HEIDELBERGER
JAHRBÜCHER
ONLINE
Band 6 (2021)

Gesellschaft der Freunde
Universität Heidelberg e.V.



Intelligenz: Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen

Rainer M. Holm-Hadulla, Joachim Funke & Michael Wink (Hrsg.)

HEIDELBERG
UNIVERSITY PUBLISHING

Intelligenz – Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen

Heidelberger Jahrbücher Online

Herausgegeben von der
Gesellschaft der Freunde Universität Heidelberg e.V.

Band 6

Intelligenz –
Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen

Rainer M. Holm-Hadulla, Joachim Funke & Michael Wink (Hrsg.)

HEIDELBERG
UNIVERSITY PUBLISHING

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter http://dnb.dnb.de abrufbar.



Dieses Werk ist unter der Creative-Commons-Lizenz 4.0 (CC BY-SA 4.0) veröffentlicht. Die Umschlaggestaltung unterliegt der Creative-Commons-Lizenz CC BY-ND 4.0

Publiziert bei Heidelberg University Publishing (heiUP)
Heidelberg 2021.

Die Online-Version dieser Publikation ist auf den Verlagswebseiten von Heidelberg University Publishing https://heiup.uni-heidelberg.de dauerhaft frei verfügbar (Open Access).

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1

Bildnachweis Cover: James Lee, unsplash (lizenzfrei),
https://unsplash.com/@picsbyjameslee

© 2021. Das Copyright der Texte liegt bei den jeweiligen Verfassern.

ISSN 2509-7822 (Print)
ISSN 2509-2464 (Online)

ISBN 978-3-96822-111-3 (Hardcover)
ISBN 978-3-96822-112-0 (Softcover)
ISBN 978-3-96822-113-7 (PDF)

Inhaltsverzeichnis

1 Vorwort
Rainer M. Holm-Hadulla, Joachim Funke & Michael Wink **1**

2 Intelligenz: Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen. Eine multi- und interdisziplinäre Zusammenfassung
Rainer M. Holm-Hadulla **7**
Einführung 7
Sektion 1: Biologische Grundlagen 8
Sektion 2: Die Psychologie der Intelligenz 13
Sektion 3: Mathematische und Künstliche Intelligenz 17
Sektion 4: Künstliche und menschliche Intelligenz 19
Sektion 5: Ökonomische Intelligenz 21
Sektion 6: Kulturelle Intelligenz 22
Sektion 7: Politische Intelligenz und Weisheit 26

3 Zur Neurobiologie der Intelligenz
Andreas Draguhn **41**
1 Einleitung 42
2 Wozu denken? Die Evolution der Intelligenz 43
3 Gibt es „intelligente Gehirne“? 49
4 Feine Unterschiede – warum sind wir nicht alle gleich klug? . . 58

4 Das intelligente Spiel mit Zufällen und Auslese
Claudia Erbar & Peter Leins **67**
1 Vorbemerkungen 68
2 Optimierung als evolutives Ziel 70

3 Von raffinierten Strategien 97
4 Abschließende Bemerkungen 110

5 Intelligenz im Tierreich
Michael Wink **117**
1 Einführung 118
2 Werkzeuggebrauch im Tierreich 120
3 Tradierung von Tricks 130
4 Planung und Einsicht 132
5 Kognition und Soziale Intelligenz 134
6 Gehirnstrukturen 136
7 Ausblick 136

6 Intelligenz: Evolutionsbiologische Grundlagen und Perspektiven
Thomas Holstein **141**
1 Einführung 142
2 Grundlagen neuronaler Kognition 143
3 Die ersten Nervensysteme 143
4 Kognition bei Invertebraten 147
5 Kognition bei Vertebraten 150
6 Kognition der Hominiden 152
7 Von der Intelligenz des *Homo sapiens* zur künstlichen Intelligenz? 155

7 Wenn die Intelligenz beeinträchtigt ist
Gudrun A. Rappold **165**
1 David und das FOXP1-Syndrom 165
2 Autismus-Spektrum-Störung 167
3 Intelligenzquotient, Minderbegabung und geistige Behinderung . 168
4 Höheres Erkrankungsrisiko bei Jungen 169
5 Das Lebensalter zählt 170
6 Bauch- und Kopfhirn arbeiten zusammen 171
7 FOXP1 und sein nahe verwandtes „Sprachentwicklungsgen“ FOXP2 172

8 Intelligenz und geistige Behinderung – Zwei Seiten einer Medaille? . . . 172
9 Die Plastizität des Gehirns . . . 173
10 Tiermodelle als wichtige Zwischenschritte zum Verständnis . . . 174
11 Lebensperspektiven . . . 175

8 Intelligenz: Die psychologische Sicht
Joachim Funke **181**
1 Einführendes . . . 181
2 Definitorisches . . . 182
3 Theoretisches . . . 183
4 Messtechnisches . . . 188
5 Kritisches . . . 188
6 Künstliches und Menschliches . . . 191
7 Abschliessendes . . . 193

9 Interpersonelle Intelligenz
Sabine C. Herpertz **199**
1 Einleitung und Begriffsklärungen . . . 200
2 Entwicklung der Interpersonellen Intelligenz: ein neurowissenschaftlicher Blick . . . 202
3 Entwicklung von Interpersoneller Intelligenz: ein Blick auf die frühe Lerngeschichte . . . 206
4 Wie wird Interpersonale Intelligenz gemessen? . . . 208
5 Interpersonelle Intelligenz und Persönlichkeitsstörungen . . . 210
6 Ausblick . . . 212

10 Entwicklung der Intelligenz im Zusammenhang mit der Nutzung digitaler Medien
Katajun Lindenberg & Ulrike Basten **219**
1 Einleitung . . . 220
2 Einfluss von Videospielen auf die kognitive Entwicklung . . . 221
3 Einfluss von Medien-Multitasking auf die kognitive Entwicklung 225
4 Einfluss von süchtiger Videospielnutzung auf die kognitive Entwicklung . . . 232
5 Wechselwirkungen von Mediennutzung und Intelligenz . . . 238

11 Metakognitive Kurzsichtigkeit – Hindernis für intelligentes Verhalten und Versäumnis der Evolution?
Klaus Fiedler, Florian Ermark & Karolin Salmen **255**
1 Einleitung: Rationalität als Inbegriff intelligenten Verhaltens . . 256
2 Metakognition 260
3 Schlussfolgerungen 269

12 Intelligente Algorithmen und Gleichungen? – Eine Annäherung an die Intelligenz mathematischer Konzepte
Thomas Stiehl & Anna Marciniak-Czochra **279**
1 Was ist Intelligenz? 279
2 Wofür brauchen wir mathematische Intelligenz? 281
3 Was ist mechanistische Modellierung ? 282
4 Wofür kann man mechanistische Modellierung anwenden? . . . 285
5 Techniken und Werkzeuge 291
6 Beispiele für mathematische Modellierung 292
7 Datengetriebene Verfahren 296
8 Ausblick 299
9 Schlussfolgerung 299

13 Künstliche Intelligenz und Algorithmen – Wahrer Fortschritt oder doch nur digitale Alchemie?
Vincent Heuveline & Viola Stiefel **305**
1 Einleitung 306
2 Starke versus schwache KI 307
3 Schwache KI ist Mathematik 308
4 Algorithmen für KI 310
5 KI als Blackbox 312
6 Interpretierbare KI als möglicher Lösungsweg 314

14 Statistik und Intelligenz – eine wechselvolle Beziehung
Christel Weiß **319**
1 Einleitung 319
2 Statistische Methoden zum Messen von Intelligenz 321
3 Der Einfluss von Intelligenz bei Datenanalysen 327
4 Schlussfolgerungen 335

15 Menschliche und künstliche Intelligenz – ein kritischer Vergleich
Thomas Fuchs **347**
1 Einleitung 347
2 Personen sind keine Programme 352
3 Programme sind keine Personen 355
4 Resümee: Simulation und Original 359

16 Emotionale Robotik – Fluch oder Segen in der psychiatrischen Versorgung?
Ines Al-Ameery-Brosche & Franz Resch **363**
1 Eine Einleitung 364
2 Künstliche sozial-emotionale Intelligenz – kinder- und jugendpsychiatrische Perspektiven 365
3 Robotik und Apparatur 370
4 Gesellschaftliche Folgen 371
5 Robotik und Psychotherapie 373
6 Robotik und Psychotherapie – ein Fazit 376

17 Menschliche und künstliche Intelligenz in der Medizin
Magnus von Knebel Doeberitz **379**
1 Der disruptive Umgang mit Information 380
2 Anwendungen der künstlichen Intelligenz in der Medizin 383
3 Konsequenzen für die Vernetzung medizinischer Daten 385
4 Gesundheitsdatenmanagement: Wem gehören die medizinischen Daten? 387
5 Warum brauchen wir Verfahren der künstlichen Intelligenz zur Aufarbeitung der Gesundheitsdaten? 388
6 Warum enwickelt sich das Internet of Medicine (IoM) so viel später als das Internet of Things (IoT)? 389

18 Die Industrialisierung der Intelligenz
Michael Byczkowski & Magdalena Görtz **395**
1 Vom Streben nach Erkenntnis 395
2 Von Beobachtung zur Erfahrung 397
3 Von Erfahrung zur Erkenntnis 397

4 Von Erkenntnis zu Fertigkeiten 398
5 Die Verbreitung der Erkenntnis 399
6 Die Verbreitung der Fertigkeiten 399
7 Von Erfahrung direkt zu Fertigkeiten 401
8 Von Daten zu Künstlicher Intelligenz 403
9 Von Korrelationen zu Kausalitäten 405
10 Modelle als Abbilder der Wirklichkeit 406
11 Ausblick 407

19 Intelligente Strategien: Richtiges Erkennen und gute Auswahl in einer komplexen Welt
Dietrich Firnhaber **413**
1 Einleitung 414
2 Das Erkennen und Nutzen der wesentlichen Faktoren in einer komplexen Welt 418
3 Auswahl der geeigneten Optionen 423
4 Offene Umsetzung 426
5 Schlussbemerkung 428

20 Intelligenz in und mit Literatur
Vera Nünning **433**
1 Warum Intelligenz und Literatur? Forschungsdesiderate, Begriffsbestimmungen und zentrale Thesen 433
2 Die Repräsentation von Intelligenz in Ian McEwans *Machines Like Me*: Kontrastierung unterschiedlicher Arten von Intelligenz und Konfliktpotential 439
3 Die Repräsentation von Intelligenz in Ishiguros *Klara and the Sun*: Empathie und Harmonie 444
4 Zur Förderung emotionaler und sozialer Intelligenz durch Erfahrungen mit literarischen Werken 447
5 Literatur als Medium der Reflektion über Intelligenz, Ethik und Weisheit 453

21 Kulturelle Intelligenz in der Literatur: Giovanni Boccaccios ‚Falkennovelle'
Christof Weiand **463**
1 Einleitung 463
2 Kulturelle Intelligenz oder Klugheit und Dummheit in der Literatur 464
3 Giovanni Boccaccio: Die ‚Falkennovelle' (*Decameron*, Quinta giornata, Novella nona, [5,9]) 467
4 Die literarische Welt des Decameron 469
5 Die Protagonisten der ‚Falkennovelle' 472
6 Kulturelle Intelligenz im *Decameron* 478
7 Die ‚Falkennovelle' im Prisma der psychologischen Intelligenzforschung 479

22 Meta-Intelligence: Understanding, Control, and Coordination of Higher Cognitive Processes
Robert J. Sternberg **487**
1 Introduction 488
2 Relations among Intelligence, Creativity, Wisdom, and Related Constructs 488
3 The Nature of Meta-Intelligence 493

23 Intelligentia Dei – Künstliche Intelligenz, menschliche Vernunft und göttliche Weisheit
Manfred Oeming **503**
1 Einführung 504
2 Leistungskraft der religiösen Sprache 504
3 Göttliche Intelligenz im Schaufenster der Werbung 510
4 Funktion der Intelligenz Gottes 512
5 Fazit 526

24 Politische Intelligenz? Ein Blick aus der Praxis zwischen Politik und Wissenschaft
Theresia Bauer **531**
Ein Lagebericht 531

25 Politische Intelligenz und Weisheit
Sebastian Harnisch **541**
1 Einleitung 541
2 Theorien der Internationalen Beziehungen und politische Intelligenz 545
3 Ende der politischen Intelligenz? 553

Personenverzeichnis **561**

Vorwort

Im vorliegenden sechsten Band der *Heidelberger Jahrbücher Online* (HDJBO), den die „Gesellschaft der Freunde Universität Heidelberg e.V." unter Federführung der drei Editoren Rainer M. Holm-Hadulla, Joachim Funke und Michael Wink herausgibt, haben sich die Autorinnen und Autoren des Bandes diesmal mit dem Konzept der Intelligenz als fächerübergreifender Thematik auseinandergesetzt.

Unter dem Titel „Intelligenz – Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen" geht es um eine Eigenschaft, die wir bei Lebewesen aller Art als Anpassungsleistung an gegebene Umwelten finden. Intelligenz hat den Menschen in Jahrtausende langer Tradition zu einer erfolgreichen Spezies gemacht. Aber wird dies so weitergehen? Künstliche Intelligenz (KI) scheint inzwischen menschlicher Intelligenz an manchen Stellen sogar überlegen - droht dem Menschen Gefahr von Seiten der KI? Das Thema *ruft* geradezu nach multi- und interdisziplinärer Betrachtung.

Diese multi- und interdisziplinäre Betrachtung findet im vorliegenden Band aus der bunten Sicht unserer Volluniversität statt. Autorinnen und Autoren aus Geistes-, Kultur-, Naturwissenschaften und der Medizin erörtern ihr Verständnis von Intelligenz aus unterschiedlichen Perspektiven und aufgrund unterschiedlicher Forschngsmethoden. Dazu kommen externe Beiträge, die die gesellschaftliche Relevanz des Phänomens unterstreichen. Die durchaus disziplinär angelegten Beiträge thematisieren dabei ganz unterschiedliche Aspekte des Rahmenthemas und erzielen dadurch am Ende eine interessante Perspektivenvielfalt. Rainer M. Holm-Hadulla hat es zudem übernommen, in seinem einleitenden Kapitel eine Zusammenschau und Einordnung der ganz unterschiedlichen Beiträge vorzunehmen. Er hat bereits im Jahr 2000 ein spannendes Jahrbuch zum Thema „Kreativität" kuratiert (Holm-Hadulla, 2000).

Noch eine Vorbemerkung der Herausgeber, die fast selbstverständlich erscheint. Anders als bei Fachzeitschriften bietet das Jahrbuch ja gerade die Möglichkeit, eher persönlich gehaltene Bewertungen vorzutragen. Die Autoren und Autorinnen sind für ihre Beiträge selbst verantwortlich. Wir als Herausgeber haben eine Auswahl getroffen, gleichzeitig jedoch Spielraum für Ideen gelassen, die mit unseren Vorstellungen nicht notwendiger Weise deckungsgleich sind.

Wie immer erfolgt an dieser Stelle eine stichwortartige Vorstellung der Beiträge dieses Bands. Am Anfang dieser Liste steht der Beitrag, der eine ausführliche Einordnung aller folgenden Kapitel unternimmt. *Rainer M. Holm-Hadulla* (Psychiatrie und Psychotherapie) erhellt in seinem einleitenden Kapitel „Intelligenz: Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen – Eine multi- und interdisziplinäre Zusammenfassung“ die hinter den Einzelbeiträgen liegende Tiefenstruktur und zieht Verbindungslinien. - Hier die Liste aller Beiträge in alphabetischer Folge (im Band selbst sind die einzelnen Beiträge den sieben Sektionen des Einleitungskapitels folgend angeordnet):

Ines Al-Ameery-Brosche und *Franz Resch* (Kinder- und Jugendpsychiatrie) weisen in ihrem Beitrag „Emotionale Robotik - Fluch oder Segen in der psychiatrischen Versorgung“ auf die Gefahren wie auch auf die Vorteile von „sozialen Robotern“ und medizinischen IT-Anwendungen hin, die als Werkzeuge angesehen werden können, aber nicht als Ersatz für menschliche Zuwendung.

Theresia Bauer (Ministerin für Wissenschaft, Forschung und Kunst des Landes Baden-Württemberg, Stuttgart) liefert mit dem Kapitel „Politische Intelligenz? Ein Blick aus der Praxis zwischen Politik und Wissenschaft“ einen Praxisbericht aus der Welt politischen Handelns. Weisheit und Vertrauen in die Wissenschaft spielen dabei eine wichtige Rolle.

Michael Byczkowski (SAP) und *Magdalena Görtz* (Urologie) schreiben über „Die Industrialisierung der Intelligenz“ und zeigen dabei anhand von medizinischen Beispielen, wie das Zusammenspiel von Beobachtung, Erfahrung, Erkenntnis und Fertigkeiten zu intelligenten Einsichten führen.

Andreas Draguhn (Physiologie) beschreibt die „Neurobiologie der Intelligenz“ und behandelt dabei ein wesentliches biologisches Korrelat der Intelligenz: das Gehirn. Wichtige Rahmenbedingungen für die genetisch angelegte „biologische“ Intelligenz zeigen, dass gute physische Bedingungen, vielfältige Reize und förderliche soziale Interaktionen in den ersten Lebensjahren günstig für deren Entwicklung sind.

Claudia Erbar und *Peter Leins* (Biologie) beziehen in ihrem Beitrag „Das intelligente Spiel mit Zufällen und Auslese“ eine evolutionstheoretische Perspektive und zeigen anhand zahlreicher Beispiele intelligente Konstruktionen der Evolution, wie sie heutzutage von der Bionik genutzt werden.

Klaus Fiedler, *Florian Ermark* und *Karolin Salmen* (Sozialpsychologie) beschreiben mit dem Begriff der „Metakognition“ mögliche Fehler und Täuschungen beim rationalen Urteilen und Entscheiden im Anwendungsfeld von Recht, Medizin und Demokratie. Qualitätskontrolle des eigenen Denkens ist angesagt.

Dietrich Firnhaber (Covestro AG, Leverkusen) nimmt mit seinem Beitrag „Intelligenter Umgang von Unternehmen mit Komplexität“ strategisches Planen zum Umgang mit unsicheren Sachverhalten unter die Lupe. Er zeigt, dass unsicheres Wissen über bekannte Unsicherheiten produktiv genutzt werden kann.

Thomas Fuchs (Philosophie und Psychiatrie) kommt in seinem Beitrag „Menschliche und künstliche Intelligenz – ein kritischer Vergleich“ zu dem Schluss, dass menschliche Intelligenz etwas spezifisch Menschliches ist, das nicht mit künstlicher Intelligenz, d.h. mit Algorithmen getriebener maschineller Datenverarbeitung auf die gleiche Ebene gestellt werden kann.

Joachim Funke (Allgemeine Psychologie) beschreibt in seinem Beitrag „Intelligenz: Die psychologische Sicht“ verschiedene Konzeptionen des Konstrukts und weist zugleich auf deren „dunkle Seite“, also das zerstörerische Potential intelligenten Handelns hin.

Sebastian Harnisch (Politikwissenschaft) wirft einen Blick auf das Konzept der „Politischen Intelligenz und Weisheit“. Dabei werden historische Wurzeln dieser Konzepte ebenso dargestellt wie aktuelle Entwicklungen im 20./21. Jahrhundert.

Sabine Herpertz (Psychiatrie und Psychotherapie) unterscheidet in ihrem Kapitel „Interpersonelle Intelligenz“ Mentalisierung, Empathie und Fürsorge. Sie beschreibt deren neurobiologische Korrelate und zieht praktische Konsequenzen

Vincent Heuveline (Mathematik) und *Viola Stiefel* (Rechenzentrum) beschreiben in ihrem Beitrag „Künstliche Intelligenz und Algorithmen – Wahrer Fortschritt oder doch nur digitale Alchemie?“ die Grundlagen von KI und die Grenzen ihrer Anwendungsmöglichkeiten. Sie plädieren für Verbesserung der KI-Kompetenzen z. B. im schulischen Bereich und gleichzeitig für die vernünftige Handhabung von KI unter ethischen und ökologischen Gesichtspunkten.

Thomas Holstein (Molekulare Biologie) geht davon aus, dass das gesamte zelluläre und molekulare Repertoire unseres Nervensystems sich bereits auf früheren

Evolutionsstufen vor über 500 Millionen Jahren ausgebildet hat. Die Fähigkeit neuronaler Systeme zu kognitiven Entscheidungsprozessen ermöglicht assoziatives Lernen und intelligente Problemlösungen schon bei aus unserer Sicht einfachen Organismen wie der Meeresschnecke. Dabei spielen spezifische Gene eine zentrale Rolle. Vergleichende genomische Untersuchungen tragen zum Verständnis der Gehirnevolution entscheidend bei.

Magnus von Knebel Doeberitz (Tumorbiologie) zeigt neue Möglichkeiten der Künstlichen Intelligenz im Bereich der Medizin auf. Viele aktuelle Fortschritte der Medizin seien ohne KI nicht möglich. Dem *Internet of Things* stellt er ein *Internet of Medicine* an die Seite.

Katajun Lindenberg und *Ulrike Basten* (Kinder- und Jugendlichenpsychotherapie) beschreiben aus einer klinischen Perspektive die „Entwicklung der Intelligenz im Zusammenhang mit der Nutzung digitaler Medien". Angesichts des steigenden Gebrauchs digitaler Medien bei Kindern und Jugendlichen werden hier in Form eines Überblicksartikels Vor- und Nachteile in Bezug auf die geistige Entwicklung diskutiert

Vera Nünning (Anglistik) greift in ihrem Beitrag „Intelligenz in und mit Literatur" unser Rahmenthema auf, indem sie dessen Darstellung in zwei aktuellen Romanen von Ian McEwan bzw. Kazuo Ishiguro analysiert und damit die mächtige Erfahrungswelt literarischer Werke für das Selbst- und Welt-Verständnis nachvollziehbar macht.

Manfred Oeming (Theologie) macht in seinem Beitrag „Intelligentia Dei" zum einen die Wissenschaftsfreundlichkeit der Bibel deutlich, zum anderen warnt er vor allzu großer Technikgläubigkeit, die mit manchen „Heilsverheissungen" der Apologeten der künstlichen Intelligenz verbunden ist.

Gudrun Rappold (Genetik) beschreibt was passiert, „Wenn die Intelligenz beeinträchtigt ist". Am Beispiel der Entwicklungsstörung „Autismus" verdeutlicht sie genetische Mechanismen, die die Entwicklung und Funktion der neuronalen Netzwerke und Verschaltungen negativ beeinflussen, bei frühzeitiger Erkennung aber auch Behandlungsmöglichkeiten eröffnen.

Robert Sternberg (Kognitive Psychologie) stellt unter dem Titel "Meta-Intelligence: Understanding Control, and Coordination of Higher Cognitive Processes" die Frage, ob sich nicht verschiedene höhere Prozesse der Kognition unter dem Dachbegriff der Meta-Intelligenz zusammenfassen lassen.

Thomas Stiehl und *Anna Marciniak-Czochra* (Mathematik) beschäftigen sich mit dem Thema „Intelligente Algorithmen und Gleichungen? – Eine Annäherung an die Intelligenz mathematischer Konzepte“ und zeigen Analogien zwischen menschlicher Intelligenz und der Intelligenz lernender Algorithmen auf. Die mit Computersimulationen möglichen Parameterschätzungen und daraus resultierenden Vorhersagen machen komplexe Sachverhalte handhabbar.

Christof Weiand (Romanistik) schreibt über „Kulturelle Intelligenz in der Literatur: Giovanni Boccaccios ‚Falkennovelle‘“ und illustriert am Beispiel des „Decameron“, was es braucht, um einen literarischen Text angemessen zu verstehen. Er zeigt, wie Gender-Perspektiven ins Spiel gebracht und Vorurteile literarisch dekonstruiert werden können.

Christel Weiß (Medizinische Statistik) stellt in ihrem historisch ausgerichteten Kapitel „Statistik und Intelligenz – eine wechselvolle Beziehung“ die Entwicklung statistischer Methoden in den Kontext „Messung von Intelligenz“, behandelt aber auch die Intelligenz von Daten, Methoden, Anwendern und Konsumenten von Statistik.

Michael Wink (Biologie) befasst sich mit „Intelligenz bei Tieren“ und zeigt viele Beispiele für intelligentes Verhalten wie z. B. Hämmern, Angeln und Stochern. Tiere sind zu erstaunlichen kognitiven Leistungen in der Lage, wie z. B. Problemlösen, Gedächtnis und Orientierung sowie sozialem Verhalten.

Die Publikation als e-Book hat sich bewährt: Sie spart Kosten und ermöglicht dank „open access“ eine größere Verbreitung als die Print-Version. Die ersten fünf Bände (Stabilität: Wink & Funke, 2016; Citizen Science: Wink & Funke, 2017; Mobilität: Funke & Wink, 2018; Schönheit: Funke & Wink, 2019; Entwicklung: Funke & Wink, 2020) haben seit ihrem Erscheinen 2016 fast 19.000 Downloads zu verzeichnen. Natürlich sind Download-Zahlen noch kein Indikator für breitere Wirkung, aber das waren die (deutlich niedrigeren!) Verkaufszahlen der alten Print-Ausgaben auch nicht. Auch diesem nun vorliegenden sechsten Band der *Heidelberger Jahrbücher Online* wünschen wir daher angemessene Verbreitung!

Wem die digitale Ausgabe nicht genügt und ein Exemplar für seinen Bücherschrank wünscht: Dank der guten Zusammenarbeit mit „Heidelberg University Publishing (HeiUP)“ kann von allen Bänden für kleines Geld eine Print-Version „on demand“ hergestellt werden. Wir bedanken uns für die wie immer harmonische Zusammenarbeit beim Team der Universitätsbibliothek unter Leitung von Frau Dr. Maria Effinger, aber auch beim Direktor der Universitätsbibliothek, Dr. Veit

Probst, der diesen Weg digitaler Informationsverbreitung seit Jahren fördert, ohne die Print-Welt zu vernachlässigen. Joachim Funke bedankt sich bei Julia Karl, M.Sc., die unsere letzten fünf Jahrbücher so wunderbar begleitet hat, nun aber ausgeschieden ist, für ihre immer noch anhaltende Hilfe beim Latex-Satz.

Natürlich wäre all dies nicht möglich ohne die finanzielle Unterstützung durch die „Gesellschaft der Freunde Universität Heidelberg e.V.“, deren Mitgliedern wir auf das herzlichste danken!

Wir sind gespannt, wie der neue Band ankommt und wie unser Jahrgangsthema aufgenommen wird. Feedback ist wie immer erwünscht!

Heidelberg, im Sommer 2021

Rainer M. Holm-Hadulla (Medizin), Joachim Funke (Psychologie)
und Michael Wink (Biologie)

Referenzen

Funke, J., & Wink, M. (Hrsg.). (2018). *Perspektiven der Mobilität* (Heidelberger Jahrbücher Online Band 3). Heidelberg University Publishing. https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2018.0

Funke, J., & Wink, M. (Hrsg.). (2019). *Schönheit: Die Sicht der Wissenschaft* (Heidelberger Jahrbücher Online Band 4). Heidelberg University Publishing. https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2019.0

Funke, J., & Wink, M. (Hrsg.). (2020). *Entwicklung – Wie aus Prozessen Strukturen werden* (Heidelberger Jahrbücher Online Band 5). Heidelberg University Publishing. https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2020.0

Holm-Hadulla, R. M. (Hrsg.). (2000). *Kreativität* (Heidelberger Jahrbücher Band 44). Heidelberg: Springer.

Wink, M., & Funke, J. (Hrsg.). (2016). *Stabilität im Wandel* (Heidelberger Jahrbücher Online Band 1). Heidelberg University Publishing. https://doi.org/10.17885/hdjbo.2016.0

Wink, M., & Funke, J. (Hrsg.). (2017). *Wissenschaft für alle: Citizen Science* (Heidelberger Jahrbücher Online Band 2). Heidelberg University Publishing. https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2017.0

Intelligenz: Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen. Eine multi- und interdisziplinäre Zusammenfassung

RAINER M. HOLM-HADULLA

Universität Heidelberg

Zusammenfassung

Intelligenz erlaubt Geschehnisse zu verstehen und die Umwelt zu gestalten. Sie ist eine vielgestaltige Fähigkeit, die im Folgenden von den einzelnen Wissenschaftsdisziplinen unterschiedlich definiert und erklärt wird. Dabei werden interdisziplinäre Verbindungen aufgezeigt, die zu einem differenzierten Verständnis des Phänomens führen sollen.

Einführung

Die erste Ausgabe von *Nature* (Huxley, 1869), einem der bis heute führenden naturwissenschaftlichen Journals, beginnt mit dem Goethe zugeschriebenen Aphorismus: „Natur! Wir sind von ihr umgeben und umschlungen … Sie spricht unaufhörlich mit uns und verrät uns ihr Geheimnis nicht … Sie hat keine Sprache noch Rede, aber sie schafft Zungen und Herzen, durch die sie fühlt und spricht." (Goethe, HA 13, S. 45f.). So suchen Wissenschaftler*innen der verschiedensten Disziplinen auch die Natur der Intelligenz mit „Zunge und Herzen", also menschlich kultiviert, zu beschreiben und zu verstehen.

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24379

Der in Alltagssprache und Wissenschaft häufig verwandte Begriff leitet sich von der lateinischen „intelligentia“ ab, die Einsicht, Verständnis und Kennerschaft bedeutet. Das in dem Begriff enthaltene Verb „legere“ bedeutet zusammenlesen, sammeln, auslesen und auswählen. „Intellegere“ wird übersetzt als wahrnehmen, erkennen, sehen, einsehen, verstehen und begreifen. Mit dem Begriff werden also eine Vielzahl mentaler Prozesse bezeichnet, die wir im Folgenden erhellen möchten. Wenden wir uns zunächst den naturwissenschaftlichen Perspektiven zu.

Sektion 1: Biologische Grundlagen

Aus moderner naturwissenschaftlicher Sicht erscheint der Mensch nicht mehr als die einzige Spezies, die Intelligenz besitzt. Intelligenz genannte kognitive Fähigkeiten werden auch anderen Spezies wie den Primaten zugeschrieben, die mit den Menschen grundlegende Ähnlichkeiten des Gehirns teilen. Aber auch biologische Wesen ohne Großhirn wie z. B. Aaskrähen können Aufgaben intelligent lösen (Nieder et al., 2020). Aktuelle Studien schreiben sogar Cephalopoden Intelligenz zu (Albertin et al., 2015; Holstein, 2021). So ist auch das menschliche Gehirn in den rund 500 Millionen Jahren seiner Evolution aus einfacheren Vorläufern entstanden (Holstein, 2021).

Die Höherentwicklung von Organismen findet durch Selektion der am besten an die Umwelt Angepassten statt (Darwin, 1859). Die kulturelle Evolution der menschlichen Intelligenz emanzipiert sich allerdings von diesem Prinzip. Am deutlichsten wird dies in der Entwicklung von Kunst, Ethik und Moral. Doch dazu später. Erbar und Leins (2021) gehen in diesem Band in Anlehnung an Darwin von einem evolutionären Optimierungsprinzip aus. Rein zufällige genetische Mutationen und Rekombinationen setzen sich in Konkurrenz durch, wenn sie einen Anpassungsvorteil bieten. Die zitierten Autoren zeigen, dass sich schon Pflanzen – ohne bewusste Intention – einer „Trickkiste der Evolution“ bedienen wie Imitieren, Täuschen und Töten. Sie erscheinen in der gegebenen Umgebung als intelligent. Wissenschaftliche Disziplinen wie die Bionik lernen von dieser „Trickkiste“ der Natur, die die Technik bis hin zur Robotik und künstlichen Intelligenz bereichert.

Die Intelligenz höher entwickelter Tiere ist unbestritten. Allerdings ist es erkenntnistheoretisch naiv, schon der DNA die Intention sich zu durchzusetzen zu unterstellen wie dies nach Richard Dawkins’ Buch „The Selfish Gene“ (2016) populär geworden ist. Gene können nicht fühlen und nicht denken, sie können

nicht etwas wollen oder nicht wollen (s.u.). Aber entwickelte Tiere weisen beträchtliche Intelligenzleistungen auf, wie Michael Wink (2021) aufzeigt. Viele Tierarten können Zusammenhänge erkennen, Pläne machen und neue Lösungen finden. Dies zeigt sich besonders deutlich, wenn sie Werkzeuge herstellen und effektiv nutzen. Manche Formen des Gebrauchs von Werkzeugen sind genetisch angelegt, andere werden erlernt, und zumeist spielen „Nature" und „Nurture" zusammen. Nicht nur Menschenaffen, sondern auch andere Arten wie z. B. Vögel verfügen über soziale Netze, durch die sie ihr praktisches Wissen weitergeben.

Wenn auch am Werkzeuggebrauch ablesbar ist, dass Tiere zu Abstraktion und Generalisation in der Lage sind, Probleme erkennen, Lösungen entwickeln und diese sogar tradieren können, so ist es ihnen wahrscheinlich kaum möglich, über das Denken nachzudenken, d. h. zu philosophieren. Sie bilden nach allem, was wir wissen, keine Selbst- und Welterklärungsmodelle aus, wie dies Menschen tun (s. u.).

Allerdings bleibt auch das am weitesten entwickelte menschliche Denken an seine natürlichen Bedingungen gebunden. Die Neurowissenschaften haben in der Erforschung der natürlichen Bedingungen der Intelligenz in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte erzielt. Der Physiologe Andreas Draguhn geht von folgender Definition aus: „Intelligenz ist die Fähigkeit, Probleme durch flexibles Handeln oder Denken zu lösen. Handeln und Denken sind dabei als intentionale Akte gemeint, die über rein reflektorische Automatismen hinausgehen, also als eigentliche *agency*" (Draguhn, 2021). Die Anpassung eines Lebewesens an seinen Lebensraum sei nicht hinreichend für die Zuschreibung von Intelligenz. Als intelligent seien nur Lebewesen anzusehen, die aktiv zwischen Alternativen wählen könnten. Diese Intelligenz ist – zumindest beim Menschen – an ein zentrales System, das Gehirn, gebunden.

Draguhn betont, dass es keine eindeutige Antwort gebe, wie es im Lauf der Evolution zu der starken Hirnentwicklung der Hominiden gekommen sei. Hofmann (2019) fasst die physischen und soziokulturellen Bedingungen dieser Entwicklung zusammen. Wechselnde Umweltbedingungen wie Klimaveränderungen und Nahrungsknappheit erforderten ständige Anpassungsleistungen. Gleichzeitig waren Gruppenbildungen und das Erlernen von sozialen Fähigkeiten ausschlaggebend für intelligente Weiterentwicklung. Damit einhergehend entstand die Sprache, die den inneren Vorstellungsraum und damit das Denken erweiterte (Draguhn, 2021). Es entfaltete sich eigendynamisch eine „kulturelle Evolution".

Diese Eigendynamik bleibt aber an die Funktionsfähigkeit des Gehirns gebunden. Hier lassen sich einzelne Aspekte des Denkens und intelligenten Handelns lokalisieren. Der Neokortex, also die Hirnrinde, wird häufig mit Denken und Bewusstsein assoziiert. Tatsächlich ist sein Volumen beim Menschen, besonders im fronto-parietalen Bereich, wesentlich größer als bei Primaten. Sehr vereinfachend könne man sagen, „dass (prä)-frontale Hirnteile besonders für Handeln, Entscheiden und rationale Impulskontrolle stehen, während der parietale Kortex multimodale sensorische und motorische Impulse integriert und auf diese Weise unser Bild vom aktuellen Kontext generiert“ (Draguhn, 2021). Man könne diese vom unmittelbaren Wahrnehmen und Handeln befreiten Areale auch als „Innenraum der Kognition“ beschreiben. Dabei dürfe man nicht vergessen, dass auch diese Bereiche in komplexe neuronale Netzwerke eingebunden seien, z. B. mit dem Kleinhirn und den Basalganglien.

Die Erforschung der Feinstruktur der neuronalen Netzwerke zeigt verschiedene anatomische Eigenschaften, die für Intelligenz von Bedeutung sind. Besonders die Anzahl der Neurone und Synapsen sind relevant sowie die Dicke der Axone. Letztere bestimmt die Geschwindigkeit der Weiterleitung von Impulsen, die eine schnelle und komplexe Informationsverarbeitung ermöglichen. Dazu tragen auch nicht-neuronale Zellen im Gehirn bei. Diese Mikrostrukturen spielen mit Makrostrukturen zusammen. So erlaubt z. B. die Faltung der Hirnrinde eine hohe lokale Konnektivität, die für die Verarbeitungsgeschwindigkeit und damit für komplexe Denkprozesse mitverantwortlich ist. Ihr modularer Aufbau führt zu einer strukturellen und funktionellen Spezialisierung verschiedener Areale (Hofmann, 2019). Hier zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Spezies, z. B. in Bezug auf sprachverarbeitende Hirnareale.

Die hoch entwickelte Intelligenz des Menschen ist mit der Größe des Frontalhirns in Verbindung gebracht worden. Der präfrontale Kortex zeichnet sich durch eine besonders zellreiche Netzwerkarchitektur aus. Er scheint als Organ der „exekutiven Kontrolle“ und „top-down Regulation“ eng mit komplexem Denken und rationalem Entscheiden in Zusammenhang zu stehen. Allerdings ist er nicht autonom, sondern wird immer auch „bottom-up“ beeinflusst und reguliert. Mit anderen Worten, die „Frontalisation“ kann nur bedingt als Beleg für die Sonderstellung des Menschen in der Natur gelten. Die Interdependenz des Frontalhirns mit anderen Hirnarealen und dem gesamten Organismus sowie der sozialen Umwelt belegt ebenso seine ökologischen Abhängigkeiten.

Aktuelle neurobiologische Befunde zeigen, wie ausgehend von einfachen neuronalen Systemen im Tierreich Formen entstanden sind, die Anforderungen durch kognitive Prozesse lösen können. Thomas Holstein (2021) beschreibt, die vergleichende *Genomforschung* berücksichtigend, wie aus zellulären Grundelementen der Neurone zum Teil sehr unterschiedliche zentralnervöse Strukturen wie Gehirne entstehen. Die Fähigkeit neuronaler Systeme zu kognitiven Entscheidungsprozessen ermöglicht assoziatives Lernen und intelligente Problemlösungen schon bei aus unserer Sicht einfachen Organismen wie der Meeresschnecke (Kandel et al., 2021). Die Größe ihrer Neuronen erlaubt eine detaillierte Untersuchung der biologischen, chemischen und physikalischen Prozesse, die mit den kognitiven Leistungen verbunden sind. Aber sie allein können die spezifischen Eigenschaften neuronaler Systeme nicht erklären, denn diese beruhen auf multizellulären Schaltkreisen von Neuronen mit *emergenten* funktionellen Eigenschaften (Holstein, 2021).

Holstein geht davon aus, dass das gesamte zelluläre und molekulare Repertoire unseres Nervensystems sich bereits auf früheren Evolutionsstufen vor über 500 Millionen Jahren ausgebildet hat. Dabei spielen spezifische Gene eine zentrale Rolle. Vergleichende *genomische* Untersuchungen tragen zum Verständnis der Gehirnevolution entscheidend bei (s. z. B. Mao et al., 2021). Auch sie können jedoch die Emergenz komplexer intelligenter Schöpfungen wie Musik, Kunst und Wissenschaft nicht erklären.

Neurobiologische Beeinträchtigungen der Intelligenz sind vielfältig. Gudrun A. Rappold (2021) zeigt am Beispiel des FOXP-1 Syndroms, dass ein einzelnes Gen die notwendigen neuronalen Verknüpfungen zum richtigen Zeitpunkt der Gehirnentwicklung stören bzw. verhindern kann. Bei den Autismus-Spektrum-Störungen sind die genetischen Konstellationen wesentlich komplexer und Intelligenzstörungen im Allgemeinen lassen sich kaum auf genetische Konstellationen zurückführen. So zeigte eine DNA-Analyse von beinahe 80.000 Personen, dass der Einfluss von 52 Genen, die mit Intelligenz assoziiert werden, sehr gering war. Weniger als 5% der Varianz konnte durch den Einfluss der Gene erklärt werden (Rappold, 2021). Intelligenz entfaltet sich auf der Grundlage einer polygenen multifaktoriellen Vererbung in einer psycho-sozialen Umgebung, die man aus ihren biologischen Bedingungen nicht erklären kann. Insofern erscheint die Hoffnung auf eine Intelligenzsteigerung durch genetische Manipulation unter dem Stichwort „Designer-Babys“ unsinnig und wird wahrscheinlich auch in Zukunft aussichtslos

bleiben. Es sei denn, es handelt sich um die Behandlung krankhafter genetischer Veränderungen.

Aus den neurowissenschaftlichen Befunden lassen sich förderliche Bedingungen für die Intelligenzentwicklung ableiten:

- hinreichend sichere Umgebungsbedingungen und gleichzeitig Entwicklungsanreize;
- frühe Förderung von Denkfähigkeit und Handlungskompetenz durch Lernen und Üben;
- sowohl Wiederholungen (z. B. durch Auswendiglernen) als auch Stimulation neuer neuronaler Verbindungen (z. B. durch musische Betätigung);
- ein angemessenes Gleichgewicht zwischen Konzentration und Distraktion, fokussiertem und assoziativem Denken, Kohärenz und Inkohärenz (s. Holm-Hadulla, 2013).

Insbesondere die Forschungen zur neuronalen Plastizität zeigen bei Gesunden eine erstaunliche Entwicklungsfähigkeit von der vorgeburtlichen Lebenszeit bis ins hohe Alter und den positiven Einfluss intellektueller Aktivitäten (Monyer & Gessmann, 2017).

Evolutions- und neurobiologisch scheint es unwahrscheinlich, die komplexen Funktionen des gesunden Gehirns durch einfache Substanzen verbessern zu können. Es ist zwar möglich, z. B. neuronale Zentren im limbischen System mit Amphetaminen zu stimulieren, um die Wachheit zu steigern. Gleichzeitig werden aber Aktivitäten im präfrontalen Kortex reduziert, was zu einer Beeinträchtigung von Urteilsvermögen und moralischer Bewertung führt. Insofern ist nicht verwunderlich, dass solche Substanzen gerne in Kriegen eingesetzt werden. Tetrahydrocannabinol (THC) führt hingegen zu Bewusstseinsveränderungen mit von manchen als angenehm erlebten Sinnestäuschungen. Gleichzeitig werden exekutive Funktionen, Gedächtnis und Konzentration beeinträchtigt. Auch die neuronale Konnektivität wird reduziert, weswegen sowohl Intelligenz als auch Kreativität beeinträchtigt werden (s. Holm-Hadulla, 2017). Insofern gilt wie für den gewohnheitsmäßigen Gebrauch von hohen Dosen Alkohols, dass manche bedeutende Künstler nicht wegen, sondern trotz Alkohols und/oder Drogen kreativ waren (s. Holm-Hadulla, 2014).

Sektion 2: Die Psychologie der Intelligenz

Auch wenn viele biologische und neurowissenschaftliche Grundlagen der Intelligenz erforscht werden können, erreicht sie besonders im menschlichen Bereich eine komplexe Qualität, die mit physikalischen, chemischen und biologischen Methoden nicht mehr erklärt werden kann. So hat sich eine Wissenschaft herausgebildet, die Intelligenz seit über hundert Jahren zu ihrem zentralen Thema auserkoren hat: die Psychologie (Funke,, 2021).

Zur Feststellung und Erforschung geistiger Behinderungen entwickelte Alfred Binet gemeinsam mit Theodore Simon 1905 einen Intelligenztest, der weite Verbreitung fand (s. Funke, 2021). Dieser wurde von Lewis Terman in den USA eingeführt, um Personal für den intelligenten Gebrauch komplexer Militär-Technologie auszuwählen. Etwa gleichzeitig entwickelte Spearman eine „Zwei-Faktoren-Theorie“, die von einem Generalfaktor von Intelligenz spezifische Faktoren wie Rechen- oder sprachliche Fähigkeiten abgrenzte. Thurstone (1938) hielt hingegen einen Generalfaktor für ein statistisches Artefakt und erachtete intelligentes Verhalten als ein Zusammenwirken mehrerer unabhängiger Primärfähigkeiten: Verbales Verständnis, Wortflüssigkeit, schlussfolgerndes Denken, räumliches Vorstellungsvermögen, Merkfähigkeit bzw. Gedächtnis, Rechenfähigkeit bzw. Zahlengedächtnis sowie Wahrnehmungsgeschwindigkeit bzw. Aufmerksamkeit (s. Funke, 2021). Zahlreiche Weiterentwicklungen schlossen sich an (s. z. B. Sternberg, 2018). Der heute gebräuchlichste Intelligenztest ist der Hamburg-Wechsler-Intelligenztest (HAWIE, seit 2013 WAIS IV), der in unterschiedlicher Form bei Kindern und Erwachsenen eingesetzt wird.

Besondere Bedeutung hat das Konzept der multiplen Intelligenzen von Howard Gardner erlangt (1993). Nach seinen Untersuchungen lassen sich empirisch-psychologisch neun Dimensionen der Intelligenz unterscheiden: sprachliche, logisch-mathematische, musikalisch-rhythmische, bildlich-räumliche, körperlich-kinästhetische, naturalistische, interpersonale, intrapersonelle und schließlich existentielle Intelligenz im Sinne von Weisheit. Insbesondere wenn es um emotionale und soziale Intelligenz geht, stoßen Messverfahren aufgrund mangelnder Komplexität an ihre Grenzen. Funke (2021) schlägt vor, die psychologische Intelligenzforschung weniger struktur- als prozessbezogen auszurichten und lebensechtere Anforderungen in Tests zu berücksichtigen: Komplexität, Vernetztheit, Eigendynamik, Intransparenz und Vielzieligkeit mit der Notwendigkeit mehrdimensionaler Informationsbewertung.

Große Popularität hat das Konstrukt der emotionalen Intelligenz von Daniel Goleman (2020) erreicht. Es beschreibt die Fähigkeit, eigene und fremde Gefühle wahrzunehmen, zu verstehen und zu beeinflussen. Ein besonderer Aspekt der emotionalen ist die interpersonelle Intelligenz, die schon von Gardner (s.o.) als zentral angesehen wurde. Herpertz (2021) unterscheidet eine (meta-)kognitive und eine emotionale Komponente der interpersonellen Intelligenz. Erstere meint die Fähigkeit zur reflektierten Perspektivenübernahme, d. h. mentale Zustände anderer verstehen und auch antizipieren zu können. Diese reflektierte Perspektivenübernahme ist an spezifische Denkfunktionen und sprachliche Ausdrücke gebunden und wird auch als Mentalisierung (Fonagy et al., 2003) bezeichnet. Die emotionale Komponente besteht in resonant-intuitivem Mitfühlen, das die Emotionserkennung und Spiegelung ermöglicht. Neurobiologisch korreliert die Mentalisierung mit phylogenetisch jüngeren kortikalen Mittellinienstrukturen und temporo-parietalen Arealen (Herpertz, 2021), während das resonant-intuitive Mitfühlen mit Prozessen in evolutionär früher entstandenen Arealen wie dem sensomotorischen Cortex und der vorderen Inselregion korreliert.

Die beschriebenen Fähigkeiten werden in der engen Interaktion mit den frühen Bezugspersonen erlernt. Die spiegelbildliche Nachahmung von affektiven und sensomotorischen Zuständen kann man schon bei Säuglingen beobachten. Sie entwickelt sich weiter zum intuitiven und verkörperten Verständnis der Affekte und Gefühle anderer (Herpertz, 2021). Prozesse der geteilten Aufmerksamkeit treten gegen Ende des ersten Lebensjahrs auf; aus ihnen entwickelt sich im weiteren Verlauf das ausgebildete Mentalisierungsvermögen (siehe Abbildung 1).

In den letzten Jahren üben digitale Medien einen immer größer werdenden Einfluss auf die menschliche Intelligenz aus. Lindenberg und Basten (2021) zeigen, wie Videospiele kognitive Funktionen beeinflussen. Dabei wird deutlich, dass bei moderatem und gezieltem Gebrauch die Aufmerksamkeitsfunktionen verbessert werden können. Die Frage, ob gleichzeitig Einbildungskraft und kreatives Denken begünstigt oder beschädigt werden, ist in den vorliegenden Studien allerdings nicht berücksichtigt. Wahrscheinlich lassen sich solch komplexe Formen der Intelligenz auch nicht empirisch-psychologisch und neurowissenschaftlich erforschen (s. Holm-Hadulla, 2011). Man kann aber nachweisen, dass eine substantielle Belastung des Aufmerksamkeitssystems durch Videospiele ein kognitives Training darstellt. Es führt auch zu Veränderungen von Struktur und Funktionsweise des

Gehirns (Lindenberg & Basten, 2021). Dabei werden Veränderungen besonders im mesolimbischen Belohnungssystem beobachtet.

Die psychologischen und neurologischen Veränderungen, die durch die Benutzung digitaler Medien entstehen, machen sich besonders Videospiele zu nutze. Stetig steigende Anforderungen an eine flexible Handhabung der Aufmerksamkeitsfunktionen sind für den Erfolge der Spiele entscheidend. Dieses Training wird von ausgefeilten psychologischen Verstärkungen begünstigt, die die Spieler langfristig binden. Die Verstärkermechanismen erhöhen dabei auch das Risiko für die Entwicklung einer Computerspielstörung und Internetsucht. Die Prävalenz dieser Störungen steigt zwischen Pubertät und Spätadoleszenz von 3% auf 9% (Lindenberg et al., 2018). Dieser Anstieg ist durch unmittelbar stark belohnende abhängigkeitserzeugende Mechanismen, ähnlich wie bei substanzgebundenem Suchtverhalten, psychologisch und neurologisch erklärbar.

Die immer längere Nutzung von Videospielen führt zu einer Dauerstimulation des dopaminergen Systems und zu strukturellen Veränderungen im Gehirn. In einem circulus vitiosus führt dies wiederum zu Veränderungen des Belohnungs-



Abbildung 1: Mutter mit Kind; Aquarell von Christel Fahrig-Holm (abgedruckt mit Genehmigung der Künstlerin).

systems. Es entsteht ein „Suchtgedächtnis“, in dem sich die Belohnungsintensität mit jeder Exposition erhöht (Lindenberg et al., 2020). So führt dysfunktionaler Mediengebrauch zu Intelligenzeinbußen, Schulversagen, Aufgabe von kreativen Hobbies und sozialem Rückzug. Die vorliegenden Studien zeigen, dass Videospiele einige kognitive Funktionen fördern können, die mit fluider Intelligenz einhergehen. Andererseits führt z. B. das Medienmultitasking zu Verminderungen der Aufmerksamkeit und Konzentrationsfähigkeit, was zu erheblichen Leistungsbußen führen kann. Lindenberg und Basten (2021) resümieren, dass Intelligenz und die Fähigkeit zur Aufmerksamkeitskontrolle Schutzfaktoren darstellen, die den zielgerichteten Einsatz digitaler Medien und ihre kontrollierte Nutzung begünstigen. Zu ergänzen ist, dass ausreichend körperliche Bewegung und gute soziale Kontakte weitere Schutzfaktoren darstellen (WHO, 2018).

Fiedler, Ermark und Salmen (2021) stellen sich der Frage, warum menschliches Urteilen und Entscheiden so häufig von den Regeln der Logik abweichen. Besonders Kahneman und Tversky (1984) haben in unzähligen Experimenten die Unzulänglichkeiten der menschlichen Intelligenz herausgearbeitet. Allerdings könne scheinbar irrationales Verhalten auch adaptiv und zweckmäßig sein. Fehlerhafte Heuristiken sind unter diesem Gesichtspunkt nicht nur Quelle irrationalen Verhaltens, sondern können auch als schnelle und sparsame Werkzeuge sinnvoll sein. Man spricht von beschränkter Rationalität, wenn die kognitive Kapazität gezielt auf bestehende Umweltanforderungen zugeschnitten ist, wie z. B. ökologische und soziale Probleme.

Die flexible Übertragung von Kompetenzen auf neue Domänen bedürfe einer ständigen kritischen Überprüfung die Fiedler, Ermark und Salmen (2021) „Metakognition“ nennen. Sie überwacht, steuert und korrigiert die üblichen kognitiven Prozesse. Defizite bei der Überwachung und Kontrolle der eigenen mentalen Operationen seien jedoch weit verbreitet. Die genannten Autoren nennen dies „Metakognitive Kurzsichtigkeit“. Sie erweise sich als schwerwiegendes Hindernis für rationales Verhalten. Als Beispiele erwähnen sie unkritische Korrespondenzschlüsse, Perseveranz und die Unfähigkeit auch das Falsche nicht zu lernen und zu erinnern. Die metakognitive Kurzsichtigkeit ist von großer praktischer Bedeutung, z. B. bei der Bewertung von Zeugenaussagen und politischen Entscheidungen.

Mittel zur Verbesserung metakognitiver Intelligenz seien schnelles und klares Feedback, Anreize für Verbesserung und die präventive Verstetigung verlässlicher Informationen. Metakognitive Kurzsichtigkeit bleibe aber dennoch ein großes

Hindernis für rationales Denken und Handeln. Es sei rätselhaft, warum uns die kritische Urteilskraft oft fehle, falsche Informationen und offensichtliche *Fake News* von echten und Informationen zu unterscheiden. Sie entwickeln die interessante Hypothese, „dass die Evolution vielleicht gar nicht ‚vergessen' hat, die Metakognition zu stärken, sondern diese vielleicht ‚absichtlich' unterdrückt hat … Der stetige Versuch, jede Information zu hinterfragen und kritisch auf ihre Haltbarkeit zu prüfen, könnte bedeuten, dass eine Reihe anderer Grundlagen der adaptiven Intelligenz aufgeopfert werden müssen, wie zum Beispiel Vertrauen in soziale Information, sparsame Heuristiken und schnelle automatisch ablaufende Priming-Effekte".

Sektion 3: Mathematische und Künstliche Intelligenz

Die Mathematikerin Anna Marciniak-Czochra und der Mathematiker Thomas Stiehl (2021) gehen von Intelligenz als allgemeiner Fähigkeit aus, die schlussfolgerndes Denken, Planen, Problemlösen, abstraktes und komplexes Denken sowie Lernen aus Erfahrung umfasst. Sie zeigen, dass mathematische und/oder algorithmische Strukturen die genannten Fähigkeiten nur in abstrakter Form realisieren können. Mathematische und künstliche Intelligenz spielten vor allem bei Prozessen eine Rolle, die dem intuitiven, letztlich originär menschlichen Verständnis wenig zugänglich seien, weil sie zu komplex, die wesentlichen Einflussgrößen nicht bekannt seien und die Datenmengen das menschliche Auffassungsvermögen überschritten. Allerdings könnten sie die menschliche Intelligenz grundsätzlich nicht ersetzen, wenn es um spezifisch menschliche Fragestellungen und Zielsetzungen ginge.

Unter mechanistischer Modellierung verstehen Stiehl & Marciniak-Czochra (2021) „die Übersetzung der einem System bzw. Sachverhalt zugrunde liegenden Mechanismen und Prozesse in formale Objekte, die mit Hilfe mathematischer oder computergestützter Techniken untersucht werden können". Die mechanistische Modellierung kann sowohl in Physik, Chemie und Biologie als auch in der Medizin und Ökonomie angewandt werden. Dabei können im Sinne der oben erwähnten Definition von Intelligenz komplexe Konzepte verstanden und systematisch geplant werden sowie Lernen aus Erfahrung ermöglicht werden. Dieses mathematische „Lernen aus Erfahrung" ist natürlich mit der menschlichen Intelligenz nicht vergleichbar, es ist eher eine stochastische Anpasung. Mechanistische

Modelle können Ereignisse vorhersagen, Schlussfolgerungen aus Erfahrungen ableiten, Strategien planen und Probleme lösen. In der Kombination datengetriebener Verfahren wie dem „maschinellen Lernen“ können sie Einflussgrößen modellieren, die sonst unverständlich blieben.

Das in Daten steckende Potential kann aber nur durch adäquate statistische Analyse und intelligente Interpretation gehoben werden. Darauf macht Christel Weiß (2021) in ihrem Beitrag über „Statistik und Intelligenz – eine wechselvolle Beziehung“ aufmerksam. Daten können nicht denken und eigenständige Lösungen entwickeln. Erst durch das Verständnis ihres Zustandekommens, ihres Anwendungsbereichs und ihrer intelligenten Verwendung können sie helfen, Ereignisse zu erklären und Zusammenhänge zu erhellen.

Vincent Heuveline und Viola Stiefel(2021) begründen in ihrem Beitrag, dass KI zunächst eine Metapher für von Algorithmen getriebene Entscheidungen ist. Die sogenannte Schwache KI (*weak or narrow artificial intelligence*) ist eine Anwendung der Mathematik. Schwache KI könne die menschliche Intelligenz in Teilbereichen übertreffen, sei aber von der menschlichen Intelligenz grundverschieden. Sie umfasst alle heute existierenden Systeme, wie wir sie z. B. aus der Bild- und Texterkennung kennen. Sogenannte starke Intelligenz versuche hingegen menschliche Intelligenz zu imitieren. Dies könne aus mathematischer Sicht grundsätzlich nicht gelingen, solche Versuche seien Science Fiction. Die grundsätzlichen Unterschiede zur menschlichen Intelligenz, insbesondere in Bezug auf verkörpertes und emotional resonantes Verstehen von biographisch getönten Stimmungen (s. Herpertz, 2021; Fuchs, 2021; Oeming, 2021) schmälert jedoch nicht die Bedeutung der KI in spezifischen Domänen. Die mittlerweile unentbehrlichen Leistungen der KI im Umgang mit dem weltweit exponentiell wachsenden Datenvolumen sind besonders auffallend. Anwendungen von KI-Algorithmen wie die „Cognition-Guided Surgery“ sind in der Medizin unentbehrlich geworden. Ähnliches gilt für die Zeichen- bzw. Bilderkennung, z. B. zur Diagnostik von Tumoren.

Heuveline und Stiefel fordern aufgrund der gesamtgesellschaftlichen Bedeutung von KI, dass das Verständnis von Algorithmen Bestandteil der Schulausbildung werde. Alle Lehrenden und Lernenden müssten über die technischen Möglichkeiten und Grenzen der KI sowie die entsprechenden ethischen Erwägungen und gesetzlichen Regelungen informiert sein. Es gehe in der Verbindung von KI und humaner Intelligenz um digitale Selbstbestimmung und Datensouveränität. Weite-

re Investitionen in KI seien unabdingbar, besonders im Bereich der ökologischen KI bzw. der „Green IT“.

Als kleinen Exkurs zu den Grenzen einzelner Wissenschaften möchte ich Folgendes erwähnen: Wenn man die Töne einer Sonate z. B. physikalisch analysiert, die beim Hören frei werdenden Neurotransmitter biochemisch erforscht und künstlich reproduziert, kann man interessante Resultate erzielen. Die Forschungsergebnisse werden aber nie etwas über den Sinn der Sonate verraten, der sich zwischen den Komponist*innen, den Pianist*innen und den Hörer*innen mit ihrer individuellen Geschichte und verkörperten Intelligenz entfaltet. Ich werde auf diese Zwischenbemerkung zurückkommen.

Sektion 4: Künstliche und menschliche Intelligenz

Thomas Fuchs begründet die fundamentalen Unterschiede zwischen künstlicher und humaner Intelligenz (Fuchs, 2021). Er geht davon aus, dass die Fortschritte der Künstlichen Intelligenz und der Robotik die Unterscheidung zwischen Simulation und Realität zunehmend in Frage stellen. Schon in seinem Buch „Die Verteidigung des Menschen“ (Fuchs, 2020) widersprach er Sozialtechnologien, die sich z. B. in der Folge des Verhaltenspsychologen Skinner versprechen, durch technische Konditionierung des Menschen eine glücklichere Gesellschaft erschaffen zu können. Die Hoffnung, durch rationales Wissen und entsprechende Technologien den in einem irrationalen Selbstverständnis befangenen Menschen zu erlösen, finde man auch in Zukunftsvorstellungen, die die humane zunehmend durch künstliche Intelligenz ersetzen wollen. Menschliche Intelligenz beruhe jedoch grundlegend auf „Erleben“, d.h. „alles Erleben beruht auf dem Leben selbst“ (Fuchs, 2021). Die Voraussetzung für menschliche Intelligenz ist daher ein lebendiger Organismus in Interaktion mit seiner Umwelt. Menschen sind keine Ansammlungen von Informationen, die durch elektronische Algorithmen gelenkt werden.

Wenn man den menschlichen Geist und seine Verkörperung im gesamten Organismus auf computeranaloge Hirnprozesse reduziert, entstehen gravierende Irrtümer. Fuchs (2020) zeigt ausgehend von Galilei, Descartes und Leibniz einen „Idealismus der Information“, der sich seit Alan Turing auch in der modernen Informationstechnologie verbreite. Das Denken werde hier rein behavioristisch definiert, was zur Verdinglichung komplexer Lebensprozesse und empathischer sozialer Begegnungen führe. Menschliches Denken setzt im Gegensatz zur künst-

lichen Intelligenz seit Lebensbeginn zwischenleibliche Erfahrungen voraus, die zu „lebendiger Intersubjektivität“ führen. Deswegen stehen wissenschaftliche und künstliche Intelligenz in einem Spannungsverhältnis mit lebensweltlicher und sozialer Intelligenz. Im günstigen Fall kann dieses Konfliktverhältnis durch dialektische Kommunikation zu neuen Erkenntnissen und Handlungsempfehlungen führen (s. Holm-Hadulla, 2013, 2020).

Auf die Gefahren der Einebnung der grundsätzlichen Unterschiede zwischen künstlicher und menschlicher Intelligenz machen auch Ines Al-Ameery-Brosche und Franz Resch aufmerksam (2021). Sie begründen, warum Werteentscheidungen computertechnisch nicht möglich sind. Alle Formen der künstlichen Intelligenz seien Werkzeuge, um vorgegebene Ziele zu erreichen. Die ethische und moralische Verantwortung bleibe immer bei den Erzeugern. Besonders deutlich zeige sich diese Problematik in der Versorgung psychisch Kranker. Künstliche Intelligenz ist mittlerweile ein unerlässlicher Bestandteil nicht nur der Forschung, sondern auch der praktischen medizinischen Versorgung. Die persönliche Begegnung mit Ärzt*innen und Psychotherapeut*innen dürfe jedoch nicht zu einem Luxus werden, der nur Wenigen zugänglich ist. Keine Maschine könne sich in einem hermeneutischen und „inter-korporeal“ resonanten Verstehensprozess in Patient*innen einfühlen: „die nonverbalen Komponenten der Interaktion, das affektive Attunement, die mimischen Dialoge, der intersubjektive Verbindungsaufbau und Austausch bleiben aus“ (Al-Ameery-Brosche & Resch, 2021). Deswegen sollten KI und entsprechende Anwendungen in Psychiatrie und Psychotherapie nur ergänzend und überbrückend genutzt werden.

Angesichts dieser Kritik am Geltungsanspruch von künstlicher Intelligenz dürfen die großartigen Fortschritte, die künstliche Intelligenz auch in der Medizin ermöglicht, nicht übersehen werden. Bei sinnvollem Einsatz von künstlicher Intelligenz könnten sogar Freiräume für eine authentische Arzt-Patient-Beziehung entstehen. In diese Richtung weisen die Ausführungen von Magnus v. Knebel Döberitz zur Interaktion von menschlicher und künstlicher Intelligenz in der Medizin (2021). Knebel Döberitz schildert die ungeahnten Möglichkeiten des Einsatzes von KI in der medizinischen Diagnostik und in der Patientenversorgung. Die zunehmende Datenflut und ihre Nutzanwendung in der Medizin wäre ohne KI im Sinne der Weak-KI (s. Heuveline & Stiefel, 2021) nicht zu bewältigen. Neuartige klinische Algorithmen ermöglichen Vorhersagen, die mit konventionellen Mitteln nicht zu treffen wären. Der Informationsfluss kann auch für die

Patienten anschaulicher gestaltet werden und Arzneimittel können person-zentriert entwickelt werden. Das *Internet of Medicine* (IoM) verspricht trotz aller Risiken, z. B. in Bezug auf den Datenschutz, erhebliche Fortschritte in der medizinischen Wissenschaft und Patientenversorgung.

Sektion 5: Ökonomische Intelligenz

Wie die Wirkung eines Musikstücks sind viele komplexe Phänomene durch Neurobiologie und wissenschaftliche Psychologie nicht zu erklären. So erfordert auch die Entwicklung von ökonomisch intelligenten Strategien in Unternehmen einen ganz eigenen Zugang. Dietrich Firnhaber (2021) geht davon aus, dass in der Ökonomie unser Denken und Handeln von mannigfaltigen Einflüssen und Rückkoppelungen beeinflusst wird, die wir weder vollständig erfassen noch fehlerfrei bewerten können. In einer komplexen Welt sei langfristiges Planen nicht nur durch unvorhersehbare Ereignisse, sondern auch durch identifizierbare Unsicherheiten geprägt. Firnhaber geht auf die Herausarbeitung und den Umgang mit diesen „bekannten Unsicherheiten“ ein. Sie können durch sorgfältige Analysen und differenzierte Szenarioplanungen in das planerische Denken und Handeln aufgenommen werden. Eine die bekannten Unsicherheiten einschließende unternehmerische Strategie erzeugt eine gewisse Stabilität, durch die diese Unsicherheiten sogar produktiv genutzt werden können. Strategien müssen jedoch, verstärkt durch angemessene Kommunikation auf und mit allen Hierarchieebenen, flexibel im Sinne einer „offenen Umsetzung“ reagieren können. Diese berücksichtigt neue Realitäten und erfordert die Fähigkeit zur kritischen und gleichzeitig konstruktiven Anerkennung anderer Einschätzungen.

KI durchdringt zunehmend alle ökonomischen Lebensbereiche. Michael Byczkowski und Magdalena Görtz (2021) zeigen, wie KI, vor allem moderne algorithmische Ansätze, in die grundlegenden Konzepte von Beobachtung, Erfahrung, Erkenntnis und Fertigkeit einzuordnen sind. Die großen Fortschritte auf dem Gebiet der KI liefern zwar keine komplexen Welterklärungsmodelle, führen aber zu wissenschaftlichen Fortschritten und nützlichen praktischen Anwendungen. Byczkowski und Görtz zufolge lassen sich vier Stufen der industriellen Revolution unterscheiden: vom Einsatz mechanischer Produktionsanlagen über die arbeitsteilige Produktion zur Automatisierung derselben bis zur sog. 4. industriellen Revolution, in der die vollständige Digitalisierung und Vernetzung der industriel-

len Produktion angestrebt werde. Möglicherweise werde diese, beeinflusst durch künstliche Intelligenz, von einer 5. industriellen Revolution abgelöst. Am Beispiel der Medizin beleuchten Byczkowski und Görtz (2021) die Chancen von künstlicher Intelligenz und die Herausforderungen bei der Anwendung intelligenter Maschinen. Sie resümieren, dass die Algorithmen der Künstlichen Intelligenz integraler Bestandteil unseres Lebens sein werden. Dabei müssen die Maschinen nicht als Konkurrenten oder gar Feinde des Menschen angesehen werden, sondern als Möglichkeiten, menschliche Fähigkeiten maschinell und intellektuell zu erweitern. So sollten sich auch Ärzte nicht durch (KI-)Algorithmen ersetzen lassen, sondern (KI-)Algorithmen nutzen, um Freiräume für persönliche ärztliche Begegnungen zu schaffen.

Sektion 6: Kulturelle Intelligenz

In Analogie zum „kulturellen Gedächtnis“ (Assmann, 1997) könnten wir von „kultureller Intelligenz“ sprechen, wenn wir uns denkend und urteilend oder Neues erschaffend auf Kulturgüter beziehen. Die kulturelle Evolution in Form von Kulturlandschaften, Architekturen, Mythen, Religionen, Literatur, Musik, bildender Kunst und anderer Artefakte ist etwas ganz anders als die biologische Evolution und kann nicht mit naturwissenschaftlichen Methoden verstanden werden. Kulturelle Intelligenz ist ein besonderer Zugang zur Welt. So verständigen sich Menschen seit ihren Anfängen mittels metaphysischer Vorstellungen, animistischer Begeisterungen und kunstvoll gestalteter Mythen über sich und ihre Umwelt. Religionen und Philosophien entwickeln diese vom natürlich Gegebenen abstrahierten Vorstellungen weiter und leiten aus ihnen Regeln für eine sinnvolle individuelle und gemeinschaftliche Lebensgestaltung ab. Wesentlich hierfür sind sprachliche und ästhetische Gestaltungen, die das kulturelle Gedächtnis auf eine Weise verstetigen, die wir im Tierreich nicht finden. Nicht erst seit der „Achsenzeit“ um 500 v. Chr. (Jaspers, 1949), in der gleichzeitig in unterschiedlichsten Regionen der Welt neue Interpretationen von Mensch und Welt und umfassende Konzeptionen zur sinnvollen Gestaltung des individuellen und politischen Lebens entstanden, können wir von einer spezifisch menschlichen Intelligenz sprechen. Die Denker der Achsenzeit – z. B. Konfuzius und Laotse, Gautama Buddha, Zarathustra und die alttestamentarischen Propheten sowie die vorsokratischen Philosophen – zeigen sehr deutlich, wie weit sich die menschliche Intelligenz von

ihren natürlichen Bedingungen emanzipiert hat. Vermittelt über Denker wie Plato und Aristoteles prägen sie unsere Vorstellungswelt bis heute (siehe Abbildung 2).

In den modernen Kulturwissenschaften wird Kultur als „der von Menschen erzeugte Gesamtkomplex von Vorstellungen, Denkformen, Empfindungsweisen, Werten und Bedeutungen aufgefasst, der sich in Symbolsystemen materialisiert“ (Nünning & Nünning, 2008, S. 6). Dabei dekonstruieren die Kulturwissenschaften auch traditionelle Gewissheiten. „Race“, „Gender“ und „Colonisation“ werden zu Leitthemen der wissenschaftlichen Reflexion und kulturellen Praxis. Christof Weiand (2021) zeigt an literarischen Beispielen wie Boccaccios „Decamerone“, wie psychologische, literatur- und kulturwissenschaftliche Analysen „kulturelle Intelligenz“ begründen können.

Vera Nünning illustriert in diesem Band mit literarischen Beispielen die Verbindung von Intelligenz, Weisheit und Ethik. Literarische Werke geben auf ihre besondere Weise Einblick in die vielfältigen Facetten der Intelligenz. Dabei kön-



Abbildung 2: „Die Schule von Athen“. Ausschnitt mit Platon und Aristoteles (von Raffael, 1500 bis 1511; Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Die_Schule_von_Athen).

nen sie Stereotype und Hierarchisierungen entlarven, wie z. B. Vorurteile über die Unterschiede von weiblicher und männlicher Intelligenz. Schließlich werden die intellektuellen Fähigkeiten, insbesondere die emotionale und soziale Intelligenz, durch die Lektüre literarischer Werke gefördert (Nünning, 2021). Leser erhalten bei der Lektüre Einblicke in kognitive und affektive Prozesse, die ihnen sonst verborgen blieben. Dies kann zu Veränderungen von Einstellungen führen, z. B. über das Verhältnis von instrumenteller Intelligenz und menschlicher Weisheit.

Anhand der Romane „Machines Like Me" von Ian McEwan und „Klara and the Sun" von Kazuo Ishiguro widmet sich Nünning dem besonderen Problem der Entkopplung von Intelligenz, Weisheit und Ethik. Die genannten Werke laden zu komplexen Reflexionen über das Verhältnis von analytischer und emotionaler Intelligenz sowie menschlicher und künstlicher Intelligenz ein. Es wird deutlich, dass Intelligenz allein für verantwortliches Handeln nicht ausreicht, es bedarf Weisheit und Ethik (s. u.).

Die kulturelle Intelligenz ist ein Aspekt ganzheitlichen Verstehens, das ich „lebensweltliche Intelligenz" nennen möchte. Sie basiert auf den alltäglichen Erfahrungen in der konkreten Lebenswelt von Individuen und Gemeinschaften im Sinne der antiken „phronesis", der praktischen Lebensklugheit (Aristoteles, 2006). Instrumentelles Handeln, komplexes Denken und lebendige Intersubjektivität bewähren sich im Alltag und führen zu einem Gefühl von Selbstwirksamkeit und Kohärenz (s. Holm-Hadulla, 2021). Dieses Gefühl und subjektive Überzeugung ist immer eingebettet in ein größeres kulturelles Ganzes, das von anderer Logik beherrscht wird als die individuelle Lebenswelt. Insofern verfügen die Kulturwissenschaften über ganz eigene Zugänge.

Ein hervorstechendes Beispiel, das uns die Bedeutung der kulturellen und künstlerischen Intelligenz zum Verstehen unserer Lebenswirklichkeit verdeutlicht, ist der Wissenschaftler, Politiker und Dichter Johann Wolfgang von Goethe. In seinem bis heute höchst einflussreichen Werk „Faust", das ihn selbst 60 Jahre begleitete, konfrontiert er sich mit den Grenzen der wissenschaftlichen Erkenntnis unserer Welt: „Habe nun, ach! Philosophie/ Juristerei und Medizin,/ Und leider auch Theologie/ Durchaus studiert, mit heißem Bemühn./ Da steh' ich nun, ich armer Tor,/ Und bin so klug als wie zuvor!" (Faust I, „Nacht").

Mit poetischen Mitteln versucht nun der Autor die Lebenswirklichkeit zu verstehen und eröffnet dadurch auch wissenschaftliche Perspektiven. Dabei widmet er sich erstaunlich aktuellen Themen. Aus ökonomischer Perspektive behandelt er

die Risiken durch kapitalungedeckte Kreditaufnahmen, die zu einer „wundersamen Geldvermehrung“ führen (Faust II, 1. Akt, „Weitläufiger Saal“). Ökologisch aktuell ist seine Auseinandersetzung mit ungebremstem Expansionsdrang, der zu rücksichtsloser Landnahme unter Opferung von Menschenleben, natürlichen Ressourcen und traditionellen Werten führt (Faust II, 5. Akt, „Offene Gegend“). Selbst zur künstlichen Intelligenz und Robotik lässt sich angesichts der Erschaffung des „Homunkulus“ einiges im Faust finden (Faust II, 2. Akt, „Laboratorium“).

Es ist offensichtlich, dass Dichtung, Kunst und Musik nicht nur der Erbauung dienen, sondern der Erkenntnis und Bewältigung emotionaler, intellektueller und sozialer Konflikte. Die Künste sind unerlässlich bei der Transformation von Hass und Gewalt (s. Holm-Hadulla, 2019b). Ihre Erkenntnis- und Bewältigungsfunktion zeigt sich bis heute in prominenten Beispielen wie dem Maler Gerhard Richter, Musikern wie Madonna und den Rolling Stones oder Dichterinnen wie Amanda Gorman (2021). Madonna sucht in ihren Inszenierungen nach Lösungen für lebensgeschichtliche Traumata und religiöse Fragen und entfaltet eine beträchtliche gesellschaftliche Wirkung, indem sie durch provokante, für viele nicht immer geschmackvolle Darstellungen soziale Ungerechtigkeiten, insbesondere die Unterdrückung von Frauen und ihrer eigenen Sexualität offenkundig macht. In ihrem atemberaubenden Song „Sympathy for the Devil“, der vermittelt über Bulgakows „Der Meister und Margarita“ an Goethes „Teil von jener Kraft, die stets das Böse will und stets das Gute schafft“, anknüpft, stellen die Rolling Stones historische Schändlichkeiten unverblümt dar. Ihr Song beschreibt verschiedenste Formen menschlicher Destruktivität. Er behandelt Themen wie die Kreuzigung Jesu Christi, die Ermordung der Zarenfamilie nach der sowjetischen Oktoberrevolution, den Hundertjährigen Krieg zwischen England und Frankreich, die rituelle Ermordung von Troubadouren in Indien und die Attentate auf die Brüder Kennedy. Die wesentliche Botschaft lautet, dass man sich mit dem Bösen beschäftigen solle, um es zu bewältigen (Holm-Hadulla, 2019b).

Goethe fasst die heilsame Bedeutung der künstlerischen und musikalischen Intelligenz in folgende Worte: „Trüb’ ist der Geist, verworren das Beginnen;/ Die hehre Welt, wie schwindet sie den Sinnen!/ Da schwebt hervor Musik mit Engelsschwingen/ Verflicht zu Millionen Tön’ um Töne,/ Des Menschen durch und durchzudringen/ Zu überfüllen ihn mit ew’ger Schöne…“ (Goethe, HA 1, S. 385 f.).

So sehen viele in der Musik eine Zufluchtsstätte für das Geistige und halten das Erleben von Schönheit für lebenswichtig. Das Thema der Schönheit als Erkenntnisweise durchzieht unsere Kultur spätestens seit Plato und verdiente eine eigene Abhandlung. Das gilt natürlich auch für die Bildende Kunst. So entdeckt beispielsweise Gerhard Richter durch die Malerei seine persönliche Geschichte im Horizont der Zeitgeschichte. Kunstbetrachter werden mitunter von komplexen Einsichten ergriffen, die sich wissenschaftlich nicht begreifen lassen. Shakespeare fasst dies bis heute gültig zusammen: „Solchermaßen gestaltete Phantasien begreifen mehr als die Vernunft jemals erklären kann“ (Shakespeare, Sommernachtstraum, 5. Akt, 1 Szene; übers. R.M.H-H.).

Die künstlerischen Erkenntnisse bedürfen aber genauso wie die wissenschaftlichen der Verbindung mit der praktischen Lebenswirklichkeit, um ethisches Handeln begünstigen zu können. Die Geschichte ist angefüllt mit intelligenten künstlerischen Inszenierungen, die nicht der poetischen Transformation von Hass und Gewalt dienten, sondern ihrer Verwirklichung. Ein extremes Beispiel ist die Kunstreligion von Richard Wagner. Sie wurde von Adolf Hitler und seinen Schergen für eine amoralische Politik vereinnahmt, die sich in vielen Belangen als „künstlerisch“ verstand (Fest, 2002). Dennoch bleibt die künstlerisch intelligente Gestaltung ein wesentliches Medium, in dem Destruktivität kreativ transformiert werden kann. Dies stellt exemplarisch Botticellis „Geburt der Venus“ dar. Das Gemälde zeigt wie Aphrodite, römisch Venus, aus dem Schaum geboren und von einer Muschel an Land getragen wird (siehe Abbildung 3). Die Göttin der Schönheit und Fruchtbarkeit entspringt allerdings einer blutrünstigen Geschichte, deren archaische Gewalt erst durch die Kunst in Schönheit verwandelt wird (s. Holm-Hadulla, 2011).

Sektion 7: Politische Intelligenz und Weisheit

Schließlich ist die höchste Form der Intelligenz nicht das technologische Machen und poetische Gestalten, sondern das ethisch-politische Handeln. Diese seit der griechischen Antike und auch im Alten China weit verbreitete Vorstellung , z. B. bei Konfuzius, 551–479 (1998) und Plato, 428/427–348/347 (1985), kann auch die schon erwähnte demokratische Diskursethik begründen (Habermas, 2011).

Robert Sternberg zeigt, dass sich einzelne Formen der Intelligenz wie analytische, fluide und kristalline Intelligenz metatheoretisch in das werteorientierte

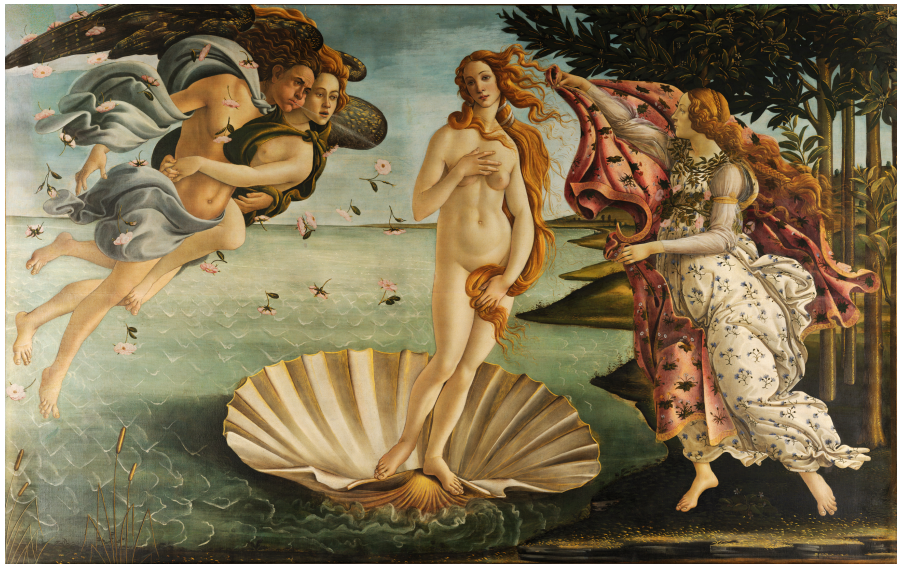


Abbildung 3: „Geburt der Venus“ von Sandro Botticelli (erschaffen um 1484–1486); Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Die_Geburt_der_Venus_(Botticelli)

Konstrukt „Weisheit“ einbinden lassen (Sternberg, 2003). Er vermutet, dass diesen verschiedenen Aspekten der Intelligenz die gleichen „Meta-Komponenten“ zu Grunde liegen, z. B. das Erkennen eines Problems, die Definition seiner Natur, die Formulierung von Lösungsstrategien etc.. Formale Intelligenz nutze diese Komponenten für Wissenserwerb, Anwendung und Analyse. Kreative Intelligenz werde eher benötigt, um neue und brauchbare Ideen zu finden, und Weisheit sei eher auf „Common Goods“ ausgerichtet (Sternberg, 2021). Er schlägt das Konstrukt einer Meta-Intelligenz vor, mit der man das Zusammenspiel der beschriebenen Intelligenzformen besser verstehen könne. Dabei stellt er sich dem Problem, dass Intelligenz auch zur (Selbst-)Destruktion eingesetzt werde. Deswegen müssten die bekannten Intelligenzfaktoren durch eine adaptive Intelligenz im Sinne von Weisheit ergänzt werden.

Es ist jedoch fraglich, ob die Komplexität von kreativer Intelligenz oder gar von Weisheit empirisch-psychologisch erfasst werden kann. Schon bei der Bewertung kreativer Produkte stößt die psychologische Forschung an ihre Grenzen. Sie kann die Originalität und Brauchbarkeit eines mathematischen Beweises, einer

naturwissenschaftlichen Entdeckung, eines Gedichts oder eines Songs nicht mit psychologischen Mitteln erfassen. Sie ist auf die Bewertungskriterien der einzelnen Wissenschafts- und Lebensbereiche angewiesen. Auch mit dem Konstrukt Weisheit wagt sie sich in einen Bereich vor, der ohne historische, philosophische, politische Theorien und lebenspraktisch verkörperte Erfahrungen nicht zu erforschen ist. Deswegen ist der Brückenschlag zu diesen Wissenschaften so bedeutsam. Herausforderungen wie den Klimawandel, die Wasser- und Luftverschmutzung, die Massenvernichtungswaffen und, recht aktuell, die Pandemien kann man nur durch eine interdisziplinäre Diskursethik bewältigen (Habermas, 2011). Wesentliche Aspekte dieser Diskursethik sind die ethisch-moralische Intelligenz, die zum großen Teil auf religiöser Weisheit beruht.

Dies begründet Manfred Oeming in seinem Beitrag über die „Intelligentia Dei" (2021). Oeming geht davon aus, dass sich viele moderne Konzepte von künstlicher Intelligenz und menschlicher Vernunft religiöser Sprache bedienen. Sie sind eingebettet in eine transzendente Weisheit, die aus uralten biblischen Überlieferungen herstammt. In diesem Sinne könne man auch von „göttlicher Intelligenz" sprechen. Sie sei eine wichtige Instanz angesichts einer seine Grenzen vergessenden Selbstüberschätzung des Menschen: „Sie erweist sich als notwendiges Korrektiv gegen versponnene, total illusorische und sich selbst maßlos überschätzende Technikgläubigkeit" (Oeming, 2021).

Die religiöse Sprache erweist ihre Leistungskraft auch im Rahmen der modernen Naturwissenschaften. Sie wird aber auch für absurde Versuche benutzt, Künstliche Intelligenz zu sakralisieren, wie z. B. durch Pläne „Gott zu programmieren". KI erscheint als Businessmodell zur Weltrettung. Das kulturelle Gedächtnis wird dabei schlicht abgeschafft und damit der wichtigste Teil des Mensch-Seins. Dabei finden sich in den biblischen Texten eine Vielzahl von intelligenten Vorstellungen, die dem Selbstverständnis und einem sinnvollen sozialen Zusammenleben dienen.

Zu den biblischen Texten über die Begrenztheit des menschlichen Wissens lassen sich Analogien in der antiken griechischen Philosophie finden. Oeming (2021) zeigt, wie besonders in Platos *Politeia* die Unterscheidung von der Erscheinung und den dahinter stehenden Ideen mythisch entfaltet wird. Gegenüber der sokratischen Hoffnung, dass man den Menschen durch philosophische Erziehung zum Wahren, Guten und Schönen führen könne, ist die Bibel allerdings skeptischer. In der Antigone des Sophokles, die analoge Strukturen wie das Buch Hiob aufweise, heißt es in der Übersetzung Hölderlins:

„Ungeheuer ist viel. Doch nichts Ungeheurer, als der Mensch.
Allbewandert, unbewandert. Zu nichts kommt er."

Wie im Buch Hiob kann der Mensch in der Antigone des Sophokles die entscheidenden Fragen des Lebens und des Sterbens nicht beantworten: „Dem Totenreich allein zu entrinnen versteht er nicht."

Der Theologe resümiert, dass die Bibel einerseits wissenschaftsfreundlich sei: „Machet euch die Erde untertan!" Dazu gehört das Ausnutzen aller technischen Möglichkeiten. Aber der Mensch darf kein technologisches Monster werden, sondern muss Mensch bleiben. Für Oeming gehören Glauben und kritisch-aufgeklärtes Denken zusammen. So können auch Techniker und Wissenschaftler an der religiösen Weisheit teilhaben. Albert Einstein drückte dies folgendermaßen aus: „Zu empfinden, dass hinter dem Erlebbaren ein für unseren Geist Unerreichbares verborgen sei, dessen Schönheit und Erhabenheit uns nur unmittelbar und in schwachem Widerschein erreicht, das ist Religiosität" (s. Oeming, 2021). Der Glaube an eine uns vorauslaufende und uns transzendierende Weisheit ist philosophisch und politisch zugleich.

Allerdings existiert ein bemerkenswerter Gegensatz zwischen der philosophischen Idealisierung der Politik und ihrem geringen öffentlichen Ansehen. Eine Ursache für diesen Befund sieht Theresia Bauer (2021) in der Komplexität politischer Entscheidungsbildung, der oft erforderlichen Schnelligkeit und der unmittelbaren Meinungsbildung. In der Politik sei man ständig „getrieben von kurzfristigem Druck, sofort zu reagieren und eine fundierte Meinung zu allem und jedem zu haben". Politik müsse permanent unterschiedliche Perspektiven und Interessen ausbalancieren, Mehrheiten organisieren und Kompromisse aushandeln.

So wird von vielen Politik als „schmutziges Geschäft" angesehen. Dabei lebt eine liberale Demokratie davon, dass die Suche nach dem Guten, Wahren und Schönen immer mit einem Prozess des öffentlichen Ringens verbunden ist: „Politische Intelligenz lebt von Voraussetzungen, die Politikerinnen und Politiker nicht allein schaffen können. Sie lebt von der Urteilskraft, dem Verantwortungsbewusstsein und der Fähigkeit von vielen, sich den Aufgaben der Gegenwart und Zukunft zu stellen. Gute Überzeugungsarbeit, machbare Lösungsansätze, hartnäckige Sicherung von Mehrheiten und Ressourcen ist im Kern unser Geschäft als Politikerinnen und Politiker – und es bedarf ohne Zweifel einiger politischer Intelligenz dafür" (Bauer, 2021).

Politische Intelligenz beinhaltet sowohl ein sittliches als auch praktischen Weltverhältnis. Sie geht damit über instrumentelle und operationale Intelligenz hinaus und muss gleichzeitig Weisheit sein. Harnisch (2021) illustriert die Spannung zwischen politischer Intelligenz und Weisheit anhand des Gegensatzes der sittlich geprägten Klugheit bei Aristoteles und der Nutzen orientierten Schlauheit bei Machiavelli. Politische Weisheit ist ein relationales Konzept, das kognitive und affektive Prozesse zur Selbstorientierung mit dem Verständnis der Anderen in einem politischen Gemeinwesen verbindet (Harnisch, 2021). Sie muss in pluralistischen Gesellschaften eine erhebliche Komplexität bewältigen und hinreichend flexibel sein, um in einem Feld konkurrierender Erkenntnisse und Ansprüche im Sinne der Aristotelische Phronesis angemessene Lösungen zu finden, die über das reine Wissen (*episteme*) und Machen (*poiesis*) hinausgehen.

So fällt es auch der politischen Weisheit zu, einzelwissenschaftliche Erkenntnisse in den Horizont der gesamten Lebenserfahrung einzuordnen. Diese Vermittlung von Teil und Ganzem ist ein wesentlicher Aspekt politischer Weisheit und hermeneutischen Verstehens (Gadamer, 1960). Dazu gehört, dass der Interpret sein Vorverständnis einbringt, aber auch bereit ist, es zu verflüssigen. Der zweite Aspekt des hermeneutischen Zirkels besteht darin, dass wissenschaftliche Erkenntnisse historisch und gesellschaftlich kontextualisiert werden. Drittens geht die Hermeneutik wie die sokratische Dialektik davon aus, dass Wahrheit aus einem gemeinsamen Verständigungsprozess resultiert. Diese kommunikative Intelligenz ist möglicherweise mit den Methoden der Wissenschaften nicht zu erklären. Sie kann sich nur im Kampf um Anerkennung bewähren (Hegel, 1807; Habermas, 2011). So resümiert Goethe in der Zeit des eingangs zitierten Aphorismus zur Natur einen Imperativ: „Edel sei der Mensch,/ hilfreich und gut! . . . Denn unfühlend/ ist die Natur;/ Es leuchtet die Sonne/ Über Bös' und Gute/ Und dem Verbrecher/ Glänzen wie dem Besten/ Der Mond und die Sterne. . . . Nur allein der Mensch/ Vermag das Unmögliche:/ Er unterscheidet, / Wählet und richtet;/ Er kann dem Augenblick/ Dauer verleihen." (Goethe, HA 1, S. 147). Wir würden heute die ethisch-moralische Superiorität ambivalenter sehen und auch die menschliche Intelligenz nicht über alles stellen. Dennoch kann die Natur nicht über die ihr eigenen Zerstörungskräfte nachdenken. Es bleibt zu hoffen, dass dies der Mensch kann: Seine multiplen Intelligenzen ethisch verantwortungsvoll einzusetzen, nicht nur zu seiner eigenen Weiterentwicklung, sondern auch zum Schutz der Natur.

Dabei können die einzelnen Wissenschaftsdisziplinen mit ihren jeweiligen Methoden und Ergebnissen helfen. Wie diese interdisziplinär zu vermitteln sind, ist allerdings eine offene Frage. Soweit ich weiß, war Hegel einer der Letzten, die versucht haben, die Einzelwissenschaften in ein hierarchisches System einzufügen (1817/1991). Solche Versuche sind für die heutigen Wissenschaften kaum noch von Bedeutung. Dennoch bleibt das Bedürfnis nach ganzheitlichem Verstehen. Sowohl Philosophen wie Richard Rorty (2000) als auch Neurowissenschaftler wie Wolf Singer (1991) betonen die Notwendigkeit immer wieder kohärente Formen zu erschaffen, um sich in sich selbst und seiner Welt zurechtzufinden (s. Holm-Hadulla, 2013).

Die interdisziplinäre Vermittlung von einzelwissenschaftlichen Erkenntnissen und besonders ihrer Anwendungen obliegt letztlich der politischen Intelligenz und Weisheit. Diese müssen bei großen Themen wie der Klima- und Friedenspolitik vielfältige wissenschaftliche und lebensweltliche Aspekte integrieren. Die Notwendigkeit individuelle lebensweltlich Erfahrungen mit einer Vielzahl einzelwissenschaftlicher Erkenntnisse politisch zu integrieren zeigt sich beispielhaft an der Bekämpfung der Covid-19 Pandemie. Epidemiologische und virologische Befunde allein können die Art der soziale Kontaktbeschränkungen nicht begründen. Politische Entscheidungen müssen viele andere medizinische Aspekte berücksichtigen (z. B. verzögerte Behandlung von Herzinfarkten), neurologische Konsequenzen (z. B. verzögerte Behandlung von Hirninfarkten), und onkologische Probleme (aufgeschobene Operationen). Darüber hinaus sind die psychologischen, sozialen, ökonomischen, kulturellen und die gesamt-gesellschaftlichen Konsequenzen zu berücksichtigen. Schließlich integriert gute Politik auch die individuellen lebensweltlichen Erfahrungen. Sie ist damit die unmögliche Kunst des Möglichen.

Unmöglich ist es für Politiker, die Ergebnisse einzelwissenschaftlicher Intelligenzen zu überprüfen und deren Beiträge in einem Gesamtbild und einem Handlungsplan zu integrieren. Letzteres würde erfordern, dass Politiker über eine Weisheit verfügen, die die einzelnen Beiträge der Wissenschaften in ein vorbestehendes ganzheitliches Konzept einfügen könnten. Diese ganzheitlichen Konzepte, die Religionen und Weisheitslehren einstmals zur Verfügung gestellt haben, haben ihre Verbindlichkeit in liberalen Demokratien verloren. Andererseits ist das auf das Ganze ausgerichtete philosophische Denken nicht nur in einer wissenschaftlichen Einzeldisziplin präsent, sondern begleitet auch den menschlichen Alltag im oft nur unterschwelligen Streben nach kohärenten Weltbildern und Handlungsentwürfen.

Diese Form der Intelligenz zeichnet sich „durch den Bezug zur Welt im Ganzen aus, also zu dem, was wir von der Welt zum gegebenen historischen Zeitpunkt wissen, sowie durch die systematische Selbstreferenz der Forscher zu sich als Menschen, sowohl als Individuen wie als Personen überhaupt, sodann zu sich als Angehörigen einer sozialen Gemeinschaft“ (Habermas, 2019, S. 27f.). Eine so verstandene philosophische Intelligenz, die wir als Weisheit bezeichnen können, umfasst die lebensweltlichen Erfahrungen im Alltag wie die großen Denkbilder unserer Kultur. Individuelles Verstehen und politische Verständigung entstehen in demokratischen Gesellschaften „im Rahmen eines generalisierten und vernünftigen, kritisch geprüften und *rational ausgearbeiteten* Vorverständnisses, das die Zeitgenossen, wenn auch auf verschiedenen Niveaus der gedanklichen Artikulation, im Spiegel ihrer Lebenswelt von der Welt haben“ (a. a. O., S. 28). Insofern ist rationales politisches Handeln doch möglich und letztlich die Basis unserer Existenz.

Literatur

Al-Ameery-Brosche, I. & Resch, F. (2021). Emotionale Robotik – Fluch oder Segen in der psychiatrischen Versorgung. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Publishing, Heidelberg (in diesem Band).

Albertin, C. et al. (2015). The octopus genome and the evolution of cephalopod neural and morphological novelties. Nature, Vol. 524, pp. 220–224.

Aristoteles (2006). Nikomachische Ethik. Übers. U. Wolf, Rowohlt, Reinbek.

Bauer, Th. (2021). Politische Intelligenz? Ein Blick aus der Praxis zwischen Politik und Wissenschaft. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Press, Heidelberg (in diesem Band).

Byczkowski, M. & Görtz, M. (2021). Die Industrialisierung der Intelligenz. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Publishing, Heidelberg (in diesem Band).

Darwin, C. (1859). On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life. London: J. Murray.

Dawkins, R. (2016). The Selfish Gene. Oxford University Press.

Draguhn, A. (2021). Zur Neurobiologie der Intelligenz. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Press, Heidelberg (in diesem Band).

Erbar, C. & Leins, P. (2021). Das intelligente Spiel mit Zufällen und Auslese. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Publishing, Heidelberg (in diesem Band).

Fest, J. (2002). Hitler: Eine Biographie. 4. Aufl., Propyläen, Berlin.

Fiedler, K., Florian E. & Salmen, K. (2021) Metakognitive Kurzsichtigkeit – Hindernis für intelligentes Verhalten und Versäumnis der Evolution? In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Press, Heidelberg (in diesem Band).

Firnhaber, D. (2021). Intelligente Strategien in Unternehmen. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Publishing, Heidelberg (in diesem Band).

Fuchs, T. (2020). Verteidigung des Menschen. Grundfragen einer verkörperten Anthropologie. Suhrkamp, Frankfurt/M.

Fuchs, T. (2021). Menschliche und künstliche Intelligenz. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Publishing, Heidelberg (in diesem Band).

Funke, J. (2006). Alfred Binet (1857 bis 1911) und der erste Intelligenztest der Welt. In: G. Lamberti (Hg.), Intelligenz auf dem Prüfstand–100 Jahre Psychometrie (S. 23–40). Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.

Funke, J. (2021). Intelligenz: Die psychologische Sicht. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Publishing, Heidelberg (in diesem Band).

Gadamer, H.G. (1960). Wahrheit und Methode. Mohr, Tübingen.

Gardner, H. (1983). The theory of multiple intelligences. Heinemann, London.

Goethe, J.W.v. (1981). Gesammelte Werke. Hamburger Ausgabe, C.H. Beck, München.

Goleman, D. (2020). Emotional Intelligence. Bloomsbury Publishing.

Gorman, A. (2021). The Hills We Climb. https://indianexpress.com/article/books-and-literature/amanda-gorman-full-poem-7155406/

Habermas, J. (2011). The Discourse Theory of Law and Democracy. Stanford University Press, Stanford.

Habermas, J. (2019). Auch eine Geschichte der Philosophie. Band 1, Suhrkamp, Frankfurt.

Hegel, G.W.F. (1807/1952). Phänomenologie des Geistes. Meiner, Hamburg.

Hegel, G.W.F. (1817/1991). Enzyklopädie der philosophischen Wissenschaften im Grundrisse. Meiner, Hamburg.

Heuveline, V., Stiefel, V. (2021). Künstliche Intelligenz und Algorithmen – Wahrer Fortschritt oder doch nur digitale Alchemie? In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke,

M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Press, Heidelberg (in diesem Band).

Hofman M.A. (2019). On the Nature and Evolution of the Human Mind. Progr Brain Res 250:251–283.

Holm-Hadulla, R.M. (2010). Kreativität – Konzept und Lebensstil. 3. Aufl., Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen.

Ders. (2011). Kreativität zwischen Schöpfung und Zerstörung. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen.

Ders. (2013). The Dialectic of Creativity: Towards an Integration of Neurobiological, Psychological, Socio-Cultural and Practical Aspects of the Creative Process. Creativity Research Journal, 25(3), 1–7.

Ders. (2017). Cannabis, ein harmloses Genussmittel? – Die Verleugnung körperlicher, psychischer und sozialer Risiken in Werbung und populären Medien. In: G. Duttge, R. M. Holm-Hadulla, J. L. Müller, M. Steuer (Hg.). Verantwortungsvoller Umgang mit Cannabis. Universitätsverlag, Göttingen

Ders. (2019a). Leidenschaft – Goethes Weg zur Kreativität. 3. Aufl., Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen.

Ders. (2019b). Sympathy for the Devil – The Creative Transformation of the Evil. Journal of Genius and Eminence, 5(1), 1–11.

Ders. (2020). Creativity and Positive Psychology in Psychotherapy. International Review of Psychiatry, https://doi.org/10.1080/09540261.2020.1809355

Ders. (2021). Integrative Psychotherapie. Psychosozial Verlag, Gießen.

Holm-Hadulla R.M., Bertolino, A. (2014). Creativity, Alcohol and Drug Abuse: The Pop-Icon Jim Morrison. Psychopathology, 47(3), 167–173.

Holm-Hadulla R.M., Koutsoukou-Argyraki, A. (2017). Bipolar Disorder and/or Creative Bipolarity: Robert Schumann's Exemplary Psychopathology. Psychopathology, 50 (6): 379–388.

Holm-Hadulla, R.M., Wendt, A.N. (2020). Dialectical Thinking – Further Contributions to Creativity. Encylocpedia of Creativity, M. Runco & S. Pritzker (Eds.), Elsevier Academic Press.

Holstein, T. (2021). Intelligenz: Evolutionsbiologische Grundlagen und Perspektiven. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Press, Heidelberg (in diesem Band).

Huxley, T. H. (1869). Nature: Aphorisms by Goethe. Nature, Nov 4, 1869, p. 9–11.

Jaspers, K. (1949). Vom Ursprung und Ziel der Geschichte. Piper, München.

Kahneman, D. & Tversky, A. (1984). Choices, values, and frames. American Psychologist, 39(4), 341–350.

Kandel, E.R., J.D. Koester, S.H. Mack, and S.A. Siegelbaum. (2021). Principles of Neural Science, Sixth Edition. McGraw-Hill, New York.

Knebel Döberitz, M. v. (2021). Menschliche und künstliche Intelligenz in der Medizin: Wo stehen wir und wo gehen wir hin. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Press, Heidelberg (in diesem Band).

Konfuzius (2005). Gespräche. C. H. Beck, München

Lindenberg, K., Halasy, K., Szász-Janocha, C., & Wartberg, L. (2018). A Phenotype Classification of Internet Use Disorder in a Large-Scale High-School Study. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(4). https://doi.org/10.3390/ijerph15040733

Lindenberg, K., Kindt, S., & Szász-Janocha, C. (2020). Internet addiction in adolescents: The PROTECT Program for Evidence-Based Prevention and Treatment. Cham: Springer.

Lindenberg, K. & Basten, U. (2021). Entwicklung der Intelligenz im Zusammenhang mit der Nutzung digitaler Medien. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Press, Heidelberg (in diesem Band).

Mao, Y., C.R. Catacchio, L.W. Hillier, D. Porubsky, R. Li, A. Sulovari, J.D. Fernandes, F. Montinaro, D.S. Gordon, J.M. Storer, M. Haukness, I.T. Fiddes, S.C. Murali, P.C. Dishuck, P. Hsieh, W.T. Harvey, P.A. Audano, L. Mercuri, I. Piccolo, F. Antonacci, K.M. Munson, A.P. Lewis, C. Baker, J.G. Underwood, K. Hoekzema, T.H. Huang, M. Sorensen, J.A. Walker, J. Hoffman, F. Thibaud-Nissen, S.R. Salama, A.W.C. Pang, J. Lee, A.R. Hastie, B. Paten, M.A. Batzer, M. Diekhans, M. Ventura, and E.E. Eichler. 2021. A high-quality bonobo genome refines the analysis of hominid evolution. *Nature*. 594:77–81.

Monyer, H. & Gessmann, M. (2017). Das geniale Gedächtnis: Wie das Gehirn aus der Vergangenheit unsere Zukunft macht. Knaus, München.

Nieder, L., Wagener, L., Rinnert, P. (2020). A neural correlate of sensory consciousness in a corvid bird. Science, Vol. 369, 6511, pp. 1626–1629; https://doi.org/10.1126/science.abb144

Nünning, V. (2021). Intelligenz in und mit Literatur. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Press, Heidelberg (in diesem Band).

Nünning, A. & Nünning, V. (2008). Einführung in die Kulturwissenschaften. Metzler, Stuttgart.

Oeming, M. (2021). Intelligentia Dei: Künstliche Intelligenz, menschliche Vernunft und göttliche Weisheit. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Press, Heidelberg (in diesem Band).

Plato (1985). Der Staat (Politeia). Übers. K. Vretska, Reclam, Stuttgart.

Pons (2021). Intellegere. https://de.pons.com/übersetzung/latein-deutsch/intellegere

Rappold, G. A. (2021). Wenn die Intelligenz beeinträchtigt ist. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Press, Heidelberg (in diesem Band).

Rorty, R (2000). Universality and Truth. In: R. B. Brandom (Ed.), Rorty and his Crtiics (pp. 1–30). Blackwell, Lynchburg, VA.

Shakespeare, W. (1951). Complete Works. Harper Collins, New York.

Singer, W. (1990). Search for Coherence: A Basic Principle of Cortical Self-Organisation. Concepts in Neuroscience, 1, 1–26.

Sternberg, R. J. (2003). Wisdom, Intelligence, and Creativity Sythesized. Cambridge University Press, New York.

Sternberg, R. J. (2021). Meta-Intelligence: Understanding, Control and Coordination of Higher Cognitive Processes. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Publishing, Heidelberg (in diesem Band).

Stiehl,, Th., Marciniak-Czochra, A (2021). Intelligente Algorithmen und Gleichungen? – Eine Annäherung an die Intelligenz mathematischer Konzepte. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Publishing, Heidelberg (in diesem Band).

Weiand, C. (2021). Kulturelle Intelligenz. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Publishing, Heidelberg (in diesem Band).

Weiß, C. (2021). Statistik und Intelligenz – eine wechselvolle Beziehung. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Press, Heidelberg (in diesem Band).

WHO (2018). More Active People for a Healthier World. World Health Organisation, ISBN 978-92-4-151418-7

Wink, M. (2021). Intelligenz im Tierreich. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Publishing, Heidelberg (in diesem Band).

Über den Autor

Rainer Matthias Holm-Hadulla hat nach dem Studium der Medizin und Philosophie eine Laufbahn als Psychiater, Psychotherapeut und Psychoanalytiker eingeschlagen. Seine klinische Tätigkeit begleitet er bis heute in Lehre und Forschung an der Universität Heidelberg und verschiedenen anderen Universitäten, besonders in Südamerika. Er wurde in nationale und internationale *Centers for Advanced Studies* berufen. Seine wichtigsten Bücher sind: „Integrative Psychotherapie"; „Leidenschaft – Goethes Weg zur Kreativität"; „Kreativität – Konzept und Lebensstil"; „Kreativität zwischen Schöpfung und Zerstörung"; „The Art of Counseling and Psychotherapy".

Korrespondenzadresse:
Prof. Dr. med. Rainer M. Holm-Hadulla
Adenauerplatz 2
69115 Heidelberg

E-Mail: rainer@holm-hadulla.com
Homepage: https://www.holm-hadulla.com/

Sektion 1:
Biologische Grundlagen

Zur Neurobiologie der Intelligenz

ANDREAS DRAGUHN

Institut für Physiologie und Pathophysiologie, Universität Heidelberg

Zusammenfassung

Wichtigstes biologische Korrelat von Intelligenz ist das Gehirn. Die Neurowissenschaften können deshalb dazu beitragen, ihre Naturgeschichte nachzuzeichnen, die vom Gehirn gesetzten biologischen Randbedingungen aufzuklären und kausale Mechanismen der Entstehung von Intelligenz zu finden. Sie können und sollten ihr Wissen in Bemühungen um angemessene Förderung des Potenzials von Menschen einbringen. Die neurobiologische Forschung zur Intelligenz hat Hirnregionen und Netzwerk-Eigenschaften identifiziert, die in besonderer Weise zur kognitiven Flexibilität beitragen. Keine der Erkenntnisse ist aber vollständig, vieles bleibt spekulativ oder günstigstenfalls eher deskriptiv als kausal erklärend. Alle Aussagen hängen zudem von der Definition des Begriffs Intelligenz ab, der aus der Human-Psychologie stammt und dessen Anwendung auf *andere* Tiere nicht trivial ist. Der anthropomorphe Blick, mit der wir oft über Tiere urteilen, könnte eine ähnliche Verzerrung erzeugen wie innerhalb der Menschheit die Messung von Intelligenz mit Instrumenten, die an einer weißen, gebildeten Mittelschicht optimiert wurden. Dennoch: Der Möglichkeitsraum unseres Denkens und Handelns ist wesentlich von der jeweiligen neuronalen Ausstattung geprägt, und das gilt sehr wahrscheinlich auch für Tiere. Von einer Reduktion der Intelligenz auf neurobiologische Vorgänge sind wir weit entfernt und sollten es auch bleiben, denn wir selbst sind die denkenden und handelnden Subjekte, nicht unser Gehirn. Neurobiologische Randbedingungen für Intelligenz zu kennen und zu beachten kann aber dabei helfen, angemessene Bildungs- und Lebensbedingungen für das *zoon logicon* zu schaffen.

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24380

1 Einleitung

Viele von uns haben als Kinder unter dem Mikroskop Pantoffeltierchen (Paramecium) beobachtet. Stößt dieser Einzeller, der eigentlich gar kein Tier ist, an ein Hindernis, so dreht er seine Schwimmrichtung um und entfernt sich. Auf ähnliche Weise reagiert er auf chemische und thermische Reize, so dass er sich in nahrungsreichen, lebensfreundlichen Umgebungen aufhält und gefährliche Gefilde meidet. Mit derartigen Verhaltensweisen schaffen es diese einfachen Organismen in den verschiedensten Habitaten zu überleben – vom Meer über Süßwasser bis zu den Pansen von Schafen. Sie sind also sehr erfolgreich und bestens an ihre jeweilige Umgebung angepasst. Sind sie deshalb intelligent? Oder gibt es Intelligenz nur in ganz bestimmten „höheren" Tieren? Vielleicht sogar nur beim Menschen? Bei komplexen Maschinen? Ist unsere Intelligenz erblich vorgegeben oder kann sie durch Lernen und Lebenserfahrung vermehrt werden?

Diese oder ähnliche Fragen haben wir uns vielleicht alle schon gestellt, denn sie berühren unser Selbstbild und oft auch unser Selbstwertgefühl. Sie sind darüber hinaus von großer gesellschaftlicher Bedeutung. Insbesondere die ‘nature-nurture‘ Debatte um angeborene oder erworbene Intelligenz hat unmittelbare Auswirkungen auf bildungs- und sozialpolitische Positionen. Das Ausmaß kognitiver Fähigkeiten ist nicht selten auch eine wertende Kategorie, sei es explizit wie bei dem utilitaristischen Philosophen Peter Singer (2013), oder implizit, wie in der alltäglichen Abwertung vermeintlich Dümmerer oder gar durch Krankheit intellektuell Eingeschränkter. Im kreationistischen Entwurf des ‚intelligent design‘ ist die Intelligenz namensgebend für den Schöpfer. Aktuelle Diskussionen werfen die Frage auf, ob außer Menschen und bestimmten Tieren vielleicht auch Computer, Roboter oder Programme intelligent sein können, und eine Gruppe von Botanikern verlangt lautstark, auch Pflanzen Intelligenz zuzuschreiben (Brenner et al., 2006; Trewawas, 2016). In all diesen Diskursen spielen die materiellen Grundlagen für Intelligenz eine Rolle. Darum ist die Frage nach den physischen Bedingungen von Intelligenz berechtigt und wichtig.

Forschung zur Intelligenz baut auf einer langen und komplexen Theoriegeschichte auf, die im Wesentlichen von verschiedenen Zweigen der Psychologie bestimmt wurde. Entsprechend vielschichtig sind die Definitionen des Begriffs, zumal sich Intelligenz nicht direkt beobachten lässt – sie ist vielmehr ein Konstrukt oder eine latente Variable, die indirekt aus messbaren Größen (z. B. dem Antwortverhalten in einem Intelligenztest) erschlossen wird. In diesem Artikel soll eine

pragmatische und möglichst konsensfähige Definition zugrunde gelegt werden: Intelligenz ist die Fähigkeit, Probleme durch flexibles Handeln oder Denken zu lösen. Handeln und Denken sind dabei als intentionale Akte gemeint, die über rein reflektorische Automatismen hinausgehen, also als eigentliche *agency*. Mit dieser Definition ist eine mentale Dimension angesprochen, wenn auch in einem breiten und handlungsorientierten Sinn. Intelligent sind damit jedenfalls nur Lebewesen (oder vielleicht Maschinen), die ihr Verhalten aktiv gestalten können, d. h. es muss einen inneren „Raum" geben, in dem die verschiedenen Handlungsoptionen repräsentiert, verglichen und bewertet werden können, ohne dass sie gleichzeitig in äußere Handlungen übersetzt werden. Das Pantoffeltierchen scheidet damit aus - jedenfalls gibt es keinerlei Hinweis darauf, dass es über den Wechsel der Schwimmrichtung vertieft nachdenken und dann entscheiden könnte. Vielmehr gehen die meisten WissenschaftlerInnen davon aus, dass Intelligenz an ein zentrales System zur Integration von Informationen und zur nachfolgenden Entscheidungsfindung gebunden ist – in der Regel also an ein Gehirn. Verschiedene Autoren benennen darüber hinaus spezifische Eigenschaften eines Gehirns, das zur Intelligenz befähigt, z. B. ein zumindest kurzzeitiges Gedächtnis, in dem relevante Kontexte präsent gehalten werden können. Wir werden hier als Minimalkonsens lediglich flexibles (aber nicht zufälliges) Verhalten, die Fähigkeit zur Kognition und die Anwendung dieser Fähigkeiten zur Lösung relevanter Probleme zugrunde legen. Den mindestens ebenso komplexen Begriff des Bewusstseins berücksichtigen wir in diesem Kontext nicht. In manchen Texten werden Intelligenz und Bewusstsein fast synonym behandelt, oft mit einer hierarchischen Benennung von „höheren" Tieren und Menschen, die zu beidem fähig sind. Dies ist möglicherweise falsch und bedarf in jedem Fall der Rechtfertigung – im Folgenden soll jedenfalls der Fokus ausschließlich auf der Intelligenz und ihren neurobiologischen Korrelaten liegen.

2 Wozu denken? Die Evolution der Intelligenz

2.1 Sind Pflanzen intelligent?

Wer ist nach unserer Definition intelligent? Es ist offenkundig, dass Menschen diese Eigenschaften haben, wenn auch in unterschiedlichem Maß. Ebenso offenkundig scheint, dass Pflanzen sie nicht haben, denn wir haben keinen Hinweis darauf, dass sie mit Hilfe kognitiver Prozesse flexibel auf ihre aktuelle Situation

reagieren und dabei aktiv zwischen verschiedenen Handlungsoptionen wählen. Vielmehr reagieren sie einfach nach vorgegebenen Mechanismen auf physische Reize (Licht, Wasser, Temperatur, Berührung usw.). Oder? In jüngerer Zeit gibt es eine deutlich wahrnehmbare Strömung innerhalb der Pflanzenwissenschaften, die eben dies bezweifelt. Das Spektrum der Veröffentlichungen reicht von populären Büchern, die Bäumen menschenähnliche Arten von Kommunikation und Fürsorge zuschreiben (z. B. Wohlleben, 2015), bis zu Artikeln in etablierten Fachzeitschriften, in denen die Intelligenz und sogar ein Bewusstsein von Pflanzen proklamiert werden (Brenner et al., 2006; Trewavas, 2016). *Plant Neurobiology* ist zu einer eigenen kleinen Fachrichtung geworden. Kern des Arguments ist, dass Pflanzen nicht nur lokal auf Umweltreize reagieren, sondern diese als elektrische oder hormonelle Signale im Pflanzenkörper weiterleiten, in geeigneten Geweben integrieren und angepasste, systemische Reaktionen zeigen. Die quasi-neuronale Struktur der Integration liegt mal im Wurzelgewebe, mal im Bast, erfüllt aber in jedem Fall die Funktionen eines Gehirns, mit dessen Hilfe die Pflanze fühlt, denkt, und situationsgerecht handelt. Eine Arbeitsgruppe hat sogar Hinweise auf assoziatives Lernen bei Pflanzen gefunden und zieht diese Experimente als Beleg für ein Pflanzenbewusstsein an. Allerdings sind diese Ergebnisse bisher weder reproduziert worden noch stellt assoziatives Lernen ein etabliertes Kriterium für Bewusstsein dar. Das wesentliche Argument gegen die Behauptung von intelligentem Verhalten bei Pflanzen ist, dass es keinerlei Hinweise auf mentale Prozesse im oben genannten Sinne gibt und man sie deshalb auch nicht postulieren sollte (Mallatt et al., 2020).

Das „Verhalten“ einer Pflanze basiert nicht auf kognitiven Prozessen. Die Blätter wenden sich zum Licht, weil sie entsprechend aufgebaut sind und es aufgrund ihrer physischen Eigenschaften tun müssen. Die Venusfliegenfalle schnappt zu, weil ihre Sensoren und Effektoren bei hinreichender Reizung durch ein Insekt eben so reagieren müssen - nach allem, was wir wissen, ist dazu kein innerer Abwägungsprozess notwendig, der unserem Entscheiden oder Denken auch nur nahekäme. Daher können wir davon ausgehen, dass in der Pflanze „niemand zuhause“ ist, den wir nach seinen oder ihren Gefühlen und Gedanken fragen könnten (Taiz et al., 2019). Dies mindert nicht die erstaunliche, oft geheimnisvolle und extrem reiche Anpassung der Pflanzen an ihre Umwelt, und es lässt viel Raum für einen respektvollen und sogar emotionalen Umgang mit diesen Lebewesen. In der einigermaßen bizarren Diskussion um das Pflanzengehirn und Pflanzenbewusst-

sein spiegelt sich aber nichts als die anthropomorphe Übertragung von Intelligenz und (Selbst)-Bewusstsein auf Pflanzen, die ihnen in keiner Weise gerecht wird. Die Plant Neurobiology ist im Begriff, einen dem Zeitgeist geschuldeten, vollkommen evidenzfreien Wissenschaftsmythos zu schaffen. Damit tut sie den Pflanzen und ihren Bewahrern und Nutzern langfristig wahrscheinlich keinen Gefallen, denen mit einem realistischen Verständnis der jeweiligen Organismen besser gedient wäre. Wir können aus diesem Beispiel ganz allgemein ableiten, dass die Anpassung eines Lebewesens an seinen Lebensraum nicht hinreichend für die Zuschreibung von Intelligenz ist. Zur Intelligenz gehören aktives Handeln, das Auswählen aus verschiedenen Handlungsoptionen und die damit verbundenen mentalen Prozesse.

2.2 Bewegung macht schlau – die Ursprünge

Ein intelligenter Organismus muss nach dem oben Gesagten also das Relevante einer Situation erfassen können, er muss verschiedene Handlungsoptionen haben, und zwischen Wahrnehmung und Handeln muss ein Denkprozess im weitesten Sinne liegen, also eine Auswahl aus einem mentalen Raum von Möglichkeiten, der nicht mit der bereits vollzogenen Handlung identisch ist. Dieser mittlere Schritt unterscheidet intelligentes Verhalten von automatisierten Reiz-Reaktionsschemata, wie sie zum Beispiel motorische Reflexe darstellen. Sein Ort ist, nach allem was wir wissen, das Gehirn. Daher führt die Frage nach der Intelligenz zwangsläufig zur Frage nach der Entstehung von zentralisierten Nervensystemen im Tierreich (Miller, 2009). Nervengewebe hat sich in drei der fünf Stämme von mehrzelligen Tieren entwickelt, nämlich den Rippenquallen (*Ctenophora*), Nesseltieren (*Cnidaria*) und den Zweiseitentieren (*Bilateralia*, diese Gruppe umfasst die meisten Tiere mit gewohnt symmetrischem Aufbau wie Fische, Vögel, Säugetiere, Krebse, Spinnen, Insekten usw.). Dagegen haben Schwämme (*Porofera*) und Placozoa (millimetergroße mehrzellige „Scheibentiere“) kein Nervensystem, möglicherweise haben sie dies sogar im Verlauf ihrer Evolution verloren (Ryan und Chiodin, 2015). Auffällig ist, dass die mit einem Nervensystem ausgestatteten Tiere in der Regel mobil sind, d. h. sich aktiv in der Umwelt bewegen können. Schwämme und Placozoa dagegen bewegen sich entweder überhaupt nicht aktiv oder nur unkoordiniert-amöboid. Daher sehen viele Autoren einen engen Zusammenhang zwischen senso-motorischem Verhalten und der Evolution von Nervensystemen. Dies wird gerne mit der bekannten Geschichte von den Seescheiden illustriert, die als schwimmfähige Larven ein Gehirn haben und nach der Anheftung an einen

Stein als sesshafte Erwachsene dieses Gehirn abbauen und verdauen, weil sie es nicht mehr brauchen.

Diese Geschichte ist amüsant, besonders wenn sie mit ironischen Analogien über die allzu menschliche Neigung zu einer gewissen Behäbigkeit garniert wird. Sie ist aber in der Sache übertrieben - erwachsene Seescheiden verfügen sehr wohl über ein zentrales Ganglion und sensorische wie motorische Neurone, mit denen sie ihr Fressverhalten, ihre Fortpflanzung und einfache Schutzreflexe koordinieren können. Sie regulieren mit Hilfe dieses einfachen Nervensystems hauptsächlich ihr inneres Milieu, ähnlich wie unser (sehr ausdifferenziertes und zellreiches) Darm-Nervensystem. Was man ziemlich sicher sagen kann ist also, dass sie kaum mehr Intelligenz als unser Verdauungssystem haben dürften. Für wirklich intelligentes Verhalten bedarf es eines komplexen zentralen Nervensystems, das dem Tier oder dem Menschen hilft, intentional, also zielgerichtet, zu handeln. Der kolumbianisch-amerikanische Neurophysiologe Rodolfo Llinas verweist darauf, dass Gehirne vor allem Vorhersagen ermöglichen, indem sie in einer internen Repräsentation die Folgen von Bewegungen oder Handlungen vorwegnehmen (Llinas und Roy, 2009). Dazu braucht das Tier oder der Mensch sinnvoll gefilterte sensorische Informationen, die das für die jeweilige Situation Wichtige hervorheben. Die aktuellen Informationen müssen mit den bereits gespeicherten integriert werden, um daraus Vorhersagen über den Erfolg einer Handlung abzuleiten. Die Regeln, nach denen Handlungsentscheidungen gefällt werden, können durch Lernen geformt und so den individuellen Lebenserfahrungen angepasst werden. In diesem Sinne ist das Gehirn also ein Organ, das vorausschauendes Verhalten ermöglicht und permanent durch Lernen optimiert. Dies alles ergibt nur dann Sinn, wenn aktives Verhalten auch möglich ist. So hat die Anekdote über die Seescheiden doch ihren richtigen Kern – wer sich nicht bewegt, braucht eigentlich kein Gehirn.

2.3 Scala naturae?

Die Larve einer Seescheide werden wir trotz ihres aktiven Schwimmens nicht in der Nähe menschlicher Intelligenz verorten, weil die Vielfalt des Verhaltens und damit der Horizont von Möglichkeiten und Entscheidungen sehr begrenzt erscheinen. Selbst wenn diese Sicht anthropomorph geprägt sein und der Larve Unrecht tun sollte, so lässt sich doch sicher sagen, dass sich beim Menschen Intelligenz und Gehirn in einer ganz besonderen und aufwändigen Weise entfaltet haben. Unser Gehirn konsumiert ungefähr 15–20% der Energie, die wir in Ruhe

verbrauchen. Wir werden sehr unreif geboren, und es ist vor allem die Reifung des Gehirns, die uns für mehr als ein Jahrzehnt in der elterlichen Fürsorge hält. Als Spezies haben wir unsere Umwelt so stark verändert, dass man vom Erdzeitalter des Anthropozäns spricht. Wir haben also in großem Maß durch aktives Handeln neue, kreative Lösungen für Probleme oder Bedürfnisse geschaffen. Dass dies auch destruktiv sein kann und uns heute vor große Probleme stellt ändert nichts an der Tatsache, dass Intelligenz in dem hier beschriebenen Sinne beim Menschen extrem ausgeprägt ist.

Es gibt keine eindeutige Antwort darauf, wie es im Lauf der Evolution zu der starken Hirnentwicklung der Hominiden kam. Die einschlägigen Theorien lassen sich grob in physische und soziokulturelle Begründungen unterscheiden (zusammengefasst in Hofman, 2019). Einige Autoren nehmen an, dass wechselnde Umweltbedingungen (Klima, Nahrungsverfügbarkeit usw.) schnelle Anpassungsvorgänge der frühen Hominiden erforderlich machten (Rosati, 2017). Dies habe einen starken evolutiven „Druck“ auf die Flexibilisierung des Verhaltens ausgeübt, zumal wir keine hoch spezialisierten biologischen Anpassungen haben, sondern eher Generalisten sind. Andere Autoren betonen die Bedeutung der Gruppenbildung, die Kommunikation und Lernfähigkeit zu Schlüsselqualifikationen gemacht haben (Herrmann et al., 2007; van Schaik und Burkart, 2011). Damit entstanden eine immer differenziertere Sprache und eine Erweiterung des inneren Vorstellungsraums, also des Denkens. Von dort ist es nicht weit bis zur Ausbildung von Kultur, also einem kollektiven System von Wissen und Praktiken, das in einem oft „kulturelle Evolution“ genannten Prozess eine Eigendynamik entfaltet hat und heute unser Denken prägt. Die unterschiedliche Geschwindigkeit von biologischer und kultureller Evolution führt dazu, dass wir Technik, Kunst und Kultur auf heutigem Niveau mit einem Gehirn bewältigen, dessen moderne Struktur sich vor 200.000 bis ca. 35.000 Jahren herausgebildet hat (Hauser, et al., 2014; Stern, 2017; Neubauer et al., 2018). Es ist für unser Selbstverständnis und für den Umgang miteinander hilfreich, sich hier und da an die enge Verwandtschaft zu unseren frühen, in der Natur lebenden Vettern zu erinnern.

Nun ist die Existenz eines Nervensystems wohl Voraussetzung für „biologische Intelligenz“ (dieser Ausdruck hat sich zur Abgrenzung von maschineller oder künstlicher Intelligenz eingebürgert). Nervengewebe ist aber, wie unser Darmnervensystem zeigt, nicht unbedingt hinreichend für „höhere“ Formen der Kognition. Damit sind wir bei der Frage, welche Ausprägungen von Intelligenz wir bei

verschiedenen Tieren finden und wie diese mit der Struktur ihres jeweiligen Nervensystems zusammenhängen. Diese Frage gehört zu den spannendsten Problemen der Neurobiologie, und hat wie zu erwarten keine einfache Antwort. Schon hinter dem unscheinbaren Wort „höher" verbirgt sich ein hierarchisches Konzept des Lebenden, das ideengeschichtlich als *Scala naturae* Karriere gemacht hat. Es ist auch in der modernen Wissenschaft noch wirksam. Aber können wir wirklich eine aufsteigende Leiter von Intelligenzen nachweisen, die bei der Seescheidenlarve beginnt und über Insekten, Frösche, Hunde und Affen bis zum Menschen führt? Woran orientiert sich eine solche Hierarchie, wie sind die Unterschiede messbar? Schimmert hier auf dem Umweg über die Neurobiologie der Wunsch durch, der Mensch möge sich doch letztlich als Krone der Schöpfung erweisen? Übersehen wir, welche Komplexität andere Lebensformen ausgebildet haben – die damit eben nur anders an die Umwelt angepasst sind, aber in keiner sinnvollen Hierarchie unterhalb des Menschen stehen? Die Antwort auf diese Fragen ist, wie so oft, eher ein informiertes „Jein" als eine plakative Schlagzeile.

Tiere zeigen ein sehr breites Spektrum von Verhaltensweisen zu denen auch flexible Problemlösungen gehören, die nach unserer Definition eindeutig auf Intelligenz hinweisen. Da die sprachliche Ebene weitestgehend fehlt, lässt sich tierische Intelligenz nur auf der Verhaltensebene messen. Hierzu werden verschiedene Kategorien herangezogen, die jeweils in Experimenten oder Beobachtungsstudien operationalisiert werden müssen (Manger, 2013). Etablierte Kriterien für Intelligenz sind beispielsweise Werkzeuggebrauch, Verständnis für Quantitäten, komplexe soziale Gefüge, Lernen durch Imitation, innovative Problemlösungen und Einsicht in die Intentionen anderer. In experimentellen Kontexten wird zusätzlich die Fähigkeit zum Erlernen von Sprache getestet sowie die Erkenntnis des eigenen Bildes im Spiegel. Letzteres wird als Hinweis auf ein Selbstbewusstsein interpretiert und ist nur bei wenigen Spezies nachweisbar (Elefanten, Delphine, Menschenaffen, bestimmte Vögel).

In all diesen Kategorien zeigen Tiere erstaunliche Leistungen, denen man schwer das Prädikat intelligenten Verhaltens absprechen kann. Besonders herausragende kognitive Fähigkeiten findet man bei den Menschenaffen, aber auch bei Raben- und Papageienvögeln. Um die geistige Leistungsfähigkeit von Walen und Delphinen hat sich dagegen ein Disput entzündet, möglicherweise auch als Reaktion auf die manchmal etwas übersteigerte Betonung der „Weisheit der Wale" in der Populärliteratur. Fachleute zeichnen ein differenziertes Bild, das auf unser

noch lückenhaftes Wissen verweist sowie auf die Unterschiede zwischen Zahn- und Bartenwalen (erstere sind vermutlich deutlich intelligenter). Insgesamt besteht aber kein Zweifel, dass es sehr flexibles Verhalten und Kognition bei Walen und Delphinen gibt (Manger, 2013; Güntürkün, 2014). Ebenso wenig lässt sich übersehen, dass alle, auch die intelligentesten Tiere, einen großen Abstand zu den Leistungen des Menschen haben. Besonders bei sprachlichen Fähigkeiten, Abstraktionen und Werkzeuggebrauch sind wir unseren Verwandten sehr deutlich überlegen.

3 Gibt es „intelligente Gehirne“?

3.1 Is big beautiful?

Zweifellos besteht ein Zusammenhang zwischen biologischer Intelligenz und dem Gehirn. Konkret stellt sich damit die Frage, wodurch sich die Hirne verschieden intelligenter Tiere und des Menschen unterscheiden. Kann man aus der Hirnstruktur direkt auf die Intelligenz eines Tiers schließen? Ist der Zusammenhang kausal? Verstehen wir vielleicht sogar die zugrunde liegenden neuronalen Prozesse? Ist der Mensch graduell oder kategorial vom Tier zu unterscheiden? Die Fragen nach der biologischen Bedingtheit des Geistigen und nach der Sonderstellung des Menschen zieht sich durch die gesamte Geschichte der Hirnforschung. So wurde der Arzt und frühe Hirnforscher Franz Joseph Gall zu Beginn des 19. Jahrhunderts mit dem Vorwurf des Materialismus konfrontiert, als er – allerdings nach heutigem Verständnis pseudowissenschaftlich – versuchte, Persönlichkeitsmerkmale und Begabungen in bestimmten Regionen des Gehirns zu verorten. Zu dem Widerstand gegen seine Lehre (der 1802 zu einem Lehrverbot durch den österreichischen Kaiser Franz II. führte) trug besonders bei, dass er die meisten „Fakultäten“ (Fähigkeiten) sowohl bei Menschen wie bei Tieren verortete. Diese Verwandtschaft in geistigen Dingen war skandalös! Die moderne neurobiologische Intelligenzforschung stellt die grundsätzliche Verwandtschaft zwischen Menschen und Tieren nicht mehr in Frage. Die Materialismus-Debatte lebt allerdings in anderen Kontexten wie der Frage nach der Willensfreiheit oder nach dem Bewusstsein von Maschinen weiter.

Bezüglich der Intelligenz erweist es sich als äußerst schwierig, präzise diejenigen Eigenschaften von Gehirnen zu definieren, die mit den kognitiven Fähigkeiten und der Flexibilität des Verhaltens verschiedener Tierarten und des Menschen

korrelieren (für eine Übersicht siehe Dicke und Roth, 2016). Frühe Versuche gingen einfach vom Hirngewicht aus. Tatsächlich kann man bei Menschen und ihre nächsten Verwandten eine Abstufung finden, die gut mit der Einschätzung der Intelligenz korreliert – mit 1200 bis 1400 g stehen wir in dieser Gruppe an der Spitze, gefolgt von Menschenaffen mit bis knapp 600 g, und weiteren Affen mit meist unter 200 g. Schädelfunde von Hominiden legen zudem ein Hirnwachstum in der Evolution des Menschen nahe, wobei der Neanderthaler sogar ein etwas schwereres Gehirn hatte als der moderne Mensch. Sobald wir aber breiter ins Tierreich schauen hinken die Vergleiche – so sind z. B. die Gehirne von Elefanten, Walrossen und Walen deutlich schwerer als die des Menschen. Nach Dicke und Roth (2016) liegen die Hirngewichte von Säugetieren zwischen 0,074 (Bambusfledermaus) und 10.000 g (Pottwal, Orca). Es ist unwahrscheinlich, dass dieser über 100.000-fache Unterschied proportional zu ihrer unterschiedlichen Intelligenz ist. Offenbar spielt das Körpergewicht eine wichtige Rolle – die Korrelation zwischen beiden Größen ist so stark, dass die Unterschiede im Hirngewicht zu 90% durch die Unterschiede im Körpergewicht erklärt werden können. Man hat versucht, diesen Effekt durch den Quotienten aus Hirngewicht/Körpergewicht herauszurechnen, aber auch so kam kein brauchbares Maß heraus. Der Blauwal rutscht nun mit einem Hirn von 0.005% des Körpergewichts auf einen der letzten Plätze, während kleine Säuger bei 10% und der Mensch bei 2% liegen. Der Grund hierfür ist, dass das Hirngewicht nicht linear mit dem Körpergewicht der Spezies ansteigt, sondern langsamer. Der von H. Jerison vorgeschlagene Enzephalisationsquotient berücksichtigt diesen Zusammenhang innerhalb jeder Klasse von Tieren und fragt, ob bei einer bestimmten Tierart das Hirngewicht unter- oder oberhalb des für diese Gruppe charakteristischen Trends liegt (Jerison, 1973). Diese vergleichende Zahl korreliert besser mit der beobachteten Verhaltensflexibilität bzw. Intelligenz. Der Mensch steht nun mit einem 7-fach über den Erwartungswert erhöhten relativen Hirngewicht an der Spitze. Aber auch dieses Maß ist nicht perfekt, sondern zeigt bei mehreren Spezies deutliche Abweichungen von einer plausiblen Anordnung. Kurz: Simple Maße für die Hirnleistung scheint es nicht zu geben, schon gar nicht nach dem Motto „big is intelligent“.

Die Forschung ist deshalb vor Allem in zwei Richtungen weitergegangen: erstens hat man gefragt, welche Teile des Gehirns die kognitive Leistungsfähigkeit besonders stark beeinflussen, und zweitens wurde versucht, Intelligenz mit der Feinstruktur der neuronalen Netzwerke zu korrelieren (Kaas und Herculano-

Houzel, 2017). Der erste Ansatz führt, nicht überraschend, zu einer Betonung des Neokortex (Hirnmantel oder Hirnrinde), der oft stark vereinfachend schlechthin mit Denken und Bewusstsein identifiziert wird. Tatsächlich ist das Volumen des Kortex beim Menschen im Vergleich zu anderen Spezies überproportional groß. Dies trifft noch mehr auf den frontalen Kortex zu, der bei Primaten und besonders beim Menschen ganz besonders ausgeprägt ist (Semendeferi et al., 2002). Andere Autoren betonen zusätzlich die Bedeutung von Arealen im Scheitellappen und sprechen vom fronto-parietalen Komplex als entscheidendes Merkmal der kortikalen Leistungsfähigkeit beim Menschen. Sehr vergröbert und bei aller Skepsis gegen zu schematische Lokalisationstheorien kann man sagen, dass (prä)-frontale Hirnteile besonders für Handeln, Entscheiden und rationale Impulskontrolle stehen, während der Parietalkortex multimodale sensorische und motorische Impulse integriert und auf diese Weise unser Bild vom aktuellen Kontext generiert. Beiden Arealen ist gemeinsam, dass sie als so genannte Assoziationskortizes keine direkten Beziehungen zu Sinnessystemen oder motorischen Zentren haben. Das relative Ausmaß dieser Assoziationsareale ist beim Menschen außergewöhnlich hoch, während Tiere mit eingeschränkterem Verhaltensrepertoire überwiegend direkt mit der Peripherie verbundene primär-sensorische oder -motorische Areale haben (Abb. 1). Sie liegen gewissermaßen oberhalb dieser peripheren Systeme, indem sie Impulse aus anderen Kortexarealen integrieren und auch nur auf dem Umweg über andere Kortexareale auf das Verhalten wirken. Sie bieten also eine zusätzliche Ebene an neuronaler Leistung, deren mentales Korrelat sich bildhaft als der von unmittelbarem Wahrnehmen und Handeln befreite „Innenraum“ der Kognition beschreiben lässt.

Aber Vorsicht: In derartigen Formulierungen schwingt leicht eine Gleichsetzung von Hirnstrukturen und geistigen Prozessen mit, die den ganz verschiedenen begrifflichen Kategorien nicht angemessen ist. Ebenso falsch ist es, Funktionen zu schematisch bestimmten Hirnregionen zuzuordnen. Das Gehirn arbeitet nach heutigem Verständnis als Netzwerk, so dass bei allen relevanten kognitiven Prozessen zahlreiche Regionen in komplexen raum-zeitlichen Aktivitätsmustern zusammenspielen. Man kann einzelnen Regionen aus diesem Grund bestenfalls eine besondere Relevanz für bestimmte Funktionen zuschreiben, aber niemals eine Identität, die weder den räumlich verteilten Funktionen noch der zeitlichen Dynamik ständig wechselnder Aktivitätsmuster gerecht würde. Neben dem Kortex sollten auch andere Bereiche des Gehirns nicht unterschätzt werden. Aus der Be-

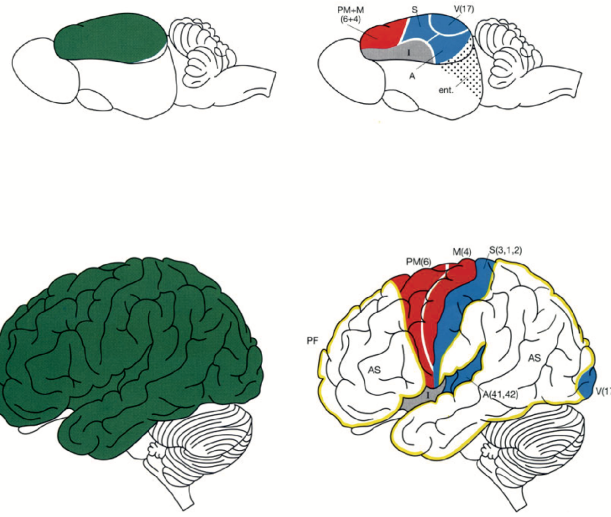


Abbildung 1: Vergleich des Gehirns eines Menschen und eines Igels. In den schematischen Skizzen ist der Neokortex jeweils grün gefärbt, motorische Areale rot und sensorische blau. Im linken Teil der Abbildung fällt die Dominanz des Neokortex beim Menschen auf, dessen Fläche durch die Faltung noch verstärkt wird. Im rechten Teil wird deutlich, dass der Kortex des Igels überwiegend aus Arealen besteht, die direkte sensorische oder motorische Funktionen haben. Beim Menschen ist dagegen der überwiegende Teil des Kortex als Assoziationskortex mit nicht direkt mit peripheren Sensoren oder Effektoren verbunden (weiße Areale). Nachdruck aus Hofman, 2019, mit freundlicher Genehmigung des Verlags.

obachtung von Patienten gibt es zum Beispiel Hinweise, dass auch das Kleinhirn (Zerebellum) neben seiner unbestrittenen motorischen Funktion wesentlich zur kognitiven Leistungsfähigkeit beiträgt (Schmahmann, 2010). Ähnlich verhält es sich mit den Basalganglien, einem Komplex verschiedener subkortikaler Kerngebiete, der klinisch primär mit Bewegungsstörungen in Zusammenhang gebracht wird, aber ebenso wichtig für die Initiierung und Auswahl von Handlungsoptionen und für die Flexibilität des Handelns ist. Neurodegenerative Erkrankungen des Kleinhirns oder der Basalganglien können neben eher somatischen neurologischen Symptomen auch Intelligenzminderungen bis hin zur Demenz verursachen.

3.2 Der Blick ins Innenleben des Gehirns: neuronale Netzwerke

Anatomische Unterteilungen des Gehirns liefern also bereits einige Hinweise für die strukturellen Grundlagen der Intelligenz, allerdings ohne die entstehenden Leistungen überzeugend zu erklären. Weiterführend ist hierfür die komplementäre Forschung an der Feinstruktur der neuronalen Netzwerke (Sporns et al., 2000). Der Kortex ist bei allen Säugetieren grundsätzlich ähnlich aufgebaut, nämlich in (meist 6) Schichten von Nervenzellen. Es gibt allerdings erhebliche Unterschiede zwischen den Spezies sowie innerhalb jeder Art zwischen verschiedenen funktionell spezialisierten Arealen. Dies zeigt sich in unterschiedlich dicken und zellreichen Schichten verschiedener kortikaler Regionen, was bereits vor über 100 Jahren beschrieben und hypothetisch als funktionelle Spezialisierung gedeutet wurde (Brodmann, 1909). Für die Überlegungen zur Intelligenz sind verschiedene anatomische Parameter von Bedeutung: die Anzahl (kortikaler) Neurone, ihre Packungsdichte, die Anzahl der Synapsen, und nicht zuletzt die Dicke der Axone, also der neuronalen Fortsätze, die elektrische Impulse zwischen den Nervenzellen übertragen. Letzteres mag zunächst überraschen, aber die Dicke dieser „Kabel“ bestimmt ihre Leitungsgeschwindigkeit, und dies scheint einen entscheidenden Vorteil bei der schnellen und komplexen Informationsverarbeitung in neuronalen Netzwerken zu bieten. Zur Leitungsgeschwindigkeit tragen auch isolierende Umhüllungen der Axone durch bestimmte Gliazellen bei. Es gibt verschiedene Typen dieser Zellen, die früher als Stützzellen bezeichnet und bezüglich ihrer funktionellen Bedeutung sträflich vernachlässigt wurden. Tatsächlich könnten die nicht-neuronalen Zellen des Gehirns einen wichtigen Beitrag zur Intelligenz leisten, der durch die informationstheoretisch geprägte Metaphorik der neuronalen „Verschaltungen“ und „Signale“ vielleicht unterschätzt wird.

Multipliziert man die Fläche und Dicke des Kortex mit der durchschnittlichen Neuronendichte, so kommt man auf die Gesamtzahl von Neuronen, die beim Menschen mit ca. 15 Milliarden maximal ist, gefolgt von Elefanten, Menschenaffen und Orcas. Allerdings sind diese Zahlen mit großen methodischen Unsicherheiten versehen. Ähnliches gilt für die Synapsenzahl, wobei klar ist, dass einzelne Nervenzellen typischerweise tausende oder zehntausende von Synapsen anderer Zellen empfangen, was die enorme Komplexität der neuronalen Netzwerke unterstreicht. Mit modernsten Methoden versucht man heute, durch serielle elektronenmikroskopische Schnitte einzelne Hirnregionen möglichst vollständig bezüglich ihrer Mikrostruktur zu rekonstruieren. Dies erweist sich allerdings als eine große expe-

rimentelle und datenanalytische Herausforderung, und bis zu einer vergleichenden Übersicht aller relevanten Kortexareale bei zahlreichen Spezies ist es noch ein sehr weiter Weg.

Mikro- und Makrostruktur sowie die Funktion des Kortex stehen übrigens in mehrfacher Hinsicht miteinander in Beziehung. Weithin bekannt ist die starke Faltung des Kortex beim Menschen, die zu „Hirnwindungen" und „Hirnfurchen" führt (wissenschaftlich als *Gyri* und *Sulci* bezeichnet). Diese Form ist wahrscheinlich eine Anpassung an die evolutive Zunahme der Gesamtfläche des Kortex, die im begrenzten Raum der Schädelkapsel Platz finden muss (der wiederum durch ganz andere Einflussgrößen wie den weiblichen Geburtskanal beschränkt sein könnte). Die Faltung des Kortex erlaubt eine besonders hohe lokale Konnektivität, weil Nervenzellen dadurch näher zusammengebracht werden (Herculano-Houzel et al., 2010). Kurze Leitungswege erhöhen wiederum die Verarbeitungsgeschwindigkeit in den Netzwerken, die wir oben schon als wichtigen Parameter identifiziert haben. Ausreichende Konnektivität bei kurzen Wegen scheint bei Walen zum begrenzenden Faktor zu werden, so dass diese riesigen Tiere einen recht dünnen Kortex und viel darunter liegende weiße Substanz (das makroskopische Korrelat der Axonbündel) aufweisen. Diese Architektur wird teilweise als Argument gegen übertriebene Vorstellungen von der Intelligenz der Wale ins Feld geführt. Charakteristisch ist schließlich die modulare Struktur der neuronalen Netzwerke: Lokal sind die Nervenzellen meist sehr stark miteinander vernetzt und bilden funktionelle Einheiten, während Axone zu anderen Modulen deutlich seltener sind (Sporns und Betzel, 2016). Diese Beschränkung ist einerseits eine Notwendigkeit – im Extremfall, dass jedes Neuron mit jedem anderen Neuron direkt verbunden wäre, würde das Volumen der weißen Substanz jedes erdenkliche Maß sprengen. Andererseits lässt sich mit den Methoden der „Network Science" zeigen, dass die Kombination hoher lokaler mit einer deutlich niedrigeren langreichweitigen Konnektivität eine sehr effiziente Kommunikation über das gesamte System hinweg erlaubt. Dieser *small world* Effekt zeigt sich eindrucksvoll in sozialen Netzwerken, die ähnlich organisiert sind. Wenn man im Ausland eine beliebige Person trifft stellt man nicht selten fest, dass man eine gemeinsame Bekannte hat. Faktisch sind wir weltweit über weniger als 10 Zwischenstationen mit den allermeisten anderen Menschen verbunden.

Eine weitere Konsequenz der extrem gesteigerten lokalen Konnektivität und des modularen Aufbaus ist die strukturelle und funktionelle Spezialisierung ver-

schiedener Areale (Brodmann, 1909; Dicke und Roth, 2016; Hofman, 2019), die Grundlage für die oben erwähnten Lokalisationstheorien geistiger Prozesse ist. Hier zeigen sich charakteristische Unterschiede zwischen den Spezies, die zum Teil direkt mit ihrem je verschiedenen Verhalten in ihrer Umwelt in Verbindung gebracht werden können. Am leichtesten sieht man das an denjenigen Arealen, die eng an sensorische oder motorische Funktionen gekoppelt sind. Nicht umsonst sind laut- und sprachverarbeitende Kortexareale beim Menschen besonders ausgeprägt, bei Katzen dominieren visuelle Kortexareale, viele Nagetiere haben dagegen eine relativ *große* Repräsentation von olfaktorischen Kortizes. Möglicherweise ist die oben beschriebene Modularisierung und Spezialisierung von Kortexarealen auch der Hintergrund der Hemisphärenasymmetrie beim Menschen, bei der z. B. Sprachverarbeitung ganz überwiegend links stattfindet. Bei Tieren mit weniger spezialisierten kognitiven Fähigkeiten, z. B. bei Ratten, ist diese Asymmetrie wesentlich schwächer.

Alle Theorien zum Zusammenhang zwischen Kortex-Architektur und Intelligenz stehen vor einem massiven Problem: Vögel. Die Gehirne dieser Tiere haben auf den ersten und zweiten Blick wenige Gemeinsamkeiten mit denen der Säuger, vor allem haben sie keinen typischen Neokortex (Abb. 2).

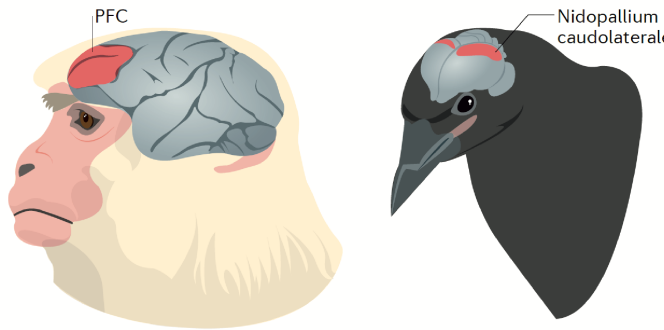


Abbildung 2: Unterschiedliche Hirnarchitekturen bei vergleichbaren Leistungen. Intelligentes Verhalten wie Werkzeuggebrauch, flexible Problemlösung, komplexe Kommunikation und Umgang mit quantitativen Größen sind bei Affen und Rabenvögeln vergleichbar. Dennoch unterscheiden sich ihre Gehirne grundlegend im Aufbau. Erst in jüngerer Zeit wurde das weit hinten liegende Areal des „Nidopallium caudolaterale“ als funktionell äquivalent zum präfrontalen Kortex der Primaten identifiziert. Nachdruck aus Nieder, 2016, mit freundlicher Genehmigung des Verlags.

Trotzdem erreichen Rabenvögel (*Corvidae*) und Papageien (*Psittaciformes*) die Intelligenz von Menschenaffen. Sie benutzen Werkzeuge, können eine hoch differenzierte sprachliche Kommunikation erlernen, erweisen sich in der Natur wie im Labor als hochkreative Problemlöser und sind erstaunlich gut im „Rechnen" (Nieder, 2020). Wie kann es sein, dass solche kognitiven Leistungen mit einem ganz anders gearteten Gehirn möglich sind? Neuere Forschungen tendieren dahin, dass der Hirnmantel (*Nidopallium*) der Vögel hinsichtlich neuronaler Konnektivität und Effizienz doch wesentliche Eigenschaften des Neokortex von Säugetieren aufweist (Stacho et al., 2020; Herculano-Houzel, 2020). Insbesondere das so genannte *Nidopallium caudolaterale* der Vögel scheint für die Organisation komplexer und flexibler Verhaltensweisen unabdingbar. Und genau in diesem Netzwerk finden sich Zelltypen und Konnektivitätsmuster, die denen des (frontalen) Kortex von Primaten gleichen. Aus Ähnlichkeiten und Abweichungen kann die vergleichende Intelligenzforschung wertvolle Hinweise auf die biologischen Bedingungen von Intelligenz gewinnen. Ähnliches gilt für Berichte von Menschen mit massiven Fehlbildungen des Kortex, die trotzdem eine relativ hohe Intelligenz aufweisen und ihr Leben bestens meistern (Feuillet et al., 2007). Leider sind solche Fälle die Ausnahme, während viele kortikale Läsionen und Reifungsstörungen mit erheblicher Intelligenzminderung einhergehen.

3.3 Krone der Schöpfung?

Im Zusammenhang mit Intelligenz und hochstehenden kulturellen Leistungen ist seit Langem die besondere Größe und Bedeutung des Frontalhirns beim Menschen betont worden. Tatsächlich lässt sich für die Größe des frontalen, und besonders des präfrontalen Kortex eine Reihung aufstellen, die in vieler Hinsicht unserer Intuition von Intelligenz und kognitiver Flexibilität nahekommt. Der präfrontale Kortex des Menschen zeichnet auch bezüglich seiner Netzwerkstruktur aus, nämlich durch eine besonders zellreiche Schicht 4 (so genannte granuläre Schicht nach dem gekörnt erscheinenden mikroskopischen Bild; Elston et al., 2006; Donahue et al., 2018). Die zunehmende „Frontalisation" wird häufig als Beleg für die evolutive Sonderstellung des Menschen dargestellt, wobei wir schon darauf hingewiesen haben, dass Lokalisationstheorien geistiger Funktionen nicht unkritisch angewandt werden sollten, ebenso wie die anthropozentrische Idee einer *Scala naturae*. Die Lokalisation aller „höheren" geistigen und sozialen Errungenschaften im Frontallappen hat im zwanzigsten Jahrhundert sogar zu einem medizinischen

Exzess geführt. Seit den dreißiger Jahren wurden die schwer behandelbaren Patienten mit Schizophrenie, Zwangsstörungen und anderen Erkrankungen zu Tausenden „psychochirurgisch“ mittels Leukotomie („Durchschneidung der weißen Substanz“) oder Lobotomie („Lappenabtrennung“) behandelt. Dabei wurden die Verbindungen des Frontalhirns mit dem Thalamus und mit anderen Kortexregionen großflächig durchtrennt. Diese aus heutiger Sicht brutale und verstümmelnde Methode wurde sogar 1949 mit dem Nobelpreis für den Portugiesen António Egas Moniz geadelt, und sie galt eine Zeitlang als große therapeutische Hoffnung. Dass die Patienten danach lebenslang unter den Folgen schwerer Persönlichkeits- und Antriebsstörungen zu leiden hatten führte erst in den sechziger und siebziger Jahren zum Ende dieses fatalen Irrwegs.

Bis heute findet sich in der Fachliteratur über den Frontalkortex das aristotelische Ideal des Menschen als *zoon logicon* (oder *animal rationale*) wieder, einschließlich moralisierender Äußerungen, nach denen nur ein intakter (prä)-frontaler Kortex uns davon abhält, triebhaft, kriminell, übergriffig und gemeinschaftsschädlich zu handeln (Wise, 2008). Er ist als Organ der „exekutiven Kontrolle“ eng mit Problemlösungsstrategien und also der menschlichen Intelligenz verbunden. Die Hervorhebung des präfrontalen Kortex ist sicher oft überzeichnet, aber nicht völlig unplausibel, da Läsionen des präfrontalen Kortex tatsächlich eine verminderte Impulskontrolle, Änderungen der Persönlichkeit und Verminderung der Fähigkeit zu rationalen Entscheidungen zur Folge haben können. Kritisch sollte man allerdings einfordern, die kategoriale Unterscheidung zwischen moralischen Werten und hirnbedingten Verhaltensdispositionen zu beachten. Das denkende, entscheidende und handelnde Subjekt ist eine Person, und nicht ein Gehirn (Janich, 2009). Allerdings sind Denken, Entscheiden und Handeln des Menschen nicht von ihren biologischen Grundlagen unabhängig, und diese sind untrennbar mit dem Gehirn verbunden.

Könnte die weitere Evolution den Menschen zu einem Wesen mit einem noch größeren und effizienteren Kortex und noch größeren intellektuellen Fähigkeiten machen? Dem weiteren Wachstum scheinen relativ enge Grenzen gesetzt - schon beim jetzigen Menschen ist die Zunahme von Kortexvolumen und -konnektivität mit einem erheblichen, überproportionalen Zuwachs an weißer Substanz (also den „Kabeln“) erkauft worden (Rilling, 2014). Dies lässt sich nicht beliebig steigern, wie man an den besonders dünnen Kortizes und dem großen Volumen der weißen Substanz bei Walen sehen kann. Außerdem verbraucht das Gehirn

bei etwa 2% Gewichtsanteil bereits jetzt über 15% unserer Energie, und seine Reifung dauert bis in die dritte Lebensdekade. Theoretiker sehen voraus, dass der intensive Metabolismus des Gehirns bei weiterer Zunahme echte Probleme der Wärmeabfuhr verursachen wird (Bullmore und Sporns, 2012; Hofman, 2009) - so werden Fragen von Raumbedarf, Energieverbrauch und Temperaturregulation zu limitierenden Faktoren, ganz ähnlich wie in der Computertechnik.

4 Feine Unterschiede – warum sind wir nicht alle gleich klug?

4.1 Kluge Köpfe?

Aus dem Bisherigen ergibt sich eine komplexe Beziehung zwischen Hirnstruktur und -funktion verschiedener Spezies und ihrer relativen kognitiven Leistungsfähigkeit. Wie sieht es aber mit der Varianz innerhalb der menschlichen Spezies aus? Drei Fragen haben die Forschung seit Langem beschäftigt. Gibt es ein strukturelles oder neurophysiologisches Korrelat unterschiedlich hoher Intelligenz bei Menschen? Sind unterschiedliche Intelligenzniveaus angeboren oder erworben? Kann man die Intelligenz gezielt fördern oder schädigen?

Intelligenz ist ein Konstrukt der Psychologie, also nicht primär eine physische Eigenschaft des Gehirns. Dennoch: So wie es Unterschiede in Größe und Aufbau des Gehirns verschieden intelligenter Spezies gibt ist auch zu erwarten, dass das psychologische Merkmal der Intelligenz nicht vom Gehirn unabhängig ist. In schrecklicher Weise zeigt sich dies bei neurodegenerativen Erkrankungen wie der Alzheimer-Krankheit, bei der mit dem Nervengewebe die Intelligenz unwiederbringlich verlorengeht. Ähnliches gilt für viele weitere angeborene oder erworbene Störungen des Gehirns, wobei die Auswirkungen auf die Intelligenz nicht nur vom Ausmaß, sondern auch stark vom Ort der Schädigung abhängen. Die isolierte Läsion eines primären, direkt mit einem Sinnes- oder Motorsystem verbundenen Areals kann durchaus auf den Ausfall dieser einen Funktion beschränkt bleiben, wie zum Beispiel nach einer Schädigung des primären visuellen Kortex. Die resultierende – meist partielle – Anopsie macht die bewusste Wahrnehmung von Objekten im betroffenen Ausschnitt des Gesichtsfelds unmöglich, alle anderen Fähigkeiten bleiben aber erhalten. Eine diffuse Schädigung assoziativer („höherer“) Kortexareale (z. B. Frontal- und Parietalhirn), zum Beispiel nach einem länger anhaltenden Sauerstoffmangel, hat dagegen in der Regel stärkere Auswirkungen auf die Intelligenz. Aus der mit Läsionen einhergehenden Psychopathologie kön-

nen wir also indirekt auf den unterschiedlich wichtigen Beitrag verschiedener Hirnregionen zur Intelligenz schließen. Die Neurophysiologie und -psychologie zieht häufig solche Schlüsse: „Bei Ausfall von X ist die Funktion Y regelmäßig betroffen, also ist X wichtig für Y". Dieses Argument zeigt aber nur eine notwendige Bedingung an. Es bedeutet keineswegs, dass die Funktion Y allein durch X verursacht würde oder gar identisch mit X ist. Sie kann und wird in aller Regel multikausal entstehen, also in einem systemischen Geschehen, das am besten als komplexes Netzwerk von Kausalbeziehungen zu beschreiben ist. Dabei gibt es nicht nur aufwärts gerichtete Ursache-Wirkungs-Ketten (Gene → Moleküle → Zellen → Netzwerke → Gehirn → Verhalten), sondern auch „Abwärtskausalität" von komplexen zu einfacheren Ebenen. Beispielsweise verursachen soziale Interaktionen durchaus Veränderungen auf Ebene der Zellen und Synapsen. Aus all diesen Gründen ist die Frage nach dem einen und genau benennbaren Ort der Intelligenz falsch gestellt.

Trotz der großen Komplexität gibt es aber identifizierbare strukturelle und funktionelle Einflussfaktoren auf die Intelligenz. Dazu gehört zunächst einmal die Größe des Gehirns, die wir schon beim Vergleich verschiedener Spezies als relevante, aber sehr grobe Messgröße kennen gelernt hatten. Versuche zur Korrelation von Intelligenz und Hirngröße reichen bis in den Beginn der humanen Neuropsychologie zurück. So publizierte etwa der britische Naturforscher Sir Francis Galton einen Aufsatz über „Head growth in students at the University of Cambridge" (Galton, 1888). Wie zu erwarten wird die Korrelation zwischen Hirnvolumen und Intelligenz beim Menschen stärker, wenn man anstelle des gesamten Gehirns auf den Kortex fokussiert, insbesondere auf die wichtigen frontalen und parietalen Assoziationsareale (Jung und Haier, 2007). Ein weiterer interessanter Zusammenhang konnte mit Methoden der funktionellen Bildgebung gezeigt werden, die heute ein dominanter Ansatz der kognitiven Neurowissenschaften ist. Bei der Lösung von Aufgaben korreliert der Energieverbrauch des Gehirns negativ mit der Intelligenz. Salopp gesagt: je intelligenter eine Person ist, umso weniger muss sie sich beim Problemlösen anstrengen. Es geht also offenbar um die Effizienz der Prozesse, ganz ähnlich wie ein trainierter Sportler eine Übung mit Leichtigkeit absolviert, während ein Untrainierter an seine Grenzen kommt (Neubauer und Fink, 2009). Neuere Studien mit hochauflösenden Verfahren weisen darauf hin, dass die Dichte an Zellfortsätzen im Kortex intelligenter Individuen geringer (!) ist als bei weniger Intelligenten (z. B. Genc et al., 2018; Abb. 3).

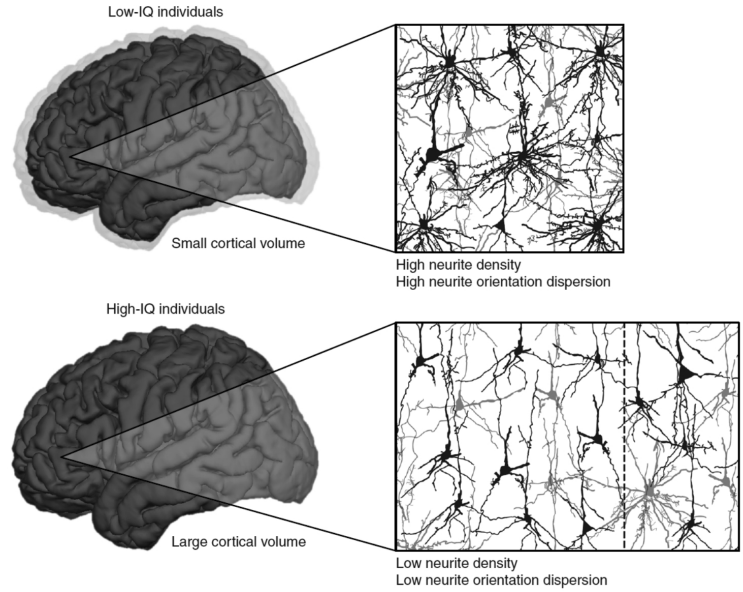


Abbildung 3: Individuelle Intelligenz und kortikale Netzwerke. Strukturelle Korrelate der Intelligenz sind weder zwischen noch innerhalb einer Spezies leicht zu definieren. Die Abbildung fasst Resultate einer neueren Studie zusammen, nach der Menschen mit höherer Intelligenz einen größeren Neokortex haben als Menschen mit geringerem IQ. In der Feinstruktur zeigt sich jedoch eine deutlich geringere Komplexität der neuronalen Fortsätze, an denen die Signalübertragung zwischen Nervenzellen stattfindet. Vermutlich sind in dem höher leistungsfähigen Gehirn selektiv die funktionell wichtigen Verbindungen gestärkt und besonders effizient angeordnet worden. Nachdruck aus Genc et al., 2018, unter ‚Creative Commons License'.

Dies deutet auf eine geringere synaptische Interaktion hin als bei weniger Intelligenten, was zunächst überrascht. Es könnte aber sein, dass die Leistungsfähigkeit des Kortex nicht einfach mit der Zell- und Synapsenzahl ansteigt, sondern dass in besonders leistungsfähigen Netzwerken nur diejenigen Verbindungen erhalten bleiben, die auch wirklich benötigt werden.

Es scheint also ein Optimum der Konnektivität zu geben, passend zum Prinzip des „sparse coding", nach dem in den neuronalen Netzwerken immer nur eine kleine Minderheit der Neurone aktiv ist. Tatsächlich entstehen während der Kindheitsentwicklung nicht einfach neue Synapsen, sondern wenig genutzte Verbindungen werden in großem Maß abgebaut – dieses synaptische „Pruning" wird

als erfahrungsabhängiger Reifungsprozess betrachtet, der dazu führt, dass nur die wirklich funktionell wichtigen Verbindungen erhalten bleiben. Diese notwendigen Umbauvorgänge auf Netzwerk-Ebene liefern eine physiologische Begründung für die Forderung, Kindern und Jugendlichen die Auseinandersetzung mit einer reichhaltigen, senso-motorisch und intellektuell förderlichen Umwelt zu ermöglichen. Das hat praktische Konsequenzen für die Ermutigung zu Erfahrungen jenseits zweidimensionaler Bildschirme, aber auch für die sehr konsequente Behandlung aller Sinnes- oder Bewegungseinschränkungen in der Kindheit (das Wort „doof" kommt von „taub" und spiegelt den irreversiblen Verlust an Bildungsfähigkeit schwerhöriger Kinder in einer Zeit, als dieses Leiden nicht erfolgreich behandelt werden konnte).

4.2 Nature via nurture

Es gibt also durchaus physische Korrelate der unterschiedlichen Intelligenz von Menschen, sowohl auf struktureller wie auf funktioneller Ebene. Das führt direkt zu der Frage, ob diese Eigenschaften angeboren sind oder durch Erfahrung und Übung geformt werden können. Das „nature-nurture" Problem beschäftigt Wissenschaft und Öffentlichkeit seit Langem, nicht zuletzt weil es große Auswirkungen auf unser Selbstverständnis und auf (bildungs)-politische Konzepte hat. Bekannt geworden sind die so genannten Zwillingstudien, in denen Kinder mit 100- oder 50-prozentig identischen Genomen verglichen wurden. Untersucht wurden dabei auch Zwillinge, die in unterschiedlichen Umgebungen aufgewachsen sind, z. B. durch Adoption, so dass man genetisch identische Menschen mit unterschiedlichen Erfahrungen vergleichen konnte. Insgesamt haben diese und andere Studien einen großen Einfluss der Gene auf die Intelligenz ergeben (mit großen Schwankungen der Abschätzungen zwischen etwa 30–80%). Allerdings muss diese Aussage durch mehrere Argumente relativiert werden. Erstens gibt es nicht „das" Intelligenzgen, sondern einzelne Genvarianten tragen immer nur minimal zur Erklärung von Intelligenzunterschieden bei, so dass es sich offenbar um eine komplexe, polygenetisch verursachte Eigenschaft handelt. Zweitens ist es so, dass die meisten untersuchten Zwillinge in einer gemeinsamen und sehr ähnlichen Umgebung aufwachsen sind. Dies gilt selbst bei adoptierten Kindern, die meist in Familien mit gehobenem Bildungsstand und mindestens mittleren Einkommensverhältnissen vermittelt wurden, also ebenfalls in ähnliche Verhältnisse. Bei gleichen Umweltbedingungen und Erfahrungen sind aber die dann noch verbleibenden Unterschiede naturgemäß

genetisch bedingt, so dass dieser Faktor wohl systematisch überschätzt wurde. Drittens ist es nach heutigem Verständnis nicht (oder nur in Ausnahmefällen) adäquat, genetische Faktoren als deterministisch anzusehen. Vielmehr ist es so, dass nicht nur die Gene den Organismus bestimmen, sondern dass die Interaktion eines Organismus mit der Umwelt auch Rückwirkungen auf die Expression, also gewissermaßen den Gebrauch, der genetischen Anlagen hat. Man spricht von Genregulation, epigenetischen Faktoren und Gen-Umwelt-Interaktionen. Daher hat der britische Autor Mat Ridley vorgeschlagen, anstelle einer *nature versus nurture* eine *nature via nurture*-Debatte zu führen (Ridley, 2003, zitiert nach Stern, 2017).

Variable Randbedingungen können also selbst bei gleichen Genen zu einer Varianz des resultierenden „Phänotyps" führen. Aus demselben Grund ist der statistisch messbare Einfluss der Gene in sozioökonomisch schwachen Schichten geringer als in reicheren Milieus. In den Mittelschichten der westlichen Industrieländer sind Ernährung, Zugang zu Bildung, Gesundheitsfürsorge usw. weitgehend einheitlich und zufriedenstellend gelöst. Also gibt es weniger umweltbedingte Varianz, so dass in diesen Gruppen die genetische Varianz stärkeren Einfluss hat. In ärmeren Gesellschaften sind dagegen die Unterschiede der Lebensbedingungen größer, so dass sich diese Faktoren stärker auswirken. Auch dass man bei älteren Menschen eine stärkere genetische Komponente findet als bei jungen ist so zu erklären – ältere Personen haben stabilere und weniger unterschiedliche Lebenssituationen als Jugendliche. Die Frage, ob unsere Intelligenz durch die Gene bestimmt wird, erweist sich somit als interessant, vielschichtig und weniger „bedrohlich" für den Wunsch nach Formbarkeit von Intelligenz, als man annehmen könnte. Trotz und mit allen genetisch vorgegebenen Randbedingungen ist das Gehirn plastisch und kann sich je nach Umgebung und Erfahrungen besser oder schlechter entwickeln. Das gilt ganz besonders in den ersten Lebensjahren, in denen man also ganz besonders auf gute Bedingungen achten sollte (Stern, 2017).

Damit sind wir bei der letzten Frage: Was können wir tun, um Intelligenz zu fördern, und welche Fehler sollten vermieden werden? Auch hier beginnen wir mit einem Blick in die Pathologie: Schwere Mangelsituationen können die Intelligenz eines Kindes schon während der Embryonalentwicklung senken – ein wichtiges Beispiel hierfür ist Jodmangel, der zum früher so genannten Kretinismus mit geistiger Retardierung führte und heute eigentlich durch entsprechende Prophylaxe nicht mehr auftreten dürfte. Andere frühkindliche Schadensmechanismen sind

Alkohol- oder (in diesem Punkt weniger dramatisch) Tabakkonsum der Schwangeren, aber auch Unterernährung oder psychosoziale Vernachlässigung von Kindern nach der Geburt. Als Extremfall sei an den Hospitalismus vernachlässigter Heimkinder erinnert, deren Intellekt und Sozialverhalten durch Reizdeprivation und fehlenden Kontakt schwer geschädigt werden. Zuwendung, Stimulation durch Neues, vielfältige Anreize und Ermutigung zu Aktivität und Lernen sind aber auch im normalen Leben nicht überall gleich verteilt, und sie scheinen wesentliche Determinanten der Intelligenzentwicklung von Kindern zu sein. Dazu gehört auch die frühe sprachliche Förderung, die in gebildeten Familien mit hoher Zuwendung automatisch erfolgen wird, in anderen Umgebungen aber eben nicht. Durch schlechte Startbedingungen entstehen Benachteiligungen, besonders für Kinder aus sozioökonomisch schwachen Gesellschaftsschichten. Sie können nur durch intensive institutionelle Förderung ausgeglichen werden, die früh einsetzen muss, denn das einmal Versäumte lässt sich nur mühsam und oft nicht vollständig aufholen. Das Sprichwort „Was Hänschen nicht lernt, lernt Hans nimmermehr" ist fatalistischer als die moderne Neurowissenschaft, Pädagogik und Psychologie akzeptieren kann und sollte, aber es ist eben auch nicht ganz falsch.

Zusammengefasst: Die teilweise genetisch angelegte Intelligenz kann sich erst durch gute physische Bedingungen, vielfältige Reize und förderliche soziale Interaktionen voll entfalten, und dies geschieht ganz besonders in den ersten Lebensjahren. Dass diese gut belegte Einsicht Folgen für die Ausgestaltung eines chancengerechten Bildungs-, Sozial- und Gesundheitssystemen haben sollte versteht sich.

Literatur

Brenner ED, Stahlberg R, Mancuso S, Vivanco J, Baluska F, van Volkenburgh E (2006) Plant neurobiology: an integrated view of plant signaling. Trends Plant Sci 11:413–419.

Brodmann K (1909) Vergleichende Lokalisationslehre der Grosshirnrinde in ihren Prinzipien dargestellt auf Grund des Zellenbaues. Barth, Leipzig.

Bullmore E, Sporns O (2012) The economy of brain network organization. Nat. Rev. Neurosci 13:336–349.

Dicke U, Roth G (2016) Neuronal factors determining high intelligence. Philos Trans R Soc Lond Ser B 371:20150180.

Donahue CJ, Glasser MF, Preuss TM, Rilling JK, Van Essen DC (2018) Quantitative assessment of prefrontal cortex in humans relative to nonhuman primates. Proc Natl Acad Sci US. 115:E5183–E5192.

Elston GN, Benatives-Piccione R, Elston A, Zietsch B, Defelipe J, Manger P, Casagrands V, Kass JH (2006) Specializations of the granular prefrontal cortex of primates: implication for cognitive processing. Anat Rec A: Discov Mol Cell Evol Biol 288A:26–35.

Feuillet L, Dufour H, Pelletier J (2007) Brain of a white-collar worker. Lancet 370:262.

Galton F (1888) Head growth in students at the University of Cambridge. Nature 38:14–15.

Genç E, Fraenz C, Schlüter C, Friedrich P, Hossiep R, Voelkle MC, Ling JM, Güntürkün O, Jung RE (2018) Diffusion markers of dendritic density and arborization in gray matter predict differences in intelligence. Nature Comm 9:1905.

Güntürkün O (2014) Is dolphin cognition special? Brain Behav Evol 83:177–180.

Hauser MD, Yang C, Berwick RC, Tattersall I, Ryan MJ, Watumull J, Chomsky N, Lewontin RC (2014) The mystery of language evolution. Front Psychol 5,410.

Herculano-Houzel S, Mota B, Wong P, Kaas JH (2010) Connectivity-driven white matter scaling and folding in primate cerebral cortex. Proc Natl Acad Sci U.S.A. 107:19008–19013.

Herculano-Houzel S (2020) Birds do have a brain cortex—and think. Science 369:21567–21568.

Herrmann E, Call J, Hernandez-Lloreda MV, Hare B, Tomasello M (2007) Humans have evolved specialized skills of social cognition: the cultural intelligence hypothesis. Science 317:1360–1366.

Hofman MA (2019) On the Nature and Evolution of the Human Mind. Progr Brain Res 250:251–283.

Janich P (2009) Kein neues Menschenbild. Zur Sprache der Hirnforschung. Suhrkamp Verlag, Frankfurt.

Jerison HJ (1973) Evolution of the Brain and Intelligence. Academic Press, New York.

Jung RE, Haier RJ (2007) The Parieto-Frontal Integration Theory (P-FIT) of intelligence: converging neuroimaging evidence. Behav Brain Sci 30:135–154.

Kaas JH, Herculano-Houzel S (2017) What makes the human brain special: key features of brain and neocortex. In: Opris, I., Casanova, M.F. (Eds.), Physics of the Mind and Brain Disorders. Springer Publishing, Switzerland, pp. 3–22.

Llinas RR, Roy S (2009) The 'prediction imperative' as the basis for self-awareness. Phil Trans R Soc B 364:1301–1307.

Mallatt J, Blatt MR, Draguhn A, Robinson DG, Taiz L (2020) Debunking a myth: plant consciousness. Protoplasma, https://doi.org/10.1007/s00709-020-01579-w.

Manger PR (2013) Questioning the interpretations of behavioral observations in cetaceans: is there really support for a special intellectual status for this mammalian order? Neuroscience 250:664–696.

Miller G (2009) On the Origin of The Nervous System. Science 325:24–26.

Neubauer AC, Fink A (2009) Intelligence and neural efficiency. Neurosci Biobehav Rev 33:1004–1023.

Nieder A (2016) The neuronal code for number. Nat Rev Neurosci 17:366–382.

Nieder A (2020) Absolute Numerosity Discrimination as a Case Study in Comparative Vertebrate Intelligence. Front. Psychol. 11:1843.

Ridley M (2003) Nature via Nurture: Genes, Experience, and What Makes us Human. HarperCollins Publishers, New York.

Rilling JK (2014) Comparative primate neuroimaging: insights into human brain evolution. Trends Cogn Sci 18:46–55.

Rosati AG (2017) Foraging cognition: reviving the ecological intelligence hypothesis. Trends Cogn Sci 21:691–702.

Ryan JF, Chiodin M (2015) Where is my mind? How sponges and placozoans may have lost neural cell types. Phil Trans R Soc B 370: 20150059.

Schmahmann JD (2010) The role of the cerebellum in cognition and emotion: personal reflections since 1982 on the dysmetria of thought hypothesis, and its historical evolution from theory to therapy. Neuropsychol Rev 20:236–260.

Semendeferi K, Lu A, Schenker N, Damasio H (2002) Humans and great apes share a large frontal cortex. Nat Neurosci 5:272–276.

Singer, P. (2013). Praktische Ethik. Stuttgart: Reclam.

Sporns O, Betzel RF (2016) Modular brain networks. Ann Rev Psychol 67:19.1–19.28.

Sporns O, Tononi G, Edelman GM (2000) Connectivity and complexity: the relationship between neuroanatomy and brain dynamics. Neural Netw 13:909–922.

Stacho M, Herold C, Rook N, Wagner H, Axer M, Amunts K, Güntürkün O (2020) A cortex-like canonical circuit in the avian forebrain. Science 369:1585.

Stern E (2017) Individual differences in the learning potential of human beings. NPJ Sci Learn 2:2.

Taiz L, Alkon D, Draguhn A, Murphy A, Blatt M, Hawes C, Thiel G, Robinson DG (2019) Plants Neither Possess nor Require Consciousness. Trends Plant Sci 24:677–687.

Trewavas A (2016) Intelligence, cognition, and language of green plants. Front Psychol 7:588.

Van Schaik CP, Burkart JM (2011) Social learning and evolution: the cultural intelligence hypothesis. Philos Trans R Soc B 366:1008–1016.

Wise SP (2008) Forward frontal fields: phylogeny and fundamental function. Trends Neurosci 31:599–608.

Wohlleben P (2015) Das geheime Leben der Bäume. Ludwig Verlag, München.

Über den Autor

Andreas Draguhn ist seit 2002 Professor und Direktor am Institut für Physiologie und Pathophysiologie der Universität Heidelberg. Er studierte in Bonn Medizin sowie begleitend Physik und Philosophie und ist seither als Neurophysiologe tätig. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Funktion neuronaler Netzwerke, insbesondere koordinierte Aktivitätsmuster von Nervenzellen im Zusammenhang mit Gedächtnisvorgängen. Er war an mehreren interdisziplinären Initiativen beteiligt, u. a. als Fellow am Marsilius-Kolleg der Universität Heidelberg sowie seit 2008 als Vize-Direktor des Interdisziplinären Zentrums für Neurowissenschaften (IZN). Von 2009–2017 war er Mitglied/Sprecher des Fachkollegiums „Neurowissenschaft“ der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG). 2014–2018 war er Studiendekan der medizinischen Fakultät Heidelberg, 2018–2019 Dekan.

Korrespondenzadresse:
Prof. Dr. Andreas Draguhn
Institut für Physiologie und Pathophysiologie
Universität Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 326
69120 Heidelberg

E-Mail: andreas.draguhn@physiologie.uni-heidelberg.de
Homepage:
http://www.medizinische-fakultaet-hd.uni-heidelberg.de/Draguhn-Andreas-Prof-Dr.110991.0.html

Das intelligente Spiel mit Zufällen und Auslese

CLAUDIA ERBAR & PETER LEINS

Centre for Organismal Studies (COS) Heidelberg – Biodiversität und Pflanzensystematik, Universität Heidelberg

Zusammenfassung

Gleichgültig, ob als aus der Organismischen Evolution hervorgegangenes oder vom Menschen hergestelltes Produkt, wenn es den Anspruch optimaler Funktionalität bei gleichzeitiger Sparsamkeit erhebt, wird ihm im Sprachgebrauch vielfach das Adjektiv „intelligent" verliehen. Mit „intelligent" ist natürlich nur der Urheber gemeint: Im einen Fall die Evolution mit ihrem intelligenten Spiel mit den Zufällen und der Auslese, im anderen die Kreativität des „Säugetiers" *Homo sapiens*. Bemerkenswert ist eine gewisse Parallelität in Bau und Funktionalität unabhängig voneinander entstandener Geräte und Systeme. Oder aber von der Natur vorgegebene Konstruktionen dienen als Vorbild, was zur Bionik als eigene Wissenschaftsdisziplin geführt hat. Aus der unüberschaubaren Fülle intelligenter Problemlösungen sind in diesem Artikel einige wenige herausgegriffen. Sie betreffen zunächst Gebrauchsgegenstände aus dem Alltag. Es sind z. B. Salzstreuer, die fürs Frühstücksei geeignet sind, Haftvorrichtungen wie Saugnäpfe, klebende Haftscheiben und – allen voran – Klettverschlüsse. Im Hinblick auf die Stabilität von Oberflächen, besonders was die Kratzfestigkeit betrifft, können verschiedene Möglichkeiten bei Pflanzen aufgezeigt werden. Eine mechanische Stabilität bei starker Krafteinwirkung z. B. durch Wind oder Gewichtsbelastung liefert statt einer ebenen Fläche eine gefaltete, wie sie uns bei den Palmblättern begegnet. Faltstrukturen zu einem Zylinder geschlossen ermöglichen eine beträchtliche Volumenveränderung bei gleichbleibender Oberfläche; ein solcher

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24381

Blasebalg- bzw. Ziehharmonika-Effekt gestattet Rippenkakteen eine Wasseraufnahme (bei Regen) bzw. einen Wasserverlust (durch Verdunstung), ohne dass es zu Gewebespannungen kommt. Leichtbauweise und doch Stabilität zeigen uns die riesigen Schwimmblätter der Victoria-Seerose auf. Mehr Sicherheit bei einer Havarie eines Schiffes durch eine möglichst hohe Anzahl dicht verschlossener Schotten können Techniker von schwimmenden Samen lernen. Mehr Sicherheit beim Hausbau in Erdbebengebieten lernen Architekten von Bäumen mit Brettwurzeln und von Grashalmen. Tarnungen zum Schutz oder Angriff reichen bei Insekten und Spinnen bis zur höchsten Perfektion. Selbst Blumen täuschen und betrügen durch raffinierte (= intelligente) Angepasstheiten an bestimmte Verhaltensmuster von Insekten zum Zwecke der Bestäubung. Fazit: Evolution ist intelligent, kennt aber keine Ethik!

1 Vorbemerkungen

Intelligenz ist, auf den Menschen bezogen, ein Konglomerat an das Zentralnervensystem gebundener Faktoren: Beobachtungsvermögen, Weitergabe von Wahrgenommenem unter Berücksichtigung einer möglichst sauberen (nicht manipulierten) Sprache, Verarbeitung und Einordnung von Sinneswahrnehmungen, Lernfähigkeit, Fähigkeit zur Logik, Plausibilität und Vernunft, Beherrschung von Emotionen, Kreativitätsvermögen, Empathie und vieles andere mehr. Beim adjektivischen Gebrauch des Intelligenzbegriffes (wie im Titel dieses Beitrags) ist Vorsicht geboten; es lauert die „Gefahr“ einer unseriösen Vorgehensweise, die beispielsweise von der „Intelligent-Design“-Bewegung in den USA offeriert wird. Diese versucht lediglich mit einem pseudowissenschaftlichen Mäntelchen vom einfältigen Kreationismus abzulenken. Während der Kreationismus von einer Schöpfung der Welt durch den biblischen Gott vor einigen Tausend Jahren ausgeht, erkennt die „Lehre“ des „Intelligent-Design“ die Dauer der Entstehung der Organismen über viele Millionen von Jahren hinweg an, geht aber weiterhin davon aus, dass alle Lebewesen – auch die ausgestorbenen – direkte! Schöpfungen des Designers sind. Man möge es den Autoren des vorliegenden Artikels nachsehen, wenn sie – bei aller Toleranz – sich von einer solchen unglaubwürdigen mythologischen Fantasie distanzieren. Jegliche ins Esoterische mündende Fantasien, wie etwa auch die angeblich fürsorgliche Kommunikation zwischen pflanzlichen Artgenossen, gehören natürlich nicht hier her.

Tatsächlich finden sich überall im Pflanzen- wie im Tierreich optimal funktionierende Konstruktionen. Sie sind letztlich das Ergebnis der Organismischen Evolution, namentlich der Selektion, beherrscht vom Ökonomischen Prinzip (= Optimierungsprinzip), vor dessen Hintergrund gnadenlose Konkurrenz stattfindet (Leins & Erbar 2008, 2018, Erbar & Leins 2018). Das „Säugetier" *Homo sapiens* hat mit seiner Intelligenz, auf einer hoch komplexen Gehirnstruktur basierend, die ebenfalls aus der Organismischen Evolution hervorgegangen ist, optimal oder fast optimal funktionierende Geräte und Systeme geschaffen. Dies geschah entweder nach dem „Versuch und Irrtum"-Prinzip auf der Grundlage der Kreativität und unter Hinzuziehung von Logik oder zumindest Plausibilität. Dabei zeigt sich vielfach, dass menschliche Kreationen sich irgendwo in der „Natur" z. B. bei Pflanzen oder Tieren wiederfinden. Oder anders herum: Naturobjekte dienen für die Konstruktion von Werkzeugen, Geräten und Systemen als Vorbilder.

Es wird in diesem Zusammenhang oft das Universalgenie Leonardo da Vinci als diesbezüglichen Pionier angeführt. Im Jahre 1505 hat er in seinem Manuskript „Über den Vogelflug" („Sul volo degli uccelli"[1]) eine Analyse der Flügel von Vögeln vorgestellt, um daraus ein künstliches Fluggerät zu konstruieren. Aber erst im 20. Jahrhundert begann der eigentliche Aufschwung in der Zusammenführung der Biologie und der Technik. Es entstand eine neue Wissenschaftsdisziplin, die BIONIK (= BIOlogie und TechNIK). Heutzutage befasst sich die Bionik in großem Umfang mit allen nur denkbaren Techniken, die von der Architektur, hochkomplexen Gerätschaften z. B. für die Medizin bis hin zur Robotik (= Robotertechnik) und künstlichen Intelligenz reichen.

Der erste, der sich in Deutschland in eindrucksvoller Weise umfänglich mit der Frage „Was kann die Technik von der Biologie lernen?" auseinandergesetzt hat, ist der Zoologe Werner Nachtigall (z. B. Nachtigall 1997, 2007, 2008, Nachtigall & Blüchel 2000).

Eine hohe Popularität erlangte als Produkt der Bionik die von dem Botaniker Wilhelm Barthlott entdeckte Selbstreinigung bei Pflanzen, die auf dem sog. „Lotus-Effekt" beruht. Schmutzteilchen werden an stark hydrophoben Oberflächen, wie sie beispielsweise die Blätter der Lotosblume (oder Lotusblume, *Nelumbo*

[1] Die Manuskriptblätter liegen als Teil des „Codice sul volo degli uccelli", auch als „Codex Turin" bekannt, in der „Biblioteca Reale" in Turin (Italien).

nucifera) besitzen, einfach durch abperlendes Wasser entfernt (Barthlott & Ehler 1977, Barthlott & Neinhuis 1997).

Das Vorhaben biologische Eigenschaften direkt auf technische Konstruktionen bzw. Systeme zu übertragen, also eine „ Eins-zu-eins-Kopie“ herzustellen, erfüllt in vielen Fällen nicht den erwünschten Erfolg. Beim bekannten „Lotus-Effekt“ sind wachsartige Mikro- und Nanostrukturen verantwortlich, die jedoch mechanischen Ansprüchen keineswegs gewachsen sind; also müssen jene aus stabileren Materialien nachgebildet werden (resultierende Produkte sind z. B. Kunststoffe, bestimmte Lacke, Fassadenfarben an Hauswänden). Neben chemischen Eigenschaften können auch Dimensionen bzw. Größenverhältnisse bei Direktkopien erfolgsmindernd sein. Ebenso muss das Nutzen-Kosten-Verhältnis stimmen und außerdem auf Gestalt- und Funktionskompromisse vor allem in komplexen Systemen eingegangen werden. Es ist also seitens des Konstrukteurs eine intelligente Vorgehensweise gefragt. Wie dem auch sei, in den nachfolgenden Abschnitten werden einige wenige, aber doch einfach nachzuvollziehende Beispiele aus der unüberschaubaren Fülle optimaler oder – bei Kompromissen – suboptimaler Problemlösungen bei Pflanzen und Tieren vorgestellt und zwar unabhängig davon, ob diese als Vorbilder technischer Errungenschaften dienten oder in den menschlichen Konstruktionen lediglich ihre Parallele finden.

2 Optimierung als evolutives Ziel

Eine Höherentwicklung von Organismen wird von einem Prinzip gesteuert, dem ökonomischen Prinzip oder Optimierungsprinzip, das die Selektion bestimmt. Dieses Prinzip wird dann wirksam, wenn Organismen (Individuen in einer Population oder verschiedene Arten) in ihrem unterschiedlichen Angepasstsein an bestimmte Umweltfaktoren (abiotischer und biotischer Art) in Konkurrenz treten („survival of the fittest“, „struggle for life“, Darwin 1859). Voraussetzung ist natürlich ihre Unterschiedlichkeit in der genetischen Ausstattung, die auf rein zufällige (!) Mutationen und Rekombinationen zurückzuführen ist; ebenfalls zufällig vollziehen sich Migrationen und Isolierungen (Bildung neuer Sippen). „Konkurrenzkämpfe“ spielen sich vielfach auf Balzplätzen und Brutplätzen ab. In Abb. 1 sind einige Szenen aus dem wehrhaft-turbulenten Sexualverhalten bei der Sizilianischen Mörtelbiene *Chalicodoma sicula* herausgegriffen. Das Weibchen „entscheidet“ über den Zeitpunkt der Begattung und begibt sich auf einen Paarungsplatz (mating place) – eine



Abbildung 1: Drei Männchen (1, 2, 3) und ein Weibchen (♀) der Sizilianischen Mörtelbiene (*Chalicotoma sicula*) in vier Szenen auf einem Paarungsplatz. Erklärung siehe Text. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

etwa ein oder wenige m^2 große Fläche, auf der einige Mörtelbienen-Männchen unterschiedlicher Größe und Färbung (dunkelbraun bis grau), auf Weibchen wartend, patrouillieren. In Abb. 1a hat sich bereits ein Männchen – mit 1 nummeriert – auf einem Weibchen niedergelassen und ist gerade im Begriff zu kopulieren, was sich in einem raschen Fächeln seiner Flügel zur Luftzufuhr bemerkbar macht. Die weiblichen Tiere sind größer als die unter sich unterschiedlich großen männlichen und besitzen blau-schillernde Flügel und mächtige Mandibeln (zu erkennen in Abb. 1c).[2] Es dauert nicht lange bis sich Konkurrenz einstellt – in unserem Beispiel mit zwei weiteren Männchen (mit 2 und 3 in Abb. 1a nummeriert); diese rücken

[2] Die Weibchen übernehmen die gesamte Brutfürsorge: Sammeln von Pollen und Nektar, Eintrag der Brutnahrung in einen von ihr selbst hergestellten Becher aus „Mörtel“ (in Bandkeramik-Manier) und Verschluss des zylinderförmigen Bechers nach der Ablage eines einzigen Eies. Oft werden mehrere solche „Brutzylinder“ nebeneinander gebaut und zuletzt mit zusätzlichen Mörtelschichten zu einer Einheit „verputzt“.

auf (Abb. 1b) und es kommt blitzschnell zu einem Kampfgetümmel. Ein kurzer Ausschnitt des Getümmels ist in Abb. 1c wiedergegeben, auf dem das Weibchen mit den kräftigen Mandibeln zu sehen ist; Männchen Nr. 1 ist in diesem „Drunter und Drüber“ nicht auszumachen, geht aber bei diesem Kampf als Sieger hervor, wie aus einem Vergleich des etwas ausgefransten linken Flügels und dem weißen „Gesichtsbart“ in Abb. 1b und 1d hervorgeht. Es können nun weitere Kämpfe folgen, bis schließlich das kräftige Weibchen in katapultartiger Weise eines der Männchen wegstößt, den Paarungsplatz verlässt und ihrer Brutarbeit nachgeht (zuerst aber sich am Nektar einer Blüte stärkt und dabei eventuell von kleineren „Verlierern“ belästigt wird).

Die „Kampfarenen“ bei den Blütenpflanzen, die wie alle Landpflanzen und viele Algen einen heterophasischen Generationswechsel durchlaufen, sind Narbe und Griffel einerseits sowie die Keimplätze der Samen andererseits. In der Haplophase kommt es zur Pollenschlauchkonkurrenz, in der Diplophase zur Keimlingskonkurrenz (siehe etwa Leins & Erbar 2008, 2010, 2018); die Sieger sind beispielsweise diejenigen Konkurrenten die (genetisch bedingt) durch einen schnelleren Stoffwechsel bzw. ein schnelleres Wachstum ausgezeichnet sind.

Im Folgenden werden nun einige besonders zweckmäßige Systeme in unterschiedlichen Ausgestaltungen aufgeführt, beginnend mit alltäglichen Gerätschaften und endend mit raffinierten „Überrumpelungstricks“, die teilweise auch das menschliche Dasein im Alltag bestimmen.

2.1 Streuer

Vielfach wird der Botaniker und Naturphilosoph Raoul Heinrich Francé als Vater der Bionik gesehen. Das deutsche Patent, das er 1920 für einen Streuer, den er nach dem Vorbild einer Mohnkapsel konstruiert hatte, war das erste Patent für eine bionische Erfindung (Abb. 2; siehe Francé 1920, Henkel 1997). Der Streuer sollte eine gleichmäßige Verteilung des Streuguts, z. B. Samenkörner, ermöglichen. Eine gleichmäßige Verteilung setzt natürlich eine entsprechende Handhabung voraus. Der Zweck einer natürlichen Streukapsel wie bei den Mohnen und anderen Gewächsen besteht nach neueren Untersuchungen aber gerade nicht in einer gleichmäßigen Verteilung der Samen bzw. der sich daraus entwickelnden Keimlinge, sondern folgt den Anforderungen eines verstärkten innerartlichen Konkurrenzkampfes, resultierend aus der Anhäufung der Samen in der Nähe der Mutterpflanze (Abb. 3; z. B. Leins & Erbar. 2008, 2010, Erbar & Leins 2018).

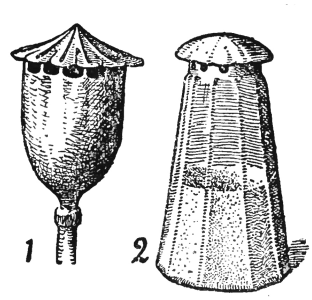


Abb. 1. Eine biotechnische „Erfindung" und ihr Vorbild.
Der neue Streuer für Haushalt und mediz. Zwecke RGM. Nr. 723730 (2) und ein reifer Mohnkopf (1), der seinen Inhalt ebenso organisch ausstreut.

Abbildung 2: Erstes bionisches (biotechnisches) Patent für einen Streuer von Raoul Heinrich Francé. Nachdem ein gleichmäßiges Ausbringen von Streugut mit mehreren Modellen nicht erfolgreich war („Ein gewöhnliches Salzfaß, wie es auf jedem Wirtstische steht. Einen Puderstreuer . . . , einen Zerstäuber . . . "), nahm Francé die Mohnkapsel als Vorbild. Aus Francé 1920.

Zum Zustandekommen dieser Anhäufung wollen wir aus der Fülle von verschiedenen Formen von Porenkapseln bei den Mohnen (Abb. 4), zwei miteinander im Windkanalexperiment (Abb. 5) und durch Freilandbeobachtungen vergleichen, nämlich die Kapseln von Klatsch- und Sand-Mohn (*Papaver rhoeas* und *Papaver argemone* ssp. *argemone*). Der Klatsch-Mohn hat breite und großporige, der Sand-Mohn schmale und kleinporige Kapseln. Es ist geradezu zu fordern, dass breite

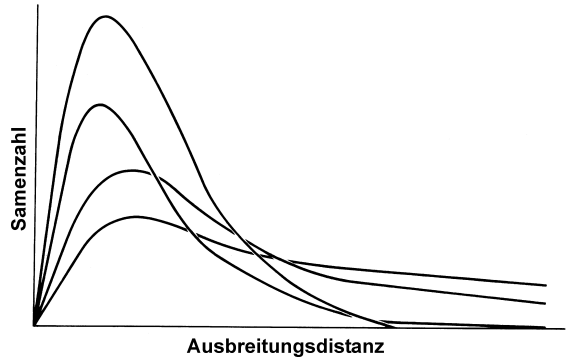


Abbildung 3: Samenausbreitungsmuster (= Keimlingsverteilungsmuster) in rechtsschiefen Kurven dargestellt. Aus Leins & Erbar 2008.

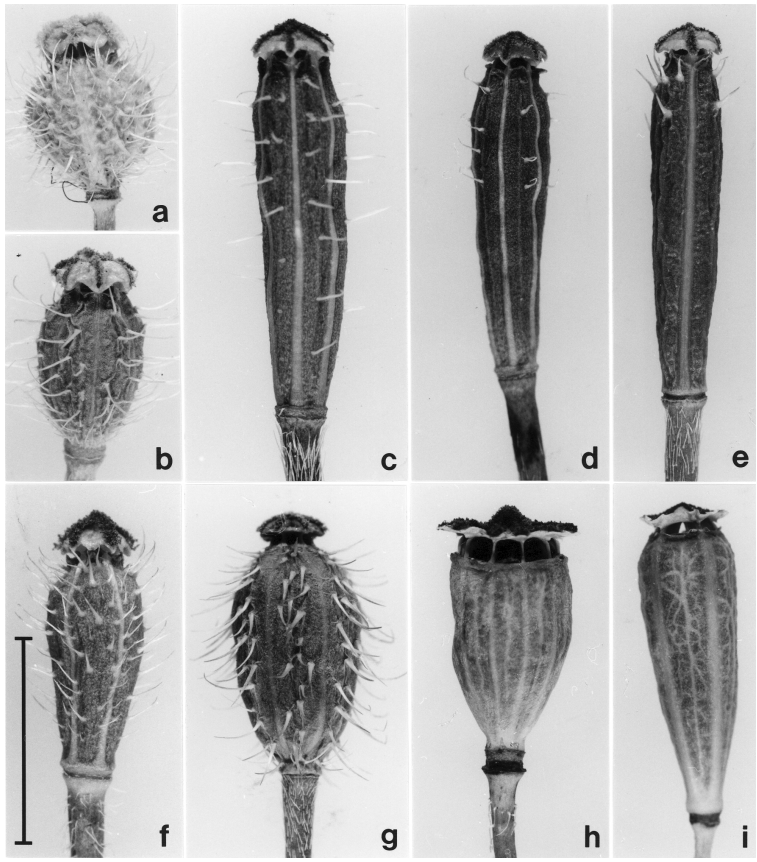


Abbildung 4: Verschiedene Kapselformen von Mohnen. – a, *Papaver pavoninum*. – b, *Papaver apulum*. – c, *Papaver argemone* ssp. *minus*. – d, Sand-Mohn *Papaver argemone* ssp. *argemone*. – e, *Papaver argemone* ssp. *meiklei*. – f, *Papaver argemone* ssp. *nigrotinctum*. – g, Bastard-Mohn *Papaver hybridum*. – h, Klatsch-Mohn *Papaver rhoeas*. – i, Saat-Mohn *Papaver dubium*. Der Messbalken entspricht 1 cm. Aus Kadereit & Leins 1988 bzw. Leins & Erbar 2008.

und kurze Kapseln mit relativ großen Poren bei gleichen Windbedingungen mehr Samen pro Zeiteinheit entlassen als lange und schmale Kapseln mit relativ kleinen bzw. durch Porenzähne zweigeteilten Poren.

Die beiden Graphiken der Abb. 5 veranschaulichen das erwartete unterschiedliche Verhalten. Im Windkanalexperiment haben beim Klatsch-Mohn bereits nach 25 Böen bei einer Windgeschwindigkeit von 12 m/s mehr als 70% der Samen die

Kapsel verlassen. Beim Sand-Mohn sind es nur etwas über 30%. Nach weiteren 25 Böen verbleiben beim Klatsch-Mohn nur noch etwa 10% der Samen in der Kapsel, von denen unter den gegebenen Versuchsbedingungen durch weitere Böen kaum mehr welche ausgestreut werden. Dagegen liegt beim Sand-Mohn das Versuchsende erst nach etwa 175 Böen. Es befinden sich dann noch etwa die Hälfte der Samen in der Kapsel. Man kann daraus den Schluss ziehen, dass weitere Samen erst bei höheren Windgeschwindigkeiten die Kapsel verlassen und dann vom Wind ergriffen natürlich weiter fliegen. Damit würden sich bei den genannten Beispielen Unterschiede im räumlichen Verteilungsmuster der Samen ergeben. Nun lässt sich aber im Freilandexperiment beim Sand-Mohn beobachten, dass die in der

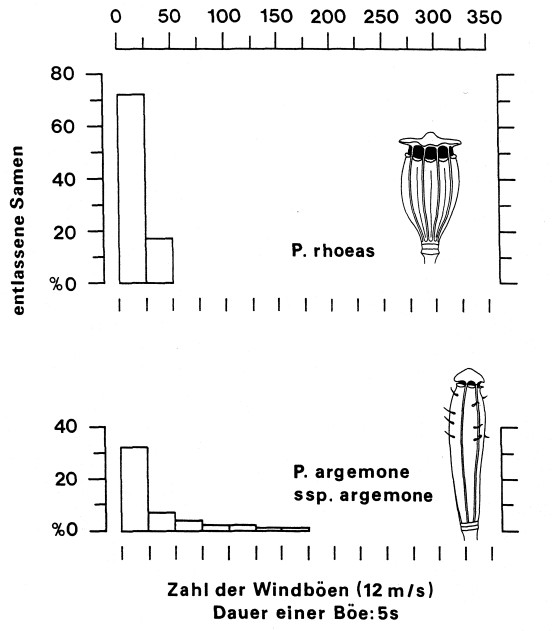


Abbildung 5: Vergleich des zeitlichen Ablaufs der Samenfreisetzung aus den Porenkapseln von Klatsch-Mohn (*Papaver rhoeas*) und Sand-Mohn (*Papaver argemone* ssp. *argemone*) in Windkanalexperimenten. Die gestielten Kapseln wurden so lange kurzen (5 s) Windböen ausgesetzt, bis bei einer Windgeschwindigkeit von 12 m/s keine Samen mehr entlassen wurden. Aus Kadereit & Leins 1988, verändert, bzw. Leins & Erbar 2008.

Kapsel verbleibenden Restsamen durch spätere, allmähliche Kapselverrottung (Abb. 6) freigesetzt und unweit von der Mutterpflanze deponiert werden können. Das letztlich resultierende Ausbreitungsmuster mag sich dann nur wenig von dem des Klatsch-Mohns unterscheiden.

Was den unterschiedlichen zeitlichen Ablauf der Samenausstreuung betrifft, so mag die rasche Entleerung der breiten großporigen Kapseln vom Klatsch-Mohn darin eine Erklärung finden, dass ein Großteil der Samen dem Zugriff Körner fressender Vögel entgeht, die die Kapseln mit ihrem Schnabel leicht zu öffnen imstande sind. Interessanterweise ist beim Sand-Mohn die viel langsamere Samenfreisetzung (in kleinen Portionen) kombiniert mit robusteren Kapseln, die nicht so leicht aufzubrechen sind. Außerdem können, nämlich bei einer Unterart des Sand-Mohns (*Papaver argemone* ssp. *nigrotinctum*), steife Borsten auf der Kapseloberfläche zusätzlich als Stoßdämpfer wirken (steif beborstete Kapseln kommen noch in anderen Mohn-Sippen vor, Abb. 4).

Eine mehr punktförmige Besetzung einer Konkurrenz-„Arena“ wie etwa eine kleine Narbe oberhalb eines Fruchtknotens mit Hilfe von Streueinrichtungen bei der Übertragung von Pollenkörnern zunächst auf bestäubende Insekten finden wir beispielsweise in Blüten mancher Raublattgewächse (Boraginaceae). Beeindruckend in seiner Präzision ist der sog. Streukegel etwa beim Borretsch (*Borago officinalis*, Abb. 7b). Grob vergleichbar ist dieser Streukegel mit einem Salzstreuer, wie man sich ihn fürs Frühstücksei wünscht (Abb. 7a). Die Wandung des Pollenbehälters wird von den fünf langen, zur Spitze hin allmählich sich verschmälernden

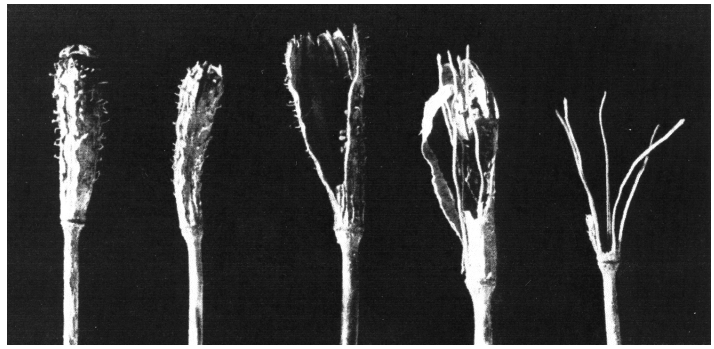


Abbildung 6: Von links nach rechts: allmähliche Kapselverrottung beim Sand-Mohn *Papaver argemone* ssp. *argemone*. Aus Blattner & Kadereit 1991 bzw. Leins & Erbar 2008.

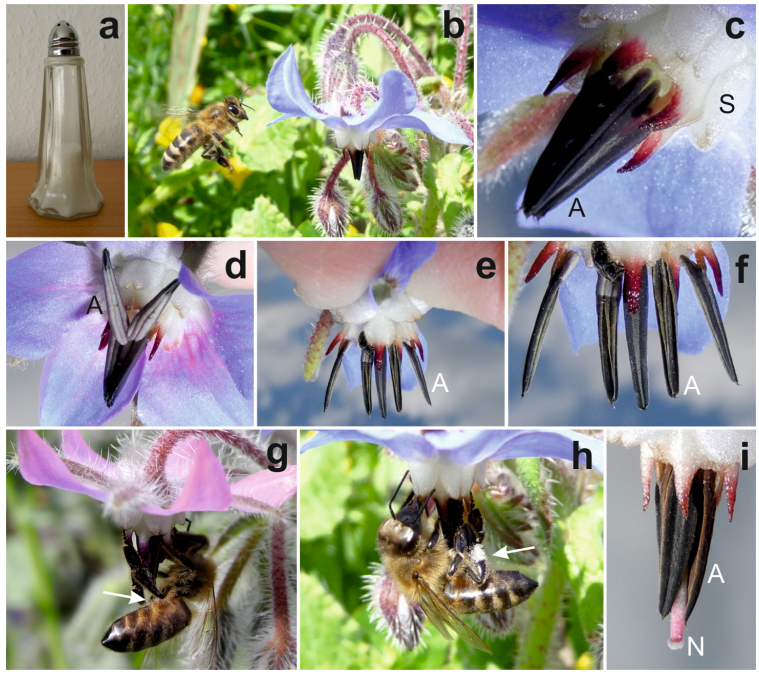


Abbildung 7: Ein wünschenswerter Salzstreuer für das Frühstücksei (a) findet eine Parallele im Pollen-Streukegel der Boretsch-Blüte (*Borago officinalis*; b–i). A = Anthere (Staubbeutel), N = Narbe, S = Schlundschuppe, der Pfeil in g weist auf der Bauchseite der Biene auf herausgerieselte Pollenkörner, der Pfeil in h zeigt auf weiße Pollenkörner am Hinterbein der Biene; weitere Erklärungen siehe Text. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

Staubbeuteln (Antheren), die dicht beisammenstehen, gebildet (Abb. 7c). Die Antheren öffnen sich nach innen von ihren Spitzen her, wie man an den beiden in Abb. 7d nach außen geklappten erkennen kann. In den beiden Abb. 7e–f ist die Blüte an ihrer Basis zwischen Daumen und Zeigefinger gequetscht, so dass alle fünf Antheren zum Spreizen gebracht werden. Die Antheren sind bereits schon leer, und ihre beiden schlitzartigen Öffnungen reichen in diesem Stadium bis zur Basis. Im Gesamten bilden die umgebogenen, die Schlitze umgebenden Wandpartien im Innern des Streuapparates zusätzliche Gleitschienen, entlang derer die Pollenkörner zur Spitze des Kegels befördert werden. Pollenkörner treten erst heraus, wenn der Streukegel zum Schütteln gebracht wird. Dies besorgen meist Honigbienen (*Apis mellifera*), die sich beim Blütenbesuch, um an den Nektar, der

sich am Blütengrund befindet, mit ihren Mundwerkzeugen zu gelangen, immer auf die gleiche Weise verhalten. Es sind mehrere funktionsgekoppelte Eigenschaften, die zusammen einen optimalen Bestäubungsverlauf garantieren; in der Blütenökologie spricht man von einem Bestäubungssyndrom. Zu diesem gehört beim Borretsch die Hängeposition der Blüte, die den Pollenstreuer in die funktionsbereite Lage versetzt; die Öffnung des Streukegels ist nach unten gerichtet. Die Biene hält sich – an der Blüte hängend – am Grunde des Streukegels fest und berührt dort sog. Schlundschuppen – das sind zur Blütenmitte hin gerichtete Ausstülpungen, die bei den Raublattgewächsen nicht selten zu finden sind – sowie auf Lücke zu diesen stehende pfriemliche Anhängsel der sehr kurzen Staubgefäßfilamente. Die Berührung dieser Anhangsorgane sowie das Einführen des Rüssels zwischen den Staubgefäßen löst ein Rütteln des Pollenstreuers aus, und Blütenstaub rieselt ziemlich genau auf die Bauchseite des Abdomens der an der Blüte hängenden Biene (Pfeil in Abb. 7g). Bei mehrmaligem Anflug der Blüten kann es zudem zum Pollenhöseln seitens der Biene kommen (Abb. 7h; Pfeil zeigt auf weiße Pollenkörner am Hinterbein der Biene). Hat sich der Streukegel entleert, beginnt der Griffel mit der reifenden Narbe, dem Landeplatz der Pollenkörner, sich zu strecken, bis die Narbe aus der Streukegelöffnung herausschaut (Abb. 7i). Das gleiche Verhalten der Insekten an den jetzt in der weiblichen Phase befindlichen Blüten garantiert damit eine exakte Berührung der Narbe mit der Körperstelle des Bestäubers, an der sich die Pollenlieferung befindet. Die Vormännlichkeit (Proterandrie) ist ebenfalls Bestandteil des betreffenden Blumensyndroms.

2.2 Anheftungsverfahren: Saugnäpfe, Klebeflächen, Klettverschlüsse

Erinnern wir uns an die „Magdeburger Halbkugeln“, eine der eindrucksvollsten Geschichten aus dem 17. Jahrhundert. Damit hat der Ingenieur und Physiker Otto von Guericke in einem spektakulären Experiment (entgegengesetzt ziehende Pferdegespanne konnten zwei Hälften einer Kugel, in welcher er ein Vakuum erzeugte, nicht mehr voneinander trennen) nachgewiesen, dass die Luft auf einen im Vakuum befindlichen Hohlraum einen Druck ausübt. Nach diesem Prinzip funktionieren auch die Saugnäpfe bei den Tintenfischen (Abb. 8a). In der Technik macht man es sich mit den Vakuumhaken aus Plastik - im Haushalt vielfach verwendet – zunutze (Abb. 8b–c). Die Haftfähigkeit auf möglichst glatten und sauberen Wandflächen hängt vom Durchmesser der Haftscheibe ab.

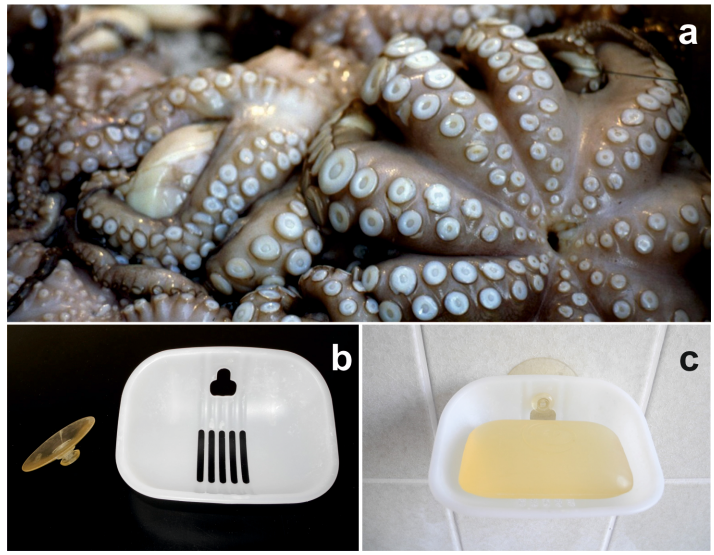


Abbildung 8: Natürliche und technische Saugnäpfe. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

Eine deutlich bessere Haftfähigkeit haben die Grundflächen der Haken durch die Aufbringung von Leim. Ihr Nachteil ist jedoch, dass diese schwerlich auswechselbar sind. Wenn wir einen Vergleich mit einer in der Natur vorkommenden Klebscheibe anstellen wollen, können wir den Wilden Wein (*Parthenocissus*[3]) heranziehen. Dieses z. B. an Hausfassaden (Abb 9a–b) zu findende Rebengewächs (Vitaceae) bildet an den Achsenenden verzweigter „Ranken" kleine Haftscheiben (Abb. 9c–e), deren Innenseite, also einer Unterlage z. B. einer Hauswand anliegenden Seite, verschleimt und bei der Austrocknung die Haftscheibe mit der Unterlage verleimt. Je rauer die Unterlage – z. B. der Putz auf einer Hausfassade – ist, um so fester ist die Scheibe mit ihr verbunden; die verschleimenden Zellen können nämlich in feine Klüfte hineinwachsen, was bereits Ende des 19. Jahrhunderts einer Doktorarbeit zu entnehmen ist (von Lengerken 1885a; neuere Arbeiten

[3] Wie es uns scheint, sind die drei in Mitteleuropa angepflanzten Arten *Parthenocissus tricuspidata* (Heimat: O-Asien), *P. quinquefolia* (Heimat: N-Amerika) und *P. inserta* (Heimat: N-Amerika) nicht klar voneinander zu trennen (wahrscheinlich Kulturvarietäten).

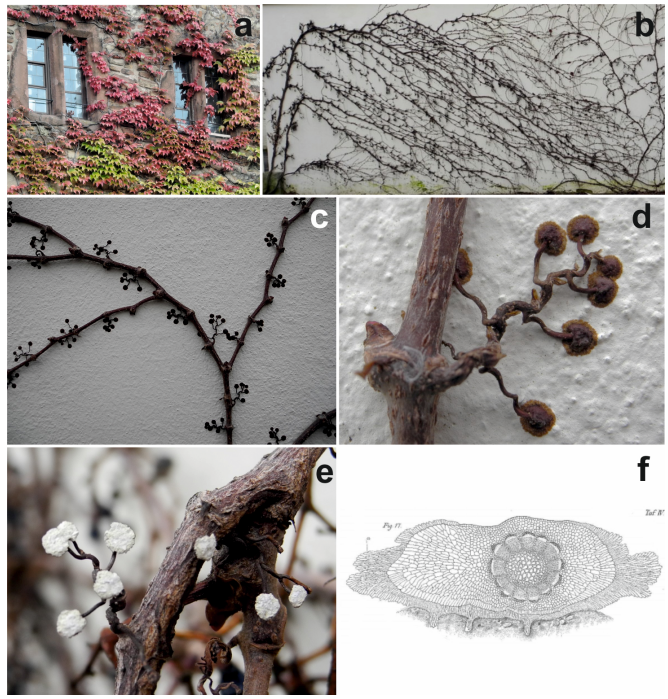


Abbildung 9: Wilder Wein *Parthenocissus*, ein kletterndes Holzgewächs, das sich mittels Haftscheiben an Hauswänden festhält. – a, Beginnende Rotfärbung des Laubs an der Handschuhsheimer Tiefburg (Heidelberg). – b, Laubfreies „Klettergerüst“ an einer verputzten rauen Wandfläche. – c–d, Klebscheiben an den Zweigenden kleiner Sprosse, die das „Gerüst“ fest mit der Unterlage verbinden. – e, Haftscheiben von der Unterlage entfernt mit Verputzresten. – f, Querschnitt einer Haftscheibe von *Ampelopsis muralis* (Synonym für *Parthenocissus quinquefolia*) mit einem kleinen Stück der Unterlage; Fig. 17 aus von Lengerken 1885b (a: bezeichnet die Epidermis des „Haftballen“, die an der Kontaktstelle zur Unterlage durch vielfache Teilungen wuchert). Bildquellen a–e: Eigene Aufnahmen.

gehen von einem Sekret [4] aus, das ausgeschieden wird, z. B. Steinbrecher et al. 2011). Das kann beim Entfernen des Kletterstrauches zu Problemen führen. Noch

[4] Es liegen erste Ergebnisse vor, dass es sich um einen Verbundklebstoff aus Polysacchariden, Kallose und schleimartigen Pektinen handelt (Bowling & Vaughn 2008).

mehr Probleme jedoch bereitet beim Entfernen ein anderer Kletterstrauch, der Efeu (Abb. 10a–c).

Der Efeu (*Hedera helix*) aus der Familie der Efeugewächse (Araliaceae) ist der einzige bei uns heimische Wurzelkletterer. Wurzelkletterer können ihren Sprossen entlang Haftwurzeln ausbilden, mit denen sie sich fest an Bäumen oder Felsen anheften (Abb. 10d–f). Die Wurzeln dringen dabei nicht bis in die Leitungsbahnen der Stämme und Äste ein (der Efeu ist also kein Schmarotzer!). Wie schafft

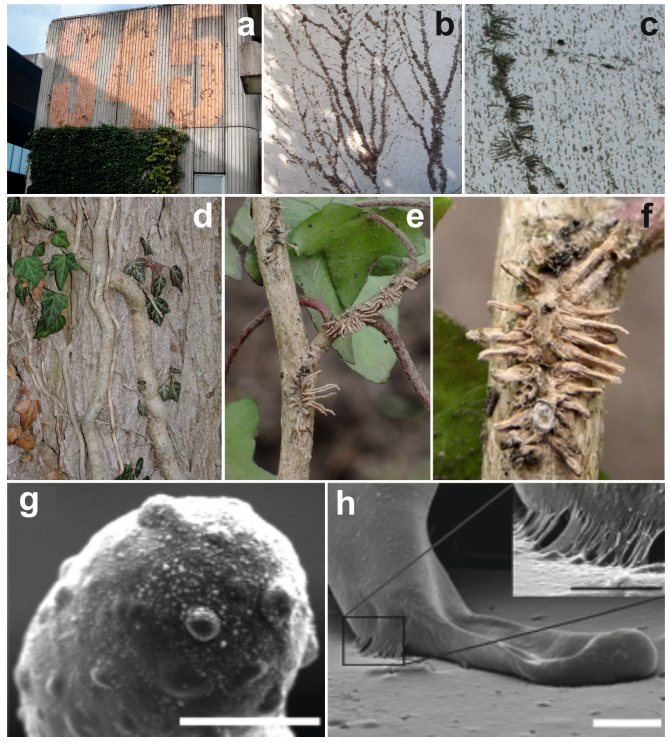


Abbildung 10: Efeu *Hedera helix*. – a–c, Haftwurzelreste nach Entfernung der Pflanze von einer Betonwand im Theoretikum der Universität Heidelberg. – d, Efeupflanze klettert einen Baum hoch. – e–f, Sprossbürtige Haftwurzeln der Efeupflanzen. – g–h, Rasterelektronenmikroskopische Bilder von Wurzelhärchen; aus Melzer et al. 2010. – g, Spitze eines Wurzelhärchens mit kugeligen Bläschen, die bei Berührung aufplatzen und eine sofort aushärtende Flüssigkeit abgeben. – h, Wurzelhärchen in Kontakt mit einer Polyester-Folie (Mylar-Folie). Das Inlay-Bild zeigt Kleberfäden, die das Wurzelhärchen an dem Substrat festkleben. Bildquellen a–f: Eigene Aufnahmen.

der Efeu es aber, sogar senkrechte Wände hochzuklettern ohne abzurutschen? Verantwortlich für ein dauerhaftes Festhalten sind beim Efeu die Wurzelhaare. Diese befinden sich hinter der Wurzelspitze und dienen gewöhnlich der Aufnahme von Wasser und gelösten Mineralsalzen. Beim Efeu aber hat ein Funktionswandel stattgefunden.

Auf der Oberfläche der kleinen, einzelligen Wurzelhärchen (sie haben einen Durchmesser von 10–15 Mikrometer und eine Länge von 20–400 Mikrometer) sitzen Bläschen, die eine klebrige Flüssigkeit enthalten (Abb. 10g). Bei einer Berührung mit einer Baumrinde oder einer Hauswand platzen diese auf, und die Flüssigkeit härtet sofort aus (Abb. 10h). Da dieser Prozess sehr schnell abläuft, konnte die chemische Zusammensetzung der Flüssigkeit noch nicht aufgeklärt werden. Aber ein weiterer Aspekt des Festhaltens konnte nachvollzogen werden. Wenn das Wurzelhaar in einer noch so kleinen Vertiefung der Baumrinde oder Hauswand austrocknet, verdrillt es sich bei diesem Prozess und wird dadurch kürzer. Die Verdrillung beruht auf dünnen Cellulose-Fasern (sog. Mikrofibrillen), die in der Zellwand parallel zueinander, aber spiralig gewunden verlaufen. Sie stehen in einem Winkel von ca. 40° zur Längsachse. Da aber an der Spitze des Härchens der Winkel größer ist (er beträgt ca. 55°), krümmt sich die Haarspitze löffel- oder hakenartig, was zusätzlichen Halt im Inneren der Oberflächenvertiefung bietet. Außerdem wird durch die Verkürzung des Härchens der ganze Efeutrieb näher an die Baumrinde oder Hauswand gezogen. All diese faszinierenden, insgesamt intelligenten Befunde sind den subtilen Untersuchungen von B. Melzer, T. Steinbrecher, R. Seidel, O. Kraft, R. Schwaiger und T. Speck (2010; Universität Freiburg und Karlsruher Institut für Technologie – KIT) zu verdanken (siehe auch Speck 2011). Jetzt wundert es nicht mehr, dass sich die Efeupflanze meist nicht ohne Schäden im Putz von einer Hauswand entfernen lässt. Auf absolut glatten Flächen wie Glas oder Aluminium funktioniert das Efeu-Prinzip nicht. Aber mit Oberflächen, die zumindest mikroskopisch kleine Risse oder Vertiefungen aufweisen, stellen die Efeu-Haftwurzeln durch ihr spezielles Ankleb- und Einhak-Haftsystem eine optimale, dauerhafte Verbindung her.

Anheften – Lösen – Anheften – Lösen oder Schließen – Öffnen – Schließen – Öffnen: Der Klettverschluss! Er gehört zu den oft zitierten Errungenschaften der Bionik. Dieses Bionik-Produkt hat einen wahren Siegeszug erlebt und ist beispielsweise in der Modeindustrie nicht mehr wegzudenken. Erfunden wurde der Klettverschluss von dem Schweizer Ingenieur George de Mestral, der die-

sen 1951 patentieren ließ. Vorbild seiner Erfindung war der kompakte Blüten- bzw. Fruchtstand eines Köpfchenblütlers (Compositae = Asteraceae), nämlich die Klette (*Arctium*, z. B. *Arctium lappa*; Abb. 11a–b). Die Klettfruchtstände sind, wie bei den Köpfchenblütlern üblich, von einer Hülle aus Hochblättern umgeben. Bei der Mariendistel (*Silybum marianum*) sind diese voluminös und bizarr, beim Gänseblümchen (*Bellis perennis*) schmal und wenig auffallend, bei der Artischocke (*Cynara cardunculus*) genießen wir in einen Dip getunkt ihren fleischigen basalen Teil. Bei *Arctium* sind die Hochblätter lang und schmal und in großer Zahl vorhanden und am Ende in ein feines Häkchen übergehend (Abb. 11a–b). An vorbeistreifenden Haartieren (z. B. Hasen oder Rehe) bleiben die Kletten hängen



Abbildung 11: Klettverschluss-Vorbild und Nachahmung. – a – b, Blüten- und Fruchtstände von der Großen Klette *Arctium lappa*. – c, Schuh mit Klettverschluss. H = Hakenschicht, Ö = Ösenschicht (feine Fäden). – d, Haken. – e, Gewellte Fäden. – f, Verschluss beider Schichten im Schnitt. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

und werden entweder abgerissen und von den Tieren abtransportiert [5], oder die Tiere lösen, falls sich die Kletten dabei nicht von der Pflanzen losreißen lassen, einen Katapult-Effekt aus, so dass die einzelnen Früchte aus dem Fruchtstand bzw. den Fruchtständen heraus geschleudert werden. Die Kletten dienen also als Diaspore [6] 1. Ordnung zur Ausbreitung der Früchte (Nussfrüchte), die man als Diasporen 2. Ordnung bezeichnen kann. Bezogen auf das Bionik-Produkt erfordern die Anheftung und das Entfernen von Gegenständen elastische, aber doch relativ stabile Haken auf der einen Oberfläche und gewellte, dünne Haare auf der anderen, welch letztere quasi als Ösen fungieren (Abb. 11d–f).

2.3 Kratzfeste Oberflächen

Hier geht es um Oberflächen, die bei mechanischer Beanspruchung etwa durch scharfe Teilchen wie Sand oder schmirgelnde Objekte keine Schrammen bekommen. Um verschiedene Möglichkeiten einer Lösung des Problems bei Pflanzen kennenzulernen, begeben wir uns etwa in Dünenregionen von Meeresküsten. Dort ist durch den häufig wehenden Wind mit Sandgebläsen zu rechnen. In der Technik wären geeignete Lösungen beispielsweise mit einem gehärteten Stahl mit glatter Oberfläche oder mit bestimmten Lacken zu erreichen. Bei den Pflanzen muss genügen, dass eine glatte Oberfläche einer von der Epidermis nach außen abgeschiedene sog. Cuticula [7] von gewisser Härte und Dicke ausgebildet ist. Die Blätter der auf diese Weise geschützten Pflanze fühlen sich hart und lederartig zäh an; eindrückliche Beispiele finden sich etwa beim Strand-Mannstreu *Eryngium maritimum* (Apiaceae, Abb. 12a–b) und bei der Strand-Zaunwinde *Calystegia soldanella* (Convolvulaceae, Abb. 12c).

Etwas außergewöhnlich – aber im technischen Bereich durchaus häufig im Gebrauch – ist bei Pflanzen eine Abwehr von Schäden unter Zuhilfenahme des schädigenden Materials selbst, nämlich der Dachpappen-Effekt. Als Beispiel wäre das Dickblättrige Leimkraut *Silene succulenta*, ein Nelkengewächs (Cary-

[5] Für de Mestral lieferten die Kletten im Fell seiner Hunde die Vorlage.

[6] Der Begriff „Diaspore“ bezeichnet Ausbreitungs- oder Vermehrungseinheiten (siehe z. B. Erbar & Leins 2018).

[7] Hauptbestandteil der Cuticula ist das Cutin. Ähnlich wie das Suberin (Korksubstanz), das das Cutin in sekundären Abschlussgeweben, den Borken bei den Holzgewächsen, ersetzt, ist es ein lipophiles Mischpolymerisat. Es bildet die Matrix für eingelagerte Wachse in der Cuticula.

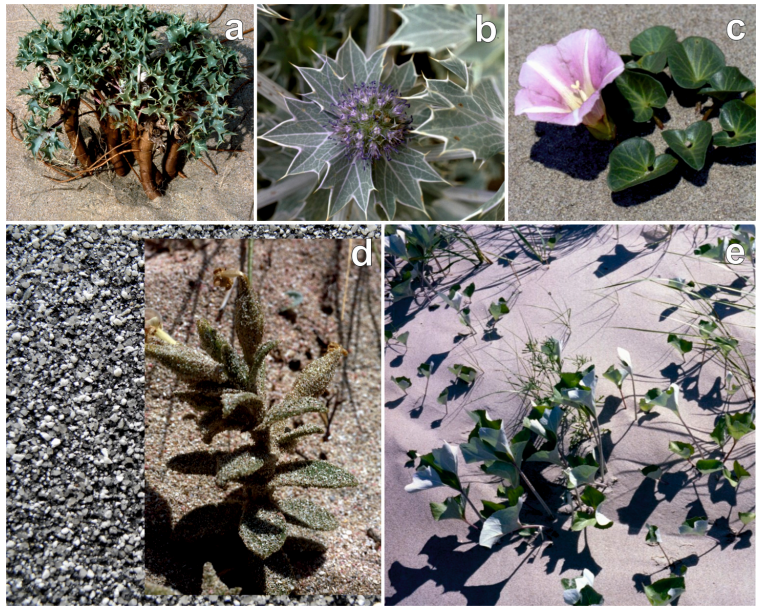


Abbildung 12 Blattoberflächen. – a–b, Strand-Mannstreu *Eryngium maritimum*. – c, Strand-Zaunwinde *Calystegia soldanella*. – d, Dickblättriges Leimkraut *Silene succulenta*; Bild auf Dachpappe montiert. – e, Dünen-Pestwurz *Petasites spurius*. Erklärungen siehe Text. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

ophyllaceae), zu nennen (Abb. 12d). Der vom Wind herangetragene Sand bleibt an der klebrigen Oberfläche der Pflanze hängen und bremst quasi die weiteren auftreffenden Sandkörner ab. [8]

Noch erstaunlicher ist die Strategie einer auf sandigen Flächen vorkommenden Pestwurz-Art, nämlich *Petasites spurius* (Asteraceae, Abb. 12e). Die Pestwurz-Arten sind durch relativ großflächige Blattspreiten gekennzeichnet. Im Umriss sind die Blätter der in Frage kommenden Dünen-Pestwurz (= Filzige Pestwurz) breit herzförmig mit verlängerten Seitenlappen, so dass die Blattspreite breiter als lang ist. Der relativ dünne und leicht bewegliche Blattstiel geht in einen breit

[8] Wie die besandete Dachpappe schützt die Besandung aber auch vor der Sonneneinstrahlung; die Sandsplitter reflektieren die Sonnenstrahlen und verhindern auf diese Weise eine zu große Erhitzung an Sonnentagen.

dreieckigen Spreitengrund über. Die Oberseite der Blattspreite ist dunkelgrün, die Unterseite durch eine dicht filzige Behaarung (Haare tot und lufterfüllt) weiß. Bei Windstille ist die Blattspreite mehr oder weniger ausgebreitet und die Photosynthese ist voll im Gange. Kommt stärkerer Wind auf, bewirkt dieser, dass die leicht beweglichen Seitenlappen der Blattspreiten nach innen umschlagen und mit dem übrigen Teil zusammen eine Spitztüte bilden (Abb. 12e), die sich mit Hilfe des leicht beweglichen Blattstiels in die geeignete von der Windrichtung bestimmte Stellung begibt: Tütenspitze gegen Luv, Tütenöffnung gegen Lee. Dadurch prallt der Sand gegen den schützenden Haarfilz. Das Geniale dabei ist die nur vorübergehende getroffene Schutzmaßnahme (bei Windstille kann die Photosynthese wieder voll in Gang gesetzt werden). Man könnte sich nun über eine eventuelle technische Übertragung Gedanken machen. Dies soll aber an dieser Stelle lediglich eine Anregung sein.

2.4 Gewellte Flächen als Kälte- und Hitzeschutz: Der Seersucker-Effekt

Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Überwinterung von Blütenpflanzen: Entweder – und dies ist bei den sog. Einjährigen der Fall – kommen sie lediglich mit Hilfe ihrer Samenproduktion über den Winter, oder sie überwintern zusätzlich mit unterirdischen Organen (Rhizome, Knollen, Rüben, Zwiebeln) oder als wintergrüne Rosettenpflanzen, bei denen der lufthaltige Schnee einen Kälteschutz bietet (dies gilt auch für direkt am Boden befindliche Ausläufer), oder aber es sind Holzgewächse, die ihre Blätter für gewöhnlich abwerfen und in ihren Blattachseln Überwinterungsknospen zurücklassen. Interessant sind, was den Kälteschutz der Blätter gegen einen gefrorenen Boden, also von unten her, anbelangt, manche Rosettenpflanzen. Eine in den Alpen und Pyrenäen vorkommende, im Gardasee-Gebiet sehr häufig auftretende Rosettenpflanze eines Lippenblütlers (Lamiaceae), nämlich das Drachenmaul *Horminum pyrenaicum* (Abb 13a), schützt ihre am Boden flach ausgebreiteten, insbesondere jungen Blätter durch Luftpölsterchen dergestalt, dass die Gewebe zwischen den Blattadern (die sog. Intercostalfelder) ein verstärktes Flächenwachstum erfahren und sich aufwölben. Ähnliches lässt sich übrigens auch beim Wirsing beobachten. Luft ist ein schlechter Wärmleiter und schützt unter der Blattunterseite das Blatt vor dem Erfrieren.

Das *Horminum*-Blatt lässt sich auch als Modell für eine bestimmte Krepp-Webart in der Mode oder auch in der Bettbezüge-Herstellung, allerdings mit der



Abbildung 13: Oberflächen. – a, Mitte der Blattrosette des Drachenmauls *Horminum pyrenaicum* (Lamiaceae) mit runzeligen Blättern. – b, Bettbezug in der Seersucker-Webweise (Krepp-Gewebe mit einem dreidimensionalen „zerknitterten“ Oberflächeneffekt). Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

entgegengesetzten Wirkung, nämlich Wärmeschutz, heranziehen. Es ist das sog. Seersucker-Tuch (das Wort kommt aus dem Persischen und bedeutet so viel wie Milch und Zucker). Diese Stoffe eignen sich hervorragend für ein angenehmes Hautklima. Hemden aus dieser Webart (abwechselnd werden beim Webvorgang die längs verlaufenden Kettfäden mal lockerer, mal fester gespannt) tragen sich an heißen Sommertagen recht angenehm, da die Tuchfläche nicht wie bei einem glatten Hemd großflächig auf der Haut liegt, sondern nur, und oft ganz locker, punktuell mit der Haut in Berührung kommt. Bei den Bettbezügen (Abb. 13b), die sommers wie winters einen angenehmen Schlaf ermöglichen, kommt noch ein weiterer nicht zu unterschätzender Vorteil hinzu: Die Seersucker-Bettwäsche darf nicht gebügelt werden; sie sieht auch im „Knitter-Look“ recht gut aus.

2.5 Mechanisch stabile Konstruktionen von größerem Format: Faltstrukturen, Leichtbauweise, Schwimmtüchtigkeit

In Verbindung mit einer mechanisch stabilen Oberfläche wird nach dreidimensionalen Konstruktionen gesucht, die ebenfalls durch eine hohe Stabilität bei maximaler Belastung ausgezeichnet sind. Belastende Faktoren können wiederum der Wind, aber ebenso das Wasser, Gewichte, Volumenveränderungen und Erderschütterungen sein. Sollen uns Pflanzen als Vorbilder für eine entsprechende technische Lösung dienen, begeben wir uns in die jeweiligen Gebiete auf unserem Planeten, in welchen natürlicherweise diesbezüglich Extreme herrschen. In Florida beispielsweise treten regelmäßig Hurrikane auf, an die die Palmen mit ihren schopfartig angeordneten gefalteten Blättern hervorragend angepasst sind (Abb. 14a–b). Dennoch findet eine solche Angepasstheit in Form einer Auffaltung der Blattspreiten ihre Grenzen; gelegentlich begegnen wir schopflosen Palmenleichen (Abb. 14c).

Palmen, die sich an Felsküsten „verirrt“ haben, laufen zusätzlich Gefahr von mächtigen Wellen getroffen zu werden (Abb. 14d). Die Faltstruktur ihrer Blätter trägt wieder wesentlich zu ihrem Überleben bei. Die Autoren dieses Artikels sind immer wieder beeindruckt von den stark in Mitleidenschaft gezogenen Exemplaren der Zwergpalme (*Chamaerops humilis*), der einzigen Palmen-Art im Mittelmeergebiet, wenn man von der nur kleinräumig verbreiteten Kretischen Dattelpalme *Phoenix theophrasti* [9] absieht. Das Areal von *Chamaerops humilis* umfasst den westlichen und zentralen Mittelmeerraum; auf Sizilien ist sie an mehreren meernahen Standorten zu finden, wo sie dominant in sog. Zwergpalmen-Garigues ist (Abb. 14d). Ihre Blattspreiten sind fächerartig zerteilt (Abb. 14e). Es handelt sich jedoch nicht um eine echte Fiederung, die entwicklungsgeschichtlich auf eine Randmeristem- Fraktionierung (Abb. 3 in Leins & Erbar 2017) zurückzuführen ist, sondern durch ein Zerreißen der Blattspreite bei deren Entfaltung, also sehr spät, zustande kommt.[10] Es werden, wie in den Schaubildern (Abb. 14g–h)

[9] *Phoenix theophrasti* kommt nur an wenigen Standorten auf Kreta und an der Südwestküste der Türkei vor.

[10] Neben der Fächerform (Fächerpalmen) gibt es die Fiederform (Fiederpalme, z. B. Dattelpalme, Phoenix), die ebenfalls auf ein Zerreißen zurückgeht. Letztere ist bei Wind weniger stabil.

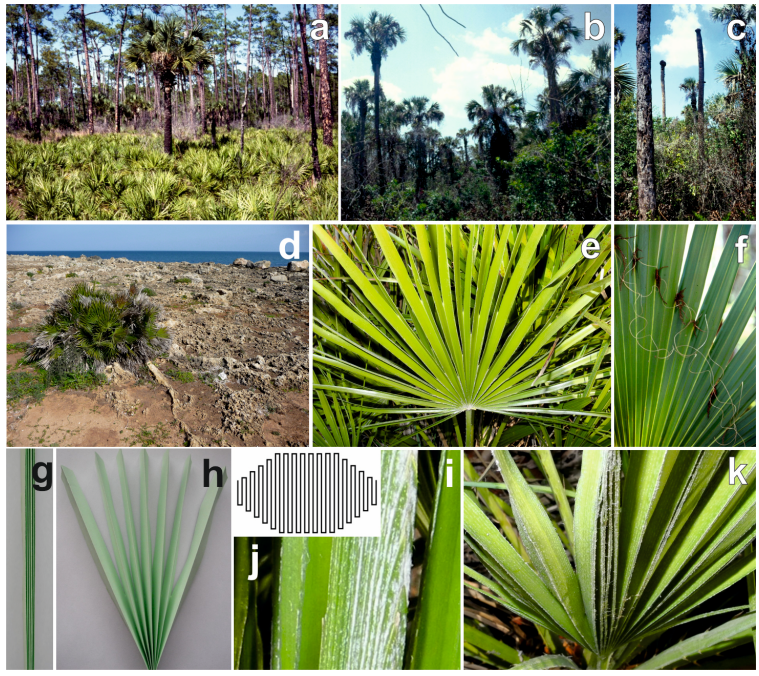


Abbildung 14: Faltstrukturen bei Palmenblättern. – a–c, Verschiedene Palmen Floridas. – a, Im Hintergrund: Palmettopalme *Sabal palmetto*, im Vordergrund (kriechend): Sägepalme *Serenoa repens*. – b–c, Königspalme *Roystonia regia*. – d–e, i–k, Zwergpalme (*Chamaerops humilis*). – d, Standort an der Felsküste im Südosten Siziliens (Riserva naturale orientata Oasi faunistica di Vendicari). – e, Gefächerte Blattspreite. – i, Deren eng gefaltete Anlage mit schematisiertem Querschnitt (j). – k, In Entfaltung begriffen. – f, Ausschnitt aus einem Fächerblatt einer tropischen Palmenart (Thailand) mit Nekrosefäden zwischen den Fächerzipfeln. – g–h, Papiermodell einer Fächerblattentfaltung. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

veranschaulicht, an jeder zweiten Kante [11] der Faltstruktur nekrotische schmale Streifen gebildet, die vielfach bei tropischen Palmen-Arten als herabhängende Fäden zu erkennen sind (Abb. 14f). Bei der Zwergpalme sind die schmalen nekrotischen Bereiche an den Kanten als weißliche Streifen zu erkennen (Totalreflexion des Lichts an den lufterfüllten abgestorbenen Gewebestreifen; Abb. 14i, k). Die

[11] Bei *Chamaerops humilis* treten zusätzlich Trennstreifen von der Peripherie des Blattes her an jeder Kante auf.

frühe Faltung der Palmblätter und die außerordentlich dichte Faltenanordnung ermöglicht eine völlig unkomplizierte Flächenvergrößerung bei gleichmäßigem Wachstum (Abb. 14j). Die Kantenbildung eines zäh-elastischen Systems bedingt ein ständiges Ausweichen aus einer Krafteinwirkung, z. B. Wind, das sich in einem Schlingern der Blattsegmente bzw. des gesamten Blattes bemerkbar macht.

Dass ein senkrecht auf eine freistehende Faltstruktur wirkender Lastendruck gegenüber einer ebenen Fläche wesentlich erhöht werden kann, zeigt ein einfacher Versuch: Man legt ein Blatt Papier auf eine Schüssel und kippt Kochsalz darauf; bereits eine kleine Menge führt zu einer Verformung. Faltet man dasselbe Blatt Papier, so hält sie einer mehrfachen Belastung stand, bevor es aus der Form gerät (vgl. Abb. 15a–d). Faltstrukturen eignen sich in Brücken sehr gut als Stabilisatoren (Abb. 15e). Man denke aber einfach auch nur an Verpackungskartons aus Wellpappe. Es geht dabei nicht nur um eine Gewichtsreduzierung, sondern bei gleicher Größe weist ein Karton aus zweiwelliger Pappe eine deutlich höhere Belastbarkeit auf als der aus einwelliger Pappe (30 kg bzw. 20 kg).

Schließt man eine gleichmäßig gefaltete Fläche zu einem Zylinder (Abb. 15f), so erhalten wir den Umriss eines Rippenkaktus (Abb. 15g–h), eine häufige Stammform der Kakteengewächse (Cactaceae). Einer der beiden größten Rippenkakteen ist der Saguaro *Carnegiea gigantea*, der in den südwestlichen USA und in Mexiko beheimatet und durch manche „Western“ bekannt geworden ist. [12] In seinem Stamm soll ein ausgewachsener Saguaro (bei 10–12 m Höhe und einem Gewicht von 6–8 Tonnen) ein Wasserreservoir von 2000–3000 (Walter 1973) oder gar 4000 Litern (Pfadenhauer & Klötzli 2014) haben. Nach einem ausgiebigen Gewitterguss kann er bis zu 750 l Wasser absorbieren (Mabberly 2008). Während einer langen Trockenperiode kann er diese Wassermenge durch Transpiration wieder verlieren – also ein ständiger Wechsel des Innenvolumens. Dies vollzieht sich, ohne dass es zu Spannungen in der Oberfläche kommt. Die Oberfläche bleibt nämlich dieselbe, ob die Rippen sich nähern und schmäler werden (bei Trockenheit) oder sich voneinander wegbewegen und an Breite gewinnen (bei Wasseraufnahme; Abb. 15k). Man spricht vom Blasebalg- oder Ziehharmonika-Effekt. Der Blasebalg und die Ziehharmonika sind sicherlich nicht von den Kakteen, die nur in Amerika vorkommen, abgeguckt. Der Blasebalg ist schon sehr früh zum Feueranfachen vom

[12] Gleichgroß, oder sogar noch etwas größer, ist der Cardón (*Pachycereus pringlei*) mit ähnlichem Verbreitungsareal (aber die beiden Kakteen-Arten kommen nie nebeneinander vor).

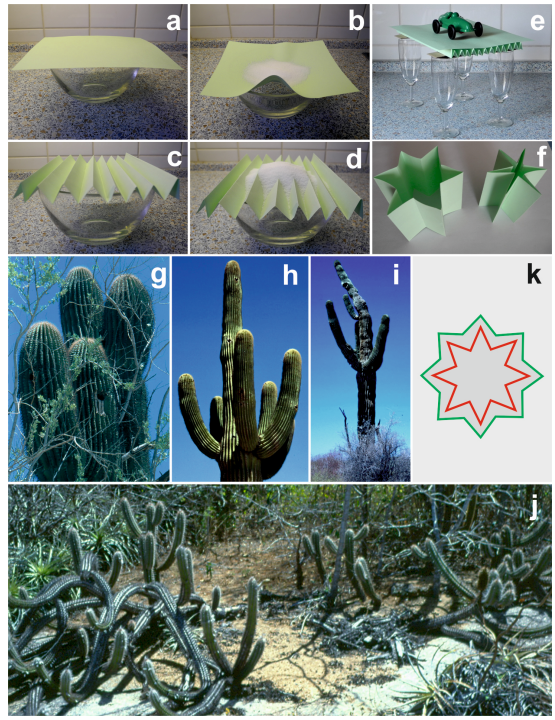


Abbildung 15: Stabilität von Faltstrukturen. – a, Ungefaltetes Blatt Papier mit Salz beladen verformt sich schon bei geringer Last (b). – c–d, Das gleiche Blatt Papier gleichmäßig gefaltet, verformt sich erst bei einer mehrfachen Last. – f, Faltstruktur zu einem im Querschnitt sternförmigen Zylinder bewirkt Blasebalg- bzw. Ziehharmonika-Effekt. – g–i, Saguaros (*Carnegiea gigantea*) verschiedenen Alters. Die Löcher, die sich an ihren Sprossen befinden, sind Eingänge zu Vogel-Bruthöhlen (von Schrei-Eule und Gila-Specht). Allzu viele Nester können zu Instabilitäten führen (i). – g, Im Bereich eines zeitweise wasserführenden Trockenflusses (wash) gedeiht die „Ammenpflanze“ (*Parkinsonia florida*, Fabaceae) noch in der Nähe des Saguaro (an trockeneren Standorten gräbt der Saguaro irgendwann seiner Ammenpflanze regelrecht das Wasser ab). – j, *Pilosocereus gounellei* am Randes eines Inselbergs (im Rücken des Photographen) bei Alagoinha (Bundesstaat Pernambuco, NO-Brasilien) mit Blick in einen Kakteen-Trockenbusch einer brasilianischen Caatinga (Dornstrauchsavanne). – k, Rot umrandeter Querschnitt eines Rippenkaktus nach längerer Trockenzeit, grün umrandet nach einem heftigen Gewitterregen im Sommer oder länger anhaltendem leichten Regen im Winter; die Volumenzunahme und -abnahme verlaufen völlig reibungslos, indem sich lediglich die Abstände der Rippenaußenkanten verändern (die Umrisslinie der steifen Außenhaut bleibt gleichlang); in Anlehnung an Spalding 1905 und Walter & Breckle 1984. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

Menschen parallel erfunden worden ohne genauere Kenntnis vom Wasserhaushalt der Kakteen zu jener Zeit.

Stabilisierung von Konstruktionen der Leichtbauweise finden wir vielfach bei schwimmenden Objekten. Spektakulär in dieser Hinsicht sind die beiden Riesen-Seerosen-Arten *Victoria amazonica* und *V. cruziana* aus der Familie der Seerosengewächse (Nymphaeaceae). Ihre riesigen kreisförmigen Blattspreiten mit aufgerichtetem Rand (Abb. 16a) und ein in der Mitte auf der Unterseite ansetzendem unter Wasser befindlichen Blattstiel (Abb. 16b–c) können einen Durchmesser von bis zu 3 m aufweisen. Die Heimat ist das tropische Südamerika. Die Pflanzen werden oft in Botanischen Gärten kultiviert, und man kann auf Postkarten und Bildern im Internet bisweilen Kinder auf den schwimmenden Blattspreiten liegend, sitzend oder stehend sehen, um deren Stabilität trotz relativ sparsamen Baumaterials zu demonstrieren. Außerhalb des Wassers ist es mit der Stabilität

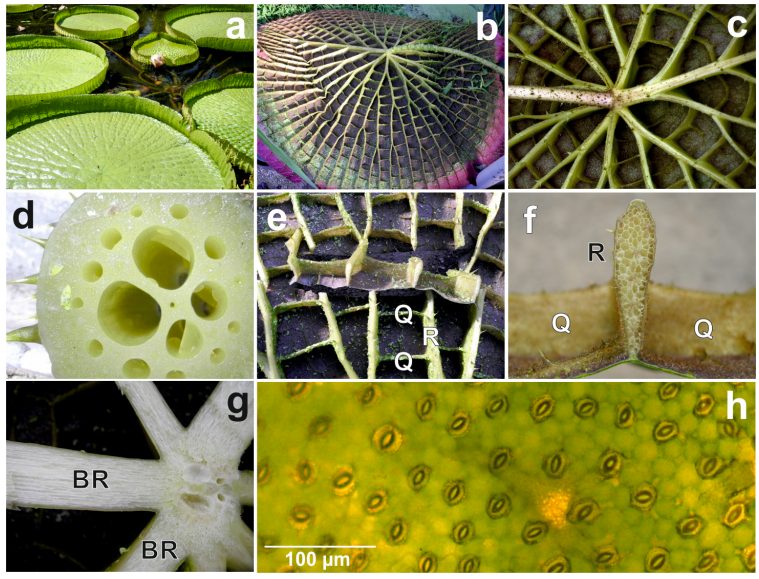


Abbildung 16: Große Seerose *Victoria*. – a, Riesige gestielte, schwimmende Blattspreite umgeben eine Blüte. – b, Blattspreite umgedreht mit Blattstielansatz. – c, Ausschnitt mit vom Blattstielansatz abzweigenden Radialleisten. – d, Interzellularenmuster im Blattstiel. – e, Radial- und Querleisten. – f, Eine Radialleiste quer geschnitten. – g, Schnitt durch die „Verteilerstelle“ am Blattstielansatz. – h, Epidermis der Blattoberseite mit Spaltöffnungen. BR = Basis der Radialleiste, R = Radialleiste, Q = Querleiste. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

der Blattkonstruktion jedoch am Ende. Die Baueigentümlichkeiten stehen ganz in der Angepasstheit an die Auftriebskraft des Wassers. Ihre Fragilität an der Luft macht sich durch Falten und teilweise auch Risse bemerkbar (Abb. 16b).

Schnell werden wir der Angepasstheit im Einzelnen gewahr, wenn wir die Morphologie und Anatomie des Blattes bei der Großen Seerose studieren. Auf der Spreitenunterseite gehen von der Ansatzstelle des Blattstiels strahlenförmig radiale Leisten, die wie der Blattstiel selbst bestachelt sind, aus, die sich zur Spreitenperipherie mehrfach dichotom verzweigen (Abb. 16b–c). In diesen Leisten (Abb. 16f zeigt einen Leistenquerschnitt) verlaufen schmale Leitgewebe, umgeben von einem lufthaltigen dünnwandigen Gewebe. Größere Lufträume (Interzellularen) bilden im Blattstiel ein fast regelmäßiges Muster (Abb. 16d). Sie stehen mit den zahlreichen schmalen Luftkanälchen (Interzellularen) der radialen Leisten in Verbindung, wie aus einem Schnitt an der „Verteilerstelle" des Blattstielansatzes zu entnehmen ist (Abb. 16g; BR = Basis der radialen Leisten). Die radialen Leisten (R in Abb. 16e) sind miteinander durch niedrigere Querleisten (Q in Abb. 16e–f) verbunden. Das filigrane Leistensystem ist in der Lage das eigentliche Chlorophyll haltige Gewebe, das sog. Mesophyll, welches zusammen mit der umgebenden Epidermis recht dünn ist, auf dem Wasser, und zwar nur auf dem Wasser, stabil zu halten. Die abschließende Gewebsschicht (Epidermis) der Blattoberseite ist von unzähligen Spaltöffnungen besetzt (dienen dem Gasaustausch und der Transpiration; Abb. 16h).

Eine Schwimmfähigkeit wird – dies gilt für pflanzliche Organe oder Organteile allgemein – durch ein ausgedehntes System von lufterfüllten Räumen (Interzellularen) gewährleistet. Zufällige Veränderungen an unterschiedlichen Stellen des Lebenszyklus während der Evolution mündeten über das Auswahlprinzip (natürliche Selektion) in eine perfekte (oder fast perfekte[13]) Angepasstheit an das Schwimmen auf dem Wasser. So konnte beispielsweise das Wasser zu einem Medium (oder Vehikel) bei der Ausbreitung der Samen genutzt werden. Denken wir etwa an die Ausbreitung der Frucht der Cocos-Palme (*Cocos nucifera*): Die Schwimmfähigkeit erhält sie durch das Auflösen der Gewebe zwischen den Leit-

[13] Mit einem Kompromiss ist immer dann zu rechnen, wenn eine Problemlösung mit weiteren Angepasstheiten in einem „Interessenkonflikt", besser Zielkonflikt, steht. Auch aus Kompromissen kann die Technik u.U. viel lernen.

bündeln unterhalb einer ledrigen Außenhaut und außerhalb eines harten Steinkerns, der den eigentlichen Samen umgibt (vgl. Erbar & Leins 2018).

Wenn wir die Dünen-Trichternarzisse *Pancratium maritimum* (Amaryllidaceae) an den Küsten des Mittelmeeres heranziehen (Abb. 17a), so sind es nicht Früchte, sondern die Samen selbst, deren Samenschale vollgepackt mit toten lufthaltigen Zellen ist (Abb. 17b–c; vgl. wieder Erbar & Leins 2018). Es liegt nahe, diese reich gekammerte Umhüllung auch als mechanischen Schutz des Samens zu sehen. Wenn die äußeren lufterfüllten Zellen mechanisch verletzt werden – z. B. falls die Samen durch den Wind über sandige Flächen als sog. Bodenläufer (eine zusätzliche Ausbreitungsmöglichkeit) getrieben werden – kann die Schwimmfähigkeit ohne Einschränkung erhalten bleiben. Die Sicherheit ist um so höher, je höher die Zahl der Hohlräume ist und je stärker und dichter die Trennwände (Zellwände) aneinanderschließen. „Die Schotten dicht machen" ist eine Redewendung aus der Seeschifffahrt. Tatsächlich können die Trennwände in der Samenschale der Trich-

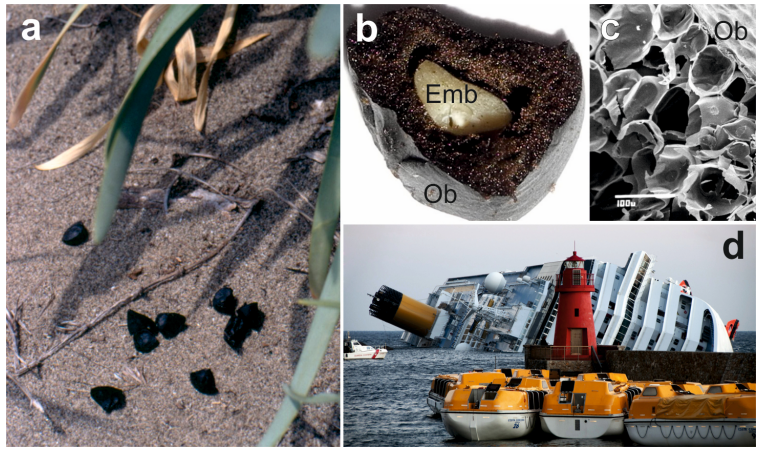


Abbildung 17: Schwimmfähigkeit. – a–c, Samen der Dünen-Trichternarzisse *Pancratium maritimum* (Amaryllidaceae). – a, Aus der Frucht entlassene Samen am Strand in der Nähe der Mutterpflanze. – b, Samen aufgeschnitten; eine dicke, aber stark lufterfüllte und dadurch leichte Samenschale umhüllt den Embryo (Emb). – c, Peripherer Ausschnitt der Samenschale im rasterelektronenmikroskopischen Bild mit Luftgewebe und glatter Oberfläche (OB). – d, Havarie der „Costa Concordia": Das auf Grund liegende Kreuzfahrtschiff, im Vordergrund einige Rettungsboote im Hafen von Giglio. Bildquelle siehe unter „Bildnachweise aus dem Internet". Bildquellen a–c: Eigene Aufnahmen.

ternarzisse mit den Schotten im Schiffsrumpf eines Personenschiffs verglichen werden. Sind die Schotten durch Öffnen von Schottentüren nicht dicht verschlossen oder sind von vornherein zu wenige vorhanden, ist die Gefahr des Sinkens des Schiffes nach einer Havarie erhöht (siehe etwa die „Costa Concordia“, Abb. 17d; Culjak 2014).

2.6 Stabilitätsaspekte in der Architektur

„Festen Boden unter den Füßen“ – das haben die Bäume, die im „Wackelwald“ (eine Attraktion bei Bad Buchau, Baden-Württemberg) wachsen, nicht. In diesem Waldgebiet liegt unter einer nur 30 cm dicken Bodenschicht aus Torf eine etwa 6 m mächtige, puddingartige Masse aus Ablagerungen des nahe gelegenen, früher größeren Federsees. Die Anpassung, eine ausreichende Standfestigkeit der Bäume zu erreichen, besteht in der Fähigkeit sog. Brettwurzeln auszubilden, kräftige, fast horizontale, durch einseitiges sekundäres Dickenwachstum brettartige Wurzeln an der Basis des Stammes. Diese Fähigkeit ist genetisch bedingt, wird aber nur bei starker Bodennässe genutzt; im Wackelwald handelt es sich bei den Bäumen mit Brettwurzeln meist um die Moor-Birke *Betula pubescens* (Betulaceae; Abb. 18a). Ein wellenartiges Schwanken des Waldbodens ist zu spüren, wenn ein Wind die Bäume hin und her bewegt, übertragen über deren flach ausgebreitetes Wurzelwerk.

Wer zum ersten Mal vor einem bis zu 60 m hohen Baumriesen in einem tropischen Regenwald, z. B. in Thailand (*Ficus spec.*, Abb. 18b) steht, ist geradezu überwältigt von der Mächtigkeit der Brettwurzeln, die pfeilförmig bis zu 9 m den Stamm heraufreichen können. Das Vorkommen derartiger Wurzeln ist eine Angepasstheit an die relativ dünne Bodenschicht im tropischen Regenwald. Die Bäume sind wiederum Flachwurzler, deren Wurzelsystem meist eine Tiefe von nur 30 cm erreicht. Die hohe Standfestigkeit durch die schräg nach oben verlaufenden Brettwurzeln wird in der Architektur beispielsweise beim Bau eines großen Hotels im Erdbeben-Hotspot San Francisco (USA) nachgeahmt (Abb. 18c–d). Die Gästezimmer befinden sich ausschließlich in der Peripherie gegenseitig sich stützender Fronten und sind durch Galerien zugänglich. Die Wohnfronten lassen eine riesige repräsentative Halle zwischen sich.

Ein anderes Bauprinzip eines „erdbebensicheren“ Hotels findet sich beispielsweise in Yokohama (Japan; Abb. 19e–f), die hervorragende Biegefestigkeit von

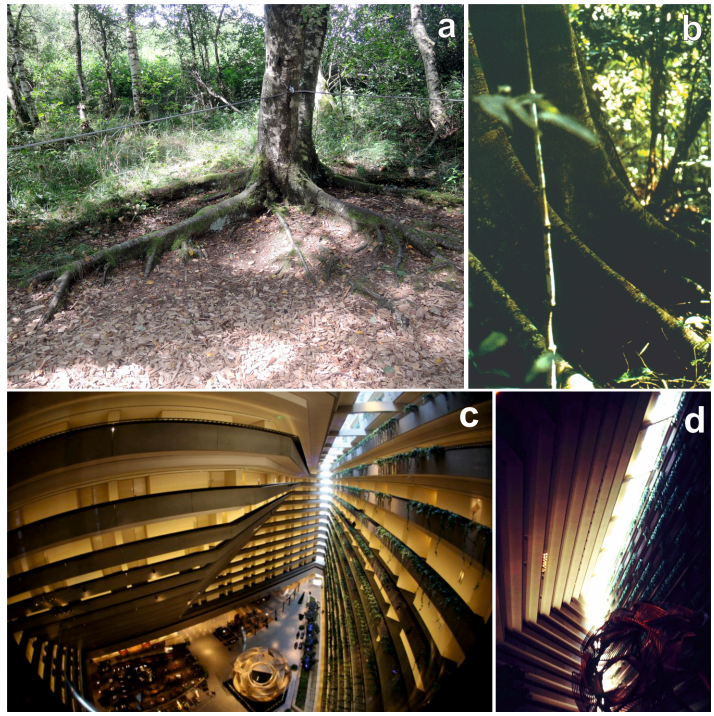


Abbildung 18: Vorbild Brettwurzeln. – a, Stammbasis mit Brettwurzel einer Moor-Birke *Betula pubescens* im Wackelwald bei Bad Buchau. – b, Brettwurzeln eines Regenwaldriesen im tropischen Regenwald in Thailand. – c–d, Nachahmung in der Architektur eines „erdbebensicheren" Hotels in San Francisco (Hyatt Regency); Näheres siehe Text. – c, Bildquelle siehe unter „Bildnachweise aus dem Internet". Bildquellen a–b: Eigene Aufnahmen.

Grashalmen, namentlich des Bambus, nachahmend (Abb. 19a–d).[14] Der Wohntrakt nimmt die Wand eines riesigen Hohlzylinders ein (die Zimmer sind entsprechend klein!). Einzelne Diaphragmen, die dem Achsenteil eines Grasknotens (an dieser Stelle entspringen die Blätter) entsprechen, verhindern beim Biegen Knicke, erhöhen also die Biegefestigkeit. Ob und in welcher Anzahl solche Trennwände in

[14] Von der Biegefestigkeit konnten wir uns im Restaurant im 40. Stockwerk selbst überzeugen, als während eines heftigen Taifuns das Gebäude deutlich spürbar ins Schwanken geriet.

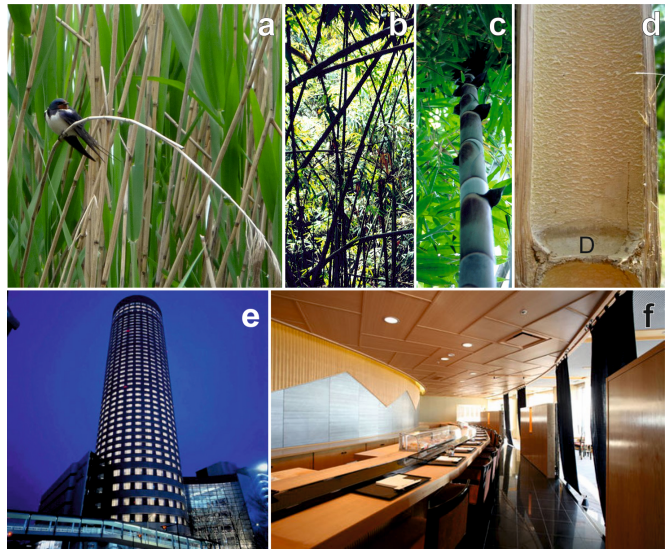


Abbildung 19: Vorbild Grashalme. – a, Schilfrohr (*Phragmites australis*). – b–d, Bambus (*Bambusa*). – b–c, Standort im Regenwald in Thailand. – d, *Bambusa vulgaris*. Längsschnitt durch die hohle Achse mit Diaphragma (D). – e, Nachbau eines „erdbebensicheren" Hotels in Yokohama (Shin Yokohama Prince Hotel). – f, „Ringrestaurant" in einem oberen Stockwerk (in der 40. Etage von 42). – e–f, Bildquellen siehe unter „Bildnachweise aus dem Internet". Bildquellen a–d: Eigene Aufnahmen.

dem besagten Hotel vorhanden sind, entzieht sich unserer Kenntnis. Ganz oben befindet sich ein Restaurant, das ebenfalls ringförmig gestaltet ist (Abb. 19f).

3 Von raffinierten Strategien bei Organismen in einem Ökosystem: Fressen und Gefressenwerden, Mutualismen, Täuschen, Betrügen, Töten

Im „Fressen und Gefressenwerden", quasi dem Hauptthema in einem Ökosystem[15], ist der Fressende natürlich im Vorteil, der Gefressene hat Pech gehabt. Schutz vor dem Gefressenwerden bieten Unterschlupf oder Tarnung. Dafür gibt es

[15] Ökosysteme sind Lebensgemeinschaften, in denen Produzenten (grüne Pflanzen), Konsumenten (meist Tiere) und Destruenten (z. B. Mikroorganismen) im momentanen Gleichgewicht stehen.

viele Beispiele. Denken wir etwa an die Arten der Stabschrecken (Bacteriidae), die in Körperform und Färbung trockene Äste nachahmen und, wenn sie auf einem Geäst eines Holzgewächses sitzen, unauffällig sind, oder die grasgrüne Schwertschrecke *Conocephalus dorsalis* (Conocephalidae; Abb. 20a), die auf nassen Wiesen zu finden ist. In der Abbildung befindet sich auch der Beutejäger, der die Schwertschrecke dennoch aufgespürt hat und in sein röhrenförmiges Nest (z. B. in einem „Insektenhotel“) verfrachtet. Es ist eine aus Mexiko stammende schwarze Wespe, die man Stahlblauer Grillenjäger (*Isodontia mexicana*) nennt. Diese Grabwespen- (Sphecidae-) Art ist in den 1960er Jahren nach Südfrankreich eingeschleppt worden, hat sich von dort aus auf weite Teile Südeuropas ausgebreitet und ist 2010 ins mittlere Oberrheintal gekommen.

Sandige Böden, auf denen oft tote dunklere Pflanzenreste liegen, besiedelt die zu den Feldheuschrecken (Acrididae) gehörende *Oedipoda caerulescens* (Abb. 20b). Auf letztere wird man lediglich bei ihrem Auffliegen aufmerksam; ihre Unterflügel sind hellblau, was ihr den Namen, Blauflügelige Ödlandschrecke, gibt.

Wenig gegen den Untergrund kontrastiert sind viele Schwebfliegen-Arten, wenn diese auf gelben Blüten bzw. Blütenständen sitzen (Abb. 21a, Gemeine Sumpfschwebfliege *Helophilus pendulus* auf der Kanadischen Goldrute *Solidago canadensis*, Asteraceae). Hinzu kommt hier noch ihre optische Erscheinung: Die

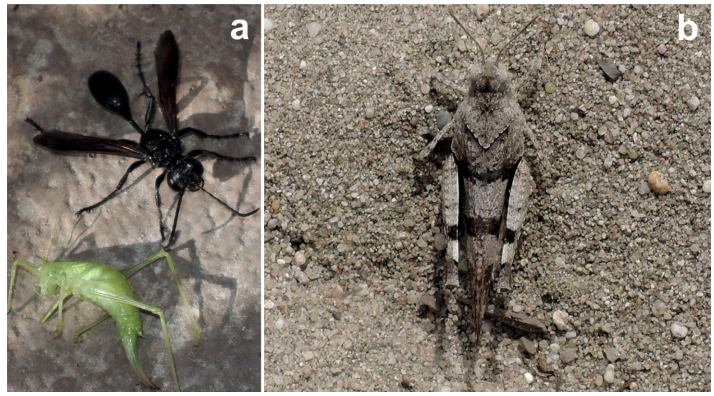


Abbildung 20: Tarnung. – a, Grasgrüne Schwertschrecke *Conocephalus dorsalis* vom Stahlblauen Grillenjäger *Isodontia mexicana* erbeutet (photographiert 2020 in Heidelberg-Handschuhsheim). – b, Blauflügelige Ödlandschrecke *Oedipoda caerulescens* (Binnendünen bei Sandhausen, Baden-Württemberg). Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

schwarz-gelbe Bänderung erinnert an jene vieler Wespen. Wespen haben für viele potentielle Raubfeinde die unangenehme Eigenschaft ihres Stechens. Wenn beispielsweise Vögel, Kröten, Eidechsen oder kleine Säugetiere durch einen Wespenstich schlechte Erfahrungen gemacht haben, werden sie in Zukunft von solchen Insekten ablassen. Unbewehrte Insekten, die, wie Klaus Lunau (2011) es in seinem empfehlenswerten Buch beschreibt, einen „Wespenharnisch" tragen, profitieren erheblich, denn die schwarz-gelbe Bänderung bzw. Ringelung ist bei erfahrenen räuberischen Tieren unmittelbar mit Gestochenwerden verknüpft.

Harmlose Insekten mit Wespenharnisch finden sich vielfach oft nah zusammen mit Echten Wespen. Abb. 21b zeigt links oben eine Borstige Dolchwespe *Scolia hirta* auf dem reichblütigen Gesamtblütenstand vom Gewöhnlichen Wasserdost *Eupatorium cannabinum* (Asteraceae). Im Ausschnitt darunter betätigen sich zwei Individuen der Großen Sumpfschwebfliege *Helophilus trivittatus* pollenfressenderweise bei der Bestäubung. Zusammen mit Honigbienen hält sich oft auch die Hainschwebfliege *Episyrphus balteatus* auf der normalerweise windbestäubten *Artemisia vulgaris* (Gewöhnlicher Beifuß, Asteraceae) auf (Abb. 21c). Vielleicht findet auch die Fleischfliege *Polietes lardaria* mit ihrer schwarz-grauen Bänderung einen gewissen Schutz. Sie ist oft auf Doldenblütlern (Apiaceae), beispielsweise auf *Angelica sylvestris* (Wald-Engelwurz), zusammen mit Wespen unterwegs (Abb. 21d).

Auch manche Käfer sind im Verlauf der Evolution mit einem, wenngleich weniger exakt gemusterten „Wespenharnisch" ausgestattet worden. In der Abb. 21e ist ein Bockkäfer aus den schwierig zu bestimmenden Schmalbock-Arten der Gattung *Strangalia* wieder auf der Doppeldolde von *Angelica sylvestris* in Begleitung von Wespen zu finden (Abb. 21e). Ein friedliches Nebeneinander zwischen Dunklen Erd-Hummeln (*Bombus terrestris*) und einem mit gebänderten Deckflügeln versehenen Käfer, nämlich dem Gebänderten Pinselkäfer *Trichius fasciatus* auf dem Blütenkopf der Gewöhnlichen Kratzdistel *Cirsium vulgare* (Asteraceae) ist kein seltener Anblick (Abb. 21f).

Die Bänderung auf den Deckflügeln der blütenbesuchenden Bockkäfer können innerhalb einer Art variabel sein. Variabel ist sie auch beim Pinselkäfer. Es wird diesbezüglich genetisch gesehen „gespielt", und dabei mögen vielleicht auch Umwelteinflüsse eine Rolle spielen. Wir müssen stets daran denken, dass die Käfer ihr Muster nicht aussuchen können. Sie sind auf den Zufall angewiesen, und ihre Muster ähneln mal mehr und mal weniger einem Wespenmuster. Es ist nicht ganz

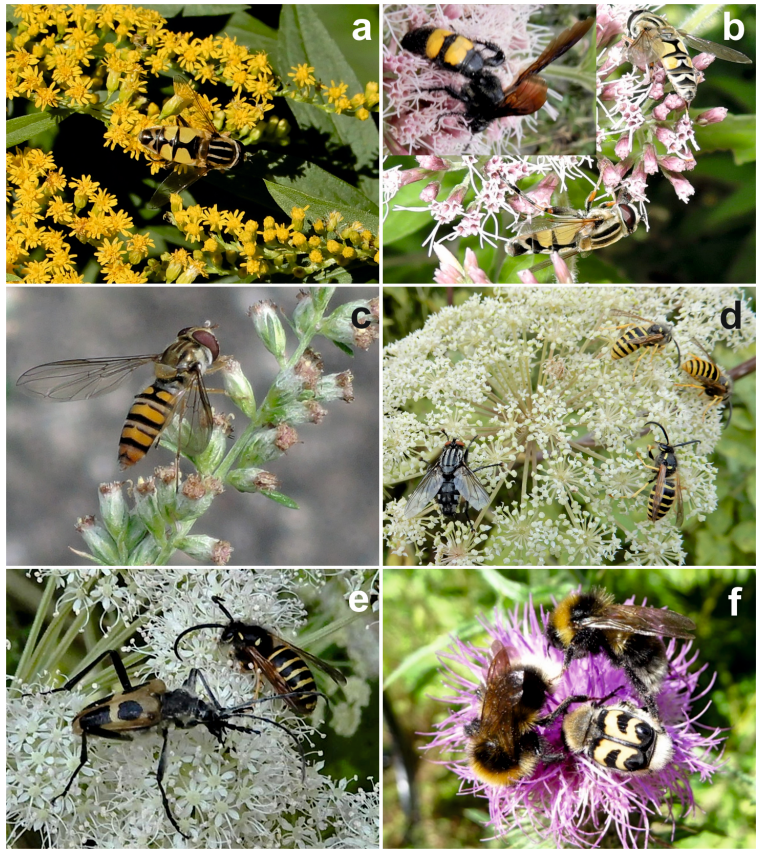


Abbildung 21: Harmlose Insekten tarnen sich mit einem „Wespenharnisch". – a, Gemeine Sumpfschwebfliege *Helophilus pendulus* auf der Kanadischen Goldrute *Solidago canadensis*, Asteraceae. – b, Links oben: Borstige Dolchwespe *Scolia hirta*, rechts und unten: Große Sumpfschwebfliege *Helophilus trivittatus* auf dem gleichen Blütenstand vom Gewöhnlichen Wasserdost *Eupatorium cannabinum* (Asteraceae). – c, Hainschwebfliege *Episyrphus balteatus* ernährt sich vom Pollen des Gewöhnlichen Beifuß *Artemisia vulgaris* (Asteraceae). – d, Eine Fleischfliege (*Polietes lardaria*) mit ihrer schwarz-grauen Bänderung hält sich gerne in der Nähe von Wespen auf Doldenblütlern (Apiaceae) auf (hier auf einem Blütenstand der Wald-Engelwurz *Angelica sylvestris*. – e, Ein sehr grob schwarz-gelb gebänderter Schmalbock-Käfer der Gattung *Strangalia* nahe bei einer Wespe ebenfalls auf dem Blütenstand der Wald-Engelwurz. – f, Ein Gebänderter Pinselkäfer *Trichius fasciatus* auf dem Blütenkopf der Gewöhnlichen Kratzdistel *Cirsium vulgare* (Asteraceae) zusammen mit zwei Erd-Hummeln (*Bombus terrestris*). Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

einfach einen Schwellenwert herauszufinden, ab wann die Wirksamkeit auf Prädatoren bei immer stärkerer „Vereinfachung“ des Musters nicht mehr vorhanden ist. Die Autoren des vorliegenden Artikels haben vielfach die Beobachtung gemacht, dass sich die betreffenden grob gemusterten Insekten beim Besuch von großen Blumen (Blütenständen) gerne in der Nähe von Wespen aufhalten.

Experimente haben gezeigt, dass Augen, die häufig auf Schmetterlingsflügeln imitiert werden, z. B. beim Tagpfauenauge *Aglais io* (Abb. 22a), eine auf Fressfeinde, z. B. Vögel, abschreckende Wirkung haben (siehe etwa Vallin et al. 2005). Dies ist auch für andere „Augenfalter“ wie etwa den Weißbindigen Bergwald-Mohrenfalter *Erebia euryale* (Abb. 22b) anzunehmen. Ähnliches gilt wahrscheinlich auch für die auffallend große Raupe des Mittleren Weinschwärmers *Deilephila elpenor* (Abb. 22c–d). Die Raupe hat einen relativ kleinen Kopf (Pfeile in Abb. 22c–d) mit äußerst scharfen Mandibeln, mit denen sie im rasanten Tempo die Blätter (hier vom Drüsigen Springkraut *Impatiens glandulifera*) Stück für Stück zersägt und einverleibt. Über dem Bereich der Brustbeine und kurz dahinter finden wir beidseits zwei „gar schaurig“ dreinschauende Augenpaarimitate. Diese werden in besonderer Weise „gefahrvoll“ präsentiert, wenn man ihr nahe kommt, indem sich der Bereich über den bleichen Brustbeinen aufbläht und der Vorderkörper sich hin und her bewegt. Nach Lunau (2011) verstärkt sich hierdurch der Eindruck eines Schlangenkopfes.

Eine Tarnung und damit verbunden aus dem Hinterhalt zu töten, ist uns aus unserem menschlichen Dasein wohl bekannt. Ob als Jäger oder Terrorist oder allgemein bei „modernen“ kriegerischen Auseinandersetzungen oder ganz einfach bei einem Banküberfall oder bei der Fallenstellung zum Töten von Insekten oder … oder … bedient sich der Mensch mancher Tricks aus der „Trickkiste“ der Evolution, die schon viele, viele Millionen Jahre alt sind.

Töten aus dem Hinterhalt mit Hilfe einer nicht zu überbietenden Perfektion der Tarnung lässt sich (jedes Mal mit großem Staunen!) bei der Veränderlichen Krabbenspinne *Misumena vatia* (Abb. 23a) beobachten. Diese Krabbenspinne ist in der Lage einen Farbwechsel durchzuführen: Auf weißen Blüten oder Blütenständen auf Beute wartend (meist Fliegen) nimmt sie eine weiße Farbe an, auf gelben eine gelbe Farbe. Verantwortlich für die Gelbfärbung ist ein flüssiger gelber Farbstoff, der vom Innern des Körpers in die obere Zellschicht verlagert wird. Dieser Vorgang kann Tage dauern, wie aus der profunden Schilderung von Heiko



Abbildung 22: Augenimitationen haben auf Fressfeinde eine abschreckende Wirkung. – a, Je zwei Augenattrappen auf der Flügeloberseite des Tagpfauenauges *Aglais io*. – b, Weißbindiger Bergwald-Mohrenfalter *Erebia euryale*. – c–d, Raupe des Mittleren Weinschwärmers *Deilephila elpenor* mit beidseits zwei Augenpaarimitationen. Die Pfeile weisen auf den kleinen Kopf. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

Bellmann (2010) zu entnehmen ist. Der Farbwechsel wird über den Gesichtssinn ausgelöst.

Eine weitere Färbung kommt bei der Gehöckerten Krabbenspinne *Thomisus onustus* vor. Diese Spinne kann sich auf gelben, weißen und hellvioletten Blumen mit der entsprechenden Färbung anpassen. Sie unterscheidet sich von der vorigen Spinnen-Art in der Form des Hinterleibs. *Thomisus onustus* hat einen kantigen Hinterleib mit der breitesten Kante an dessen Ende; bei *Misumena* ist der Hinterleib mehr oval-kugelig. In Abb. 23b hat eine *Thomisus onustus*-Spinne auf dem Blütenkopf von *Glebionis coronaria* (Kronenwucherblume, Asteraceae) eine Fliege, in Abb. 23c ein Hosenbienen-Weibchen (*Dasypoda hirtipes*) gefangen. Das Fangen erfolgt immer auf die gleiche Weise: Bei Ankunft der zukünftigen Beute schießt die Spinne blitzschnell vor und appliziert dem Opfer zwischen Kopf und Thorax ein betäubendes Gift. Ein Hosenbienen-Männchen hat sich (Abb. 23d) – wieder auf Glebionis - eine weitere Krabbenspinnen-Art, nämlich

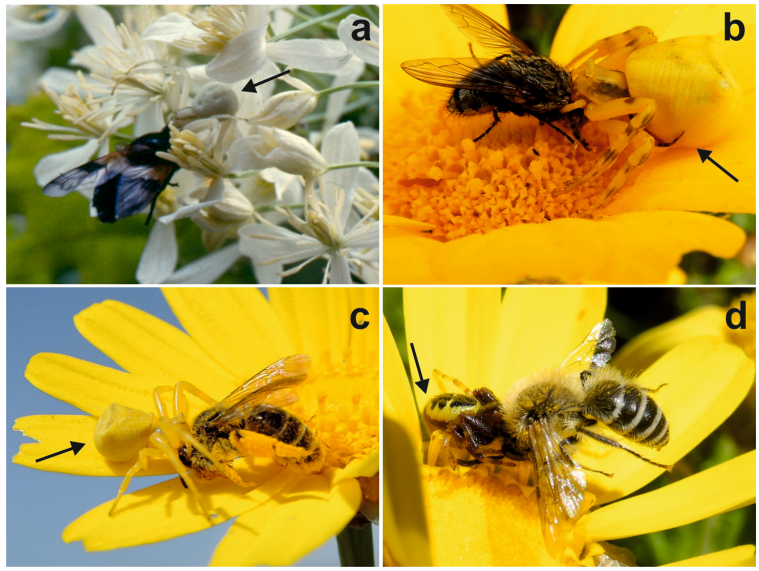


Abbildung 23: Perfekt getarnte räuberische Krabbenspinnen (Pfeile) auf weißen und gelben Blumen sind in der Lage, ihre Körperfarbe dem Untergrund anzupassen und quasi aus dem Hinterhalt besuchende Insekten blitzschnell zu lähmen. – a, Veränderliche Krabbenspinne *Misumena vatia* auf den Blüten der Aufrechten Waldrebe *Clematis recta* (Ranunculaceae) mit gefangener Fliege. – b–d, Beutefang auf den Blütenköpfen der Kronenwucherblume *Glebionis coronaria* (Asteraceae). – b, Eine Fliege wurde hier von einer Gehöckerten Krabbenspinne *Thomisus onustus* erbeutet. -c, Gehöckerte Krabbenspinne mit einem Hosenbienen-Weibchen (*Dasypoda hirtipes*) als Beute. – d, Südliche Glanz-Krabbenspinne *Synema globosum* hat sich ein Hosenbienen-Männchen geschnappt. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

die Südliche Glanz-Krabbenspinne *Synema globosum*, geschnappt. Diese weist eine (variable) schwarz-gelbe Musterung auf dem längs-ovalen Hinterleib auf. Möglicherweise hat „im Eifer des Gefechts“ das Hosenbienen-Männchen den Räuber mit einem Weibchen verwechselt. Das satte glänzende Gelb an den Seiten des Spinnen-Hinterleibs imitiert, wenngleich grob, vielleicht die reich mit Pollen gefüllten Hosen an den Hinterbeinen eines Hosenbienen-Weibchens, die im Kontrast zum schwarz-gelb beringten Abdomen stehen. Genauere Untersuchungen im Hinblick auf das UV-Sehen der Bienen könnten weitere Hinweise geben. Es besteht zuweilen, vor allem bei einer großen Begeisterung bei der Beobachtung von Naturphänomenen, die Gefahr einer Überinterpretation.

Von Täuschen, Betrügen und Töten bleiben die Pflanzen nicht ausgeschlossen. Als vor etwa 140 Millionen Jahren oder vielleicht noch früher die Bedecktsamer (= Angiospermen = Blütenpflanzen) entstanden sind, kam es zu einem großartigen Zusammenspiel zwischen Blumen und Tieren (zunächst Insekten). Sie traten in ein mutualistisches Verhältnis ein, ein Verhältnis, das auf einem gegenseitigen Geben und Nehmen beruht: Speise (Pollenkörner oder/und Nektar) gegen Pollentransport zur Bestäubung. Nicht selten sind in verschiedenen Verwandtschaftsbereichen Blüten aus dem mutualistischen Verhältnis ausgeschert (siehe z. B. Dafni 1984, Vogel 1975, 1993, Leins & Erbar 2008, 2010, Erbar et al. 2017, Erbar 2017).

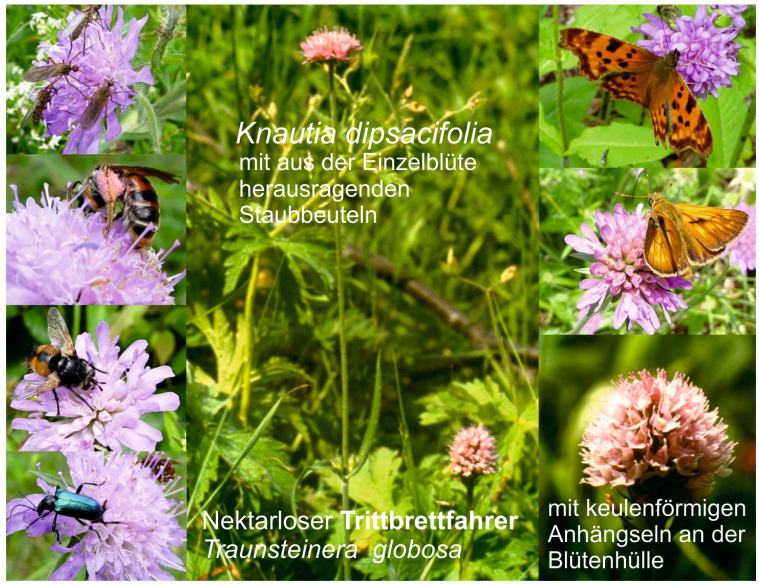


Abbildung 24: Als Trittbrettfahrer unter den Blumen sind die Blütenstände der Kugelorchis *Traunsteinera globosa* (Orchidaceae) zu nennen. Sie bietet den besuchenden Insekten weder Nektar noch Pollen als Gegengabe für den Pollentransport zum Zwecke der Bestäubung. Sie schleicht sich regelrecht in dichte Populationen der Wald-Witwenblume *Knautia dipsacifolia* (Caprifoliaceae-Dipsacoideae) ein, an deren Blütenständen sie in Farbe und Form eine bis ins Detail gehend optische Angepasstheit erfuhr. *Knautia*-Blütenstände weisen als Generalisten ein hohes Bestäuberspektrum auf; linke Seite von oben nach unten: Tanzfliegen der Gattung *Empis*; Knautien-Sandbiene *Andrena hattorfiana*; Igelfliege *Tachina fera*; Blauvioletter Scheibenbock *Callidium violaceum*; rechte Seite von oben nach unten: C- Falter *Polygonia c-album*; Rostfarbiger Dickkopffalter *Ochlodes venatus*. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

Relativ „harmlos“ sind die Trittbrettfahrer unter den Blumen. Die Kugelorchis (auch Kugelknabenkraut genannt) *Traunsteinera globosa* (Orchidaceae, Abb. 24 rechts unten) bildet keinen Nektar. Ihre Blütenstände haben sich (natürlich über Zufall!) in der Weise angepasst, dass sie den Blütenständen der Wald-Witwenblume *Knautia dipsacifolia* (Caprifoliaceae-Dipsacoideae) in Farbe und Form bis ins Detail ähneln. Die Kugelorchis muss sich lediglich in eine dichte Population der Knautien einschleichen, um reichlich Insektenbesuche zu bekommen; die Insekten gehen natürlich leer aus. Das hohe Bestäuberspektrum bei der Knautie sichert natürlich auch eine genügend hohe Bestäuberrate bei der Kugelorchis.

Farb – und Formveränderungen an Verpackungen gaukeln nicht selten Verbrauchern etwas vor; hier sind Werbe-Psychologen gefragt. Man ist gewohnt, Bio-Nahrungsmittel grün oder zumindest teilweise grün zu verpacken. Man schaue sich heutzutage im Supermarkt einmal die Vitrinen an und man wird feststellen, dass auf Verpackungen von Nicht-Bio-Nahrungsmitteln oft eine grüne Farbe noch hinzukommt oder sogar dominiert. In einem Supermarkt auf Madeira werden Mineralwässer unterschiedlicher Qualität mit entsprechend unterschiedlichen Preisen angeboten (Abb. 25). Das teuerste Mineralwasser im entsprechenden Regal ist das aus der Perrier-Quelle, vielen Verbrauchern als edles Mineralwasser bekannt.



Abbildung 25: (Intelligente?) Verkaufsstrategie in den Supermarkt-Regalen. Erläuterungen im Text. Bildquelle: Eigene Aufnahme.

Warum nicht das darunter befindliche deutlich billigere Vidago kaufen? Kaufmännisch intelligent platziert, ist man unbewusst geneigt, die billigere zu nehmen, verführt vom Outfit der Flasche und des Etiketts, das sich assoziativ mit dem „Edelwasser" vergleicht. Ein anspruchsvoller Verbraucher wird sich Zeit nehmen und prüfen, welches Wasser wirklich das bessere ist.

Übertreibung, falsches Versprechen, Irreführung, Lüge, Betrug prägen die industrielle Werbung. Täglich wird der Verbraucher in den Medien damit überschüttet. Intelligente (informierte) Verbraucher lassen sich weniger verführen. Werbung zieht vielmehr den Dummen (Uninformierten) das Geld aus der Tasche. Sind also diejenigen, die Werbung machen, die Gescheiteren? Blumen sind weder gescheit noch dumm. Sie vermögen jedoch für sich selbst durch die erwähnten Falschmeldungen sehr lange Zeiträume hinweg außerordentlich erfolgreich zu sein (z. B. Leins & Erbar 2008, 2010, Erbar 2017). Blüten können z. B. Fliegen anlocken, wenn sie – den Fresstrieb der Tiere ansprechend – stark übertreibende Nektarattrappen „ins Schaufenster" stellen. Das Sumpf-Herzblatt oder Studentenröschen *Parnassia palustris* (Parnassiaceae) liefert ein beeindruckendes Beispiel (Abb. 26): Die einzeln stehenden Blüten besitzen fünf prinzessinenkrönchen-förmige Organe, die mit fünf Staubgefäßen alternieren. Am Ende der Krönchenzacken befindet sich jeweils ein gelbes wässrig-glänzendes Kügelchen. Der Glanz der aber völlig trockenen Attrappen rührt von ihrer seidensatinartigen Oberfläche her (Abb. 27c). Ganz ohne Nektar sind die krönchenartigen Organe jedoch nicht; an ihrer stielförmigen Basis wird ein wenig von diesem süßen Saft aus sog. Saftspalten ausgeschieden (Abb. 27a–b), der von den Fliegen bald nach der Landung offensichtlich olfaktorisch wahrgenommen wird (Abb. 26b). Die kreisförmige Anordnung der Krönchen „zwingt" die Fliege sich einmal wie auf einer Drehscheibe zu drehen (Abb. 28); sie nimmt dabei aus jeweils einer Anthere (Staubbeutel) mit ihrem Bauch punktförmig reichlich Pollen auf. Die Antheren werden durch Filament- (Staubfaden-) Wachstum nacheinander nach oben über die noch unreifen Narben des Fruchtknotens geschoben (Abb. 26b); bei günstiger Witterung dauert das Präsentieren der fünf Staubbeutel insgesamt fünf Tage (siehe Abb. 32 in Erbar & Leins 2020). Die leeren Antheren werden, nachdem sich ihre Filamente nach außen biegen, meistens abgeworfen. Schließlich ist die Blüte im weiblichen Zustand (Abb. 26c) und präsentiert ihre reifen Narben genau dort, wo sich zuvor die Staubbeutel befanden; exakter kann wohl eine Bestäubung durch ein mit Pollen beladenes Insekt nicht funktionieren.

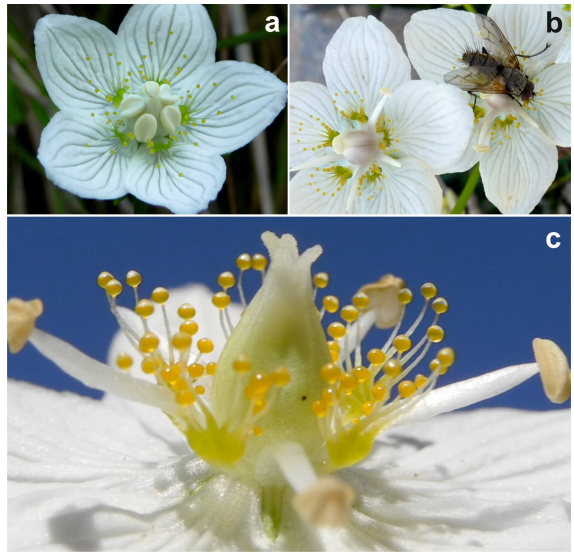


Abbildung 26: Das Sumpf-Herzblatt *Parnassia palustris* (Parnassiaceae), dessen Blüten mehr versprechen, als sie halten. Die glänzenden „Nektartropfen“ sind strohtrocken, aber locken wegen ihres Glanzes reichlich Fliegen an. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

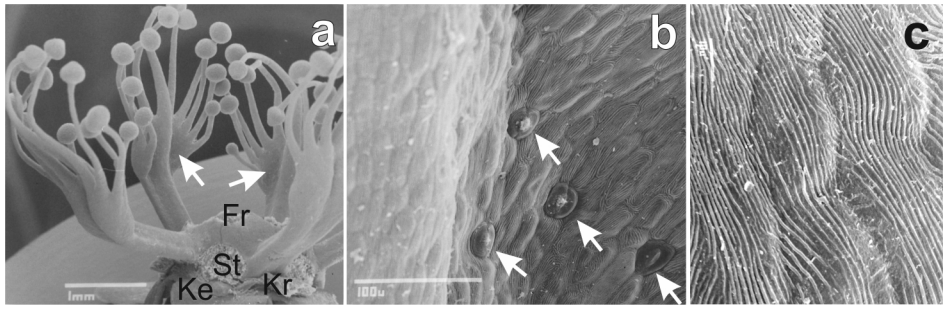


Abbildung 27: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Nektarorgane des Sumpf-Herzblatts. – a, Die angeberischen prinzessinnenkrönchenartigen Blütenorgane tragen am Ende der Strahlen kugelförmige Scheinnektarien. Kronblätter (Kr), Staubgefäße (St) und Fruchtknoten (Fr) abpräpariert; Ke = Kelchblatt. Pfeile weisen auf Nektarspalten an der stielartigen Basis. – b, Vergrößerung der Nektar sezernierenden Region mit Saftspalten (Pfeile). – c, Bogig striate Oberfläche der kugelförmigen Scheinnektarien. Aus Leins & Erbar 2008, verändert.

Neben solchen an den Fresstrieb von Insekten angepassten (im Sinne von Mehr-Schein-als-Sein) betrügerischen Blüten finden sich in den unterschiedlichsten Verwandtschaftsbereichen der Blütenpflanzen immer wieder Täuschblumen mit einseitigen Angepasstheiten an Insekten-Verhaltensmuster, die die Sexualität oder den Bruttrieb betreffen. Wohl bekannt als Sexualtäuschblumen sind diejenigen einer Reihe von Arten der Orchideen-Gattung *Ophrys* (Ragwurz; Paulus & Gack 1980, 1981, Paulus 2007). Brutplatz-Täuschblumen begegnen wir etwa bei den Osterluzeigewächsen, den Aristolochiaceae. Höchst elaboriert sind unter ihnen die Kesselfallen und Rutschbahnen der *Aristolochia*-Arten (z. B. Sprengel 1793, Vogel 1965, 1978, Leins & Erbar 2008, 2010, Erbar et al. 2017, Erbar 2017). Ebenfalls den Osterluzeigewächsen angehörende Haselwurz- bzw. *Asarum*-Arten täuschen Brutplätze vor. Bei *Asarum caudatum*, der Geschwänzten Haselwurz aus Nordamerika, hat der Brutplatzbetrug sogar Todesfolgen für die Brut.

Es war der bedeutendste Blütenbiologe des 20. Jahrhunderts, Stefan Vogel – er forschte bis ins 21. Jahrhundert hinein und hat bahnbrechende Entdeckungen



Abbildung 28: Die Blüten des Sumpf-Herzblatts sind blütenökologisch eine Drehscheibenblume. – a–d, Schnell aufeinanderfolgende Schnappschüsse eines Blütenbesuchers. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

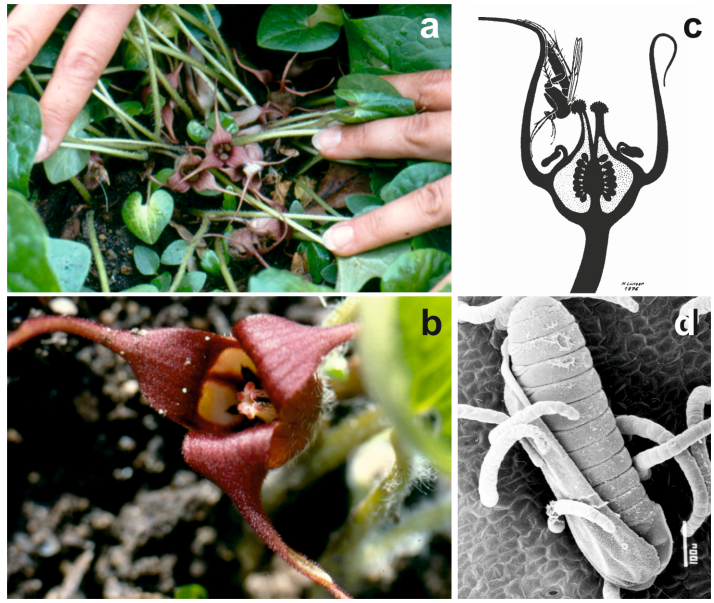


Abbildung 29: Die Blüten der Geschwänzten Haselwurz *Asarum caudatum* (Aristolochiaceae) aus Nordamerika sind betrügerische Brutplatz imitierende Täuschblumen mit Todesfolgen für die Nachkommen der besuchenden Pilzmücken (siehe Text). c aus Vogel 1978. Bildquellen a–b,d: Eigene Aufnahmen.

gemacht –, der als erster das betrügerische Verhältnis dieser Blüte gegenüber Pilzmücken aufdeckte (Vogel 1978). Auf den ersten Blick ist beim Blütenaufbau (Abb. 29a–b) kaum eine Beziehung zu den echten Brutplätzen der Pilzmücken zu erkennen. Für die Eiablage suchen die Pilzmücken feuchte, kühle Räume („feuchte Krypten“) auf, wie sie etwa zwischen Lamellen auf der Hutunterseite von Basidiomyceten- (Ständerpilz-) Fruchtkörpern vorhanden sind. Trotz ihrer dreidimensionalen Unähnlichkeit mit einem Pilzfruchtkörper werden die Blüten regelmäßig und eifrig von Pilzmücken besucht. Mit der bodennahen Position der Blüte und dem für die Pflanze notwendigen feuchten Wuchsort des Waldbodens sind „Betrüger“ und „Opfer“ in genügende Reichweite gebracht. Die Pilzmücken, deren Gesichtssinn als nicht sonderlich ausgeprägt gilt (wohl kein exaktes Formensehen), werden höchstwahrscheinlich olfaktorisch durch einen für unsere Nase nicht wahrnehmbaren pilztypischen Geruch angelockt, der vermutlich von den rotbraun gefärbten Kelchteilen, insbesondere den Kelchschwänzen, emittiert wird.

Die weißen Flecken auf den Kelchblättern spielen sicherlich für eine optische Nahorientierung eine Rolle, viel mehr wirken sie jedoch im Hinblick auf die Fähigkeit der Pilzmücken, lokale Feuchtigkeit, „feuchte Krypten“ etwa, wahrzunehmen, als Schlüsselreiz. Die weißen Kelchfelder sind nämlich mit lebenden Haaren besetzt, die Flüssigkeit abscheiden. Tatsächlich suchen die Pilzmücken-Weibchen die weißen Felder bevorzugt auf, wobei sie mit ihrem Rücken die Narben bzw. die geöffneten Antheren berühren (Abb. 29c). Nicht selten kommt es dabei zur Eiablage. Eier und daraus entwickelte Larven, die man im Bereich der weißen Felder immer wieder finden kann, gehen sämtlich nach kurzer Zeit zugrunde (Abb. 29d).

4 Abschließende Bemerkungen

Aus der unüberschaubaren Fülle organismischer Angepasstheiten haben wir für diese Studie einige wenige Beispiele ausgewählt, um die Parallelität sinnvoller Problemlösungen bei Mensch, Tier und Pflanze aufzuzeigen. Sie stammen aus der Technik und Architektur sowie aus der Verhaltensweise. Ein optimales Funktionieren bei gleichzeitig realisierbarem (möglichst geringem) Aufwand haben wir einer intelligenten Vorgehensweise gleichgesetzt. Daraus ergibt sich ein intelligentes Produkt. Der Begriff „Intelligenz“ suggeriert zunächst eine ausschließlich auf den Menschen bezogene Wesensart. Vielfach ist man versucht, die menschliche Intelligenz mit Hilfe von Tests zu messen. Oft beinhalten diese eine lange Latte von Intelligenzfaktoren, aus deren Gesamtheit der Intelligenzquotient ermittelt wird. Berücksichtigung findet natürlich das Alter des Menschen. Ein Altersvergleich eröffnet interessante Aspekte der Intelligenzentwicklung bzw. -veränderung bezogen auf ein Einzelindividuum. Bei der Ermittlung einer allgemeinen Intelligenz besteht allerdings die Gefahr einer essentialistischen Vorgehensweise. Diese mündet quasi in eine Normierung. Nun lässt sich aber der Mensch nicht in eine Norm bzw. in einen Typus pressen. Alle Individuen des „Säugetiers“ *Homo sapiens* sind wie alle Individuen einer Tier- oder Pflanzen-Art – wenn man von einer Klonierung, die gang und gäbe bei den Pflanzen ist, absieht – Unikate. Es liegt auf der Hand, dass sich in einem solchen Unikat Fähigkeiten und Unfähigkeiten in unterschiedlichsten Mischungsverhältnissen präsentieren. Ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen – in den Intelligenztests öfters abgefragt – hilft einem Philosophen aus dem Labyrinth der Widersprüchlichkeiten innerhalb der Ethik kaum

heraus. Wohl aber werden Chirurgen oder Techniker oder Biologen, die sich mit der Morphologie und Anatomie beschäftigen, bei all ihrem Tun vom angeborenen oder erlernten Zurechtfinden in Raum und Zeit profitieren.

Die Intelligenz ist beim Menschen nicht von heute auf morgen entstanden, sondern in einem evolutiven Prozess Schritt für Schritt. Es hat wohl mit der Fähigkeit zu lernen begonnen, was unabhängig auch in anderen Tiergruppen zu beobachten ist. Man denke etwa an die Lernfähigkeit bei Raben und Krähen (z. B. Taylor et al. 2012, Uomini et al. 2020). Im Kontext der Evolution ist alles, was der Mensch zu schaffen vermag, ein Resultat der Organismischen Evolution, unterworfen dem intelligenten Spiel mit Zufällen und Auslese. Evolution selbst kennt keine Ethik. Letztere ist dem Menschen in seinem „Sichselbstbewusstwerden" und dem Bewusstsein, dass er als Zoon politikon (Aristoteles) auf der Erde weilt, eigen. Zufall und Optimierung durch Selektion unter dem Diktat des Ökonomischen Prinzips (Optimierungsprinzip), das unerbittliche Konkurrenz auslöst, lässt sich auch – wenn man es will! – als „Schöpfungsstrategie" bezeichnen. Wenn man es will!, kann man sich über die Attribute eines „Schöpfers" Gedanken machen. Das wollen wir aber intelligenten Theologen und Religionswissenschaftlern, falls sie es wollen, überlassen.

Literatur

Barthlott, W. & Ehler, N. 1977: Raster-Elektronenmikroskopie der Epidermisoberflächen von Spermatophyten. – Tropische und subtropische Pflanzenwelt **19**: 367–467.

Barthlott, W. & Neinhuis, C. 1997: Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. – Planta **202**: 1–8.

Bellmann, H. 2010: Der Kosmos Spinnenführer. – Stuttgart: Franckh-Kosmos Verlag.

Blattner, F. & Kadereit, J.W. 1991: Patterns of seed dispersal in two species of *Papaver L.* under near-natural conditions. – Flora **185**: 55–64.

Bowling, A.J. & Vaughn, K.C. 2008: Structural and immunocytochemical characterization of the adhesive tendril of Virginia creeper (*Parthenocissus quinquefolia* [L.] Planch.). – Protoplasma **232**: 153–163.

Culjak, A. 2014: Organisation und Devianz - Eine empirische Fallrekonstruktion der Havarie der Costa Concordia. – Wiesbaden: Springer VS.

Dafni, A. 1984: Mimicry and deception in pollination. – Annu. Rev. Ecol. Syst. **15**: 259–278.

Darwin, C. 1859: On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life. – London: J. Murray.

Erbar, C. 2017: Falsche Versprechen: Lug und Trug in der Blütenwelt. – Ruperto Carola **11**: 120–127.

Erbar, C. & Leins, P. 2018: Wie mobil sind Pflanzen? – HDJBO **3**: 21–50. https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2018.0.23818.

Erbar, C. & Leins, P. 2020: Entwicklungen in der Entwicklung – Fortwährende Veränderungen im Fluss der Organismenwelt. – HDJBO **5**: 1–45. https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2020.0.24182.

Erbar, C., Heiler, A. & Leins, P. 2017: Nectaries in fly-deceptive pitcher-trap blossoms of *Aristolochia*. – Flora **232**: 128–141.

Francé, R.H. 1920: Die Pflanze als Erfinder. – Stuttgart: Franckh'sche Verlagshandlung.

Henkel, K. 1997: Die Renaissance des Raoul Heinrich Francé. – Mikrokosmos **86**: 3–16.

Kadereit, J.W. & Leins, P. 1988: A wind tunnel experiment on seed dispersal in *Papaver* L. sects. Argemonidium Spach and Rhoeadium Spach (Papaveraceae). – Flora **181**: 189–203.

Lengerken, A. von 1885a: Die Bildung der Haftballen an den Ranken einiger Arten der Gattung *Ampelopsis*. – Dissertation Univ. Göttingen.

Lengerken, A. von 1885b: Die Bildung der Haftballen an den Ranken einiger Arten der Gattung *Ampelopsis*. – Bot. Zeitung 43: 337–346, 353–361, 369–379, 385–393, 401–410,Taf. IV.

Leins, P. & Erbar, C. 2008: Blüte und Frucht. Morphologie, Entwicklungsgeschichte, Phylogenie, Funktion und Ökologie. 2. Aufl. – Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.

Leins, P. & Erbar, C. 2010: Flower and Fruit. Morphology, Ontogeny, Phylogeny, Function and Ecology. – Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers.

Leins, P. & Erbar, C. 2017: Bäume und Sträucher in Herbst und Winter erkennen. Bebilderte Steckbriefe, Wissenswertes zu Namen, Mythologie und Verwendung. 2. Auflage. – Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.

Leins, P. & Erbar, C. 2018: Bäume und Sträucher in Frühjahr und Sommer erkennen. Bebilderte Steckbriefe und allerlei Begleitgeschichten aus Biologie, Mythologie und Verwendbarkeit. – Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.

Lunau, K. 2011: Warnen, Tarnen, Täuschen. – Darmstadt: WBG.

Mabberley, D.J. 2008: Mabberley's Plant-book. 3rd ed. – Cambridge: Univ. Press.

Melzer, B., Steinbrecher, T., Seidel, R., Kraft, O., Schwaiger, R. & Speck, T. 2010: The attachment strategy of English ivy: a complex mechanism acting on several hierarchical levels. – J. R. Soc. Interface **7**: 1383–1389.

Nachtigall, W. 1997: Vorbild Natur: Bionik-Design für funktionelles Gestalten. – Berlin & Heidelberg: Springer-Verlag.

Nachtigall, W. 2007: Natur macht erfinderisch. Das Ravensburger Buch der Bionik. – Ravensburg: Ravensburger Verlag.

Nachtigall, W. 2008: Bionik. Lernen von der Natur. – München: Beck.

Nachtigall, W. & Blüchel, K.G. 2000: Das große Buch der Bionik. Neue Technologien nach dem Vorbild der Natur. – München: Deutsche Verlags-Anstalt.

Paulus, H.F 2007: Wie Insekten-Männchen von Orchideenblüten getäuscht werden - Bestäubungstricks und Evolution in der mediteranen Ragwurzgattung *Ophrys*. – Denisia **20**: 255–294.

Paulus H.F. & Gack, C. 1980: Beobachtungen und Untersuchungen zur Bestäubungsbiologie südspanischer *Ophrys*-Arten. – Jahresb. Naturw. Vereins Wuppertal **33**: 55–68.

Paulus H.F. & C. Gack 1981: Neue Beobachtungen zur Bestäubung von Ophrys (Orchidaceae) in Südspanien, unter besonderer Berücksichtigung des Formenkreises *Ophrys fusca* agg. – Plant Syst. Evol. **137**: 241–258.

Pfadenhauer, J.S. & Klötzli, F.A. 2014: Vegetation der Erde: Grundlagen, Ökologie, Verbreitung. – Berlin & Heidelberg: Springer Spektrum.

Spalding, E.S. 1905: Mechanical adjustment of the Sahuaro (*Cereus giganteus*) to varying quantities of stored water. – Bull. Torrey Bot. Club **32**: 57–68.

Speck, T. 2011: Intelligente Kleber nach dem Vorbild der Natur. – https://www.biooekonomie-bw.de/de/fachbeitrag/aktuell/intelligente-kleber-nach-dem-vorbild-der-natur/.

Sprengel, C.K. 1793: Das entdeckte Geheimnis der Natur im Bau und in der Befruchtung der Blumen. – Berlin: Vieweg.

Steinbrecher, T., Beuchle, G., Melzer, B., Speck, T., Kraft, O. & Schwaiger, R. 2011: Structural development and morphology of the attachment system of *Parthenocissus tricuspidata*. – Int. J. Plant Sci. **172**: 1120–1129.

Taylor, A.H., Miller, R. & Gray, R.D. 2012: New Caledonian crows reason about hidden causal agents. – Proc. Natl. Acad. Sci. **109**: 16389–16391.

Uomini, N., Fairlie, J., Gray, R.D. & Griesser, M. 2020: Extended parenting and the evolution of cognition. – Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci. **375**: 20190495. https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0495.

Vallin, A., Jakobsson, S., Lind, J. & Wiklund, C. 2005: Prey survival by predator intimidation: an experimental study of peacock butterfly defence against blue tits. – Proc. R. Soc. B. **272**: 1203–1207.

Vogel, S. 1965: Kesselfallen-Blumen. – Umschau **65**: 12–17.

Vogel, S. 1975: Mutualismus und Parasitismus in der Nutzung von Pollenträgern. – Verh. Deutsch. Zool. Ges. **68**: 102–110.

Vogel, S. 1978. Pilzmückenblumen als Pilzmimeten. – Flora **167**: 329–398.

Vogel, S. 1993: Betrug bei Pflanzen: Die Täuschblumen. – Abhandl. Akad. Wiss. Lit. Mainz, math.-nat. Kl. **1993/1:** 1–48.

Walter, H. 1973: Die Vegetation der Erde in öko-physiologischer Betrachtung. Bd. I: Die tropischen und subtropischen Zonen. 3. Aufl. – Stuttgart: G. Fischer Verlag.

Walter, H. & Breckle, S.W. 1984: Ökologie der Erde. Bd.2: Spezielle Ökologie der Tropischen und Subtropischen Zonen. – Stuttgart: Fischer, UTB Große Reihe.

Bildnachweise aus dem Internet

Abb. 17d: Roberto Vongher, Wikimedia Commons - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18045701.

Abb. 18c: https://www.businesstraveller.de/hotel/hippe-hallen-die-zehn-spektakulaersten-hotel-lobbys-der-welt/.

Abb. 19e: https://images.meetingsbooker.com/images/venues/e14b8357b8dc49afb81241737.jpg.

Abb. 19f: https://images.meetingsbooker.com/images/venues/9cfe753c189d4d868c60fb0f2.jpg.

Wir danken der Royal Society, London, für die freundliche Erlaubnis die Abbildungen 2a (hier: Abb. 10g) und 3a (hier: Abb. 10h) aus der Publikation von Melzer et al. 2010, erschienen im „Journal of the Royal Society Interface“ zu benutzen.

Über die Autoren

Claudia Erbar wurde nach ihrem Biologie- und Chemiestudium, das sie mit dem 1. Staatsexamen in beiden Fächern abschloss, an der Universität Bonn zum Dr. rer.nat. promoviert. Für ihre Staatsexamensarbeit erhielt sie den Preis der Konrad-Adenauer-Stiftung für Studierende der Botanik. Seit 1983 ist sie Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität Heidelberg. Nach der Habilitation im Fach Botanik 1993 hat sie seit 2000 eine apl. Professur und ist heute Forschungsgruppenleiterin für das Gebiet „Blütenbiologie und Evolution" am Centre for Organismal Studies (COS) Heidelberg. Ihre Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen der Blütenentwicklungsgeschichte vor dem Hintergrund morphologisch-funktioneller Fragestellungen, Blütenökologie (Blütenfunktionen bei Bestäubung und Befruchtung und der Interaktion mit Insekten) und Verwandtschaft und Evolution der Blütenpflanzen. In der Lehre vertritt sie auch die Pflanzengeographie.

Peter Leins studierte Biologie, Chemie und Philosophie an den Universitäten Tübingen, Freiburg und München. In München wurde er zum Dr. rer.nat. promoviert. Anschließend war er Assistent, später Oberassistent, am Institut für Systematische Botanik bei Prof. Dr. Hermann Merxmüller. Zwischendurch erlernte er die Methodik der Pollenkunde bei Prof. Dr. Gunnar Erdtman in Stockholm. Er habilitierte sich im Fach Botanik mit einer pollensystematischen Forschungsarbeit an einer Compositengruppe. Danach erhielt er einen Ruf auf eine Professur am Botanischen Institut der Universität Bonn. Drei weitere Rufe folgten: FU Berlin, Uni Heidelberg, Uni Kiel (FU Berlin und Uni Kiel nicht angenommen). An der Universität Heidelberg war er zunächst Direktor des Instituts für Systematische Botanik und Pflanzengeographie und des Botanischen Gartens (später Abteilung Biodiversität und Pflanzensystematik des neu gegründeten Heidelberger Instituts für Pflanzenwissenschaften). Seit 2002 ist er im forschenden und lehrenden „Ruhestand". Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen der Blütenmorphologie und -entwicklungsgeschichte, Blütenökologie, Blütenpflanzensystematik, Pollenkunde, Ausbreitungsbiologie, Evolutionsbiologie und Biophilosophie.

Korrespondenzadresse:
Prof. Dr. Claudia Erbar, Prof. Dr. Peter Leins
Universität Heidelberg
COS-Biodiversität und Pflanzensystematik
Im Neuenheimer Feld 345
69120 Heidelberg, Germany

E-Mail: erle@urz.uni-heidelberg.de
Homepages:
http://www.cos.uni-heidelberg.de/index.php/c.erbar?l=
http://www.cos.uni-heidelberg.de/index.php/p.leins?l=

Intelligenz im Tierreich

MICHAEL WINK

Institut für Pharmazie und Molekulare Biotechnologie, Universität Heidelberg

Zusammenfassung

Unter den Rabenvögeln, Papageien, Delfinen, Neuwelt- und Altweltaffen und vor allem den Menschenaffen gibt es viele Arten, die sich durch besondere Intelligenzleistungen ausweisen. Offenbar können sie Zusammenhänge erkennen, Pläne machen und innovative Lösungen finden. Das zeigt sich beim Herstellen und Nutzen von Werkzeugen, um Nüsse, Muscheln, Schnecken oder Vogeleier zu öffnen. Stöckchen und Drähte werden eingesetzt, um versteckte Beute zu sondieren und aufzuspießen. Menschenaffen setzen Zweige ein, um Ameisen oder Termiten aus ihrem Bau zu angeln oder an Honig zu gelangen. Viele Arten erfinden überraschende Tricks, um clever an unerschlossene Nahrungsquellen zu gelangen. Diese Tricks werden in den Tierpopulationen durch Tradierung weitergegeben. Viele Tiere zeigen erstaunliche kognitive Leistungen (Problemlösungen, Gedächtnis, Orientierung) und soziale Intelligenz. Die Annahme, dass nur wir Menschen intelligente Wesen sind, Werkzeuge benutzen und unser Verhalten planen, ist damit eindeutig überholt. Offenbar wurden die Gene für Intelligenz viel früher entwickelt und sind weit verbreitet. Da wir Menschen über die größte Anzahl an Neuronen in unserem Gehirn verfügen, besitzen wir eine besonders eindrucksvolle kognitive Leistungsfähigkeit. Wir verfügen zudem über Sprechvermögen als Alleinstellungsmerkmal und können damit Innovationen besonders schnell tradieren.

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24382

1 Einführung

Unter dem Begriff der Intelligenz fasst man unterschiedliche kognitive und geistige Leistungsfähigkeit zur Lösung von logischen, praktischen oder sprachlichen Problemen zusammen. In dieser Form passt der Begriff nur auf uns Menschen. Wir Menschen gehen gewöhnlich mit Ignoranz und Arroganz davon aus, dass nur *Homo sapiens* ein intelligentes Wesen ist, während die Tiere nur durch Instinkte überleben als quasi Verhaltensroboter, die genetisch für spezifische Verhaltensweisen geprimt sind, nur auf äußere Reize reagieren und durch Versuch und Irrtum lernen.

Seit Plato versuchen Kirchenlehrer, Philosophen und Philologen, den Menschen durch eindeutige Kriterien vom Tier abzugrenzen. Das erste Kriterium, dass der Mensch das einzige zweibeinige Wesen ohne Federn ist, hat sich nicht richtig bewährt, denn auch schon Menschenaffen und vor allem die Vorläuferarten zu *Homo sapiens* waren zweibeinig. Später wurden neue Kriterien dazu genommen, die alle etwas mit der Intelligenz zu tun haben:

- Gebrauch und Herstellung von Werkzeug,
- Kriegsführung,
- Zweckfreies Spiel,
- Kochkunst,
- Religiosität.

Wie ich in diesem Artikel ausführen werde, ist der Gebrauch und Herstellung von Werkzeug schon seit längerem als Alleinstellungsmerkmal weggefallen, da es viele Tiere gibt, die so etwas können (Becker 2021; Hauser 2001). Seit den Feldstudien von Jane Goodall in Ostafrika wissen wir, dass Schimpansen Kriege führen können. Und Lynda Sharpe konnte nachweisen, dass Schleichkatzen in freier Wildbahn intensiv spielen. Von Ottern wurde berichtet, dass sie regelmäßig mit Steinen spielen, ähnlich wie Kinder mit Holzwürfeln. Jeder Halter von einem Hund oder Katze kann die offensichtliche und inhärente Spielfreudigkeit seiner Haustiere sicher bestätigen. Mit dem Kochen liegt vermutlich tatsächlich ein Alleinstellungsmarkmal für die Gattung *Homo* vor, denn *Homo erectus* erlernte vor rund 1,8 Millionen Jahren die Beherrschung des Feuers und damit vermutlich

das Kochen. Dadurch konnte schwerverdauliche oder mikrobiell belastete Nahrung nutzbar gemacht werden (Frank et al., 2018). Eine verbesserte Ernährung war vermutlich eine Voraussetzung für die Entwicklung eines größeren Gehirns (wie wir es beim Menschen und Neandertaler vorfinden), das sehr viel Energie benötigt (Storch et al., 2013). Religiosität könnte ein wirkliches Merkmal für den modernen Menschen *Homo sapiens* sein. Hinweise darauf ergeben Gräber mit Grabbeigaben, die erst mit *H. sapiens* aber noch nicht beim Neandertaler auftreten.

Bei der Intelligenzdiskussion wird übersehen, dass Tiere eine erhebliche praktische Intelligenz und hohe kognitive Fähigkeiten (Gedächtnis, Orientierung) besitzen müssen, um täglich Nahrung zu finden, nicht von Feinden gefressen zu werden und um sich erfolgreich fortzupflanzen. Hätten sie diese Fähigkeiten nicht, wären sie schon lange ausgestorben. Aber es gibt auch Hinweise auf nichtinstinktive Intelligenz, denn Tiere zeigen vielfach die Fähigkeit, komplizierte Probleme zu lösen und Zusammenhänge zu durchschauen. Tiere können dabei neue kreative Lösungen entwickeln (z. B. Werkzeuge) und über soziale Netzwerke weiterverbreiten. Wir wissen natürlich nicht, was in dem Kopf eines Tieres vorgeht, doch darf man annehmen, dass Tiere denken, fühlen und empfinden können. Damit gehören Emotionalität, Kognition, Bewusstsein, Lernfähigkeit und Soziabilität auch zu den Intelligenzmerkmalen der Tiere, mit denen wir ja phylogenetisch nah verwandt sind. Dabei kann man unterschiedliche Formen der Intelligenz unterscheiden, wie handwerkliche, ökonomische, ökologische und soziale Intelligenz. Solche Intelligenzformen hängen von den Lebewesen und den Problemen ab, die sie in ihrer Umwelt zu meistern haben.

Die Frage, ob es Intelligenz bei Tieren gibt und woran man sie erkennen kann, wird heute von den Verhaltensbiologen erforscht. Die Verhaltensbiologie hat im Lauf der letzten 160 Jahre mehrfach ihren Namen gewechselt. Bereits 1858 prägte David Weinland den Namen *Animal Psychology*, aus der dann im Deutschland die Tierpsychologie wurde. Diese Disziplin beschäftigte sich mit der systematischen und vergleichenden Erforschung tierischen Verhaltens. Auch Charles Darwin hatte sich dieser Thematik schon angenommen und 1872 „The Expression of the Emotions in Man and Animals“ publiziert. Darwin brachte für die Untersuchung von Verhaltensweisen evolutionsbiologische Aspekte in die Diskussion ein. Diese Anregungen fielen auf fruchtbaren Boden und wurden im 20. Jahrhundert von den Verhaltensforschern Oskar und Katharina Heinroth (Schulze-Hagen 2019), Otto Koehler, Nikolaas Tinbergen (Schulze-Hagen 2021) und Konrad Lorenz aufgegrif-

fen und erfolgreich weiterentwickelt. Anfänglich nannten sie ihr Forschungsgebiet Tierpsychologie, aber ab 1950 benutzten sie weitgehend den Begriff Ethologie, der schon 1920 als *Ethology* von William Wheeler im englischen Sprachraum benutzt wurde. Inzwischen hat sich der Begriff Verhaltensbiologie etabliert. Da die Psychologie sich mit der Psyche des Menschen, also dem Erleben, Verhalten und Bewusstsein, beschäftigt, ist der Begriff Verhaltensbiologie angemessener als Tierpsychologie, da wir bei Tieren nur das Verhalten analysieren können und nur daraus auf deren Psyche rückschließen können.

2 Werkzeuggebrauch im Tierreich

Wenn Anthropologen Spuren von Frühmenschen oder noch älteren Vorfahren finden, werden Hinweise auf Werkzeuggebrauch herangezogen, um die Funde der Gattung *Homo* zuordnen zu können. Denn Werkzeuggebrauch gilt gemeinhin als eine intelligente Leistung und Alleinstellungsmerkmal, an der man Menschen erkennen kann. Es gibt jedoch viele Beobachtungen, dass Säugetiere und Vögel ebenfalls Werkzeuge benutzen, meist um an versteckte Nahrung in Spalten und Löchern oder Nahrung in Schalen (Nüsse, Muscheln) zu gelangen. Wer Werkzeuge benutzt oder herstellt, muss das Problem verstanden und einen Lösungsweg durchdacht haben oder ihn von anderen Artgenossen erlernt haben. Er muss also Funktion und Passung eines Gegenstandes begriffen haben. Durch den gezielten Einsatz eines Objekts wird aus ihm ein Werkzeug. Manche Tiere bearbeiten einen Gegenstand, um ihn als Werkzeug passend zu machen. Dies ist der Bereich der technischen Intelligenz. Organe eines Tieres gelten aber nicht als Werkzeuge in unserem Zusammenhang, auch wenn wir von Kau- oder Greifwerkzeugen reden (Becker 2021).

Intelligentes Verhalten und Werkzeuggebrauch sind nicht immer eindeutig erlernt oder tradiert. Einige Varianten des Werkzeuggebrauchs könnten auch genetisch angelegt sein (Bartgeier, Singdrossel), andere sind eindeutig neue Erfindungen, die kulturell tradiert werden. Bei Eichhörnchen wurde gefunden, dass die Fähigkeit, Nüsse aufzunagen, genetisch angelegt ist. Jedoch lernen Individuen durch Erfahrung sehr schnell, mit welcher Technik es am besten geht. Dies gilt für viele tierische (und menschliche) Verhaltensweisen. Beim Werkzeuggebrauch existieren auch einige Zwischenstufen, d. h. Nature und Nurture ergänzen sich auch hier, wie bei vielen anderen Verhaltensmerkmalen (Eibl-Eibesfeldt 1972).

2.1 Hammer und Hämmern

Viele energiereiche Samen sind durch eine harte Schale geschützt. Einige Tiere haben sich im Verlauf der Evolution durch spezielle Anpassungen darauf spezialisiert, solche hartschaligen Samen oder Früchte zu öffnen, um die energiereichen Kerne zu nutzen. Man denke beispielsweise an das Gebiss der Nagetiere (Mäuse, Eichhörnchen), mit dem auch die härteste Nuss aufgenagt werden kann. Oder an die Schnäbel der Spechte, die Nüsse aufhämmern oder an die Quetschschnäbel der Finkenvögel, die damit kleinere Samen knacken können. Diese Anpassungen sind eindeutig genetischer Natur, wenn auch die aktuelle Ausführung des Nüsseknackens durch Lernen und Erfahrung verbessert werden kann.

Demgegenüber stehen die Tierarten, die Steine als Werkzeug einsetzen, um hartschalige Nahrung aufzuschlagen, sogenanntes *Hämmern*. Dieses Verhalten ist eher erlernt und wird in Populationen tradiert. Beim Hämmern kann man zwei Varianten unterscheiden: 1. Ein Tier nimmt einen Stein oder einen ähnlichen harten Gegenstand in den Schnabel oder Pfoten und hämmert damit auf die hartschalige Beute ein und 2. Ein Tier wirft einen Stein auf hartschalige Nahrung, z. B. ein Straußenei, um es zum Aufplatzen zu bringen. Dies wird als Quasi-Hämmern bezeichnet (Becker 2021).

Hämmern

Drei Rabenvögel sind unter Vögeln bekannt, die zu den hämmernden Arten zählen. Die australische Drosselkrähe (*Corcorax melanorhamphos*) ernährt sich unter anderem von Süßwassermuscheln. Um diese Muscheln zu öffnen, suchen die Drosselkrähen eine leere Muschelschale und hämmern damit auf die lebenden Muscheln ein, bis sich diese öffnen. Außerdem können sie die Muscheln auf Steine werfen, damit sie aufplatzen. Weniger gut ist das Hämmern für die Amerikanerkrähe (*Corvus brachyrhynchos*) und den Borstenraben (*Corvus ripidurus*) belegt (Becker 2021). Klaffschnäbel (*Anastomus lamelligerus*) öffnen Schecken und Muscheln alleine mit ihrem Schnabel und nicht mithilfe von Werkzeugen, wie man früher annahm (Becker 2021).

Verbreiteter ist das Hämmern bei den Säugetieren, vor allem bei den Primaten. Unter den Raubtieren ist der amerikanische Seeotter (*Enhydra lutris*) dafür bekannt, dass er marine Großschnecken, insbesondere Meerohren oder Abalones (Gattung *Haliotus*) aufhämmert. Diese Schnecken können einen Durchmesser von

bis 25 cm erreichen. Sie klammern sich fest an Unterwasserfelsen und können nicht so leicht davon abgelöst werden. Um an diese Nahrung zu gelangen, suchen Seeotter große Steine (bis 1,5 kg Gewicht), die sie in ihren Pfoten halten. Damit tauchen sie zu den Muscheln hinunter und hämmern mit dem Stein so lange auf die Muschel ein, bis ein Loch entstanden ist. Durch dieses Loch angeln die Seeotter mit ihrer Pfote die Eingeweide der Muschel und warten dann, dass die Muschel stirbt. Dann kann sie vom Felsen abgelöst werden. Die Seeotter tauchen dann damit auf und verzehren sie auf dem Rücken schwimmend.

Primaten sind für ihre Intelligenz bekannt. So ist es nicht verwunderlich, dass sie Werkzeuge einsetzen, um hartschalige Nahrung (Nüsse, Muscheln) zu knacken. Solche Verhaltensweisen kennt man von den Neuweltaffen (Kapuzineraffen), Altweltaffen und Menschenaffen. Als Werkzeuge werden in der Natur Steine oder Hartholzteile verwendet. In Gefangenschaft wurden auch vielerlei andere Gegenstände zum Hämmern verwendet. In der Natur wurden regelrechte Ambossplätze beobachtet, zu denen die Affen die Nüsse transportierten. Das Hämmern wird erlernt, wobei bei Kapuzineraffen die Männchen diese Technik häufiger und intensiver einsetzen als die Weibchen. Nachahmungslernen scheint bei Kapuzineraffen nur eine geringe Rolle zu spielen (Becker 2021).

Unter den Altweltaffen sind nur zwei Arten bekannt, die Hämmern einsetzen: Bärenpavian (*Papio ursinus*) und Langschwanzmakake (*Macaca fiscicularis*). Die Makaken öffnen Muscheln und Schnecken, indem sie die Nahrung auf einen Amboss legen und dann mit einem Stein bearbeiten. Die Jungaffen lernen von den Alttieren und meistern erst im Alter von zweieinhalb Jahren diese Technik. Diese Technik hat inzwischen so zugenommen, dass die Muscheln bereits selten wurden. Bärenpaviane setzen Steine ein, um Früchte des Baobabs zu knacken. Hauptsächlich waren es junge Pavianmännchen, die diese Technik erlernten (Becker 2021).

Unter den Menschenaffen (Gorilla, Orang-Utan, Schimpanse und Bonobo) findet man das Hämmern in besonders raffinierter Weise bei den Schimpansen und Bonobos, während Orang-Utan manchmal Termitenbauten aufhämmern, Gorillas aber offenbar die Technik gar nicht kennen. Nur die Schimpansen in Westafrika haben die Tradition entwickelt, Nüsse mit Steinen aufzuhämmern. Die Schimpansen in Ost- und Zentralafrika sind noch nicht auf den Trick gekommen. Als Werkzeuge werden Hartholz oder Steine, als Amboss Baumwurzeln eingesetzt. Es sind vor allem die Mütter, die diese Technik verwenden und an ihre Kinder, vor allem an die

Töchter weitergeben. Hammersteine können mehrere Kilogramm schwer sein, die dann mit beiden Händen hochgehoben und auf die Nuss geknallt werden. Offenbar haben Schimpansen das Zusammenspiel von Amboss und Hammer verstanden. In Westafrika wurden Steine mit Nutzungsspuren gefunden, die vermutlich von Schimpansen vor 4300 Jahren benutzt wurden. Diese Steine hatten eine Größe, die gut in Schimpansenhände passten, sodass *Homo sapiens* als Verursacher wohl unwahrscheinlich ist. Diese Verhaltensweise ist nicht genetisch fixiert, sondern muss erlernt werden. Vermutlich wurden sie von einer Schimpansengeneration zur nächsten weitergegeben. Bonobos verhalten sich ähnlich wie Schimpansen, jedoch ist bei ihnen der Werkzeuggebrauch weniger gut dokumentiert (Becker 2021).

Quasi-Hämmern

Beim Quasi-Hämmern wird ein Stein in den Schnabel oder in die Hand genommen und auf eine hartschalige Nahrung geworfen. Im Unterschied zum Hämmern, wird bei dieser Technik das Werkzeug losgelassen.

Der Schmutzgeier (*Neophron percnopterus*) nutzt offenbar Steine, um große Eier, wie z. B. von einem Strauß zu öffnen. Dies wurde schon im 19. Jahrhundert zuerst beschrieben und im 20. Jahrhundert intensiv untersucht. Schmutzgeier können einen bis zu 1 kg schweren Stein im Schnabel zu einem Straußennest tragen, um damit die Eier aufzuschlagen. Kleinere Eier werden auch auf den Boden geworfen, bis sie aufplatzen. Diese Verhaltensweisen scheinen sich aus dem Sozialverhalten abzuleiten, als Quasi-Hämmern wird die Technik jedoch erlernt und tradiert (Eibl-Eibesfeldt 1972). Möglicherweise benutzen auch der australische Schwarzbrustmilan (*Hamirostra melanostermon*), die Kapkrähe (*Corvus capensis*) und Schildrabe (*Corvus albus*) Steine, um Eier ähnlich wie die Schmutzgeier zu öffnen (Becker 2021). Unter den Säugetieren benutzen Mangusten offenbar den Steine-Trick, um Eier zu knacken. Eisbären sollen Eisbrocken einsetzen, um damit Robben zu betäuben (Becker 2021).

Amboss-Prinzip

Beim Hämmern wird eine feste Unterlage (flacher Stein, Fels, Baumstamm) benötigt, die als Amboss dient. Jetzt gibt es eine Reihe von Tieren, die zwar einen

Amboss benutzen, aber keinen Hammer, sondern sie nehmen einen zu öffnenden Gegenstand in den Schnabel oder die Pfoten und schlagen ihn auf den Amboss.

Von Lippfischen der Gattung *Cheilinus* wurde berichtet, dass sie Seeigel und Muscheln mit ihrem Mund ergreifen, dann zu einem Riffgestein schwimmen und daran die Beute aufschlagen. Da nicht alle Lippfische dies können, geht man davon aus, dass hinter dieser Verhaltensweise ein Lernvorgang stecken müsste.

Bei Vögeln ist die Ambossbenutzung verbreitetet, wenn es darum geht hartschalige Nahrung (Insekten, Gehäuseschnecken) zu knacken oder tot zu schlagen. Eine Schneckenschmiede wurde beim Feuerliest (*Halcyon coromandra*), bei einem inzwischen ausgestorbenen Kuckuck (*Coua delandei*), bei Pittas (*Pitta versicolor* und 4 weiteren Arten), beim Zahnlaubenvogel (*Scenopoeetes dentirostris*), beim Flötenwürger (*Laniarius ferrugineus*), unserer heimischen Singdrossel (*Turdus philomelos*), Amsel (*Turdus merula*) und weiteren Drosseln, und vereinzelt bei Schnäppern (Schwarzkehlchen *Saxicola rubetra*; Trauerschnäpper *Ficedula hypoleuca*, Purpurpfeifdrossel *Myophonus caeruleus*) beobachtet (Becker 2021). Einige Vögel schlagen ihre Beute mehrfach gegen einen Amboss, um sie zu töten; dies kennt man von Mittelmeermöwen (*Larus michahellis*), Schmutzgeiern (*Neophron percnopterus*), Seriema (*Chunga burmeisteri*), Bienenfresser (*Merops apiaster*), Eisvogel (*Alcedo atthis*) und weiteren Arten.

Seeotter, die wir als Werkzeugbenutzer schon kennengelernt hatten, können auch Schnecken und Muscheln in ihre Vorderpfoten nehmen und hämmern diese solange auf einen Amboss, bis sie offen sind. Unter den Primaten ist die Ambossbenutzung nicht weit verbreitet und offenbar erlernt: Nur wenige Kapuzineraffen der Neuen Welt schlagen Nüsse, Eier oder feste Früchte gegen Baumstämme, um sie zu knacken. Unter den Altweltaffen sind es Paviane und Schimpansen, die Nüsse oder Schildkröten mittels Ambosstechnik öffnen (Becker 2021). Eine Variante des Ambos ist die Klemmamboss-Technik, bei der Nahrung in Ritzen oder kleinen Spalten eingeklemmt wird, um sie besser öffnen zu können. Dies kennt man z. B. vom heimischen Buntspecht, der auffällige Spechtschmieden betreibt, um die Zapfen von Kiefern oder Fichten zu öffnen.

2.2 Nüsse und Knochen knacken

Wie gelangt man ohne Werkzeuge an Nahrung, die in festen Schalen (Nüssen, Muscheln, Schnecken) oder in Knochen steckt?

Vogelbeobachter wissen seit langem, dass Raben- und Saatkrähen auf clevere Art und Weise Nüsse knacken. Sie suchen sich eine Walnuss, fliegen damit auf und lassen diese dann aus der Luft auf einen harten Untergrund fallen, wie z. B. auf eine Straße (Abb. 1). Wenn alles klappt, platzt die Nuss beim Aufprall auf, und der Inhalt kann gefressen werden. In der Umgebung von Heidelberg sieht man im Herbst und Winter häufig Dutzende Raben- und Saatkrähen unter Walnussbäumen, die dort Nüsse suchen und auf die beschriebene Art und Weise knacken. Der Trick ist offensichtlich bekannt.

Eine Verbesserung dieser Taktik wurde von japanischen Rabenkrähen berichtet, welche die Japanische Walnuss (*Juglans ailanthifolia*) lieben. Anstelle immer wieder mit den Nüssen aufzufliegen, legten die Krähen in der japanischen Stadt Sendai die Nüsse gezielt vor die Räder von langsam fahrenden Autos oder von wartenden Autos an einer Ampel. Dadurch wurden die Nüsse schnell geknackt und das Fruchtfleisch konnte verzehrt werden. Nach und nach haben auch Krähen in anderen japanischen Städten (aber nicht in Europa) den Trick gelernt. Einige Rabenkrähen wählen Ampeln aus, um die Nüsse gezielt vor die Räder von bei



Abbildung 1: Saatkrähe mit Walnuss (Foto: M. Wink).

Rotlicht wartenden Autos zu platzieren. Nachdem die Autos bei Grün über die Nuss gefahren waren, warteten die Krähen auf die Rotphase, um die geknackte Nuss zu fressen (Schilthuizen 2018). Neben Nüssen haben Krähenvögel (Saat-, Raben-, Nebelkrähe, Dohle, Kolkrabe, Geradschnabelkrähen) es gelernt, auch Muscheln und Strandschnecken durch die Wurftechnik zu knacken (Becker 2021).

Der Trick, hartschalige Beute aus großer Höhe auf eine harte Oberfläche fallen zu lassen, kennt man auch von Raubmöwen (Skua, *Stercorarius skua*), die Pinguineier aus der Luft herunterwerfen oder von Silbermöwen (*Larus argentatus*) und anderen Möwenarten in Amerika und Australien, die dies mit Wellhornschnecken, Taschenkrebsen, Seeigeln und Muscheln machen (Becker 2021). Die Ei-Wurfmethode beherrschen etliche andere Vogelarten, wie Schmutzgeier, Rohrweihe (*Circus aeruginosus*) und Seriema. Eine weitere Variante hat der Vampirgrundfink (*Geospiza difficilis*) auf der Galapagos-Insel Wolf erfunden; er rollt mit Absicht Tölpel-Eier gegen Felsen, damit sie aufplatzen.

Unter den Greifvögeln hat der Bartgeier (*Gypaetus barbatus*) eine besondere Technik entwickelt, um an das nahrhafte Knochenmark von Röhrenknochen zu gelangen, die nach einem Geierbesuch bei einem Aas meist übrigbleiben. Bartgeier nehmen solche Knochen in den Schnabel (Abb. 2) und lassen sie aus etwa 500



Abbildung 2: Bartgeier nehmen Knochen vom Aasplatz auf und werfen dies über Felsen ab. Dort platzen sie auf und die Bartgeier können das energiereiche Knochenmark fressen (Foto: M. Wink).

Meter Höhe auf spezielle Felsen fallen. Dort platzen die Knochen auf, der Bartgeier fliegt zu einem „Beinhaus“ und versucht, das Knochenmark zu finden. Auch kleinere Knochenstücke können von ihm heruntergeschluckt und verdaut werden (Margalida et al., 2020). Auch vom Steinadler (*Aquila chrysaetos*) und Weißkopfseeadler (*Haliaeetus leucocephalus*) wurde berichtet, dass sie Schildkröten nach der Bartgeier-Methode erbeuten.

Eine Variante der Wurftechnik ist die Verwendung von Steinen oder Ästen, um sie aus der Luft auf Angreifer zu werfen, z. B. Menschen, die sich einem Nest nähern. Dazu gibt es meist anekdotische Berichte von der Küstenseeschwalbe, Königsbussard, Kaffernadler, Kolkraben, Rabenkrähen und Dohlen (Becker 2021). Wie man aus Zoos weiß, werfen auch Affen und Elefanten gerne Steine und Äste auf Wärter und Besucher. In der Natur gehört das Werfen mit Steinen und Ästen zum Verhaltensrepertoire von Kapuzinern, Makaken, Paviane und vor allem von Orang-Utans und Schimpansen zur Feindabwehr, aus Imponiergehabe oder zum Beuteerwerb (Becker 2021).

2.3 Angeln mit einem Köder

Mangrovenreiher (*Butorides striata*) werfen gezielt kleine Aststückchen oder Fliegen als Köder ins Wasser, um Fische anzulocken. Die Reiher warten unbeweglich und stoßen dann mit ihrem spitzen Schnabel zu, sobald ein Fisch auftaucht. Ähnliches Verhalten gehört auch zum Verhaltensrepertoire von Grünreiher (*Butorides virescens*) und Rallenreiher (*Ardeola ralloides*); andere Reiherarten nutzen Köder jedoch nur sehr selten (Becker 2021).

2.4 Stochern und Angeln

Wenn sich Nahrung in Löchern oder anderen Verstecken befindet, dann können intelligente Tiere sie mithilfe von Haken oder Stöckchen sondieren oder aufspießen. Solch ein Werkzeuggebrauch kennt man von einigen Vogelarten, von Elefanten und mehreren Affenarten.

Kakadus gehören zu den erfindungsreichen Papageien. Sie suchen Stöckchen, um versteckte Beute zu erlangen. Dabei können sie Stöckchen, die zu lang sind, einkürzen. Kakadus verstecken ihre Werkzeuge für einen späteren Gebrauch. Dieser Werkzeuggebrauch wird erlernt und tradiert (Becker 2021).

Berühmt für den Gebrauch von Dornen zum Sondieren von Nahrung sind die Specht-Darwinfinken (*Camarhynchus pallidus*) auf den Galapagosinseln (Abb. 3). Diese Darwinfinken suchen sich ein Stöckchen oder Kaktusdorn und sondieren damit Nahrung in kleinen Löchern. Werden sie beim Sondieren fündig, so meißeln sie die Höhle mit dem Schnabel auf, um an die Beute zu kommen. Für diese Verhaltensweise gibt es möglicherweise eine genetische Prädisposition. Der eigentliche Werkzeuggebrauch muss jedoch erlernt werden (Becker 2021). Auch verschiedene Kleiberarten, Meisen und andere Singvögel benutzen Stöckchen (zumindest gelegentlich) zum Sondieren.

Wie man erwarten kann, sind Krähenvögel besonders findig, wenn es um Stochern und Sondieren geht. Die Geradschnabelkrähe (*Corvus moneduloides*) aus dem Südpazifik ernährt sich von Insektenlarven, die sie mit Werkzeugen aus Baumrindenspalten herausangelt. Dabei ist die Herstellung dieser Stocherwerkzeuge ziemlich kompliziert und offenbar nicht angeboren. Diese Werkzeuge werden wiederverwendet. Die Geradschnabelkrähen sind offensichtlich intelligent, handeln aufgrund von kausalen Zusammenhängen vernünftig und ziehen aus Ursache und



Abbildung 3: Darwin-Spechtfink mit Beute auf der Insel Santa Cruz (Galapagos-Inseln; Foto: M. Wink).

Wirkung Rückschlüsse. Auch für Grünhäher (*Cyanocorax yncas*), Blauhäher (*Cyanitta cristata*), Sund-, Hawaii-, Glanz- und Amerikanerkrähen wurde der Einsatz von Stöckchen berichtet. Kolkraben können sogar Drähte gezielt verbiegen, um Beute besser angeln zu können (Becker 2021).

Gut belegt ist das Stochern bei den Primaten. Unter den Neuweltaffen kennt man dieses Verhalten von den Kapuzineraffen, bei den Altweltaffen von Makaken und Gibbons. Mandrill, Grünmeerkatzen und Makaken nutzen Stöcke, um an Körperstellen zu gelangen, die sie mit den Händen oder Beinen nicht erreichen können.

Wie sieht es bei den Menschenaffen aus: Gorillas setzen Stöcke gezielt ein, um Termitenlarven aus einem Termitenbau herauszuangeln. Berühmter sind die Orang-Utans, die man auch in vielen Zoos dabei beobachten kann, wie sie mit einem längeren Stöckchen Insekten oder Honig aus Höhlen oder Spalten angeln (Abb. 4). Orang-Utans legen einen Vorrat an unterschiedlich langen Stöckchen an, die sie je nach Bedarf einsetzen. Dieses Verhalten ist erlernt und junge Affen lernen das Verhalten durch Nacheifern. Gut belegt ist auch der Einsatz von Stöcken zum Angeln von Termiten und Ameisen bei Schimpansen und Bonobos. Sie



Abbildung 4: Orang-Utan im Zoo von San Diego (USA), angelt mit Stöckchen aus künstlichen Löchern (Foto: M. Wink).

können mehrere Stunden täglich mit dem Angeln verbringen. Erst mit drei Jahren beherrscht ein junger Schimpanse die Kunst des Termitenangelns. Da Schimpansen Süßigkeiten lieben, haben sie auch gelernt, wie man mit Stöckchen Honig stippen kann. Schimpansen nutzen auch Stöckchen, um ihre Zähne zu reinigen oder setzen kräftige Stöcke ein, wenn sich Trupps bekämpfen.

Wolfgang Köhler publizierte schon 1921 Beobachtungen zum intelligenten Werkzeuggebrauch bei Schimpansen (Köhler 1921). In der Versuchsanordnung hingen die Forscher Bananen an die Decke des Käfigs, in dem sich auch mehrere Kisten und Stöcke befanden. Schimpansen lernten schnell, wie man Kisten aufeinanderstellt, um so an die hoch hängende Nahrung zu gelangen oder sie kombinierten Kisten mit einem Stock. Dabei lernten sie die Handlungsfolge nicht nur durch Ausprobieren, sondern offensichtlich durch Nachdenken.

3 Tradierung von Tricks

Lernleistungen sind bei vielen Tieren bekannt, vor allem wenn es um den Nahrungserwerb geht. Hier geht es um Objektkenntnis und besondere Methoden, die Herausforderungen zu bewältigen. Beispiele wären das Öffnen von Nüssen durch Eichhörnchen, oder Beutefang bei Iltis und Frosch (Eibl-Eibesfeldt 1972). Viele Säuger und Vögel lernen von ihren Eltern, vor allem von der Mutter, was man essen kann und wie man an die Nahrung herankommt. So können Traditionen entstehen, die in Familien tradiert werden. Von Stummelschwanzmakaken in Japan wurde berichtet, dass sie anfingen, Süßkartoffeln vor dem Verzehr in einer Pfütze oder in einem Bach zu waschen. Das Verhalten wurde zuerst 1952 beobachtet, 1962 wuschen schon über 75% aller Makaken ihre Süßkartoffeln (Eibl-Eibesfeldt 1972).

Seit über 100 Jahren wurde bekannt, dass Kohlmeisen (*Parus major*) oder Blaumeisen (*Cyanistes caeruleus*) zunächst in England, später auch in anderen europäischen Ländern es gelernt hatten, Milchflaschendeckel zu öffnen, um an die oben sitzende Sahne zu gelangen. Damals wurden Milchflaschen jeden Morgen von einem Milchmann bei den Kunden vor die Haustüre geliefert und abgestellt. Offenbar waren ein paar besonders neugierige Meisen auf den Trick gekommen, wie man die Deckel der Milchflaschen öffnet. Auch wenn die Milchindustrie unterschiedliche Deckel einsetzte, die Meisen lernten schnell, wie man auch diese öffnen kann. Es war offensichtlich, dass diese Tricks an weitere Meisen

tradiert wurden, indem diese das Verhalten beobachteten und dann nachahmten. Vermutlich entstand dieses Verhalten aber nicht nur einmal, sondern mehrfach und unabhängig voneinander. Seitdem Kunden ihre Milch im Supermarkt kaufen und es keine Milchmänner mehr gibt, ist auch diese Verhaltensweise wieder verschwunden (Schilthuizen 2018).

Durch Lucy Aplin und Mitarbeitern (Universität Oxford; aktuell MPI für Verhaltensbiologie in Konstanz) wurde geprüft, wie schnell Kohlmeisen Tricks lernen, an versteckte Nahrung zu gelangen und wie sich dieses Wissen ausbreiten kann. Dazu wurden in einem Versuchsgelände, auf dem viele hundert Meisen brüten, spezielle Futterautomaten aufgestellt, die Mehlwürmer im Innern enthielten – eine beliebte Speise für Meisen. Um an diese Mehlwürmer zu gelangen, mussten die Meisen es lernen, eine an der Seite des Kastens angebrachte Schiebtüre zur Seite zu schieben. Zunächst wurden 10 Meisen in der Voliere daraufhin trainiert, die Schiebetüren gezielt zu öffnen. Dann wurden diese trainierten Meisen in verschiedenen Arealen des Versuchsgeländes freigelassen, auf dem überall solche Futterautomaten standen. Nur in den Subpopulationen, in denen Trainer-Meisen freigelassen wurden, lernten alle anderen Meisen schnell den Trick, während in Subpopulationen ohne Trainer kaum eine Meise alleine auf den Trick kam. Offenbar haben auch Vögel soziale Netze, über die praktisches Wissen weitergegeben werden kann (Schilthuizen 2018).

Ein weiteres Beispiel für Vögel, die es gelernt haben, Nahrung von Tisch des Menschen zu stibitzen, gehören Barbadosgimpelfinken (*Loxigilla barbadensis*). Diese Gimpel hatten offenbar herausgefunden, dass der Zucker in den Portionstütchen für Zucker, die in einem Restaurant meist auf dem Tisch stehen, hervorragend schmeckt. Die Gimpel flogen an den Tisch, ergriffen ein Zuckertütchen, fixierten es mit einem Fuß und hackten mit dem Schnabel ein Loch hinein. Dann wurden die Zuckerkrümel schnell geschluckt und weggeflogen, bevor ein Gast sie bemerkte und verscheuchte. Jean-Nicolas Audet und Simon Ducatez machten dann weitere Versuche mit den Barbadosgimpelfinken und fanden, dass städtische Gimpelfinken wesentlich schneller Tricks lernten als ländliche Vögel (Schilthuizen 2018).

Zur Voraussetzung für ein exploratives Verhalten, wie bei den Krähen, Meisen und Gimpelfinken beobachtet wurde, gehören Wagemut und Erkundungslust (Neophilie). Solche Eigenschaften, die vermutlich genetisch gesteuert werden, sind bei Stadtvögeln offenbar weit verbreitet. Bei den Vögeln in unserer urbanen Umwelt gab es offenbar einen evolutionären Selektionsprozess, sodass letztlich stressto-

lerante, weniger ängstliche Vögel mit reduzierter Fluchtdistanz evolvierten, die sich durch Wagemut und Erkundungslust auszeichnen, die intelligente Leistungen fördern und ermöglichen.

4 Planung und Einsicht

Einige Tiere legen Beuteverstecke an, wenn es mehr Nahrung gibt, als gefressen werden kann. So verstecken Eichelhäher Nüsse und Eicheln, Tannenhäher die Zapfen von Zirbelkiefern und Kleiber kleinere Samen. Dabei werden unterschiedliche Plätze gesucht und nicht alles in ein einziges Versteck gebunkert. Diese Vögel haben ein exzellentes Gedächtnis sowie Orientierung und finden diese Verstecke auch Wochen und Monate später, wenn die Nahrung knapp wird. Sie sind jedoch nicht perfekt. Sie übersehen oder vergessen doch manches Versteck; dies nützt den Pflanzen, denn auf diese Weise werden die Samen verbreitet. Eichel- und Tannenhäher spielen dadurch eine wichtige Funktion in Waldökosystemen, um deren Diversität aufrecht zu erhalten.

Generell kann man beobachten, dass Tiere ein ungewöhnlich gutes Ortsgedächtnis haben und dadurch ihren Heimatplatz ohne Probleme wiederfinden, selbst wenn sie weite Wanderungen unternehmen. Bei Zugvögeln ist dies besonders auffällig. Einige Arten verfügen offenbar über einen Sonnen- und Magnetkompass, mit dem sie navigieren können. Viele Arten lernen ihren Zugweg auch über Landmarken und können über sie navigieren (man spricht von einer Landmarkenorientierung; Wink 2014).

Durch Dressurversuche haben Verhaltensforscher schon früh erkannt, dass viele Tiere zu Leistungen fähig sind, die man als höhere Hirnleistung einstufen könnte. Denn sie erfordern Abstraktion und Generalisation. Dies ist vor allem beim Werkzeuggebrauch ersichtlich. Generell kann man beobachten, dass Werkzeuggebrauch und Cleverness mehrfach und unabhängig in der Evolution entstanden. Alle diese Verhaltensweisen setzen voraus, dass ein Tier einen Plan entwickelt haben muss, um ein Werkzeug für einen spezifischen Zweck einzusetzen. Dies benötigt Einsicht und Intelligenz. Häufig werden Vorbilder nachgeahmt und in Populationen können sich kulturelle Traditionen im Werkzeuggebrauch herausbilden. Als Alleinstellungsmerkmal kann der Werkzeuggebrauch für *Homo sapiens* nicht länger angesehen werden, auch wenn wir ihn zu einer besonderen Fertigkeit entwickelt haben. Was uns auszeichnet, ist unsere Fähigkeit zur Rückbesinnung, Antizipa-

tion, Reflexion und Verantwortung (Storch et al., 2013). Aber auch bei diesen Merkmalen dürfte es dazu zumindest bei den Menschenaffen schon Vorstufen geben.

Haushunde kennen ihren Besitzer meist sehr gut und können Ereignisse ahnen. Wirft ein Hundebesitzer an einem Strand den Stock schräg ins Meer, so würde man erwarten, dass der Hund der Wurfrichtung folgt. Es wurde jedoch berichtet, dass der Hund zunächst am Ufer entlanglief bis er dem Stock am Nächsten kam, erst dann sprang er ins Wasser, um den Stock zu holen (Becker 2021). Um diesen Prozess so zu optimieren, muss der Hund Intelligenz aufweisen, denken können und kausale Planungen durchführen. Offenbar haben Hunde ein einfaches Ich-Bewusstsein und ihre geistigen Fähigkeiten entsprechen denen eines zweieinhalbjährigen Kindes.

Onur Güntürkün von der Universität Bochum beschriebt ein Experiment mit einer Elster (*Pica pica*; Güntürkün 2020). Die Forscher befestigten einen gelben Papiersticker an der Kehle der Elster, deren Kopf vorher mit einem Tuch bedeckt war, sodass die Elster nicht sehen konnte, was gerade vorging. Dann ließ man sie ohne die Kopfbedeckung in einem Raum mit einem Spiegel frei. Die Elster erkannte sich sofort im Spiegelbild und sah den Sticker, den sie sofort entfernte. War kein Spiegel vorhanden oder wenn ein schwarzer Sticker verwendet wurde, störte sich die Elster nicht an dem Sticker. Derartige Verhaltensweisen gelten bei Menschenaffen für einen Beweis der Selbsterkennung. Sich selbst im Spiegel zu erkennen ist für Orang-Utans, Schimpansen, Indische Elefanten und Delphine bekannt, also alles Säugetiere mit großem Gehirn. Neben der Elster zählen andere Rabenvögel und Papageien zu den Vögeln, die höhere kognitive Eigenschaften zeigen. Obwohl Vögel eine andere Hirnstruktur und sehr viel kleinere Gehirne als Säugetiere aufweisen, zeigen sie dennoch ein ähnliches Leistungsvermögen, was Lernen, Selbstwahrnehmung und Entscheidungsfindung angeht. Vögel können Kausalzusammenhänge erkennen, die Zukunft planen oder Bündnisse mit Artgenossen schmieden (Heinrich 1999; Güntürkün 2020). Wir können demnach davon ausgehen, dass die Intelligenz von Rabenvögeln und Papageien der von Menschenaffen entspricht.

5 Kognition und Soziale Intelligenz

Neben der technischen Intelligenz existiert eine soziale Intelligenz bei vielen Tieren. Primaten und Hunde sind berühmt für ihre soziale Intelligenz. Können Vögel dies auch? Krähen leben in Schwärmen zusammen und sind daher für eine solche Aufgabe prädestiniert. Bei Kolkraben konnte man feststellen, dass diese ein soziales Netz besonders über Rufe aufbauen, durch das es ihnen gelingt, besser an Nahrung heranzukommen, versteckte Beute zu finden oder sich zu verteidigen (Güntürkün 2020). Kolkraben können erkennen, wenn sie beobachtet werden. Sie erkennen, was andere Vögel sehen oder nicht sehen können; dies wird als „Theory of Mind“ bezeichnet.

In der Regel sind Landtiere intelligenter als Tiere, die lebenslang im Wasser leben. Möglicherweise war die eher eintönige Umgebung der Meeresumgebung weniger fordern als die Landlebensräume. Ausnahme sind die Delfine und andere Wale, die erstaunliche kognitive Leistungen erbringen können. Wale haben eigene raffinierte Gesänge, mit denen sie ihre sozialen Netze strukturieren und durch Echolokalisierung ihre Nahrung erbeuten.

Handaufgezogene Kolkraben können offenbar Denkaufgaben lösen; sie scheinen mögliche Lösungswege in ihrem Gehirn durchzuspielen, um im ersten Anlauf zur richtigen Lösung zu kommen. Zudem können Kolkraben Pläne für die Zukunft machen. Aber nicht alle intelligent erscheinende Verhaltensweisen gehen auf einen aktiven Denkprozess zurück, viele erfolgen instinktiv und sind angeboren. Dies kann der Biologe durch sogenannte Kaspar-Hauser Versuche zeigen, in denen Jungtiere ohne Kontakt zu Vorbildern aufgezogen werden (Heinrich 1999). So kann man z. B. zeigen, dass viele Lautäußerungen bei Tieren eine genetische Basis haben, wenn auch lernen eine zusätzliche Rolle spielen kann.

Anfang des 20. Jahrhunderts erregte „der kluge Hans“, ein Pferd in Berlin, große Aufmerksamkeit, denn das Pferd konnte zählen, angeblich Bruchrechnung und andere Rechenkünste. Das Pferd war aber nur intelligent, wenn die Aufgaben von seinem Trainer gestellt wurden. Offenbar verfügte das Pferd über soziale Intelligenz und konnte an kleinen Gesten des Trainers erraten, was die richtige Antwort sein musste (Gundlach 2006).

Hunde lassen sich gut trainieren und zeigen erstaunliche Gedächtnisleistungen. Der Border Collie Rico konnte z. B. 260 Wörter den zugehörigen Spielzeugen oder Gegenständen zuordnen und Spielzeug auf Kommando aus einem Nebenzimmer holen. Man könnte jetzt argumentieren, dass der Collie ein gutes Gedächtnis hat.

In einem Versuch wurden ihm sieben bekannte Spielzeuge und ein unbekanntes Spielzeug, sagen wir eine Katze vorgelegt. Auf den Befehl „Rico, wo ist die Katze?“ brachte er meist die Katze herbei. Er wusste offenbar, dass Dinge einen Namen haben und da jetzt nach einem neuen Namen gefragt wurde, kombinierte er richtig, dass dies die Katze sein musste. Er zeigte Abstraktionsvermögen und lernte ähnlich, wie dies kleine Kinder tun. Durch Gehirnscans konnte gezeigt werden, dass Hunde nicht nur die Bedeutung von Wörtern verstehen, sondern auch den emotionalen Inhalt des Gesagten. Dabei wird die Bedeutung von Wörtern und emotionaler Inhalt in unterschiedlichen Hirnarealen prozessiert.

Das Gorillaweibchen Coco lernte die amerikanische Gebärdensprache und die Primatologin Penny Patterson brachte Coco 1000 Gesten bei. Coco konnte Ausdrücke kombinieren und verstand rund 2000 gesprochene englische Wörter. Ähnliche Ergebnisse wurden mit anderen Primaten erhalten; sie kamen jedoch nie über die Sprachfähigkeit von Kleinkindern hinaus.

Die Seelöwin Rocky lernte, sich 90 graphische Symbole zu merken. Rocky konnte Graphiken in sinnvolle Gruppen zu sortieren und lernte es, Perspektiven zu interpretieren.

Papageien können ein ähnlich hohes kognitives Leistungsvermögen erreichen wie Primaten. So konnte der Graupapagei (*Psittacus erithacus*) Alex Handlungen und über 100 Objekte nach Form und Farbe kategorisieren, sowie Zahlenmengen bis acht erfassen. Dieser Papagei hatte ein Verständnis für relative Größenverhältnisse und erkannte, wenn Objekte fehlten. Alex konnte Fragen über seine Vorlieben beantworten und besaß in einigen Bereichen kognitive Fähigkeiten, die einem fünfjährigen Kind entsprachen (Güntürkün 2020). Offenbar verfügte Alex über ein Konzept, also eine abstrakte Vorstellung von einem Gegenstand.

Selbst Tauben, deren Gehirn noch kleiner als das von Krähen, Elstern und Papageien ist, erreichen erstaunliche kognitive Leistungen. So konnten trainierte Tauben bis zu 7254 abstrakte Muster im Gedächtnis halten und logische Zusammenhänge erkennen (Güntürkün 2020).

Schwarmintelligenz (auch kollektive oder Gruppenintelligenz genannt) kann man schon bei den Evertebraten beobachten, man denke an die sozialen Insekten wie Bienen, Ameisen und Termiten, die in komplex strukturierten Staaten leben und in klaren sozialen Netzwerken untereinander verbunden sind und intelligente Entscheidungen durch Zusammenarbeit treffen. Kommunikation, Genetik und

erlernte Verhaltensweisen ermöglichen die Funktion eines Insektenvolkes. Das Kollektiv bildet quasi einen Superorganismus mit spezifischer Schwarmintelligenz.

6 Gehirnstrukturen

Vögeln fehlt ein Großhirn mit der Großhirnrinde (Neocortex), die bei den Säugetieren der Sitz für kognitive Leistungen gilt. Im Neocortex sind die Neuronen in einer besonderen Art und Weise angeordnet, sodass komplexe Netzwerke (Konnektom) aufgebaut werden können. Stattdessen haben Vögel einen Hirnmantel (Pallium), dessen Stratifizierung und Grundschaltpläne denen der Großhirnrinde ähneln und vermutlich daher ähnlich leistungsfähig sind (Güntürkün 2020).

Die Größe des Gehirns ist aber offensichtlich nicht automatisch für die Intelligenz ausschlaggebend. Es kommt auf die Anzahl der Neuronen im Gehirn an. Die Zahl der Neuronen liegt bei Vögeln bei etwa 1 Milliarde, beim Schimpansen bei 7,4 Milliarden und bei uns Menschen bei rund 86 Milliarden. Es gilt wohl die Regel: je mehr Neuronen desto höher die Intelligenz. Die Neuronen sind im Vogelgehirn dichter gepackt als im Säugergehirn. Letztlich hängen die kognitiven Fähigkeiten von der Verarbeitungsgeschwindigkeit und der Speicherkapazität der Nervennetze ab (Güntürkün 2020). Innerhalb dieser Tiergruppen sind einige besonders intelligent. Bei Säugetieren weisen diese Arten mehr Neuronen auf, bei intelligenten Vögeln ist die Neuronendichte erhöht, sodass die Entfernung zwischen einzeln Neuronen verringert ist und daher schneller Informationen austauschen können (Güntürkün 2020).

7 Ausblick

In vielen kognitiven Bereichen können es Rabenvögel und Papageien mit Menschenaffen aufnehmen:

- sie benutzen Werkzeuge,
- sie spielen nach entsprechendem Training Memory,
- sie können sich in andere hineinversetzen,
- sie zeigen Selbstkontrolle bei leckeren Versuchungen,

- sie erkennen Kausalität hinter Geschehnissen und planen die Zukunft,
- sie können Zusammenhänge erkennen und ziehen daraus entsprechende Schlussfolgerungen,
- sie können Rechtschreibregeln für kurze Wörter lernen,
- sie können Muster erkennen (auch Kunstwerke unterscheiden),
- sie besitzen ein gewisses Zahlenverständnis,
- sie haben ein exzellentes Kurzzeitgedächtnis,
- sie können sich selbst im Spiegel erkennen.

Es stellt sich die Frage, ob diese kognitiven Eigenschaften bei Vögeln und Primaten unabhängig voneinander in der Evolution entstanden, oder ob bereits der letzte gemeinsame Vorfahre von Vögeln und Säugetieren vor 320 Millionen Jahren dieses Wahrnehmungsbewusstsein besaß (Storch et al., 2013). Berücksichtigt man, dass auch Tintenfische (also Mollusken) und Insekten schon intelligentes Verhalten zeigen, könnten die Ursprünge deutlich älter sein. Da alle Lebewesen ständig Probleme in ihrer Umwelt meistern müssen, könnten kognitive Leistungen und Bewusstsein auch mehrmals und konvergent entstanden sein. Durch vergleichende Genomanalysen müsste man diese Fragen eigentlich beantworten könnten, sobald man die relevanten Gene identifiziert hat.

Im Tierreich sind nicht alle Arten gleich hochbegabt. Unter den Wirbellosen können Kraken (Kopffüßler oder Cephalopoden) erstaunliche kognitive Leistungen hervorbringen. Sie sind besonders lernfähig und haben ein exzellentes räumliches Gedächtnis. Sie können beispielsweise den Schraubdeckel eines Glases mit ihren Saugnäpfen aufdrehen, in dem leckere Nahrung platziert war (Becker 2021). Sie können sich jedoch nicht selbst im Spiegel erkennen, wie wir dies bei der Elster kennengelernt hatten. Unter den Säugetieren gelten Menschenaffen, aber auch viele andere Primaten, Elefanten und Delfine als hochintelligent. Homo sapiens ist aus Sicht der Evolutionsbiologie bekanntlich sehr nah mit dem Menschenaffen, insbesondere mit Schimpansen und Bonobos verwandt. Vor rund 7 Millionen Jahren hatten wir gemeinsame Vorfahren (Storch et al., 2013). Daher ist es eigentlich nicht verwunderlich, dass viele unserer kognitiven Fähigkeiten auch schon bei dem Menschenaffen vorhanden sind. Wir sind aber sicherlich der klügste

Affe. Zudem verfügen wir als einzige rezente Tierart über Sprechvermögen und Schrift. Dadurch können wir unsere Erfahrungen schnell und über eine große Entfernung weitergeben und tradieren. Diese Alleinstellungsmerkmale erlauben uns, unsere Gedanken und Ideen anderen Mitmenschen verbal oder schriftlich mitzuteilen. Das geht schneller als ein Kopieren von Verhaltensweisen durch einfache Beobachtung.

Literatur

Becker, P.-E. (2021). Wie Tiere hämmern, bohren, streichen. Werkzeuggebrauch und Bandbreite der Kultur bei Tier und Mensch. Stuttgart: Hirzel.

Darwin, C. (1872). The Expression of the Emotions in Man and Animals. London: John Murray.

Eibl-Eibesfeldt, I. (1972). Grundriß der vergleichenden Verhaltensforschung. Ethologie. München: R. Piper & Co Verlag, 3. Auflage.

Frank, G., Linster, L., Wink, M. (2018). Karotten lieben Butter. Eine Sterneköchin, ein Arzt und ein Wissenschaftler über traditionelles Kochwissen und gesunden Genuss. München: Knaus.

Güntürkün, O. (2020). Verhaltensforschung. Federvieh mit Köpfchen. Spektrum der Wissenschaft 30, 1–21.

Gundlach, H. (2006). Carl Stumpf, Oskar Pfungst, der Kluge Hans und eine geglückte Vernebelungsaktion. Psychologische Rundschau, 57, 96–105.

Hauser, M. D. (2001). Wilde Intelligenz. Was Tiere wirklich denken. München: C.H. Beck.

Heinrich, B. (1999). Mind of the Raven. Investigations and Adventures with Wolf-Birds. Ney York: Harper-Collins.

Köhler, W. (1921). Intelligenzprüfungen an Menschenaffen. Berlin: Springer.

Margalida, A., Wetterauer, B., Domhan, C, Schulze-Hagen, H., Wink, M. (2020). What do minerals in the feces of Bearded Vultures reveal about their dietary habits? Science of the Total Environment 728 (2020) 138836.

Schilthuizen, M. (2018). Darwin in der Stadt. Die rasante Evolution der Tiere im Großstadtdschungel. München: DTV.

Schulze-Hagen, K. Kaiser, G. (2019) Die Vogel-WG. Die Heinroths, ihre 1000 Vögel und die Anfänge der Verhaltensforschung. München: Knesebeck-Verlag.

Schulze-Hagen, K. (2021).: Niko Tinbergen und deutsche Ornithologen: Eine wechselseitige Inspiration. Vogelwarte 59.

Storch, V., Welsch, U., Wink, M. (2013). Evolutionsbiologie. 3. Auflage. Heidelberg: Springer-

Wink, M. (2014). Ornithologie für Einsteiger. Heidelberg: Springer-Spektrum.

Über den Autor

Michael Wink ist Ordinarius für Pharmazeutische Biologie an der Universität Heidelberg, wo er seit 1999 die Abteilung Biologie am Institut für Pharmazie und Molekulare Biotechnologie leitete. Seit 1.10.19 arbeitet er als Seniorprofessor an der Universität Heidelberg. Nach dem Studium der Biologie und Chemie an der Universität Bonn forschte er in Braunschweig, Köln, München und Mainz. Seine Arbeitsgebiete reichen von Phytochemie, Arznei- und Giftpflanzen, Ornithologie und Naturschutz bis zur Systematik, Phylogenie und Evolutionsforschung. Er ist Autor/Co-Autor von mehr als 20 Büchern und über 1000 Originalarbeiten. Er ist Gastprofessor an Universitäten in China, Thailand, Argentinien und Mexiko, außerdem Mitglied diverser Wissenschaftlicher Beiräte, Herausgeber einiger Zeitschriften und Empfänger mehrerer Auszeichnungen.

Korrespondenzadresse:
Prof. Dr. Michael Wink
Universität Heidelberg
Institut für Pharmazie und Molekulare Biotechnologie
INF 329
69120 Heidelberg, Germany
E-Mail: wink@uni-heidelberg.de
Homepage:
https://www.uni-heidelberg.de/institute/fak14/ipmb/phazb/akwink.html und
https://www.winks-biology.com

Intelligenz: Evolutionsbiologische Grundlagen und Perspektiven

THOMAS HOLSTEIN

Centre for Organismal Studies, Universität Heidelberg

Zusammenfassung

Obwohl der Begriff Intelligenz mittlerweile in den verschiedensten Bereichen verwandt wird, um die Entstehung komplexer Kausalitäten zu erklären, wird Intelligenz hier primär als die Fähigkeit neuronaler Systeme verstanden, Probleme in kognitiven Entscheidungsprozessen zu lösen. Kognition und intelligentes Verhalten sind daher primäre Objekt, aber nicht Subjekt der zufallsgetriebenen biologischen Evolution. – Aktuelle Arbeiten aus der Neurobiologie und vergleichenden Genomforschung haben jetzt gezeigt, wie, ausgehend von einfachen neuronalen Systemen, in allen Großgruppen des Tierreichs Formen entstanden sind, die in der Lage sind, vergleichbar komplexe Probleme in kognitiven Prozessen zu lösen. Diese Kognition beruht zwar auf den gleichen zellulären Grundelementen (Neuronen), wird aber in zum Teil ganz unterschiedlich gestalteten zentralnervösen Strukturen (Gehirne) realisiert. Durch den Vergleich der Nervensysteme von Tieren, die zu höheren intelligenten Sinnesleistungen fähig sind, werden jetzt erste gemeinsame Eigenschaften und Prinzipien offenkundig, welche Voraussetzung für die Entstehung höherer intelligenter Systeme sind (z. B. die Verschaltungsdichte, aber nicht Zahl neuronaler Elemente). Sie sind wahrscheinlich auch *Constraints* in der Entwicklung künstlicher intelligenter Systeme.

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24383

1 Einführung

Die biologischen Grundlagen der Intelligenz und unseres Bewusstseins sind eines der spannendsten Themen an der Nahtstelle von Biologie und Psychologie und sie sind von grundsätzlicher Bedeutung für das Selbstverständnis des Menschen und unsere Erkenntnisfähigkeit. Lange wurde dieses Thema aus anthropozentrischer Sicht behandelt, akzeptierend, dass der Mensch ein Produkt der biologischen Evolution ist, aber zugleich eine Sonderstellung für den Menschen beanspruchend. Eine wesentliche Voraussetzung für Intelligenz bzw. intelligente Kognition und intelligentes Verhalten ist ohne Zweifel die Fähigkeit von Individuen eine Form von Selbstreflektion und Bewusstsein zu entwickeln. Hier bestand für lange Zeit für *Hominiden*, *Primaten* und Säugetiere im weiteren Sinne ein Alleinstellungsmerkmal, indem man davon ausging, dass nur diese Tiere in Form der Großhirnrinde das entsprechende Korrelat für das Bewusstsein in der Evolution entwickelt haben.

In einem Editorial des amerikanischen Wissenschaftsmagazins *Science* wurden im September 2020 unter dem Titel „Geteiltes Bewusstsein“ zwei Arbeiten vorgestellt (Nieder et al., 2020; Stacho et al., 2020), in denen erstmals auf Ebene der Neuroanatomie und Neuropsychologie gezeigt wurde, dass in Vögeln bei der Durchführung einer komplexen „Denk-Aufgabe“ neuronale Antworten im Gehirn aktiviert werden, die mit der Wahrnehmung von Reizen der Problemlösung korrelieren. Eine solche Aktivität scheint das neuronale Korrelat und der Marker für das Bewusstsein und für die seit langem bekannten kognitiven Fähigkeiten dieser Vögel zu sein (Herculano-Houzel, 2020; Kabadayi et al., 2016; MacLean et al., 2014; Olkowicz et al., 2016).

Diese Arbeiten werfen eine Reihe von neuen Fragen auf, die für unser Verständnis der biologischen Evolution der Intelligenz von fundamentaler Bedeutung sind. Sie stellen auch die Frage nach der Sonderstellung des Menschen auf neuer Grundlage: Was sind letztlich die molekularen und zellulären Grundlagen menschlicher Intelligenz? Gibt es Intelligenz auch in anderen Tiergruppen und auf welchen Prinzipien beruht sie? Wenn Bewusstsein und Intelligenz in einer konvergenten Evolution mehrfach im Tierreich entstanden sind, welche Bedeutung hat dies für die Entwicklung von „Künstlicher Intelligenz“? In diesem Essay soll versucht werden, einen Überblick über aktuelle Arbeiten zu den Eigenschaften und zur Evolution neuronaler Systeme zu geben, die vielleicht Antworten auf diese Fragen geben können.

2 Grundlagen neuronaler Kognition

Der Inbegriff neuronaler Kognition ist ohne Zweifel das menschliche Gehirn. Seine immense Komplexität – es besteht aus hundert Milliarden Neuronen einer noch unbekannten Anzahl verschiedener Typen, wobei jedes Neuron in der Lage ist, sich mit Zehntausenden anderer Neuronen zu verbinden – macht ein ganzheitliches Verständnis seiner Funktionsweise äußerst schwierig. Das menschliche Gehirn ist aber in den gut 500 Millionen Jahren seiner Evolution aus einfacheren Vorläufern entstanden. Ein Großteil unseres Wissens der einzelnen Elemente unseres Nervensystems beruht daher auf dem Vergleich mit einfacheren und besser zugänglichen Systemen bei Invertebraten und Vertebraten. So erlauben die großen Neuronen der Meeresschnecke *Aplysia* eine detaillierte Untersuchung der neuronalen Architektur und Physiologie bei verschiedenen Formen des assoziativen Lernens (Kandel et al., 2021). Und die Bedeutung der Ionenkanäle für die Ausbildung des Aktionspotentials bei der Erregungsleitung wurde bei den Riesenaxonen der Tintenfische entdeckt (Hodgkin and Huxley, 1952; Kandel et al., 2021). Obwohl einzelne Neuronen die funktionellen Einheiten von Nervensystemen darstellen, können sie alleine die spezifischen Eigenschaften neuronaler Systeme nicht erklären; diese beruhen immer auf multizellulären Schaltkreisen von Neuronen mit emergenten funktionellen Eigenschaften (Bosch et al., 2017). Für das Verständnis der Funktion von Nervensystemen ist es somit unerlässlich, die frühesten evolutionären Beispiele von Nervensystemen zu verstehen (Abbildung 1).

3 Die ersten Nervensysteme

Es ist bemerkenswert, dass Nervensysteme schon sehr früh in der Evolution der Tiere auftraten und mit Sicherheit schon vor der Entstehung der bilateralsymmetrischen Tiere - auch bekannt als *Bilateria* - vorhanden waren. Von den Linien, die sich vor der Radiation der Bilateria im Kambrium auseinanderentwickelten („Kambrische Explosion“), sind Nervensysteme nur bei Nesseltieren (*Cnidaria*) und Rippenquallen (*Ctenophora*) vorhanden, nicht aber bei den Schwämmen (Chapman et al., 2010; Watanabe et al., 2009). Die Nervensysteme der Cnidaria und Bilateria weisen viele Gemeinsamkeiten auf, während es bei den Ctenophora aufgrund der begrenzten Anzahl von Neurotransmittern Unterschiede gibt; auch ist deren phylogenetische Position noch offen (Bosch et al., 2017; Moroz et al., 2014).

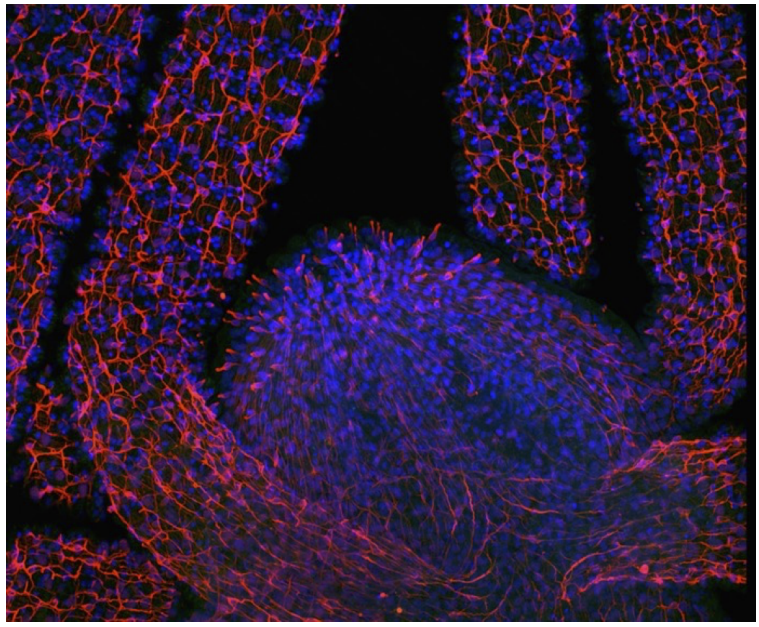


Abbildung 1: Ein diffuses Nervennetz ohne Gehirn und Ganglien wie das Nervensystem der Nesseltiere, stand wahrscheinlich am Anfang der Evolution der Nervensysteme. Das Nervennetz des Süßwasserpolypen *Hydra vulgaris*, dargestellt durch Expression eines nervenspezifischen Membranproteins (rot) und mit einem DNA-Farbstoff (DAPI) gefärbte Zellkerne (blau). In *Hydra* wird aber um die Mundöffnung (Hypostom) des Polypen eine hohe Dichte von sensorischen Neuronen aufgebaut, die für den Fang-Akt und die Nahrungsaufnahme wichtig sind. Es gibt breites Spektrum von verschiedenen Neurotransmittern, die in Subpopulationen von Neuronen exprimiert werden. Solch einfache Nervennetze sind zu komplexen Verhaltensmustern fähig, wie dem Fang-Akt mit Nesselzellen oder den verschiedenen Formen der Fortbewegung (siehe Abbildung 2) und werden derzeit zell- und neurobiologisch untersucht. (Aufnahme © Bertulat & Holstein).

Cnidaria, zu denen Medusen (Quallen) und Polypen (Hydren, Anemonen, Korallen) bildende Gruppen gehören, besitzen ein Nervensystem, das im Gegensatz zu den Nervensystemen der Bilateria nicht als zentralisiertes Nervensystem (ZNS) funktioniert, sondern ein diffuses Nervennetz darstellt, dass ohne Gehirn und Ganglien operiert (Abbildung 1). Durch den Vergleich dieses einfachen neuronalen Systems mit den komplexeren Systemen können so grundlegende Konstruktionsprinzipien eines zentralen Nervensystems erforscht werden, z. B. welchen Beitrag

das ZNS für höhere neuronale Funktionen wie die eines Bewusstseins und von intelligentem Verhalten besitzt (Bosch et al., 2017).

Es ist faszinierend zu sehen, zu welch komplexen Verhaltensmustern die *Cnidaria* bereits verfügen. Die Raffinesse ihres Verhaltens wurde bereits im 18. Jahrhundert erkannt, als Abraham Trembley erstmals die Fortbewegung des Süßwasserpolypen *Hydra* beschrieb (Trembley, 1744) (Abbildung 2).

Aber auch Medusen besitzen verschiedenste Verhaltensmuster, die nicht nur zur Lokomotion, sondern auch zum Beutefang und zur geschlechtlichen Vermehrung eingesetzt werden. Wie all diese Verhaltensmuster über ein diffuses Netz von Neuronen zustande kommen, ist derzeit überhaupt nicht verstanden (Bosch et al., 2017; Rentzsch et al., 2019). Es ist auch gänzlich kontraintuitiv, dass bei den *Cnidaria* dem einfachen neuronalen Netz elaborierte Sinneszellen und Sinnesorgane gegenüberstehen, die es an Komplexität mit den sensorischen Leistungen der Wirbeltiere aufnehmen können. So sind die Nesselzellen hochspezialisierte neuronale Zellen, die mit ihren Nesselkapseln und ciliären Mechano- und Chemorezeptoren zu den komplexesten Zelltypen im Tierreich gehören (David et al., 2008; Holstein and Tardent, 1984; Nüchter et al., 2006), und Würfelquallen haben zur Orientierung im Raum Linsenaugen entwickelt, die man nur aus den höheren Bilateria kannte.

In den letzten Jahren wurden neben dem klassischen Süßwasserpolypen *Hydra* und seinen verwandten marinen kolonialen Formen (z. B. *Hydractinia echinata*) auch Medusen (*Clytia hemispherica* und *Aurelia aurita*) sowie die Seeanemone *Nematostella vectensis* im Labor untersucht und deren Genome entschlüsselt (Chapman et al., 2010; Gold et al., 2019; Leclere et al., 2019; Putnam et al., 2007). Damit stehen verschiedene basale Nervensysteme für funktionelle Analysen zur Verfügung, mit denen die Entstehung komplexer Verhaltensmuster auch auf molekularer Ebene verstanden werden kann. Die jetzt sequenzierten Genome und Transkriptome zeigen, dass diese Verhaltensmuster auf einer unerwartet hohen genetischen Komplexität der Nervennetze von Nesseltieren beruhen. Die Vielfalt an synaptischen Proteinen, kleinen Neurotransmittern, Neuropeptiden sowie deren Verarbeitungsmaschinerie ist so komplex, wie wir sie aus „höheren“ Tieren kennen, z. B. aus Insekten und Vertebraten.

Es kann davon ausgegangen werden, dass das gesamte zelluläre und molekulare Repertoire unseres Nervensystems sich bereits in dieser frühen Evolutionsstufe in den gemeinsamen Vorfahren der *Cnidaria* und *Bilateria* vor > 500 Millionen

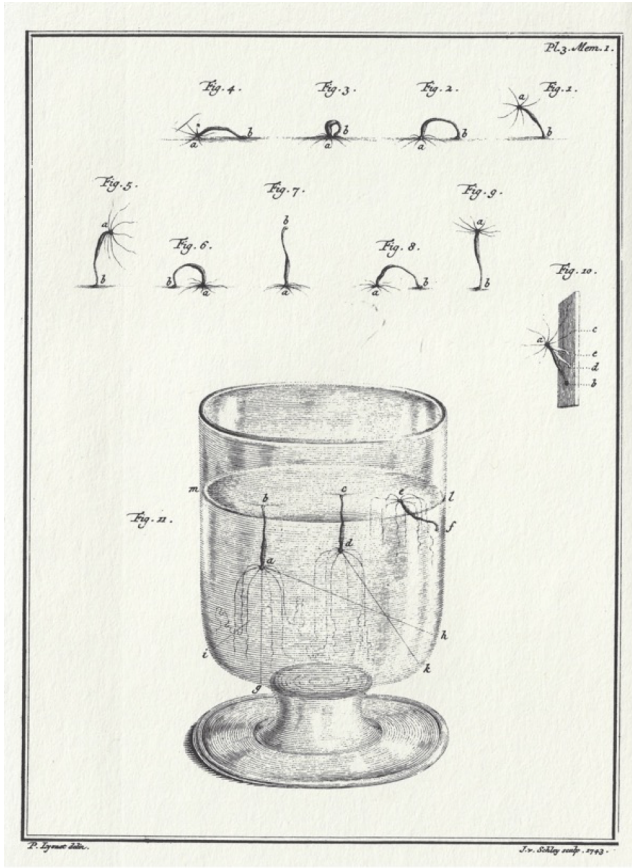


Abbildung 2: Der Genfer Naturforscher Abraham Trembley hat den Süßwasserpolypen minutiös in seinem Verhalten beobachtet und seine Erkenntnisse 1744 in dem einflussreichen Buch „*Mémoires pour servir à l'histoire d'un genre de polypes d'eau douce*" veröffentlicht. In der Tafel 3 sind verschiedene Bewegungsmuster der etwa 1 cm langen Hydren beschrieben: Zum einen eine raupenspinnerartige Fortbewegung (Fig. 1-4) bei der sich das Tier abwechselnd kontrahiert und dehnt, während der fixierte aborale Pol (b) dem oralen Ende mit den Tentakeln folgt und so von einem Standort zum nächsten gehoben wird. Bei der anderen Bewegung erfolgt ein Überschlag des aboralen Endes (Fuß) (Fig. 5-9). Außerdem können sich die Tiere vertikale bewegen oder in einem Gefäß (Fig.10) und die Anheftung an die Wasseroberfläche (Fig.11). Trembley war nicht nur beobachtender Naturforscher, sondern auch ein Begründer der experimentellen Biologie (Entdeckung der Regeneration bei *Hydra*) mit großer Wirkung auf die Philosophen seiner Zeit.

Jahren entwickelt hat. Dabei war wahrscheinlich die primäre Funktion des Nervensystems „nur“ die einfache sensorische und motorische Koordination. Angesichts der komplexen Verhaltensmuster dieser Tiere wird derzeit dennoch diskutiert, ob diese einfachen neuronalen Netze bereits über Eigenschaften verfügen, die über die neuronale Koordination hinausgehen, oder ob die höheren neuronalen Funktionen eine Zentralisierung des Nervensystems benötigen. Die Tatsache, dass die Evolution des ZNS der Bilateria eng an die Existenz einer zweiten Körperachse gekoppelt ist, die den Cnidaria noch fehlt, deutet darauf hin, dass bestimmte Schaltkreise des Nervensystems erst in den Bilateria entstanden sind. Hier führte die Evolution zu Ganglien und zentralnervösen Strukturen, die eine höhere neuronale Dichte und damit eine höhere Zahl von synaptischen Kontakten ermöglichte.

Die Ausbildung eines ZNS kann als evolutiver Trend verstanden werden, der am Anfang der Bilateria-Evolution stand. Vergleichend genomische Studien zeigen Gemeinsamkeiten in der Ontogenie des Nervensystems einschließlich seiner zentralnervösen Elemente in allen Verwandtschaftsgruppen der Bilateria einschließlich des Gehirns (Hirth et al., 2003; Reichert, 2005). Sie gliedern sich in drei Großgruppen, die *Deuterostomia*, *Lophotrochozoa* und *Ecdysozoa*. Die Deuterostomia, zu denen als größte Gruppe die Wirbeltiere (Vertebraten) mit dem Menschen gehören, bilden das Nervensystem auf der dorsalen Rückenseite (Notoneuralia), während *Lophotrochozoa* und *Ecdysozoa* das Nervensystem auf der ventralen Bauchseite bilden (Gastroneuralia). Neue Befunde deuten darauf hin, dass in den drei Großgruppen unabhängig voneinander (konvergent) Formen mit einem ZNS entstanden sind, die nach verhaltensbiologischen Kriterien zu höheren neuronalen Leistungen und damit zu intelligentem Verhalten fähig sind (Roth, 2015; Roth and Dicke, 2005; Roth and Dicke, 2012) (Abbildung 3).

4 Kognition bei Invertebraten

Die komplexesten Gehirne der *Ecdysozoa* besitzen die Insekten. Sie gehören zu den Gliederfüßern (Arthropoden), deren Nervensystem sich aus einfachen Vorläufern mit einem oralen Nervenring und Ganglien enthaltenden ventralen Nervensträngen ableitet. Das dreiteilige Gehirn besitzt in seinem vorderen Teil sogenannte „Pilzkörper“ (*Corpora pedunculata*), die bei der Honigbiene die Hälfte des Hirnvolumens einnehmen und deren neuronale Dichte um eine Größenordnung größer ist als bei Wirbeltieren (Reichert, 2005; Roth, 2015) (Strausfeld

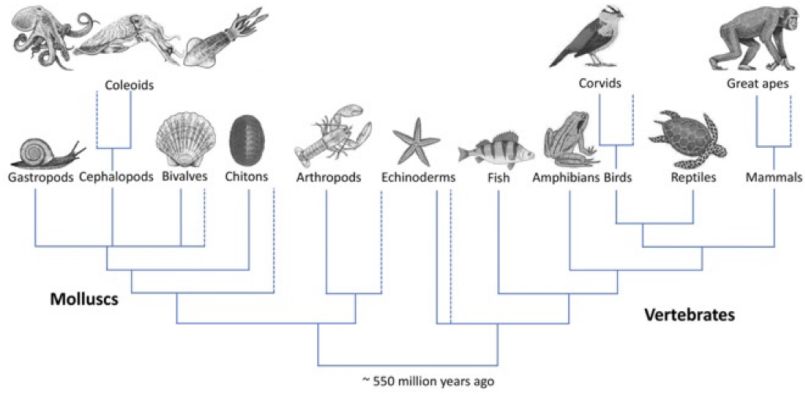


Abbildung 3: Phylogenetischer Baum, der die evolutionäre Beziehung zwischen Kopffüßern (*Cephalopoden*) und Rabenvögeln (*Corviden*) und Menschenaffen (*Hominiden*) darstellt. Modifiziert aus: *Biological Reviews 96 (2021) 162–178 ©2020 The Authors. Biological Reviews published by John Wiley & Sons Ltd on behalf of Cambridge Philosophical Society* (*Bildquellen: ©CCBY-SA: Schnecke, Stachelhäuter, Chiton*; *©CCBY-NC-ND: Tintenfisch*; *©jenesesimre, stock.adobe.com*: *Krake, Tintenfisch, Gliederfüßer, Muschel*; *©artbalitskiy, stock.adobe.com*: *Affe, Rabenvogel, Fisch, Amphibien, Reptil*).

and Hirth, 2013). Die Region wurde als Substrat für die Entwicklung kognitiver und sozialer Funktionen identifiziert und besitzt ein eindrucksvolles Repertoire und eine eindrucksvolle Flexibilität an Verhaltensmustern für Nahrungsaufnahme, räumliche Orientierung und soziale Interaktion (Roth, 2015). Bienen zeichnen sich auch durch ihr großes Lernverhalten aus und scheinen zum Aufbau kognitiver Karten zur räumlichen Orientierung fähig zu sein, die kontextabhängig abgerufen werden können (Roth, 2015), obwohl dies noch in Diskussion steht (Cruse and Wehner, 2011; Wehner and Menzel, 1969).

Die komplexesten Gehirne der *Lophotrochozoa* – und aller Tiere außerhalb der Vertebraten – besitzen die rezenten Tintenfische (*coleoide Cephalopoda*), zu denen die Kraken (*Octopoda*), Kalmare (*Theutidae*) und Sepien (*Sepiida*) gehören (Albertin et al., 2015; Wanninger and Wollesen, 2018). Als Mitglied der großen Gruppe der Weichtiere (*Mollusca*), zu denen auch Muscheln und Schnecken gehören, leiten sich auch deren Nervensysteme aus einfachen Vorläufern mit einem oralen Nervenring und Ganglien enthaltenden ventralen Nervensträngen ab, wie sie bei Ringelwürmern (Polychäten) vorkommen. Das Nervensystem von Tintenfischen enthält rund 550 Millionen Neuronen, von denen sich etwa 90% in den Armen und

den Sehnerven befinden und 10% im eigentlichen Gehirn. Das Gehirn ist in einen ventralen motorischen und einen dorsalen Abschnitt unterteilt, dem die sensorische Informationsverarbeitung und höhere kognitive Funktionen zugeschrieben wird (Albertin et al., 2015; Roth, 2015; Shomrat et al., 2008). Der Vertikal-Lappen des Oktopus Gehirns ist sein komplexester Teil und Schlüsselstruktur für die an den Lern- und Gedächtnis-Prozessen beteiligten Schaltkreise (Albertin et al., 2015; Shomrat et al., 2008; Young et al., 1971). Er enthält mit etwa 26 Millionen Neuronen mehr als die Hälfte der Neuronen im Gehirn (Roth, 2015). Er besteht aus zwei Arten von Neuronen: Interneuronen, die ‚en passant' Synapsen zu den primär visuellen Afferenzen bilden und Projektionsneuronen, die eine Verbindung zum Subvertikallappen herstellen. Dadurch entsteht ein hochgeordnetes Netzwerk mit Millionen sich kreuzender Fasern.

In der vor kurzem erschienenen ersten Beschreibung des Genoms eines Tintenfischs (*Octopus bimaculoides*) konnte gezeigt werden, dass die molekulare Grundlage dieses hochkomplexen Gehirns unter anderem auf neuronalen Adhäsionsproteinen beruht, die für die Ausbildung der synaptischen Kontakte zwischen den Neuronen verantwortlich sind (Albertin et al., 2015). Im Oktopus-Genom sind 168 *Protocadherin*-Gene vorhanden, die durch Tandem-Genduplikation und Expansion dieser Genfamilie entstanden sind und die primär im Nervengewebe exprimiert werden. Die Funktion der Protocadherine wurde bisher vor allem bei Säugetieren untersucht, wo sie für die neuronale Entwicklung und das Überleben sowie die synaptische Spezifität erforderlich sind; sie entstehen hier aber durch komplexes Spleißen und nicht durch Genduplikation. Die Expression von Protocadherinen in den neuralen Geweben von Tintenfischen deutet auf eine zentrale Rolle dieser Gene bei der Etablierung und Aufrechterhaltung der Organisation des Nervensystems von Kopffüßern hin, wie es von Säugetieren bekannt ist (Albertin et al., 2015).

Die hochkomplexe molekulare und morphologische Struktur der Tintenfisch-Gehirne lässt uns verstehen, warum bei diesen Tieren so viele „intelligente" Verhaltensweisen beschrieben wurden. So kann ein „Oktopus sich nicht nur gut merken, wo schmackhaftes Futter zu finden ist, sondern er kehrt nach einer Reise weit weg von zu Hause oft auf dem kürzesten Weg nach Hause zurück, den er vorher noch nie genommen hatte." (Roth 2015). Wie bei Bienen wird deshalb diskutiert, ob Tintenfische über eine „mentale Karte" verfügen (Roth, 2015) und inwieweit

sie zu einem „Lernen durch Beobachten“ fähig sind (Fiorito and Chichery, 1995; Fiorito and Scotto, 1992; Roth, 2015).

Diese Berichte zu intelligentem Verhalten von Tintenfischen haben aber jetzt eine neue Qualität erhalten, denn es konnte gezeigt werden, dass auch Tintenfische fähig sind, Selbstkontrolle in einer Belohnungsverzögerungsaufgabe auszuüben (Schnell et al., 2021a; Schnell et al., 2021b; Schnell and Clayton, 2019). Die Fähigkeit, unmittelbare Befriedigung zugunsten einer besseren, aber verzögerten Belohnung zu überwinden, gilt als wichtige kognitive Fähigkeit für effektive Entscheidungsfindung, zielgerichtetes Verhalten und Zukunftsplanung (Mischel 1974, Santos & Rosati 2015, Schnell et al., 2021a; Schnell et al., 2021b; Schnell and Clayton, 2019). Beim Menschen wurde die Fähigkeit zur Selbstkontrolle mit der kognitiven Leistungsfähigkeit von Kindern in Verbindung gebracht: Kinder, die in der Lage waren, eine Belohnung länger hinauszuzögern [1], erzielten auch bei intellektuellen Aufgaben bessere Ergebnisse (Mischel, 2015; Mischel et al., 1989). – Um die Selbstkontrolle bei Tintenfischen zu testen, haben Schnell und Kollegen den Tieren eine Aufgabe gestellt, welche ebenfalls die Fähigkeit eines Individuums misst, auf sofortige Belohnung zu verzichten (Schnell et al., 2021a; Schnell et al., 2021b). Die Tintenfische hielten die Verzögerungszeiten für bis zu 50-130 s aufrecht. Um die Lernleistung zu testen, mussten die Tintenfische lernen, die Belohnung mit einem von zwei Reizen zu assoziieren; anschließend mussten sie lernen, die Belohnung mit dem alternativen Reiz zu assoziieren. Auch hier hatten Tintenfische, die fähig waren, ihre Belohnung länger hinauszuzögern als andere, die bessere Lernleistung (Schnell et al., 2021a; Schnell et al., 2021b). Die Arbeit zeigte, dass Tintenfische Verzögerungen tolerieren können, um Nahrung von höherer Qualität bzw. Quantität zu erhalten, was letztlich vergleichbar ist mit der Situation bei Säugetieren (Schnell et al., 2021a; Schnell et al., 2021b).

5 Kognition bei Vertebraten

Der Mensch (Homo sp.) ist eine Gattung, die evolutionsbiologisch zur Familie der Menschenaffen (Hominiden) und damit der Säugetiere gehört. Die Erforschung

[1] Kinder bekamen ein Marshmallow vorgesetzt und hatten die Wahl – sofort zu essen oder zu warten, um später zwei zu bekommen. Der Versuch wurde auch als Marshmallow Test bekannt (Walter Mischel 2014, Siedler, ISBN 9783827500434).

komplexer Kognition war traditionell auf die Hominiden und verwandte Gruppen innerhalb der Primaten beschränkt, da diese als Höhepunkt kognitiver Komplexität angesehen wurden, obwohl es zunehmend Hinweise darauf gab, dass es auch andere Säugetiere (*Mammalia*), aber auch Vögel (*Aves*) gibt, die ein Gehirn besitzen, das zu kognitiven Leistungen fähig ist, die mit denen von Primaten vergleichbar sind (MacLean et al., 2014; Olkowicz et al., 2016). Beispiele dafür sind z. B. Wale (Fox et al., 2017; Marino, 2002), Elefanten (Plotnik et al., 2006; Plotnik et al., 2011) oder Papageien (Pepperberg, 2006; Pepperberg et al., 2013) und Rabenvögel (Boeckle and Bugnyar, 2012; Emery and Clayton, 2004). Die Tatsache, dass Rabenvögel kognitive Fähigkeiten besitzen, die denen von Affen entsprechen (Clayton and Emery, 2005; Emery and Clayton, 2005; Güntürkün and Bugnyar, 2016; Kabadayi et al., 2016), hat daher die Frage aufgeworfen, ob sich komplexe Kognition bei Vertebraten mehrfach und unabhängig voneinander entwickelt hat (Roth, 2015).

Mammalia und Aves haben sich bereits vor etwa 300 Millionen Jahren in zwei unterschiedlichen Gruppen der *Amnioten*[2] auseinanderentwickelt und ihr Gehirn lässt sich – wie das Nervensystem aller Vertebraten – auf einfachste Vorläufer der Chordaten vor 550 Millionen Jahren zurückführen (Abbildung 3). Nach der allgemeinen Lehrmeinung gibt es aber grundsätzliche Unterschiede in der Gehirnanatomie und Neuroarchitektur zwischen Affen und Rabenvögeln (Jarvis et al., 2005). Demnach besitzt die Mantelschicht (Pallium) des Großhirns bei Vögeln keine Schichtung wie bei Säugetieren (diese mächtige Schichtung hat dem Pallium der Säugetiere die Bezeichnung „Großhirnrinde“ eingebracht), weshalb Vögel keine Großhirnrinde besäßen (Güntürkün and Bugnyar, 2016; Herculano-Houzel, 2020). Diese Annahme einer fehlenden Großhirnrinde wurde aber angezweifelt, denn auch das Pallium der Vögel leitet sich – wie unsere Großhirnrinde – embryonal aus demselben Abschnitt des sich entwickelnden Gehirns ab mit allen molekularen Markern, und es besitzt eine vergleichbar hohe Zahl und Dichte an Neuronen (Güntürkün and Bugnyar, 2016; Herculano-Houzel, 2020; Puelles et al., 2013). In den neuen Arbeiten wird jetzt gezeigt, dass das Pallium von Vögeln eine ähnliche neuronale Organisation und Schichtung aufweist

[2] Amnioten sind Landwirbeltiere, die sich durch Embryonalhüllen unabhängig vom Wasser fortpflanzen können, während Amphibien in der Embryonalentwicklung darauf angewiesen sind und postembryonal Kaulquappen als Larvenstadien ausbilden.

wie der Kortex von Säugetieren und über Neuronen verfügt (Stacho et al., 2020), die das Wahrgenommene neurophysiologisch repräsentieren können (Nieder et al., 2020), was ein Kennzeichen von Bewusstsein ist (Herculano-Houzel, 2020).

Es ist deshalb eine spannende Frage, wieweit innerhalb der Vertebraten die Kognition und Fähigkeit zu einem Bewusstsein bereits bei dem gemeinsamen Vorfahren von Vögeln und Säugetieren existierte (Bshary and Brown, 2014; Herculano-Houzel, 2020; Nieder et al., 2020). Obwohl die Evolution der Tintenfische und der Vergleich mit anderen Tiergruppen nahelegt, dass es eine konvergente Evolution von höherer Kognition und Bewusstsein gab (Roth, 2015), scheint es innerhalb der Vertebraten doch gewisse strukturelle und embryologische Gemeinsamkeiten zu geben, die in der Evolution dazu führten, dass neuronale Strukturen mit besonders hoher neuronaler Dichte nur in bestimmten Regionen aufgebaut wurden, welche dann die Entstehung höherer intelligenter Systeme ermöglichten. Es sollen daher neben den Vögeln auch die biologischen Grundlagen der Kognition bei Primaten/Hominiden, der Gruppe von Säugetieren zu denen wir Menschen gehören, abschließend behandelt werden.

6 Kognition der Hominiden

Es wurde lange angenommen, dass die hohe kognitive Leistungsfähigkeit und Intelligenz, welche die Hominiden und den Menschen auszeichnet, in engem Zusammenhang mit der Größe und Komplexität des Gehirns und der Großhirnrinde (*Cortex cerebri*) stehen oder gar durch diese erklärt werden können (Abbildung 3). In der Tat kam es innerhalb der Hominiden seit der Aufspaltung der Menschenaffen und Gattung *Homo* im späten Miozän vor 6-7 Millionen Jahren (Harrison, 2010) zu einer extrem schnellen Zunahme der Gehirngröße vor allem in der menschlichen Evolution, während die Gehirngröße sich bei den verschiedenen Menschenaffengruppen innerhalb der Hominiden weniger stark änderte.

Die starke Größenzunahme des menschlichen Gehirns war begleitet von einer erheblichen Umstrukturierung des Verdauungssystems sowie Fress- und Sozialverhaltens (Fonseca-Azevedo and Herculano-Houzel, 2012; Roth and Dicke, 2005; Roth and Dicke, 2012).

Es wurde wiederholt versucht, die hohe kognitive Leistungsfähigkeit bei Säugern generell mit der Gehirngröße zu korrelieren. Roth & Dicke haben 2005 die verfügbaren Daten zur Größe des Gehirns bei verschiedenen Säugern bestimmt

und die Korrelation zu der kognitiven Leistungsfähigkeit der Gehirne untersucht (Roth and Dicke, 2005; Roth and Dicke, 2012). Dabei zeigte sich, dass die *absolute Größe* des Gehirns innerhalb der Säugetiere zwar um bis zu 5 Größenordnungen variieren kann (das Gewicht reicht von 0,1g bei den kleinsten Gehirnen bei Insektenfresser und Fledermäusen bis zu 9000g bei den großen Walen), aber das menschliche Gehirn ist bei weitem nicht das größte (Gewicht von etwas 1,35 kg). Dies gilt auch bei Betrachtung der *relativen Größe* des Gehirns (Gehirngröße/Körpergröße) wodurch allometrische Effekte kompensiert werden [3], auch hier liegen die Hominiden im Mittelfeld (Roth and Dicke, 2005; Roth and Dicke, 2012). Die Daten lassen daher keine einfache Korrelation zwischen Gehirngröße und der kognitiven Leistungsfähigkeit zu.

Ein deutlicheres Bild zeichnet sich bei den für die Kognition relevanten Strukturen des Kortex ab, wo beim Menschen die meisten Neuronen unter den rezenten Primaten zu finden sind (Sousa et al., 2017). Als neurobiologisches Substrat der allgemeinen Intelligenz bei Säugetieren gilt der an der Stirnseite des Gehirns gelegene Frontallappen (präfrontaler Kortex) (Duncan et al., 2000). Er ist an der Verknüpfung sensorischer Informationen mit den kognitiv-mentalen Vorgängen des Denkens, der Handlungsplanung und der Entscheidungsfindung unmittelbar beteiligt (Roth and Dicke, 2005; Roth and Dicke, 2012). Obwohl der präfrontale Kortex des Menschen besonders groß ist (Roth and Dicke, 2005; Roth and Dicke, 2012), wurde in neueren vergleichenden Studien an Primaten die überproportionale Größe des menschlichen präfrontalen Kortex grundsätzlich in Frage gestellt (Roth and Dicke, 2005; Roth and Dicke, 2012; Semendeferi et al., 2002), ein Problem, das nach wie vor Gegenstand aktueller Forschung ist (Hayashi et al., 2021).

Da weder die absolute noch die relative Größe des Gehirns ein Alleistellungsmerkmal des menschlichen Gehirns sind, stellt sich die Frage, welche biologischen Eigenschaften das Gehirns den Menschen von seinen nächsten rezenten Hominiden Verwandten, den Schimpansen (*Pan troglodytes*) und Zwergschimpansen bzw.

[3] Allometrie bezieht die Organgröße auf die Körpergröße; das Gehirn folgt einer Potenzfunktion mit einem Exponenten von 0,6-0,8 was bedeutet, dass die Gehirne mit zunehmender Körpergröße zwar absolut größer, aber relativ kleiner werden (Roth, G., and U. Dicke. 2005. Evolution of the brain and intelligence. Trends Cogn Sci. 9:250-257, Roth, G., and U. Dicke. 2012. Evolution of the brain and intelligence in primates. Prog Brain Res. 195:413-430).

Bonobos (*Pan paniscus*) unterscheiden. Es setzt sich daher die Auffassung durch, dass der Schlüssel zu den einzigartigen Fähigkeiten des menschlichen Gehirns sich weniger in seiner absoluten oder relativen Größe oder sogar in der Anzahl der Neuronen und Glia, sondern vielmehr in subtileren Komponenten ausdrückt wie einer größeren Vielfalt an neuronalen Zelltypen oder komplexeren Mustern der neuronalen Vernetzung (Sousa et al., 2017). Diese Veränderungen müssen zudem evolutiv jung sein, d. h. sie müssen frühestens mit der starken Hirnentwicklung der Hominiden im frühen Miozän (15-18 Millionen Jahre) und spätestens mit der Abspaltung der Gattung *Homo* von den restlichen Hominiden, den Menschenaffen, im späten Miozän vor 6-7 Millionen Jahren begonnen haben.

An dieser Stelle haben vergleichend genomische Untersuchungen entscheidend zu einem besseren Verständnis möglicher Faktoren der Gehirnevolution innerhalb der Säugetiere beigetragen. Durch den direkten Vergleich der mittlerweile komplett sequenzierten Genome der Menschenaffen (Chimpanzee and Analysis, 2005; Kronenberg et al., 2018; Locke et al., 2011; Mao et al., 2021; Scally et al., 2012) mit dem des Menschen lassen sich relevante neuronale Gene identifizieren, die ausschließlich beim Menschen vorhanden sind, und die sich in diesem Zeitfenster, z. B. durch Genduplikation, neu gebildet haben. Mit diesem Ansatz wurden primatenspezifische Gene identifiziert, die in den neuralen Stamm- und Vorläuferzellen des sich entwickelnden Neokortex besonders aktiv sind (Florio et al., 2018). Die Zahl strikt human-spezifischer Gene ist beschränkt (n=15), sie sind innerhalb der letzten 6-7 Millionen Jahre neu entstanden und enthalten regulatorische Gene, die an der neuronalen Proliferation und Expansion des Neokortex beteiligt sind (Florio et al., 2015) (Florio et al., 2018). Andere Neokortex spezifische Gene, die auch bei anderen Primaten oder Säugern vertreten sind, waren in der Zahl höher (n=3458), tragen aber auch zur neokortikalen Entwicklung bei (Florio et al., 2018). Von besonderem Interesse ist hier das *SLIT-ROBO GTPase 2* (*SRGAP2*) Gen, dessen Expression auch im sich entwickelnden Neokortex angereichert ist (Charrier et al., 2012; Dennis et al., 2012).

Es war bereits bekannt, dass SRGAP2 an der Gehirnentwicklung beteiligt ist (Guerrier et al., 2009) und dass Menschen mindestens drei ähnliche Kopien des Gens besitzen, während nicht-menschliche Primaten nur eine tragen. Es konnte gezeigt werden, dass der Mensch vier nicht-identische Kopien (genannt A-D) von *SRGAP2* an verschiedenen Stellen auf Chromosom 1 trägt (Geschwind and Konopka, 2012). Durch den Vergleich der Gensequenzen mit denen des *SRGAP2-*

Gens vom Orang-Utan und Schimpansen schätzten die Autoren, dass *SRGAP2* in der menschlichen Abstammungslinie vor etwa 3,4 Millionen Jahren dupliziert wurde, was zu *SRGAP2A* und *SRGAP2B* führte (Geschwind and Konopka, 2012).

Weitere Duplikationen von *SRGAP2B* führten vor etwa 2,4 Millionen Jahren zu *SRGAP2C* und vor etwa 1 Million Jahren zu *SRGAP2D*, wobei besonders *SRGAP2C* vor 2 bis 3 Millionen Jahren eine wichtige Rolle gespielt haben könnte, als sich menschliche Kognition entwickelte (Geschwind and Konopka, 2012). Die zweite Studie beleuchtet den Mechanismus des *SRGAP2*-Gens (Charrier et al., 2012). Die Bildung dendritischen Ausstülpungen (*spines*) auf der Oberfläche von Neuronen sind für die Ausbildung synaptischer Kontakte essentiell. Hier wurde gezeigt, dass SRGAP2A die Bildung von spines fördert und die Migration von Neuronen innerhalb der sich entwickelnden Großhirnrinde verlangsamt, während das humanspezifische SRGAP2C die Bildung weiterer Stacheln begünstigt.

Dadurch kommt es zu einer höheren Dichte an *spines* und einer Verlangsamung in der kortikalen Entwicklung, was eine höhere Plastizität des Gehirns ermöglicht, d. h. der Fähigkeit, neuronale Verbindungen als Reaktion auf neue Erfahrungen zu verändern (Geschwind and Konopka, 2012). Die Duplikation von *SRGAP2C* wurde auch bei den Neandertalern und Denisova Menschen gefunden. Interessanterweise weist auch das *FOXP2* Gen, das mit der Etablierung einiger Aspekte der Sprachfähigkeit unseres Gehirns sowie mit Sprachstörungen in Verbindung gebracht wird, beim Neandertaler und Menschen dieselben Mutationen auf, die den Menschenaffen fehlen (Krause et al., 2007).

7 Von der Intelligenz des *Homo sapiens* zur künstlichen Intelligenz?

Ziel dieser Arbeit war aufzuzeigen, wie aus den einfachsten Stufen eines neuronalen Netzes komplexe Nervensystem entstanden, die in den verschiedensten Tiergruppen sehr wahrscheinlich konvergent zueinander in der >600-500 Millionen Jahre währenden Evolution sind. Der Mensch scheint daher nicht mehr die einzige Spezies zu sein, die Intelligenz besitzt. Allerdings zeigt ein Vergleich der verschiedenen Systeme, dass die hohen kognitiven Leistungen, welche ein intelligentes Verhalten ermöglichen, immer an eine bestimmte Umgebung und einen bestimmten Kontext gebunden sind. Diese Kontexte sind zugleich an eine Millionen Jahre lange Evolution der biologischen „Kognitionssysteme“ geknüpft. Die künstliche Intelligenz ist daher nur als Erweiterung menschlicher Intelligenz

denkbar, allerdings unter Einbeziehung aller Sophistikation, die in der Evolution die Entstehung höherer Kognition ermöglichte.

Danksagung

Ein herzlicher Dank geht an Rainer M. Holm-Hadulla, der den Anstoß zu dieser Arbeit gegeben hat und es mir ermöglichte, über den „Tellerrand“ unserer Forschung zum Nervensystem der *Cnidaria* hinauszuschauen.

Literatur

Albertin, C.B., O. Simakov, T. Mitros, Z.Y. Wang, J.R. Pungor, E. Edsinger-Gonzales, S. Brenner, C.W. Ragsdale, and D.S. Rokhsar. 2015. The octopus genome and the evolution of cephalopod neural and morphological novelties. *Nature*. 524:220–224.

Boeckle, M., and T. Bugnyar. 2012. Long-term memory for affiliates in ravens. *Curr Biol*. 22:801–806.

Bosch, T.C.G., A. Klimovich, T. Domazet-Loso, S. Grunder, T.W. Holstein, G. Jekely, D.J. Miller, A.P. Murillo-Rincon, F. Rentzsch, G.S. Richards, K. Schroder, U. Technau, and R. Yuste. 2017. Back to the Basics: Cnidarians Start to Fire. *Trends Neurosci*. 40:92–105.

Bshary, R., and C. Brown. 2014. Fish cognition. *Curr Biol*. 24:R947–950.

Chapman, J.A., E.F. Kirkness, O. Simakov, S.E. Hampson, T. Mitros, T. Weinmaier, T. Rattei, P.G. Balasubramanian, J. Borman, D. Busam, K. Disbennett, C. Pfannkoch, N. Sumin, G.G. Sutton, L.D. Viswanathan, B. Walenz, D.M. Goodstein, U. Hellsten, T. Kawashima, S.E. Prochnik, N.H. Putnam, S. Shu, B. Blumberg, C.E. Dana, L. Gee, D.F. Kibler, L. Law, D. Lindgens, D.E. Martinez, J. Peng, P.A. Wigge, B. Bertulat, C. Guder, Y. Nakamura, S. Ozbek, H. Watanabe, K. Khalturin, G. Hemmrich, A. Franke, R. Augustin, S. Fraune, E. Hayakawa, S. Hayakawa, M. Hirose, J.S. Hwang, K. Ikeo, C. Nishimiya-Fujisawa, A. Ogura, T. Takahashi, P.R. Steinmetz, X. Zhang, R. Aufschnaiter, M.K. Eder, A.K. Gorny, W. Salvenmoser, A.M. Heimberg, B.M. Wheeler, K.J. Peterson, A. Bottger, P. Tischler, A. Wolf, T. Gojobori, K.A. Remington, R.L. Strausberg, J.C. Venter, U. Technau, B. Hobmayer, T.C. Bosch, T.W. Holstein, T. Fujisawa, H.R. Bode, C.N. David, D.S. Rokhsar, and R.E. Steele. 2010. The dynamic genome of Hydra. *Nature*. 464:592–596.

Charrier, C., K. Joshi, J. Coutinho-Budd, J.E. Kim, N. Lambert, J. de Marchena, W.L. Jin, P. Vanderhaeghen, A. Ghosh, T. Sassa, and F. Polleux. 2012. Inhibition of

SRGAP2 function by its human-specific paralogs induces neoteny during spine maturation. *Cell*. 149:923–935.

Chimpanzee, S., and C. Analysis. 2005. Initial sequence of the chimpanzee genome and comparison with the human genome. *Nature*. 437:69–87.

Clayton, N., and N. Emery. 2005. Corvid cognition. *Curr Biol*. 15:R80–81.

Cruse, H., and R. Wehner. 2011. No need for a cognitive map: decentralized memory for insect navigation. *PLoS Comput Biol*. 7:e1002009.

David, C.N., S. Ozbek, P. Adamczyk, S. Meier, B. Pauly, J. Chapman, J.S. Hwang, T. Gojobori, and T.W. Holstein. 2008. Evolution of complex structures: minicollagens shape the cnidarian nematocyst. *Trends Genet*. 24:431–438.

Dennis, M.Y., X. Nuttle, P.H. Sudmant, F. Antonacci, T.A. Graves, M. Nefedov, J.A. Rosenfeld, S. Sajjadian, M. Malig, H. Kotkiewicz, C.J. Curry, S. Shafer, L.G. Shaffer, P.J. de Jong, R.K. Wilson, and E.E. Eichler. 2012. Evolution of human-specific neural SRGAP2 genes by incomplete segmental duplication. *Cell*. 149:912–922.

Duncan, J., R.J. Seitz, J. Kolodny, D. Bor, H. Herzog, A. Ahmed, F.N. Newell, and H. Emslie. 2000. A neural basis for general intelligence. *Science*. 289:457–460.

Emery, N.J., and N.S. Clayton. 2004. The mentality of crows: convergent evolution of intelligence in corvids and apes. *Science*. 306:1903–1907.

Emery, N.J., and N.S. Clayton. 2005. Evolution of the avian brain and intelligence. *Curr Biol*. 15:R946–950.

Fiorito, G., and R. Chichery. 1995. Lesions of the vertical lobe impair visual discrimination learning by observation in Octopus vulgaris. *Neurosci Lett*. 192:117–120.

Fiorito, G., and P. Scotto. 1992. Observational Learning in Octopus vulgaris. *Science*. 256:545–547.

Florio, M., M. Albert, E. Taverna, T. Namba, H. Brandl, E. Lewitus, C. Haffner, A. Sykes, F.K. Wong, J. Peters, E. Guhr, S. Klemroth, K. Prufer, J. Kelso, R. Naumann, I. Nusslein, A. Dahl, R. Lachmann, S. Paabo, and W.B. Huttner. 2015. Human-specific gene ARHGAP11B promotes basal progenitor amplification and neocortex expansion. *Science*. 347:1465–1470.

Florio, M., M. Heide, A. Pinson, H. Brandl, M. Albert, S. Winkler, P. Wimberger, W.B. Huttner, and M. Hiller. 2018. Evolution and cell-type specificity of human-specific genes preferentially expressed in progenitors of fetal neocortex. *eLife*. 7:e32332.

Fonseca-Azevedo, K., and S. Herculano-Houzel. 2012. Metabolic constraint imposes tradeoff between body size and number of brain neurons in human evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 109:18571–18576.

Fox, K.C.R., M. Muthukrishna, and S. Shultz. 2017. The social and cultural roots of whale and dolphin brains. *Nat Ecol Evol*. 1:1699–1705.

Geschwind, D.H., and G. Konopka. 2012. Neuroscience: Genes and human brain evolution. *Nature*. 486:481–482.

Gold, D.A., T. Katsuki, Y. Li, X. Yan, M. Regulski, D. Ibberson, T. Holstein, R.E. Steele, D.K. Jacobs, and R.J. Greenspan. 2019. The genome of the jellyfish Aurelia and the evolution of animal complexity. *Nature Ecology & Evolution*. 3:96–104.

Guerrier, S., J. Coutinho-Budd, T. Sassa, A. Gresset, N.V. Jordan, K. Chen, W.L. Jin, A. Frost, and F. Polleux. 2009. The F-BAR domain of srGAP2 induces membrane protrusions required for neuronal migration and morphogenesis. *Cell*. 138:990–1004.

Güntürkün, O., and T. Bugnyar. 2016. Cognition without Cortex. *Trends Cogn Sci*. 20:291–303.

Harrison, T. 2010. Anthropology. Apes among the tangled branches of human origins. *Science*. 327:532–534.

Hayashi, T., Y. Hou, M.F. Glasser, J.A. Autio, K. Knoblauch, M. Inoue-Murayama, T. Coalson, E. Yacoub, S. Smith, H. Kennedy, and D.C. Van Essen. 2021. The nonhuman primate neuroimaging and neuroanatomy project. *Neuroimage*. 229:117726.

Herculano-Houzel, S. 2020. Birds do have a brain cortex-and think. *Science*. 369:1567–1568.

Hirth, F., L. Kammermeier, E. Frei, U. Walldorf, M. Noll, and H. Reichert. 2003. An urbilaterian origin of the tripartite brain: developmental genetic insights from Drosophila. *Development*. 130:2365–2373.

Hodgkin, A.L., and A.F. Huxley. 1952. Propagation of electrical signals along giant nerve fibers. *Proc R Soc Lond B Biol Sci*. 140:177–183.

Holstein, T., and P. Tardent. 1984. An ultrahigh-speed analysis of exocytosis: nematocyst discharge. *Science*. 223:830–833.

Jarvis, E.D., O. Güntürkün, L. Bruce, A. Csillag, H. Karten, W. Kuenzel, L. Medina, G. Paxinos, D.J. Perkel, T. Shimizu, G. Striedter, J.M. Wild, G.F. Ball, J. Dugas-Ford, S.E. Durand, G.E. Hough, S. Husband, L. Kubikova, D.W. Lee, C.V. Mello, A. Powers, C. Siang, T.V. Smulders, K. Wada, S.A. White, K. Yamamoto, J. Yu, A. Reiner, A.B. Butler, and C. Avian Brain Nomenclature. 2005. Avian brains and a new understanding of vertebrate brain evolution. *Nat Rev Neurosci*. 6:151–159.

Kabadayi, C., L.A. Taylor, A.M. von Bayern, and M. Osvath. 2016. Ravens, New Caledonian crows and jackdaws parallel great apes in motor self-regulation despite smaller brains. *R Soc Open Sci*. 3:160104.

Kandel, E.R., J.D. Koester, S.H. Mack, and S.A. Siegelbaum. 2021. Principles of Neural Science, Sixth Edition. McGraw-Hill Education.

Krause, J., C. Lalueza-Fox, L. Orlando, W. Enard, R.E. Green, H.A. Burbano, J.J. Hublin, C. Hanni, J. Fortea, M. de la Rasilla, J. Bertranpetit, A. Rosas, and S. Paabo. 2007. The derived FOXP2 variant of modern humans was shared with Neandertals. *Curr Biol*. 17:1908–1912.

Kronenberg, Z.N., I.T. Fiddes, D. Gordon, S. Murali, S. Cantsilieris, O.S. Meyerson, J.G. Underwood, B.J. Nelson, M.J.P. Chaisson, M.L. Dougherty, K.M. Munson, A.R. Hastie, M. Diekhans, F. Hormozdiari, N. Lorusso, K. Hoekzema, R. Qiu, K. Clark, A. Raja, A.E. Welch, M. Sorensen, C. Baker, R.S. Fulton, J. Armstrong, T.A. Graves-Lindsay, A.M. Denli, E.R. Hoppe, P. Hsieh, C.M. Hill, A.W.C. Pang, J. Lee, E.T. Lam, S.K. Dutcher, F.H. Gage, W.C. Warren, J. Shendure, D. Haussler, V.A. Schneider, H. Cao, M. Ventura, R.K. Wilson, B. Paten, A. Pollen, and E.E. Eichler. 2018. High-resolution comparative analysis of great ape genomes. *Science*. 360:eaar6343.

Leclere, L., C. Horin, S. Chevalier, P. Lapebie, P. Dru, S. Peron, M. Jager, T. Condamine, K. Pottin, S. Romano, J. Steger, C. Sinigaglia, C. Barreau, G. Quiroga Artigas, A. Ruggiero, C. Fourrage, J.E.M. Kraus, J. Poulain, J.M. Aury, P. Wincker, E. Queinnec, U. Technau, M. Manuel, T. Momose, E. Houliston, and R.R. Copley. 2019. The genome of the jellyfish Clytia hemisphaerica and the evolution of the cnidarian life-cycle. *Nat Ecol Evol*. 3:801–810.

Locke, D.P., L.W. Hillier, W.C. Warren, K.C. Worley, L.V. Nazareth, D.M. Muzny, S.P. Yang, Z. Wang, A.T. Chinwalla, P. Minx, M. Mitreva, L. Cook, K.D. Delehaunty, C. Fronick, H. Schmidt, L.A. Fulton, R.S. Fulton, J.O. Nelson, V. Magrini, C. Pohl, T.A. Graves, C. Markovic, A. Cree, H.H. Dinh, J. Hume, C.L. Kovar, G.R. Fowler, G. Lunter, S. Meader, A. Heger, C.P. Ponting, T. Marques-Bonet, C. Alkan, L. Chen, Z. Cheng, J.M. Kidd, E.E. Eichler, S. White, S. Searle, A.J. Vilella, Y. Chen, P. Flicek, J. Ma, B. Raney, B. Suh, R. Burhans, J. Herrero, D. Haussler, R. Faria, O. Fernando, F. Darre, D. Farre, E. Gazave, M. Oliva, A. Navarro, R. Roberto, O. Capozzi, N. Archidiacono, G. Della Valle, S. Purgato, M. Rocchi, M.K. Konkel, J.A. Walker, B. Ullmer, M.A. Batzer, A.F. Smit, R. Hubley, C. Casola, D.R. Schrider, M.W. Hahn, V. Quesada, X.S. Puente, G.R. Ordonez, C. Lopez-Otin, T. Vinar, B. Brejova, A. Ratan, R.S. Harris, W. Miller, C. Kosiol, H.A. Lawson, V. Taliwal, A.L. Martins, A. Siepel, A. Roychoudhury, X. Ma, J. Degenhardt, C.D. Bustamante, R.N. Gutenkunst, T. Mailund, J.Y. Dutheil, A. Hobolth, M.H. Schierup, O.A. Ryder, Y. Yoshinaga, P.J. de Jong, G.M. Weinstock, J. Rogers, E.R. Mardis, R.A. Gibbs, et al. 2011. Comparative and demographic analysis of orang-utan genomes. *Nature*. 469:529–533.

MacLean, E.L., B. Hare, C.L. Nunn, E. Addessi, F. Amici, R.C. Anderson, F. Aureli, J.M. Baker, A.E. Bania, A.M. Barnard, N.J. Boogert, E.M. Brannon, E.E. Bray, J. Bray, L.J. Brent, J.M. Burkart, J. Call, J.F. Cantlon, L.G. Cheke, N.S. Clayton, M.M. Delgado, L.J. DiVincenti, K. Fujita, E. Herrmann, C. Hiramatsu, L.F. Jacobs, K.E. Jordan, J.R. Laude, K.L. Leimgruber, E.J. Messer, A.C. Moura, L. Ostojic, A. Picard, M.L. Platt, J.M. Plotnik, F. Range, S.M. Reader, R.B. Reddy, A.A. Sandel, L.R. Santos, K. Schumann, A.M. Seed, K.B. Sewall, R.C. Shaw, K.E. Slocombe, Y. Su, A. Takimoto, J. Tan, R. Tao, C.P. van Schaik, Z. Viranyi, E. Visalberghi, J.C. Wade, A. Watanabe, J. Widness, J.K. Young, T.R. Zentall, and Y. Zhao. 2014. The evolution of self-control. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 111:E2140–2148.

Mao, Y., C.R. Catacchio, L.W. Hillier, D. Porubsky, R. Li, A. Sulovari, J.D. Fernandes, F. Montinaro, D.S. Gordon, J.M. Storer, M. Haukness, I.T. Fiddes, S.C. Murali, P.C. Dishuck, P. Hsieh, W.T. Harvey, P.A. Audano, L. Mercuri, I. Piccolo, F. Antonacci, K.M. Munson, A.P. Lewis, C. Baker, J.G. Underwood, K. Hoekzema, T.H. Huang, M. Sorensen, J.A. Walker, J. Hoffman, F. Thibaud-Nissen, S.R. Salama, A.W.C. Pang, J. Lee, A.R. Hastie, B. Paten, M.A. Batzer, M. Diekhans, M. Ventura, and E.E. Eichler. 2021. A high-quality bonobo genome refines the analysis of hominid evolution. *Nature*. 594:77–81.

Marino, L. 2002. Convergence of complex cognitive abilities in cetaceans and primates. *Brain, behavior and evolution*. 59:21–32.

Mischel, W. 2015. The Marshmallow Test: Why Self-Control Is the Engine of Success. Little, Brown.

Mischel, W., Y. Shoda, and M.I. Rodriguez. 1989. Delay of gratification in children. *Science*. 244:933–938.

Moroz, L.L., K.M. Kocot, M.R. Citarella, S. Dosung, T.P. Norekian, I.S. Povolotskaya, A.P. Grigorenko, C. Dailey, E. Berezikov, K.M. Buckley, A. Ptitsyn, D. Reshetov, K. Mukherjee, T.P. Moroz, Y. Bobkova, F. Yu, V.V. Kapitonov, J. Jurka, Y.V. Bobkov, J.J. Swore, D.O. Girardo, A. Fodor, F. Gusev, R. Sanford, R. Bruders, E. Kittler, C.E. Mills, J.P. Rast, R. Derelle, V.V. Solovyev, F.A. Kondrashov, B.J. Swalla, J.V. Sweedler, E.I. Rogaev, K.M. Halanych, and A.B. Kohn. 2014. The ctenophore genome and the evolutionary origins of neural systems. *Nature*. 510:109–114.

Nieder, A., L. Wagener, and P. Rinnert. 2020. A neural correlate of sensory consciousness in a corvid bird. *Science*. 369:1626–1629.

Nüchter, T., M. Benoit, U. Engel, S. Ozbek, and T.W. Holstein. 2006. Nanosecond-scale kinetics of nematocyst discharge. *Curr Biol*. 16:R316–318.

Olkowicz, S., M. Kocourek, R.K. Lucan, M. Portes, W.T. Fitch, S. Herculano-Houzel, and P. Nemec. 2016. Birds have primate-like numbers of neurons in the forebrain. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 113:7255–7260.

Pepperberg, I.M. 2006. Grey parrot numerical competence: a review. *Anim Cogn*. 9:377–391.

Pepperberg, I.M., A. Koepke, P. Livingston, M. Girard, and L.A. Hartsfield. 2013. Reasoning by inference: further studies on exclusion in grey parrots (Psittacus erithacus). *J Comp Psychol*. 127:272–281.

Plotnik, J.M., F.B. de Waal, and D. Reiss. 2006. Self-recognition in an Asian elephant. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 103:17053–17057.

Plotnik, J.M., R. Lair, W. Suphachoksahakun, and F.B. de Waal. 2011. Elephants know when they need a helping trunk in a cooperative task. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 108:5116–5121.

Puelles, L., M. Harrison, G. Paxinos, and C. Watson. 2013. A developmental ontology for the mammalian brain based on the prosomeric model. *Trends Neurosci.* 36:570–578.

Putnam, N.H., M. Srivastava, U. Hellsten, B. Dirks, J. Chapman, A. Salamov, A. Terry, H. Shapiro, E. Lindquist, V.V. Kapitonov, J. Jurka, G. Genikhovich, I.V. Grigoriev, S.M. Lucas, R.E. Steele, J.R. Finnerty, U. Technau, M.Q. Martindale, and D.S. Rokhsar. 2007. Sea anemone genome reveals ancestral eumetazoan gene repertoire and genomic organization. *Science*. 317:86–94.

Reichert, H. 2005. A tripartite organization of the urbilaterian brain: developmental genetic evidence from Drosophila. *Brain Res Bull*. 66:491–494.

Rentzsch, F., C. Juliano, and B. Galliot. 2019. Modern genomic tools reveal the structural and cellular diversity of cnidarian nervous systems. *Curr Opin Neurobiol*. 56:87–96.

Roth, G. 2015. Convergent evolution of complex brains and high intelligence. *Philos T R Soc B*. 370.

Roth, G., and U. Dicke. 2005. Evolution of the brain and intelligence. *Trends Cogn Sci*. 9:250–257.

Roth, G., and U. Dicke. 2012. Evolution of the brain and intelligence in primates. *Prog Brain Res.* 195:413–430.

Scally, A., J.Y. Dutheil, L.W. Hillier, G.E. Jordan, I. Goodhead, J. Herrero, A. Hobolth, T. Lappalainen, T. Mailund, T. Marques-Bonet, S. McCarthy, S.H. Montgomery, P.C. Schwalie, Y.A. Tang, M.C. Ward, Y. Xue, B. Yngvadottir, C. Alkan, L.N. Andersen, Q. Ayub, E.V. Ball, K. Beal, B.J. Bradley, Y. Chen, C.M. Clee, S. Fitzgerald, T.A. Graves, Y. Gu, P. Heath, A. Heger, E. Karakoc, A. Kolb-Kokocinski, G.K. Laird, G. Lunter, S. Meader, M. Mort, J.C. Mullikin, K. Munch, T.D. O'Connor, A.D. Phillips, J. Prado-Martinez, A.S. Rogers, S. Sajjadian, D. Schmidt, K. Shaw, J.T. Simpson, P.D. Stenson, D.J. Turner, L. Vigilant, A.J. Vilella, W. Whitener, B. Zhu,

D.N. Cooper, P. de Jong, E.T. Dermitzakis, E.E. Eichler, P. Flicek, N. Goldman, N.I. Mundy, Z. Ning, D.T. Odom, C.P. Ponting, M.A. Quail, O.A. Ryder, S.M. Searle, W.C. Warren, R.K. Wilson, M.H. Schierup, J. Rogers, C. Tyler-Smith, and R. Durbin. 2012. Insights into hominid evolution from the gorilla genome sequence. *Nature*. 483:169–175.

Schnell, A.K., P. Amodio, M. Boeckle, and N.S. Clayton. 2021a. How intelligent is a cephalopod? Lessons from comparative cognition. *Biol Rev Camb Philos Soc*. 96:162–178.

Schnell, A.K., M. Boeckle, M. Rivera, N.S. Clayton, and R.T. Hanlon. 2021b. Cuttlefish exert self-control in a delay of gratification task. *Proc Biol Sci*. 288:20203161.

Schnell, A.K., and N.S. Clayton. 2019. Cephalopod cognition. *Curr Biol*. 29:R726–R732.

Semendeferi, K., A. Lu, N. Schenker, and H. Damasio. 2002. Humans and great apes share a large frontal cortex. *Nat Neurosci.* 5:272–276.

Shomrat, T., I. Zarrella, G. Fiorito, and B. Hochner. 2008. The octopus vertical lobe modulates short-term learning rate and uses LTP to acquire long-term memory. *Curr Biol*. 18:337–342.

Sousa, A.M.M., K.A. Meyer, G. Santpere, F.O. Gulden, and N. Sestan. 2017. Evolution of the Human Nervous System Function, Structure, and Development. *Cell*. 170:226–247.

Stacho, M., C. Herold, N. Rook, H. Wagner, M. Axer, K. Amunts, and O. Güntürkün. 2020. A cortex-like canonical circuit in the avian forebrain. *Science*. 369.

Strausfeld, N.J., and F. Hirth. 2013. Deep homology of arthropod central complex and vertebrate basal ganglia. *Science*. 340:157–161.

Trembley, A. 1744. Mémoires pour servir à l'histoire d'un genre de polypes d'eau douce à bras en forme de cornes. J.& H. Verbeek, Leide.

Wanninger, A., and T. Wollesen. 2018. The evolution of molluscs. *Biol Rev Camb Philos Soc.*

Watanabe, H., T. Fujisawa, and T.W. Holstein. 2009. Cnidarians and the evolutionary origin of the nervous system. *Dev Growth Differ.* 51:167–183.

Wehner, R., and R. Menzel. 1969. Homing in the ant Cataglyphis bicolor. *Science*. 164:192–194.

Young, J.Z., J.Z. Young, and B.B. Boycott. 1971. The Anatomy of the Nervous System of Octopus Vulgaris. Clarendon Press.

Über den Autor

Thomas W. Holstein hat nach dem Studium der Biologie an der Universität Wien (Dr. phil.) und seiner Assistenzzeit in Zürich und München 1991 an der Universität München habilitiert (Dr. rer.nat. habil.). Er hatte Professuren an der Universität Frankfurt (1993–1998) und der Technischen Universität Darmstadt (1998–2004), bevor er 2004 an die Universität Heidelberg kam, wo er seitdem lehrt und forscht. Er hatte Rufe an die Universitäten Karlsruhe und Wien und war u. a. Fellow am Heidelberger Marsilius-Kolleg (2011–2014), Präsident der Heidelberger Akademie der Wissenschaften (2015–2020) und Sprecher des SFB 1324 der DFG (2017–2021). Sein Arbeitsgebiet ist die molekulare Zell- und Entwicklungsbiologie mit einem Fokus auf evolutionsbiologischen Fragen. Mit seiner Arbeitsgruppe arbeitet er zu den Stammzellen und dem Nervensystem des Süßwasserpolypen *Hydra* und der Seeanemone *Nematostella*.

Korrespondenzadresse:
Prof. Dr. Thomas W. Holstein
Centre for Organismal Studies
Universität Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 230
69120 Heidelberg

E-Mail: holstein@uni-heidelberg.de
Homepage:
https://www.cos.uni-heidelberg.de/index.php/t.holstein?l=#

Wenn die Intelligenz beeinträchtigt ist

GUDRUN A. RAPPOLD

Institut für Humangenetik, Universität Heidelberg

Zusammenfassung

Das vergangene Jahrzehnt zeichnete sich durch eine Fülle von Entdeckungen aus, die zur Aufklärung und zum Verständnis von Neuroentwicklungsstörungen führten, darunter geistige Retardierung und Autismus-Spektrum-Störung. Diese Erfolge waren durch methodische Weiterentwicklungen in der Array-Diagnostik und durch Next-Generation-Sequenzierung möglich geworden. Über die Hälfte aller Neuroentwicklungsstörungen konnte dadurch ursächlich aufgeklärt werden. Eine Früherkennung dieser tiefgreifenden Entwicklungsstörungen in den frühen Stadien der Gehirnentwicklung ist von großer Bedeutung, um wirksame Behandlungsschritte einzuleiten. Ein vertieftes Verständnis der neurobiologischen Prozesse der identifizierten Gene und ihrer Stoffwechselwege ist auch notwendig, um die Entwicklung und Funktion der neuronalen Netzwerke und Verschaltungen besser zu verstehen.

1 David und das FOXP1-Syndrom

Die erste Nachricht kam per E-Mail. Ein Wissenschaftler-Ehepaar aus den Vereinigten Staaten berichtete über seinen Sohn David (Name geändert), bei dem gerade die Diagnose FOXP1-Syndrom gestellt wurde – eine Mutation c.1240delC in dem FOXP1-Gen auf Chromosom 3p14.1 des Jungen. Chromosom 3p14.1 und chr3:g.71027087delG, das sind Ortungsdaten, mit deren Hilfe sich Humangenetiker auf den Erbanlagen von Menschen zurechtfinden. Ein Verlust einer einzigen Base innerhalb des FOXP1-Gens war offensichtlich für die Erkrankung des Jungen verantwortlich. Diese kleine Veränderung an genau dieser Stelle des Genoms

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24384

musste *de novo* entstanden sein, da sie bei beiden Elternteilen und einer gesunden Schwester nicht nachgewiesen wurde. Mit dieser Information endete eine lange diagnostische Odyssee, in deren Verlauf die Eltern versucht hatten, etwas über die Ursachen der Krankheit ihres Kindes in Erfahrung zu bringen. Für die Familie war die Diagnose eine Erlösung. Hiermit war für die Eltern klar, dass sie nichts falsch gemacht hatten und alles, was bisher geschehen war, fand nun eine Erklärung.

Die Familie plante eine Europa-Reise und hatte über Google und PubMed alle Informationen, die sie finden konnte, gelesen. Sie wollte weitere Informationen über dieses Autismus-Syndrom mit geistiger Behinderung bekommen, welches wir im Jahre 2010 zum ersten Mal beschrieben hatten (Horn et al., 2010; Hamdan et al., 2010). Ich lud die ganze Familie und einen Mitarbeiter zu mir nach Hause ein. „Das ist David" – die Eingangstüre war gerade erst geöffnet, als David ohne Blickkontakt hereinstürmte, seine Eltern und Schwester überholte und im nächstliegenden Zimmer verschwand, um es zu inspizieren. Sein Vater entschuldigte sich wegen dieser überstürzten Ankunft und fragte nach, ob es möglich sei, alle Räume des Hauses vom Keller bis zum Dach mit David zusammen anzusehen, damit er Sicherheit darüber bekäme, dass sich niemand sonst im Haus verberge, der ihm gefährlich werden könnte. Dies würde David sehr helfen, zur Ruhe zu kommen. Und so war es auch. Wir konnten an einem Tisch Platz nehmen und uns beim Teetrinken unterhalten. Für David war ein Stillsitzen allerdings immer nur für einige wenige Minuten möglich. David zeigte – wie viele der anderen Kinder mit einem FOXP1-Syndrom – mehrere der bekannten Autismussymptome: Angst vor anderen Menschen, Unfähigkeit zur Konzentration, innere Unruhe und Hyperaktivität und sehr beschränkte Kommunikations- und Ausdrucksfähigkeit aufgrund seiner geistigen Behinderung. Schwierigkeiten beim Aufbau persönlicher Beziehungen und stereotype Bewegungsabläufe erwecken zudem oft den Anschein, als lebte er in einer ganz eigenen Welt.

„David war schon immer ganz anders als seine Schwester. Das war schon ganz früh zu bemerken"; so die Aussage seiner Mutter. Alle Versuche, Blickkontakt zu ihrem kleinen Sohn aufzunehmen, scheiterten. Verzögert auch die ersten Entwicklungsschritte. Sehr spät begann er zu sprechen, und dann auch nur einzelne Worte. Auch die Ärzte waren zunächst ratlos. Viele Fachärzte wurden konsultiert. Eine erste Untersuchung der Chromosomen erbrachte kein Ergebnis. Schließlich führte eine Sequenzierung des Exoms zu einem eindeutigen Ergebnis. Bei einer Exom-Sequenzierung werden genau die 1,5 Prozent der genetischen Erbinforma-

tionen abgefragt, in denen die Anlage für die proteinkodierenden Bereiche steckt. Eine Deletion einer einzelnen Base an der Stelle c.1240 des FOXP1-Gens führte bei David zu einem Stopp innerhalb des Gens und zu einem Kettenabbruch an Position 414. Ein kleiner Fehler mit großer Wirkung. Gerade erst war bekannt geworden, dass Fehler im Bauplan für das FOXP1 Protein bei Autismus und geistiger Behinderung eine Rolle spielen. Doch welche Funktion übernimmt es im gesunden Gehirn, in welche Signalwege ist es eingebunden, und welche Schäden verursacht sein Fehlen genau? Wie wir nun wissen, ist ein intaktes FOXP1-Gen notwendig, um die richtigen neuronalen Verknüpfungen zur richtigen Zeit in der Entwicklung des Gehirns zu gewährleisten. Zum Zeitpunkt der Diagnose war David bereits 4 Jahre alt. Als Davids Gehirn getestet wurde, lag der ermittelte Wert bei einer leichten geistigen Behinderung. Sein Verhalten wurde dem autistischen Formenkreis zugeordnet.

2 Autismus-Spektrum-Störung

Autismus ist eine angeborene Störung der Wahrnehmungs- und Informationsverarbeitung im Gehirn, die sehr unterschiedlich ausgeprägt sein kann. Sie geht einher mit häufig verminderter, doch selten auch mit überdurchschnittlicher Intelligenz. Man spricht deshalb auch von einer Autismus-Spektrum-Störung. Diese Bezeichnung hat sich mittlerweile durchgesetzt, da sie beschreibt, dass ein ganzer Spektrumbogen von Phänotypen unter dieser Bezeichnung subsumiert werden kann. Man spricht auch von niedrigfunktionalem und hochfunktionalem Autismus. Der hochfunktionale Autismus zeichnet sich durch eine signifikant verzögerte Sprachentwicklung vor dem 3. Lebensjahr aus und unterscheidet sich damit vom Asperger-Syndrom, bei dem eine Sprachentwicklungsstörung nicht vorliegt. Autismus und das Savant Syndrom mit seinen Inselbegabungen sind seit dem Film „Rain Man“ einem breiteren Kinopublikum bekannt: Dustin Hofmann in der Hauptrolle spielt einen Menschen, der nicht nur in seiner eigenen Welt lebt, sondern auch spektakuläre Begabungen besitzt und sich zum Beispiel nach nur einmaligem Lesen ein ganzes Telefonbuch merken kann. Auch Greta Thunberg, die Klimaaktivistin, sprach schon offen über ihr Asperger-Syndrom (https://www.watson.de/leben/gretathunberg). Diese überdurchschnittlich intelligenten, oft technisch versierten, aber sozial in sich gekehrten Menschen zeigen auf, dass es sich bei dem hochfunktionalen Asperger-Syndrom sowohl um eine

Gabe, als auch um ein Defizit handeln kann. Allerdings muss gesagt werden, dass Menschen mit einem Asperger-Syndrom nur einen kleinen Prozentsatz unter den Autisten ausmachen und die weitaus meisten Menschen mit einer Autismus-Spektrum-Störung eine geistige Behinderung aufweisen. Autismus-Spektrum-Störung assoziiert mit geistiger Behinderung, das ist also eher die Regel.

3 Intelligenzquotient, Minderbegabung und geistige Behinderung

Menschen mit einer Intelligenzminderung, sei es nun in Verbindung mit autistischen Merkmalen oder nicht, machen einen großen Anteil der Rat suchenden Familien in einer Genetischen Poliklinik aus. Neben den genetischen Ursachen, die zunehmend über Sequenzierung der Exome oder Genome der betroffenen Menschen aufgeklärt werden, können auch externe Faktoren, wie zum Beispiel Teratogene oder Alkoholmissbrauch während der Schwangerschaft zu einer geistigen Behinderung führen. Intelligenz wird über den Intelligenzquotienten (IQ) gemessen, der einer normalen Verteilung folgt und dessen Mitte mit 100 definiert wird. Ungefähr drei Prozent aller Menschen weisen eine geistige Behinderung auf. Zwei bis drei Prozent der Bevölkerung haben einen IQ, der zwischen 50 und 70 liegt und somit als mild retardiert eingestuft wird. In Forrest Gump, einer amerikanischen Literaturverfilmung mit Tom Hanks in der Hauptrolle, wird eine leichte geistige Behinderung unnachahmlich illustriert mit dem wunderbaren Satz des Hauptdarstellers „Life is like a box of chocolates; you never know what you are going to get." Bei circa 0,5 bis 1 Prozent der Bevölkerung hingegen liegt eine Intelligenzminderung vor, die moderat (IQ 35–49) oder schwer (IQ 20–34) bis zu schwerwiegend (IQ unter 20) ist und wo dann ganz andere Maßstäbe gelten.

Es gibt viele unterschiedliche genetische Formen der Intelligenzminderung, die oft in Syndromen zusammengefasst oder anderweitig klassifiziert werden. Die häufigsten Syndrome, die mit einer geistigen Behinderung einhergehen, sind das Down-Syndrom (Trisomie 21) und das Fragile-X Syndrom. In beiden Fällen wurden die Defekte bereits auf Chromosomenebene sichtbar und deshalb bereits vor allen anderen Syndromen identifiziert. Monogenetische Erkrankungsformen, bei denen nur ein bestimmtes Gen betroffen ist, sind sehr viel später aufgeklärt worden. Mehrere tausend unterschiedliche Gene sind in den letzten 30 Jahren bekannt geworden. Einen dramatischen Anstieg der Entdeckungen gab es innerhalb der letzten zehn Jahre aufgrund des Next-Generation-Sequencing (Rauch et

al., 2012). Eine extreme genetische Heterogenität wurde dabei festgestellt. Diese genetische Heterogenität eines vermeintlich ähnlichen Krankheitsbildes hat viele überrascht. Humangenetiker haben es daher mit einer äußerst vielgestaltigen Gruppe von Erkrankungen zu tun. Diese Gene, die meist in den cortikalen, striatalen und hippokampalen Neuronen des Gehirns exprimiert werden, weisen ganz unterschiedliche Funktionen in der synaptischen Plastizität, transkriptionellen Regulation und bei dem Chromatin Remodelling auf. Wenn man dann weiterhin davon ausgeht, dass weit über die Hälfte aller 20.000 menschlichen Gene im Gehirn exprimiert werden, also dort gebraucht werden, ist es durchaus denkbar, dass auch Fehlfunktionen dieser Gene im Gehirn zu einer Retardierung führen könnten. Wenngleich auch die bekannten und häufigen Syndrome mittlerweile gut beschrieben sind, so ist ein Ende der genetischen Aufklärung der verschiedenen Formen von Intelligenzminderung damit noch lange nicht in Sicht.

Mikrodeletions- und Mikroduplikationssyndrome, bei denen mehrere Gene zu viel oder zu wenig vorhanden sind, konnten bereits schon relativ früh bei Menschen mit einer geistigen Behinderung nachgewiesen werden. Es mag ungewöhnlich klingen, aber sowohl Deletionen und Duplikationen eines bestimmten Chromosomenbereiches können in manchen Fällen zu einem sehr ähnlichen Phänotyp führen. Man erklärt sich das so, dass für bestimmte Gene, die für geistige Prozesse notwendig sind, chromosomale Imbalancen besonders starke Auswirkungen besitzen, d. h. wenn entweder zu viel oder zu wenig Protein vorhanden ist. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von neuronaler Homöostase.

Auch war es überraschend zu sehen, wie in anderen Fällen unterschiedliche Mutationen im selben Gen zu ganz unterschiedlichen Erscheinungsbildern und Ausprägungsformen führen können. Das phänotypische Spektrum eines einzelnen Gens stellte sich viel breiter dar als man dies erwartet hatte. Auch hier gibt es keinen allgemeingültigen Mechanismus oder eine allgemeingültige Regel. Wie in der gesamten belebten Natur steht auch in der Genetik eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Verfügung. Auch hier müssen Lehrbücher den neuen Erkenntnissen angeglichen und teilweise revidiert werden.

4 Höheres Erkrankungsrisiko bei Jungen

Von der Entwicklungsstörung Autismus sind rund ein bis drei Prozent der Kinder betroffen – Jungen viermal häufiger als Mädchen. Bei dem Asperger-Autismus ist

sogar nur jede zehnte Person weiblich (Baron-Cohen et al., 2005). Warum aber ist das männliche Geschlecht so viel anfälliger für diese Erkrankung? Untersuchungen an menschlichen Zellen und den Gehirnen von Mäusen haben gezeigt, dass das männliche Geschlechtshormon Testosteron in der Zeit vor und nach der Geburt bestimmte „Risikogene" im Gehirn aktiviert oder hemmt (Stone et al., 2004). Ein geschlechtsspezifischer Hormoneinfluss auf bestimmte Gene scheint also dieser ungleichen Verteilung der Entwicklungsstörung zugrunde zu liegen. Da Jungen mehr Testosteron produzieren als Mädchen, führen diese Gendefekte bei ihnen häufiger zu einer Störung im Autismusspektrum.

Auch bei Menschen mit einer geistigen Behinderung sind Jungen weitaus häufiger betroffen. Eine der Ursachen liegt darin, dass die X-chromosomal gekoppelte geistige Behinderung ungefähr 10–20% aller Fälle ausmacht. Das erste Gen, das auf dem X-Chromosom in diesem Zusammenhang identifiziert wurde, war das FMR-Gen, das zu dem Fragilen X-Syndrom führt. Bei dem Fragilen X-Syndrom handelt es sich um die häufigste geistige Behinderung überhaupt, die durch den Defekt eines einzelnen Gens ausgelöst werden. Hier sind ausschließlich Jungen schwer betroffen, denn bei Mädchen kann das zweite X-Chromosom einen Ausgleich schaffen. Mädchen und Frauen haben hier also einen klaren Vorteil.

5 Das Lebensalter zählt

Das erstmalige Auftreten einer geistigen Behinderung in einer Familie ist bei älteren Paaren ab 40 Jahren doppelt so hoch im Vergleich zu jüngeren Paaren. Ein fortgeschrittenes Alter von Paaren mit Kinderwunsch spielt damit eine nicht zu vernachlässigende Rolle. In Familien mit einem an Trisomie 21 erkrankten Kind beispielsweise ist der maternale Alterseffekt schon seit langem bekannt. Aber auch Väter sind an einem erhöhten Risiko aufgrund eines erhöhten Lebensalters wesentlich beteiligt. Ein Großteil des erhöhten Risikos entsteht nämlich aufgrund von Mutationen während der Spermatogenese (D'Onofrio et al., 2014). Auch bei Autismus-Spektrum-Erkrankungen ist dieser Alterseffekt bekannt: Kinder von Vätern über 45 Jahren haben eine ungefähr drei Mal höhere Wahrscheinlichkeit, an Autismus zu erkranken, als Kinder von Vätern unter 25 Jahren.

6 Bauch- und Kopfhirn arbeiten zusammen

Das Gehirn und der Darm – die beiden größten Nervenansammlungen im menschlichen Körper – sind über das Rückenmark und den Vagusnerv eng miteinander verbunden. Genveränderungen bei Autismus und geistiger Retardierung können auch für Störungen des Magen-Darm-Traktes verantwortlich sein (Niesler and Rappold, 2021). Viele der Gene, die mit Autismus in Verbindung stehen, sind sowohl im Gehirn als auch im Verdauungstrakt aktiv.

Die 100 Millionen Nervenzellen, die unseren Verdauungstrakt umgeben, gelten als eine Art „zweites Gehirn“. Dieses sogenannte Bauchgehirn kommuniziert mit dem Kopfgehirn und lässt uns die richtigen Entscheidungen „aus dem Bauch heraus“ treffen. Dieses „zweite Gehirn“, so haben Neurowissenschaftler herausgefunden, setzt sich aus teilweise den gleichen Zelltypen zusammen. Eine Verbindung von psychischen Prozessen wie dem Verhalten und dem Verdauungssystem mit seinem Bauchhirn sind vermutlich weitaus enger gekoppelt als bisher angenommen (Rao and Gershon, 2016). Erkrankungen des Magen-Darm-Traktes oder Verdauungsprobleme treten nämlich bei Menschen mit einer geistigen Retardierung und Autismus-Spektrum-Störung überdurchschnittlich häufig auf. Systematisch erfasst wurden diese Beschwerden allerdings bislang noch nicht. Eine Schwierigkeit besteht auch darin, dass sich Betroffene durch die meist eingeschränkten kommunikativen und intellektuellen Fähigkeiten nur schwer mitteilen können, wenn z. B. Verdauungsprobleme Beschwerden verursachen.

Bei dem FOXP1-Syndrom, das zu den häufigeren Autismus-Erkrankungen zählt, ist schon recht gut belegt, dass bei vielen der Erkrankten Schluckbeschwerden und Magen-Darm-Probleme bestehen (Fröhlich et al., 2019). Mit einer angepassten Ernährung sowie medikamentösen Behandlung kann nun der eingeschränkten Speiseröhren- und Darmfunktionalität, die bei dem FOXP1-Syndrom beobachtet wurde, begegnet werden. Vor allem ist jetzt klar, dass die Magen-Darm-Problematik nicht nur – wie bisher häufig angenommen – von den Medikamenten, die Betroffene einnehmen müssen, oder ihrem abweichenden Essverhalten hervorgerufen wird, sondern aufgrund der Fehlfunktion des FOXP1-Gens selbst.

7 FOXP1 und sein nahe verwandtes „Sprachentwicklungsgen“ FOXP2

Das Gen FOXP1 enthält den Bauplan eines Proteins, welches das An- und Ausschalten vieler anderer Gene steuert, um auf diese Weise neuronale Verbindungen auszubilden. Einige davon, die bereits während der Entwicklung des Gehirns notwendig sind, werden auch in anderen Bereichen, wie dem enterischen Nervensystem und den Muskelzellen durch FOXP1 reguliert. Im Striatum, der Gehirnregion, welche maßgeblich an der Sprachentwicklung beteiligt ist tritt FOXP1 meist interagierend zusammen mit dem FOXP2 Protein auf, um andere Gene zu steuern. Man nennt sie deshalb auch Transkriptionsfaktoren. FOXP2 wurde als erstes Gen identifiziert, das durch eine Mutation eine ganz spezifische Sprachstörung verursacht (Lai et al., 2001). Für Sprachforscher stellte dies eine Sensation dar: eine Mutation in einem einzigen Gen, welches in einer großen Familie mit dem Namen KE weitergegeben wurde. Allerdings liegen bei den weitaus meisten Familien mit einer genetisch bedingten Sprachstörung sehr viel komplexere Formen der Vererbung vor. Die Familie KE war daher ein Glücksfall in der wissenschaftlichen Forschung. Die ursprüngliche Hypothese, dass es sich bei FOXP2 um das Gen handeln könnte, das evolutionär für die Ausbildung menschlicher Sprache, also die feinmotorischen Kompetenzen im Kehlkopf notwendig ist, konnte jedoch in dieser Exklusivität nicht gehalten werden. Man kann aber festhalten, dass beide Gene, FOXP1 und FOXP2 etwas mit Sprache zu tun haben, wobei die Auswirkungen der Fehlfunktion von FOXP1 weit über die Sprache hinausgehen und viele andere Entwicklungsprozesse im Gehirn und anderen Geweben des Körpers mitbeeinflussen.

8 Intelligenz und geistige Behinderung – Zwei Seiten einer Medaille?

Zwillingsstudien haben schon seit langem darauf hingewiesen, dass Gene eine wichtige Rolle bei der Intelligenz spielen. „Nature or nurture“, das war die große Frage und damit verbunden, in welchem Verhältnis beide zu einander stehen. Eine einfache Erklärung ist hier sicher nicht möglich, da es sich eher um den dynamischen Mix beider Einflüsse handelt. Bei der Erforschung geistiger Behinderung stehen auch weitere Fragen im Raum: Könnte es sein, dass in den Genbereichen, in welchen die zu einer geistigen Behinderung führenden Genvarianten vorkommen, auch andere Varianten möglich sind, die zu besonderen Intelligenzleistungen

führen? Sind Intelligenz und geistige Behinderung vielleicht das Ergebnis feiner Unterschiede in denselben Erbanlagen, also die zwei Seiten einer Medaille? Dass es nicht so einfach ist, zeigen die Daten: Bei Intelligenz handelt es sich um ein polygenes Merkmal, bei dem wahrscheinlich Hunderte oder Tausende von Genen beteiligt sind (Goriounova and Mansvelder, 2019). Bei einer ersten genetischen DNA-Analyse von fast 80.000 Menschen und einem Vergleich zu ihren IQ-Werten kristallisierten sich zunächst 52 Gene heraus, deren Biologie mit Intelligenz assoziiert war. Ihr Einfluss war jedoch klein: zusammen nur weniger als 5% in den IQ-Werten. Weitere Genomweite Assoziationsstudien (GWAS) Studien an einer noch größeren Zahl von Menschen haben dann viele weitere Varianten in nichtkodierenden Bereichen in der Nähe von den Genen identifiziert, die eine Rolle in den regulatorische Prozessen der Neuroentwicklung spielen. Mindestens tausend weitere Gene konnten damit bestimmt werden, die mit Intelligenz assoziiert sind (Savage et al., 2021).

Dies steht ganz im Gegensatz zu den Erkrankungen, bei denen eine einzige Mutation eine Erkrankung auslösen kann. Man geht also bei der Intelligenz von einer polygenen, multifaktoriellen Vererbung aus, während viele der Mutationen, die eine geistige Behinderung auslösen, monogener Natur sind und also nur ein bestimmtes Gen betreffen. Folglich gibt es auch DAS Intelligenzgen nicht, sondern viele über das Genom verteilte Genvariationen sind an der Intelligenz beteiligt, welche ihre Wirkung nur unter bestimmten Umweltbedingungen entfalten können. Komplizierte ethische Bedenken, wie diese Information genutzt werden könnte (Stichwort Designer-Babys mit besonders hohem IQ) können schon deshalb in den Bereich der Fiktion verlagert werden.

9 Die Plastizität des Gehirns

Eines der größten Errungenschaften unseres Gehirns ist seine Anpassung an sich ändernde Lebensbedingungen: die Plastizität des Gehirns. So fanden Wissenschaftler beispielsweise bei Taxifahrern in London heraus, dass in der grauen Substanz des posterioren Hippocampus ein Gehirnbereich vorhanden ist, der aufgrund ihres räumlichen Gedächtnisses dank ihres Navigierens durch die vielen Straßenzüge der Stadt besonders ausgebildet war (Maguire et al., 2000). Eine schwedische Studie fand heraus, dass beim Lernen einer neuen Sprache sich genau die Gehirnbereiche entwickeln, die für die Sprachentwicklung verantwortlich sind.

Fortwährendes Training und eine stimulierende, fördernde Umgebung hilft also dem Gedächtnis und kann damit Lernerfolge herstellen und sogar die Architektur des Gehirns verändern. Auch bei vielen Menschen mit einer geistigen Behinderung und Autismus ist ein Lernerfolg möglich, wenn damit frühzeitig begonnen wird. Aus diesem Grund sind diagnostische Früherkennung und nachfolgende Förderungsprogramme so wichtig.

10 Tiermodelle als wichtige Zwischenschritte zum Verständnis

Anhand von Tiermodellen kann nachvollzogen werden, welche Defizite das Fehlen eines bestimmten Gens im sich entwickelnden Gehirn zur Folge hat. Mithilfe von Tiermodellen können auch therapeutische Optionen getestet werden. Kommen wir zurück zum FOXP1-Syndrom: Die Proteinversion der Maus und die des Menschen sind sich sehr ähnlich. Mäuse mit einem Komplettverlust des FOXP1-Gens im Nervensystem, kommen zunächst mit einem weitgehend normal entwickelten Gehirn zur Welt. Im Verlauf der ersten Lebenswoche verändert sich das für Wahrnehmung und Verhalten wichtige Striatum des Gehirns (Bacon et al., 2015). Auch in einer zentral gelegenen Hirnstruktur, dem Hippocampus, unverzichtbar für die Ausbildung von Langzeitgedächtnis und Erinnerung, treten Veränderungen auf, die Auswirkungen auf die Signalverarbeitung haben. Es konnte gezeigt werden, dass sich in den betroffenen Nervenzellen die Verästelung der Neuriten und die sogenannte Erregungsleitung, durch welche Signale zwischen Nervenzellen weitergegeben werden, verändert (Bacon et al., 2015). Zusätzlich zum degenerierten Striatum sind bei den Mäusen benachbarte Hirnstrukturen, die Ventrikel, vergrößert. Vergrößerte Ventrikel ließen sich auch bei Menschen mit einer FOXP1-Mutation nachweisen. Zudem lösen die Veränderungen Verhaltensauffälligkeiten aus, die mit den Symptomen bei autistischen Patienten vergleichbar sind: Die Mäuse nehmen kaum Notiz von ihren Artgenossen und versuchen auch nicht, mit diesen in Kontakt zu treten. Dazu kommen stereotype, repetitive Verhaltensweisen, verminderte Lernfähigkeit und Hyperaktivität. Auch die Lautkommunikation der FOXP1-Mäuse (Mäuse verständigen sich über Laute im Ultraschallbereich) zeigte sich beeinträchtigt und wies Parallelen zu den Störungen bei Patienten mit FOXP1-Mutation auf (Fröhlich et al., 2017). So ergeben sich wichtige Einblicke in das Verhalten und die neuronalen Netzwerke. Aufgrund dieser beobachteten

Ähnlichkeiten können nun therapeutische Ansätze ausgetestet werden, bevor man klinische Studien mit Patienten in Erwägung zieht.

11 Lebensperspektiven

Kinder mit einer geistigen Behinderung und/oder Autismus-Spektrum-Störung bestimmen den Alltag einer Familie und das meist bei Tag und Nacht. Ein unruhiger Schlaf in der Nacht kann nur eine der vielen Belastungen für eine Familie sein. Auf Sinnesreize reagieren diese Kinder meist besonders empfindlich, während das Schmerzempfinden reduziert sein kann. Beide Phänomene sind nicht einfach zu ertragen. Doch auch viele Kinder mit einer geistigen Behinderung, insbesondere diejenigen mit einer leichten und moderaten Beeinträchtigung, können vieles lernen, benötigen hierfür nur mehr Zeit und es bedarf größerer Anstrengungen für sie als für andere Kinder. Hier sind die Strategie der kleinen Schritte, kurze Lerneinheiten, visuelles Lernen, Musik und Sport von besonderer Bedeutung. Deshalb können gesicherte Diagnosen auch aufzeigen, in welchen Bereichen therapeutische Unterstützung besonders sinnvoll ist. Mithilfe der Diagnosen können den Familien unterstützende Maßnahmen und Hilfen angeboten werden. Die Ursache einer Krankheit zu kennen, erleichtert auch das Vorgehen bei ganz praktischen Dingen, wie zum Beispiel den Verhandlungen mit den Krankenkassen. Und nicht zuletzt, Familien mit einem ähnlichen Schicksal können sich in Selbsthilfegruppen gegenseitig wichtige praktische wie seelische Unterstützung geben.

Großes Glück haben Kinder, deren Eltern sich für ihre Bedürfnisse nach Förderung einsetzen und die richtigen Schulen oder Werkstätten für behinderte Menschen finden. David hat das Glück, ein Elternhaus zu haben, das alles Menschenmögliche für seine Förderung unternimmt. Er geht auf eine Förderschule für lernbehinderte Kinder und hat dort, nach Aussage seiner Eltern, schon große Fortschritte gemacht. Doch ein ganz normales, selbstbestimmtes Leben wird er vermutlich nie führen können. Auch jetzt noch spricht er nur halbe Sätze und ist für Außenstehende schwer zu verstehen. Er hat jedoch ein gutes Gedächtnis, ist liebenswert und gibt sich große Mühe, wie auch die anderen Kinder mit einem FOXP1-Syndrom, seine Einschränkungen zu überwinden. Sein berufliches Ziel jedenfalls hat er schon klar gesteckt: Fahrer eines Feuerwehrautos.

Referenzen

Bacon, C., Schneider, M., Le Magueresse, C., Froehlich, H., Sticht, C., Gluch, C., Tucker, P., Monyer, H., Rappold, G.: Brain-specific Foxp1 deletion impairs neuronal development and causes autistic-like behaviour. Mol Psychiat. 20(5) 632–9, 2015.

Baron-Cohen S., Knickmeyer R.C., Belmonte M.K. Sex differences in the brain: implications for explaining autism. Science 310(5749):819–23, 2005.

D'Onofrio B.M., Rickert M.E., Frans E., Kuja-Halkola R., Almqvist C., Sjölander A., Larsson H., Lichtenstein P. Paternal age at childbearing and offspring psychiatric and academic morbidity. JAMA Psychiatry. Apr;71(4):432–8, 2014.

Fröhlich H., Rafiullah R., Schmitt N., Abele S. and Rappold G.A.: Foxp1 expression is essential for sex-specific murine neonatal ultrasonic vocalization. Hum Mol Genet. 26(8): 1511–21, 2017.

Fröhlich H., Kollmeyer M.L., Linz V.C., Stuhlinger M., Groneberg D., Reigl A., Zizer E., Friebe A., Niesler B., Rappold G.A.: Gastrointestinal dysfunction in autism displayed by altered motility and achalasia in Foxp1+/- mice. PNAS 116(44): 22237–45, 2019.

Goriounova N.A., Mansvelder H.D.: Genes, Cells and Brain Areas of Intelligence. Front Hum Neurosci. 13:44. 2019.

Hamdan, F.F., Daoud, H., Rochefort, D., Piton, A., Gauthier, J., Langlois, M., Foomani, G., Dobrzeniecka, S., Krebs, M.O., Joober, R., Lafrenière, R.G., Lacaille, J.C., Mottron, L., Drapeau, P., Beauchamp, M.H., Phillips, M.S., Fombonne, E., Rouleau, G.A., Michaud, J.L. De novo mutations in FOXP1 in cases with intellectual disability, autism, and language impairment. Am J Hum Genet. 87(5):671–8, 2010.

Horn, D., Kapeller, J., Rivera-Brugués, N. R., Moog, U., Lorenz-Depiereux, B., Eck, S., Hempel, M., Wagenstaller, J., Gawthorpe, A., Monaco, A. P., Bonin, M., Riess, O., Wohlleber, E., Illig, T., Bezzina, C.R., Franke, A., Spranger, S., Villavicencio-Lorini, P., Seifert, W., Rosenfeld, J., Klopocki, E., Rappold, G.A.*, Strom, T. A.* (* equal contribution): Indentification of FOXP1 deletions in three unrelated patients with mental retardation and significant speech and language deficits. Hum Mutat. 31(11): E1851–60, 2010.

https://www.watson.de/leben/gretathunberg/846867677: Greta-Thunberg und das Asperger-Syndrom: https://de.wikipedia.org/wiki/Greta_Thunberg

Lai C.S, Fisher S.E., Hurst J.A., Vargha-Khadem F., Monaco A.P.: A forkhead-domain gene is mutated in a severe speech and language disorder. Nature 413(6855):519–23, 2001.

Maguire, E.A., Gadian, D.G., Johnsrude, I.S., Good, C.D., Ashburne, J., Frackowiak, R.S.J., and Frith, C.: Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers. PNAS 297(8)4398–4403, 2011.

Niesler B., Rappold G.A.: Emerging evidence for gene mutations driving both brain and gut dysfunction in autism spectrum disorder. Mol Psychiat.: doi: 10.1038/s41380-020-0778-5, 2020.

Rauch, A., Wieczorek, D., Graf, E., Wieland, T., Endele, S., Schwarzmayr, T., Albrecht, B., Bartholdi, D., Beygo, J., Di Donato, N., Dufke, A., Hempel, M., Horn, D., Hoyer, J., Joset, T., Röpke, A., Moog, U., Riess, A., Thiel, C.T., Tzschach, A., Wiesener, A., Wohlleber, E., Zweier, C., Ekici, A.B., Zink, A.M., Rump, A., Meisinger, C., Grallert, H., Sticht, H., Schenck, A., Engels, H., Rappold, G., Schröck, E., Wieacker, P., Riess, O., Meitinger, T., Reis, A., Strom, T. M.: Range of genetic mutations associated with severe non-syndromic sporadic intellectual disability: an exome sequencing study. Lancet 380(9854): 1674–82, 2012.

Rao M., Gershon M.D.: The bowel and beyond: the enteric nervous system in neurological disorders. Nat Rev Gastroenterol Hepatol. 13(9): 517–528, 2016.

Savage J.E., Jansen P.R., Stringer S., Watanabe K., Bryois J., de Leeuw C.A., Nagel M., et al. Genome-wide association meta-analysis in 269,867 individuals identifies new genetic and functional links to intelligence. Nat Genet. 50(7):912–919, 2018.

Stone J.L., Merriman, B., Cantor R.M., Yonan A.L., Conrad Gilliam, T., Geschwind D.H., Nelson, S.F.: Evidence for sex-specific risk alleles in autism spectrum disorder. Am J Hum Genet: Dec;75(6):1117–23, 2004

Über die Autorin

Gudrun A. Rappold ist Ordinaria für Humangenetik an der Universität Heidelberg, wo sie seit 2003 die Abteilung Molekulare Humangenetik leitet. Nach dem Studium der Biologie, Chemie und Physik an der Universität Stanford, Heidelberg und Konstanz, arbeitete sie als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am MRC Mammalian Genome Unit in Edinburgh, Schottland; European Molecular Biology Lab (EMBL), Heidelberg und Imperial Cancer Research Fund in London, England. Ihre Arbeitsschwerpunkte liegen auf den molekularen Grundlagen genetischer Erkrankungen, vor allem Neuroentwicklungsstörungen und endokrinologischen Erkrankungen, wobei u. a. Tiermodelle, iPSCs sowie Genom-Editierung zum Einsatz kommen. Sie und ihre Arbeitsgruppe haben über 30 neue Gene identifiziert, welche Entwicklungsstörungen zugrunde liegen. Sie ist Gutachterin und Wissenschaftliche Beirätin bei nationalen und internationalen Organisationen und Gerichten, Patentinhaberin und Beraterin für die Biomedizinische Industrie, und arbeitet in Stiftungen und als Editorial Board Member wissenschaftlicher Zeitschriften. Sie ist Autorin von mehr als 300 Originalarbeiten, Reviews und Buchkapiteln und eines Buches im Fachbereich der Genetik, sowie Empfängerin mehrerer Auszeichnungen

Korrespondenzadresse:
Prof. Dr. Gudrun A. Rappold
Abteilung Molekulare Humangenetik, Institut für Humangenetik
Universität Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 366
69120 Heidelberg

E-Mail: Gudrun.Rappold@med.uni-heidelberg.de
Homepage: https://www.klinikum.uni-heidelberg.de/personen/prof-dr-rer-nat-gudrun-rappold-3324

Sektion 2:
Psychologie der Intelligenz

Intelligenz: Die psychologische Sicht

JOACHIM FUNKE[1]

Psychologisches Institut, Universität Heidelberg

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird ein kleiner Ausschnitt der psychologischen Forschung zum Thema „Menschliche Intelligenz“ dargestellt. Intelligenz ist ein zentrales Konstrukt der modernen Psychologie, um Unterschiede in der kognitiven Leistungsfähigkeit von Menschen zu beschreiben. Etwas breitere Konzeptionen sehen die Anpassung des Menschen an seine Umwelt und die Gestaltung der Umwelt zu unserem Vorteil als zentrales Element intelligenten Handelns. Es wird ein kurzer Überblick über verschiedene Konzeptionen von Intelligenz gegeben. Auch die „dunkle Seite“ der Intelligenz (das zerstörerische Potential) wird angesprochen. Die Besonderheiten menschlicher im Vergleich zu künstlicher Intelligenz werden betont.

1 Einführendes

Intelligenz ist ein Prädikat, mit dem man sich gerne schmückt (oder noch beliebter: mit dem man von anderen geschmückt wird). Niemand möchte „dumm“ oder „töricht“ genannt werden, über die Dummheit anderer kann man sich lustig machen. Während in der Antike bereits die Messung von Körperkräften in Form von

[1] Der Text beruht auf einem Vortrag, der am 8.1.2021 als Eröffnungsvortrag auf der 145. Jahrestagung der Evangelischen Forschungsakademie gehalten wurde und im dortigen Konferenzbericht unter dem Titel „Was ist Intelligenz? Die psychologische Sicht“ im Jahr 2021 veröffentlicht wird.

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24385

„Olympischen Spielen“ bekannt war, gab es zwar intelligenzfordernde Aufgaben wie das Rätsel der Sphinx, die laut der griechischen Mythologie Theben belagerte und niemanden durchliess, der ihre Frage nicht korrekt beantwortete: „Was ist am Morgen vierfüßig, am Mittag zweifüßig, am Abend dreifüßig?“ Nur der kluge Ödipus wusste die Antwort (der Mensch), woraufhin die Sphinx Selbstmord beging und Theben damit gerettet wurde. Aber vergleichbare Geistes-Olympiaden sind damals nicht entwickelt worden, sieht man von den „Symposien“ (Gastmalen) als Vorformen wissenschaftlicher Konferenzen einmal ab.

2 Definitorisches

Es gehört sich in einer guten wissenschaftlichen Arbeit, das zentrale Konstrukt – also in unserem Fall: „Intelligenz“ – klar zu definieren. Nun ist das gerade für Intelligenz außerordentlich schwierig wegen des hohen Abstraktionsniveaus der Vorgänge, über die hier zu reden sein soll. Manche wie der Historiker Edwin Boring (1923) verweisen daher der Einfachheit halber lieber auf die Messprozedur („operationale Definition“ sensu Bridgman, 1927): „Intelligenz ist das, was der Intelligenztest misst“. So korrekt diese Aussage auch ist, so sehr lässt sie uns doch im Unklaren über das, was gemessen werden soll.

Eine Arbeitsdefinition, akzeptiert von 52 bekannten Intelligenzforschern im Jahr 1994, anlässlich einer Umfrage unter 131 führenden Intelligenzforschern[2], lautet folgendermassen:

> A very general mental capability that, among other things, involves the ability to reason, plan, solve problems, think abstractly, comprehend complex ideas, learn quickly and learn from experience. It is not merely book learning, a narrow academic skill, or test-taking smarts. Rather, it reflects a broader and deeper capability for comprehending our surroundings—“catching on”, “making sense” of things, or “figuring out” what to do.

Da ist viel Inhalt drin: Denken, Planen, Problemlösen, Lernen, Verstehen. Im Grunde all das, was die moderne Kognitionsforschung bei Menschen als „höhere“

[2] „Mainstream science on intelligence“ *December*, 13, 1994. Wall Street Journal, p. A18.

kognitive Prozesse bezeichnet (im Unterschied etwa zu dem „einfachen“ Prozess der Wahrnehmung).

3 Theoretisches

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts sind die ersten Theorien der Intelligenz entstanden, die wir heute als Klassiker betrachten. Fünf bedeutende Persönlichkeiten sollen nachfolgend kurz vorgestellt werden, die bis heute als einflussreiche Gestalter unserer modernen Intelligenztheorien angesehen werden. Diese fünf Personen sind (1) Alfred Binet (globale Intelligenz und deren Diagnostik), (2) Lewis Terman (IQ und der Stanford-Binet-Test), (3) Charles Spearman (die Zwei-Faktoren-Theorie), (4) Louis L. Thurstone (die Theorie der „primary mental abilities“) sowie (5) David Wechsler (ein pragmatischer Kompromiss).

Alfred *Binet* (1857-1911) hat im Auftrag des Pariser Bildungsministeriums zusammen mit Theodore Simon im Jahr 1905 über die Entwicklung des ersten „Intelligenztests“ berichtet, um geistig behinderte Kinder in den Schulklassen aufzufinden. Ihr Messverfahren bestand aus 30 verschiedenen Tests, diese wurden 1908 revidiert und bereits 1916 als Stanford-Binet-Test in den USA weiterentwickelt von Lewis Terman (s. u.). In diese Zeit fällt auch die erstmalige Erwähnung des Begriffs IQ. Der Intelligenz-Quotient (IQ) nach William Stern (1912) ist als Verhältnis von Intelligenzalter zu Lebensalter mal Hundert (IQ=IA/LA*100) definiert.

Alfred Binet hat mit seiner Testentwicklung entscheidende Fortschritte der Intelligenz-Diagnostik eingeleitet und Standards gesetzt, die bis heute Gültigkeit haben (siehe dazu auch Funke, 2006). Dazu zählen insbesondere die Reliabilitätssteigerung (= Steigerung der Messgenauigkeit) (1) durch Mehr-Item-Messung, (2) durch eine systematische Schwierigkeitsstaffelung, (3) durch die Standardisierung von Instruktion, Durchführung und Auswertung, (4) durch eine Test-Normierung durch Vergleich mit verschiedenen Altersgruppen, (5) durch eine ausgeprägte Verhaltensorientierung, in der die erbrachte Leistung zählt, nicht die subjektives Einschätzung einer Leistung, und last but not least (6) durch die Überzeugung, dass das Testergebnis nicht die einzige Grundlage der Beurteilung sein darf.

Lewis *Terman* (1877-1959) hat den Binet-Simon-Test in die USA eingeführt. Im Lichte der Erfordernisse des Ersten Weltkriegs (Auswahl intelligenten Militärpersonals zur Bedienung der damals noch sehr fehleranfälligen Militär-Technologie)

entwickelte er das Original weiter zum sog. „Army Alpha"-Test, der erstmals massenhaft zum Einsatz kam und damit einen enormen Aufschwung der Intelligenzdiagnostik einleitete.

Terman startete zudem eine erste Längsschnitt-Studie mit Hochbegabten (das Stanford Genius Projekt; die Teilnehmenden wurden „Termiten" genannt): Im Jahre 1921 wurden 1528 begabte 12jährige Jugendliche mit einem IQ größer als 140 erstmals erfasst, dann immer wieder erneut (1928, 1936, 1940, 1945, 1950, 1955, 1960) getestet. Im Jahr 2003 lebten noch 200 Personen des Ursprung-Jahrgangs 1909. Über die Hälfte seiner Hochbegabten machte einen College-Abschluss (damals normal war das nur für 8% eines Jahrgangs), dennoch zog er im Rückblick auf 25 Jahre Längsschnitt das für ihn ernüchternde Fazit: „At any rate, we have seen that intellect and achievement are far from perfectly correlated." (Terman & Oden 1947, p. 352)

Charles *Spearman* (1863-1945) hat bereits im Jahr 1904 eine „Zwei-Faktoren-Theorie" vorgestellt: Neben einem Generalfaktor *g*,[3] der überall beteiligt ist, sind immer noch spezifische Faktoren *s* (z. B. Rechenfähigkeiten oder sprachliche Fähigkeiten) an einer Testaufgabe beteiligt. Grundlage seiner Theorie war die damals neuartige Methode der Korrelationsrechnung, später die der Faktorenanalyse. Wichtig war ihm die komplementäre Natur von *g* und *s*: *g* kann nicht trainiert werden, *s* dagegen sehr wohl; *g* repräsentiert „noegenetic processes" (= Verstehensprozesse) im Unterschied zu sensorischen und motorischen Prozessen.

Louis L. *Thurstone* (1887-1955) hat in seinem Buch von 1938 das Modell mehrerer gemeinsamer Faktoren („primary mental abilities", PMA) vorgestellt. Er hielt *g* für ein statistisches Artefakt. Intelligentes Verhalten ergibt sich für ihn aus dem Zusammenwirken mehrerer unabhängiger Faktoren (der sieben Primärfähigkeiten): (1) Verbales Verständnis, (2) Wortflüssigkeit, (3) Schlussfolgerndes Denken, (4) Räumliches Vorstellungsvermögen, (5) Merkfähigkeit, Gedächtnis, (6) Rechenfähigkeit, Zahlenverständnis, (7) Wahrnehmungsgeschwindigkeit, Aufmerksamkeit.

David *Wechsler* (1896-1981) führte 1932 den IQ als Abweichungsquotienten ein, da bei Erwachsenen der IQ als Verhältnis von Intelligenzalter zu Lebensalter

[3] Die Abkürzung *g* (für „general intelligence") hat sich als Kürzel durchgesetzt. Böse Zungen behaupten, *g* sei für die Psychologie das, was *C* (Kohlenstoff) für die Chemie sei (Ree & Earles, 1993).

(IQ=IA/LA*100) wegen des ständig wachsenden Alters nicht sinnvoll ist (bei gleicher Leistung sinkt der IQ mit steigendem Alter). Der Abweichungsquotient führt den Bezug auf eine Normalverteilung der entsprechenden Altersgruppe ein, mit einem Mittelwert von 100 und einer Standardabweichung von 15. Die von Wechsler entwickelte umfängliche Testbatterie unterscheidet zwischen Verbal-IQ und Handlungs-IQ; sie wird ständig revidiert und ist bis heute im Einsatz unter der Bezeichnung „Hamburg-Wechsler Intelligenztest für Erwachsene“ (HAWIE-R), „Wechsler Adult Intelligence Scales - Revision IV (Deutsche Adaption)“ (WAIS-IV) bzw. „Hamburg-Wechsler Intelligenztest für Kinder“ (HAWIK-R).

Auch moderne Theorien der Intelligenz sind zahlreich formuliert worden – und es gibt gute Übersichten dazu, so dass ich hier lieber darauf verweisen möchte als diese Theorien erneut auszubreiten (siehe z. B. Sternberg, 2018; Sternberg & Kaufman, 2011; Wilhelm & Schroeders, 2019).

Einen Ansatz möchte ich allerdings noch erwähnen, der eine gewisse Verbreitung gefunden hat: Howard *Gardner* (1993) hat mit seiner Annahme von multiplen (zunächst sieben, inzwischen neun) eigenständigen „Intelligenzen“ Aufmerksamkeit erregt: (1) sprachlich-linguistische Intelligenz: z. B. Sprachverstehen, Schreiben, Reden und Lesen; (2) logisch-mathematische Intelligenz, z. B. Kopfrechnen; (3) bildlich-räumliche Intelligenz: z. B. Lesen einer Landkarte, Verstauen von Koffern; (4) musikalische Intelligenz: z. B. Spielen eines Instruments, Komposition eines Stücks; (5) motorische Intelligenz: z. B. Kontrolle der Körperbewegungen, Tanz und Sport; (6) intrapersonale Intelligenz: Fähigkeit, mit sich selbst (intra-personal) umzugehen; (7) interpersonale Intelligenz: Fähigkeit, mit anderen Menschen umzugehen („Soziale Intelligenz“); (8) naturalistische Intelligenz im Sinne eines besonderen Bezugs zur Natur; (9) spirituelle, „existentielle“ Intelligenz im Sinn von Weisheit und Transzendenz. Abbildung 1 illustriert diese verschiedenen „Intelligenzen“ und benennt auch jeweils prominente Vertreter des jeweiligen Typs.

Gardner gibt als Gründe für die Annahme eigenständiger „Intelligenzen“ eine umfangreiche Kriterienliste an: potentielle Isolierung einer speziellen Hirnstruktur, z. B. durch Hirnschäden; Existenz außergewöhnlicher Begabungen; identifizierbare Kernfunktion von Menschen; charakteristische Individualgeschichte; evolutionäre Plausibilität; Stützung durch Daten aus der Experimentalpsychologie; Stützung durch Daten aus der Psychometrie; geeignet für die Codierung in einem

Symbolsystem (z. B. die Systeme der Noten, Buchstaben, Zahlen). Das schließt z. B. eine „Schachintelligenz“ aus, da ihr etwa eine evolutionäre Plausibilität fehlt.

Die heute am meisten verbreitete Konzeption ist die von Cattell, Horn und Carroll entwickelte Theorie (CHC-Modell genannt; siehe McGrew, 2005; Schneider & McGrew, 2012). Danach ist ein dreischichtiges Schema mit einer einzigen allgemeinen kognitiven Fähigkeit („g“) auf der dritten (obersten) Schicht („Stratum“ genannt), acht Fähigkeiten auf dem zweiten Stratum und etwa sechsundsechzig Fähigkeiten auf dem ersten (untersten) Stratum anzunehmen (Carroll, 1993). Zu den Fähigkeiten des zweiten Stratums gehörten fluide (Gf) und kristalline Intelligenz (Gc), Gedächtnis, Visualisierung und einige andere Merkmale. Zu den Fähigkeiten des ersten Stratums innerhalb der Kategorie der fluiden Fähigkeiten Gf gehören induktives, sequentielles (deduktives), quantitatives und Piagetsches Schlussfolgern. Andere Faktoren des zweiten Stratums wurden in ähnlicher Weise in engere Primärfaktoren aufgeteilt. Abbildung 2 zeigt die Entwicklung der verschiedenen Intelligenztheorien und deren Kulmination im kombinierten CHC-Modell nach Cattell (1963), Horn (1976) und Carroll (1993).

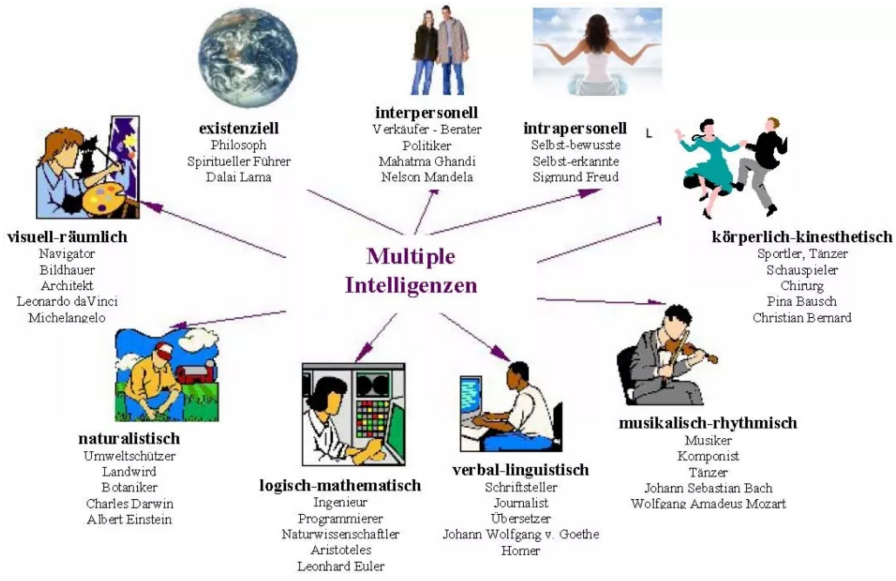


Abbildung 1: Illustration der multiplen Intelligenzen nach Howard Gardner (Quelle: https://open-mind-akademie.de/hochbegabung/theorie-der-multiplen-intelligenz/).

Im zweiten Stratum sind z. B. drei der acht Faktoren Geschwindigkeitsfaktoren. Dazu gehört ein Verarbeitungsgeschwindigkeitsfaktor, der durch Reaktionszeit-Aufgaben und andere zeitlich begrenzte Aufgaben (z. B. Synonymvergleiche für häufige Wörter) gemessen wird. Ein separater breiter kognitiver Geschwindigkeitsfaktor wird durch Tests zur numerischen Fähigkeit (z. B. einstellige Additionsaufgaben) und zur Wahrnehmungsgeschwindigkeit (z. B. Buchstaben-Bild-Zuordnung) gemessen, sowie allgemeine Faktoren zur Testgeschwindigkeit (z. B. die Anzahl der angekreuzten Items innerhalb eines Zeitlimits).

Der dritte Faktor des zweiten Stratums ist ein breiter Faktor Gedächtnis, der vor allem durch Fluency-Tests („Flüssigkeit“) gemessen wird. Beispiele für Fluency-

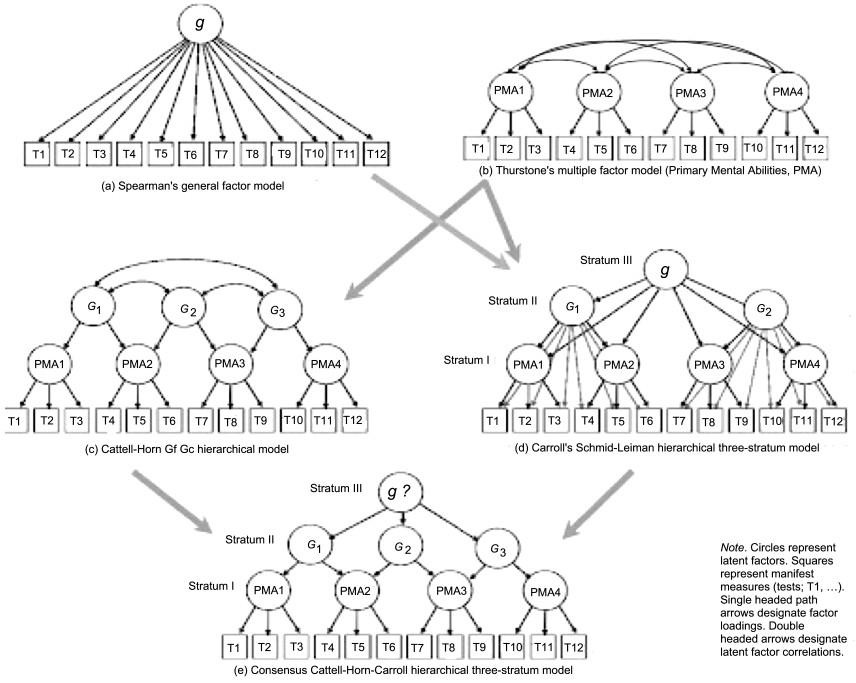


Abbildung 2: Die Entwicklung des CHC-Modells mit seinen drei Schichten (1e), hergeleitet aus Spearmans Generalfaktor-Modell (1a), Thurstones Vorstellung der „primary mental abilities“ (PMA; 1b), der Cattell-Horn-Annahme fluider und kristalliner Intelligenz (1c) und dem hierarchischen Drei-Schichten-Modell (1d), mit Kreisen als latenten und Vierecken als manifesten Variablen (Tests T1 … Tn; Quelle: Institute for Applied Psychometrics IAP, Dr. Kevin McGrew, 4-11-2014).

Tests sind solche, bei denen ein Proband z. B. zwei Minuten Zeit hat, um „alle 4-Buchstaben-Wörter aufzulisten, die Ihnen einfallen und die mit B beginnen und mit T enden“ oder „schreiben Sie so viele Synonyme wie möglich für das Wort ‚gut‘ auf“. Die „breiten“ Fähigkeiten auf Stratum 2 sind in der Zusammenschau im Einzelnen wie folgt benannt: Gc – crystallized intelligence, Gf – fluid intelligence, Gs – processing speed, Gt – reacting or decision making speed, Gsm – short-term or immediate memory, Glr – long-term memory storage and retrieval, Grw – reading and writing abilitym, Gq – quantitative reasoning, Gv – visual processing, Ga – auditory processing.

4 Messtechnisches

Der Intelligenztest ist wohl eines der erfolgreichsten Produkte auf dem Markt verkäuflicher Psycho-Waren. Ganze Industrien (Testverlage wie z. B. die international operierenden Firmen „Educational Testing Service“, „Hogrefe Publishing“, „Pearson Assessments“ oder „Schuhfried“) leben davon. Dessen ungeachtet darf die Frage gestellt werden, ob (und wenn ja wie) psychische Merkmale wie z. B. das Konstrukt „Intelligenz“ gemessen werden können, analog zu einer Messung von Kraft in der Physik (kritisch: Gould, 1996).

Dass seit über 100 Jahren die Begabungsdiagnostik immer weiter perfektioniert wurde und der IQ-Test daher das am längsten optimierte Messinstrument in der Psychologie darstellt, ist Segen und Fluch zugleich: Segen deswegen, weil die Mess-Präzision eine enorm hohe Qualitätsstufe erreicht hat; Fluch deswegen, weil wir seit über 100 Jahren den einmal gewählten Aufgabensatz zwar schrittweise optimiert haben, eine „Runderneuerung“ des Mess-Ansatzes aber versäumt wurde. Dies leitet über zur Kritik an den vorliegenden Messverfahren.

5 Kritisches

Die Kritik an den vorliegenden Messverfahren macht sich an folgenden Punkten fest: (a) Es handelt sich oft um Rätselfragen; (b) alle relevanten Informationen stehen auf einem Silbertablett zur Verfügung; (c) es gibt nur eine einzige richtige Lösung; (d) die Aufgaben besitzen keine zeitliche Dimension, man muss nicht mit den Konsequenzen von Entscheidungen weiterarbeiten; (e) erfasst wird vor allem analytische Intelligenz – es fehlt die Erfassung von sozialen und emotionalen

Fähigkeiten, die unter dem Stichwort „soziale“ und „emotionale“ Intelligenz gefasst werden.

Mit anderen Worten: Intelligenztests seien „insgesamt zu wenig komplex“ – so formuliert es knapp und kompakt der Literat Hans-Magnus Enzensberger (2007) in einem lesenswerten Essay mit dem schönen Titel „Im Irrgarten der Intelligenz. Ein Idiotenführer“ (ähnlich testkritisch übrigens auch Sternberg, 2016).

Noch eine weitere Schiene der Kritik soll hier angeführt werden, die vom amerikanischen Intelligenzforscher Robert Sternberg in neuerer Zeit lebhaft vertreten wird: „The Dark Side of Intelligence“ oder die *Selbst-Destruktions-Hypothese*. Sternberg (2019, p. 8) sieht die dunkle Seite der Intelligenz dort: „ … if a person's creative, analytical, or practical skills are used for dark ends“. Er vertritt die Selbst-Destruktions-Hypothese: Nach bisherigem Standard als „intelligent“ geltende Personen (also eigentlich: „kluge Köpfe“) richten die Menschheit zugrunde. Aus diesem Grund hält er „adaptive“ Intelligenz (i.S. kollektiver Bemühungen) für wichtiger als „allgemeine“ Intelligenz (i.S. individueller – egoistischer– Überlebenssicherung; siehe Sternberg, 2021).

Das Konzept von Intelligenz weist durchaus eine Nähe zum Konzept von Weisheit auf, ein Konzept, das in herkömmlichen IQ-Tests nicht adressiert wird. Weisheitsmerkmale, die zu berücksichtigen wären, sind z. B. Lebenserfahrung, Perspektivenvielfalt, Selbstreflexion, Wissen über ein „gutes“ Leben sowie Wissen über die fundamentale Pragmatik des menschlichen Lebens (siehe z. B. Baltes & Smith, 2008; Fischer, 2015; Glück, 2019). Um diese Merkmale adäquat zu erfassen, bräuchte es völlig andere Messzugänge als bisher praktiziert.

Eine weitere mögliche Alternative zur Erfassung intelligenten Handelns (und damit eine mögliche Alternative zum IQ-Test) besteht in der Leistungs- und Verhaltensmessung beim zielführenden Handeln in computersimulierten Szenarien. Dieser Gedanke ist entstanden als Reaktion auf das seit den 1970er Jahren spürbare Unbehagen mit IQ-Tests (zu wenig realitätsnah, kaum Validität im Alltag). Auf Vorschlag von Dietrich Dörner (Bamberg) kam es zur Verwendung von computersimulierten Szenarien. Ziel war die Erfassung „komplexen Problemlösens“, also des Umgangs mit Unsicherheit in komplexen Situationen (Dörner, 1981).

Begünstigt wurde dieser Plan durch die Verfügbarkeit von Großrechnern zunächst in Rechenzentren, später (als Kleinrechner) in psychologischen Laboratorien. Damit konnten kontrollierte Anforderungen in Form von Simulationsmodellen geschaffen werden, in denen sich Testpersonen als handelnde Akteure (Manager,

Bürgermeister, Entwicklungshelfer) bewähren mussten. Eine der offenen Fragen war (Putz-Osterloh, 1981): In welchem Verhältnis stehen Intelligenz und das Lösen komplexer Probleme? Die Antwort der Dörner-Gruppe (siehe z. B. Dörner et al., 1983) war klar: in keinem! Natürlich gab es Widerspruch dazu (z. B. Funke, 1983; Hörmann & Thomas, 1989; Kretzschmar et al., 2016). Der Streit zwischen beiden Seiten ist durch zwei unterschiedliche Perspektiven charakterisiert: Während Intelligenzforschung eher *struktur*bezogen argumentiert, ist die Forschung zum komplexen Problemlösen eher *prozess*bezogen ausgerichtet. Die aktuelle Position findet sich bei Dörner und Funke (2017) beschrieben.

Die fünf Eigenschaften eines komplexen Problems zeigen die Nähe zu lebensechteren Anforderungen, anders als sie im Intelligenztest erfasst werden. Zu nennen sind (1) *Komplexität* (= ein zu verstehendes System besteht aus sehr vielen verschiedenen Variablen; Konsequenz: Die Verarbeitungskapazität des Problemlösers wird überschritten, daher besteht die Notwendigkeit der Informationsreduzierung), (2) *Vernetztheit* (= die beteiligten Variablen sind untereinander stark vernetzt; Konsequenz: Der Problemlöser muss die (wechselseitigen) Abhängigkeiten zwischen den beteiligten Variablen berücksichtigen, daher besteht die Notwendigkeit zur Modellbildung und Informationsstrukturierung), (3) *Eigendynamik* (= das fragliche System entwickelt sich auch ohne Zutun des Akteurs weiter; Konsequenz: Es steht nur begrenzt Zeit zum Nachdenken zur Verfügung, daher besteht die Notwendigkeit rascher Entscheidungen aufgrund oberflächlicher Informationsverarbeitung), (4) *Intransparenz* (= die Informationen, die der Akteur für seine Entscheidungen braucht, sind nicht vollständig zugänglich, z. T. aus prinzipiellen Gründen, z. T. aus Zeitgründen; Konsequenz: Es besteht die Notwendigkeit aktiver Informationsbeschaffung), (5) *Polytelie* (= Vielzieligkeit; d. h. es ist nicht nur ein Kriterium zu optimieren, sondern es müssen viele, gelegentlich einander widersprechende Bedingungen beachtet werden; Konsequenz: Der Problemlöser muss eine differenzierte Zielstruktur mit Regeln zur Konfliktlösung aufbauen und es besteht die Notwendigkeit mehrdimensionaler Informationsbewertung).

Diese Konzeption komplexer Probleme lag der internationalen PISA-Studie im Jahr 2012 zugrunde (OECD, 2014), die das Problemlösepotential 15-jähriger Schülerinnen und Schüler aus 67 Nationen erfassen sollte (siehe im Detail Ramalingam et al., 2017). Da es politisch nicht erwünscht war, in diesem Kontext von „Intelligenz“ zu sprechen (das Konzept klingt so unveränderlich), wurde lieber von (trainierbaren) kognitiven Kompetenten gesprochen.

Im Umgang mit komplexen Problemen, die in computersimulierten Szenarien aufgeworfen werden, kommen die drei Intelligenzarten, die nach Robert Sternberg (1998) für den Lebenserfolg (im Sinne einer „Erfolgsintelligenz“) nötig sind, zum Vorschein: (a) kreative Intelligenz, um die wirklich wichtigen Probleme aufzuspüren; (b) analytische Intelligenz, um diese Probleme zu lösen; sowie (c) praktische Intelligenz, um die gefundenen Problemlösungen auch anzuwenden und im sozialen Kontext durchzusetzen.

6 Künstliches und Menschliches

Ein von der Öffentlichkeit mit großer Spannung verfolgter Aspekt betrifft den (vermeintlichen) Wettlauf zwischen natürlicher (menschlicher) und künstlicher (maschineller) Intelligenz. Die Frage steht im Raum: Wann übernimmt die KI mit ihrer Superintelligenz die Weltherrschaft? Der amerikanische Autor Ray Kurzweil (seit 2012 Leiter der Technik-Abteilung bei Google) hat diesen Punkt in seinem Buch „The singularity is near“ (2005) als „Technologische Singularität“ bezeichnet, als Wendepunkt der Geschichte, von dem ab die Menschheit Unsterblichkeit erreichen kann.

Was sind die Stärken künstlicher Systeme? Maschinelle Systeme punkten bei speziellen (gut definierten) Anforderungen (wie z. B. Schach oder Go – nicht aber beim Nahost-Problem); bei Mustererkennung (wie z. B. Unterschriften – nicht aber beim Erkennen des Schwarzen Melanoms auf dunkler Haut); sie glänzen durch hohe Geschwindigkeit und rasches Lernen (Lernen durch die Verarbeitung großer Datenmengen, nicht durch Einsicht).

Was sind im Vergleich dazu die unübertroffenen Stärken von Menschen? Umgang mit Unsicherheit und mit Neuem. Phantasie und Spiel. Witz und Ironie. Spiritualität. Lachen: Interessanterweise lachen künstliche Systeme nicht. Menschen besitzen im Unterschied zu Maschinen das Merkmal der Sterblichkeit und darüber hinaus die prinzipielle Fähigkeit zum Selbstmord – ich kenne kein maschinelles System, das sich selbst den Stecker herauszieht. Kultur und Geschichte machen zudem den Menschen aus, sowohl individuell in der persönlichen Lebensgeschichte wie auch übergreifend in der Menschheitsgeschichte.

Schließlich der gesamte Komplex, der sich um die Begriffe „Bewusstsein, Freiheit, freier Wille“ dreht: Man könnte grobschlächtig sagen: *Menschen handeln, Maschinen führen aus*. Deswegen halte ich es auch für falsch, wenn KI-Systeme

(wie z. B. die Software für selbstfahrende Autos) mit sogenannter „Ethik“ ausgestattet werden (z. B. mit der Vorschrift, im Notfall lieber alte Menschen als kleine Kinder zu überfahren). Eine derartige Vorschrift ist natürlich noch keine Ethik – es handelt sich lediglich um vorprogrammierte Entscheidungsregeln, die selbstfahrende Autos benötigen. Aber ein Satz Regeln macht noch keine Ethik.[4]

Dass die Techniken des maschinellen Lernens längst zu Produkten geführt haben, die angeblich „intelligent“ die Kreditwürdigkeit einer Person oder dessen „Rückfallrisiko“ für Straftaten beurteilen, zeigt nur ein Problem unserer Gesellschaft auf, sich Entscheidungen zu entziehen, für die Menschen die Verantwortung übernehmen sollten. Längst gibt es Forderungen, solche Art von „BlackBox“-KI nicht mehr zu akzeptieren (Rudin, 2019).

Als kleines Amüsement zur Leistungsfähigkeit der KI, Texte zu generieren, hier ein anschauliches Beispiel: Ich habe der Text-generierenden KI-Agorithmus „GPT-2“ (online verfügbar z. B. unter https://transformer.huggingface.co) den ersten Satz dieses Artikels (siehe oben: „Intelligenz ist ein Prädikat, mit dem man sich gerne schmückt (oder noch besser: mit dem man von anderen geschmückt wird)“) als Input gegeben (auf Englisch: „Intelligence is a predicate with which one likes to adorn oneself (or even better: with which one is adorned by others). Nobody likes to be called „stupid“ or „foolish“; the stupidity of others can be made fun of.“) und die Software gebeten, den Textanfang fortzusetzen. Daraufhin kam folgender Vorschlag als Output des KI-Systems für einen zweiten Satz: „Intelligence is the ability to recognize the fact that someone is acting in a certain way, in particular, when such actions result in consequences that are unpredictable.“ (auf deutsch etwa: „Intelligenz ist die Fähigkeit, die Tatsache zu erkennen, dass jemand in einer bestimmten Weise handelt, insbesondere, wenn diese Handlungen zu Konsequenzen führen, die nicht vorhersehbar sind“). Klingt wie ein richtiger Satz, aber ist natürlich Nonsense. Keine Bedrohung für Autoren, wohl aber für Herausgeber wissenschaftlicher Zeitschriften: Die ersten computergenerierten „wissenschaftlichen“ Texte sind bereits in Konferenz-Bänden abgedruckt worden und mussten kürzlich zurückgezogen werden.[5]

[4] Ethik zeigt sich oft erst im Regelverstoß, z. B. beim Tyrannenmord.

[5] siehe https://retractionwatch.com/2021/02/17/publisher-retracting-five-papers-because-of-clear-evidence-that-they-were-computer-generated/. Abgerufen am 10.08.2021

Zum Menschlichen der Intelligenz gehört übrigens auch die *Torheit* (die nicht mit Dummheit gleichzusetzen ist) als ihrer Schattenseite mit dazu. Barbara Tuchman schreibt in ihrem Buch „Von Troja bis Vietnam“ (1989) über die Torheit der Regierenden und macht deutlich, dass im Feld der Politik eine Menge von Fehlentscheidungen zu finden sind, die viele Menschenleben gekostet haben. Das ist keine neue Erkenntnis – bereits Plato schreibt in seiner „Politeia“: „Und so wird uns und euch der Staat wachend verwaltet werden und nicht träumend, wie jetzt die meisten von solchen verwaltet werden, welche Schattengefechte miteinander treiben und sich entzweien um die Obergewalt, als ob sie ein gar großes Gut wäre.“ (Politeia, 521d). Dörner (2021) beschreibt die Torheiten gesellschaftlicher Entscheidungsträger, die er vor allem in (1) Vereinfachungen der Realität (Komplexitätsreduktion), (2) Kompetenzdemonstrationen und (3) der Sicherung von Gruppenkohärenz („groupthink“; siehe auch Janis, 1982) sieht. Er knüpft dabei an seine früheren Beobachtungen zur „Logik des Misslingens“ an (Dörner, 1989).

7 Abschliessendes

Das Konstrukt der Intelligenz erfüllt in unserer modernen Leistungsgesellschaft eine wichtige Selektionsfunktion. Deswegen werden wir so schnell nicht davon loslassen können. Allerdings können wir dafür sorgen, dass das bislang schmale Verständnis von Intelligenz als Indikator primär analytischer (und egoistischer) Fähigkeit durch ein breiteres Verständnis ersetzt wird, das auf den adaptiven Vorteil unserer Spezies als Ganzer abhebt („adaptive Intelligenz“ im Sinn von Robert Sternberg). Die bisher gute Prädiktionskraft von *g* in Hinblick auf die Ausprägung anderer psychologischer Variablen muss dabei ja nicht verloren gehen (siehe hierzu E. Stern & Neubauer, 2016).

Danksagung Für Kommentare und Anmerkungen zu einer Vorfassung danke ich Dr. Marlene Endepohls herzlich.

Referenzen

Baltes, P. B., & Smith, J. (2008). The fascination of wisdom: Its nature, ontogeny, and function. *Perspectives on Psychological Science*, *3*(1), 56–64. https://doi.org/10.1111/j.1745-6916.2008.00062.x

Binet, A., & Simon, T. (1905). Méthodes nouvelles pour le diagnostic du niveau intellectuel des anormaux. *L'Année Psychologique*, *11*, 191–244.

Boring, E. G. (1923). Intelligence as the tests test it. *New Republic*, *36*, 35–37.

Bridgman, P. W. (1927). *The logic of modern physics*. Macmillan.

Carroll, J. B. (1993). *Human cognitive abilities: A survey of factor-analytic studies*. Cambridge University Press.

Cattell, R. B. (1963). Theory of fluid and crystallized intelligence: A critical experiment. *Journal of Educational Psychology*, *54*, 1–22. https://doi.org/10.1037/h0046743

Dörner, D. (1981). Über die Schwierigkeiten menschlichen Umgangs mit Komplexität. *Psychologische Rundschau*, *32*, 163–179.

Dörner, D. (1989). *Die Logik des Mißlingens. Strategisches Denken in komplexen Situationen*. Rowohlt.

Dörner, D. (2021). *Torheit in der Politik*. Universität Bamberg (unveröffentl. Manuskript).

Dörner, D., & Funke, J. (2017). Complex problem solving: What it is and what it is not. *Frontiers in Psychology*, *8(1153)*, 1–11. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01153

Dörner, D., Kreuzig, H. W., Reither, F., & Stäudel, T. (1983). *Lohhausen. Vom Umgang mit Unbestimmtheit und Komplexität*. Huber.

Enzensberger, H. M. (2007). *Im Irrgarten der Intelligenz. Ein Idiotenführer*. Suhrkamp.

Fischer, A. (2015). Wisdom—The answer to all the questions really worth asking. *International Journal of Humanities and Social Science*, *5*(9), 73–83.

Funke, J. (1983). Einige Bemerkungen zu Problemen der Problemlöseforschung oder: Ist Testintelligenz doch ein Prädiktor? *Diagnostica*, *29*, 283–302.

Funke, J. (2006). Alfred Binet (1857 bis 1911) und der erste Intelligenztest der Welt. In G. Lamberti (Ed.), *Intelligenz auf dem Prüfstand—100 Jahre Psychometrie* (pp. 23–40). Vandenhoeck & Ruprecht.

Gardner, H. (1993). *Multiple intelligences: The theory in practice*. Basic Books.

Glück, J. (2019). Wisdom. In R. J. Sternberg & J. Funke (Eds.), *The psychology of human thought: An introduction* (pp. 307–326). Heidelberg University Publishing. https://books.ub.uni-heidelberg.de/index.php/heiup/catalog/book/470

Gould, S. J. (1996). *The mismeasure of man (revised and expanded)*. W. W. Norton.

Hörmann, H.-J., & Thomas, M. (1989). Zum Zusammenhang zwischen Intelligenz und komplexem Problemlösen. *Sprache & Kognition*, *8*, 23–31.

Horn, J. L. (1976). Human abilities: A review of research and theory in the early 1970s. *Annual Review of Psychology*, *27*(1), 437–485. https://doi.org/10.1146/annurev.ps.27.020176.002253

Janis, I. L. (1982). *Groupthink. Psychological studies of policy decisions and fiascoes*. Revised and enlarged edition. Boston, MA: Houghton Mifflin.

Kretzschmar, A., Neubert, J. C., Wüstenberg, S., & Greiff, S. (2016). Construct validity of complex problem solving: A comprehensive view on different facets of intelligence and school grades. *Intelligence*, *54*, 55–69. https://doi.org/10.1016/j.intell.2015.11.004

Kurzweil, R. (2005). *The singularity is near: When humans transcend biology*. Viking.

McGrew, K. S. (2005). The Cattell-Horn-Carroll theory of cognitive abilities. In D. P. Flanagan & P. L. Harrison (Eds.), *Contemporary intellectual assessment: Theories, tests, and issues* (2nd ed., pp. 136–181). Guilford Press.

OECD (2014). *PISA 2012 results. Creative problem solving: Students' skills in tackling real-life problems: Vol. V.* OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264208070-en

Plato (1985). *Der Staat* (Politeia). Übers. K. Vretska, Reclam, Stuttgart

Putz-Osterloh, W. (1981). Über die Beziehung zwischen Testintelligenz und Problemlöseerfolg. *Zeitschrift für Psychologie*, *189*, 79–100.

Ramalingam, D., Philpot, R., & McCrae, B. (2017). The PISA 2012 assessment of problem solving. In B. Csapó & J. Funke (Eds.), *The nature of problem solving: Using research to inspire 21st century learning* (pp. 75–91). OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264273955-7-en

Ree, M. J., & Earles, J. A. (1993). g is to psychology what carbon is to chemistry. A reply to Sternberg and Wagner, McClelland, and Calfee. *Current Directions in Psychological Science*, *2*(1), 11–123. https://doi.org/10.1111/1467-8721.ep10770509

Rudin, C. (2019). Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nature Machine Intelligence*, *1*(5), 206–215. https://doi.org/10.1038/s42256-019-0048-x

Schneider, W. J., & McGrew, K. S. (2012). The Cattell–Horn–Carroll model of intelligence. In D. P. Flanagan & P. L. Harrison (Eds.), *Contemporary intellectual assessment, Theories, tests, and issues. Third edition* (pp. 99–145). Guilford Press.

Stern, E., & Neubauer, A. C. (2016). Intelligenz: Kein Mythos, sondern Realität. *Psychologische Rundschau*, *67*(1), 15–27. https://doi.org/10.1026/0033-3042/a000290

Stern, W. (1912). *Die psychologische Methode der Intelligenzprüfung und deren Anwendung an Schulkindern*. Johann Ambrosius Barth.

Sternberg, R. J. (1998). *Erfolgsintelligenz. Warum wir mehr brauchen als EQ+IQ*. Lichtenberg.

Sternberg, R. J. (2016). Groundhog Day: Is the field of human intelligence caught in a time warp? A comment on Kovacs and Conway. *Psychological Inquiry*, *27*(3), 236–240. https://doi.org/10.1080/1047840X.2016.1156504

Sternberg, R. J. (Ed.). (2018). *The nature of human intelligence*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781316817049

Sternberg, R. J. (2019). A theory of adaptive intelligence and its relation to general intelligence. *Journal of Intelligence*, *7*(4), 1–17. https://doi.org/10.3390/jintelligence7040023

Sternberg, R. J. (2021). *Adaptive intelligence. Surviving and thriving in times of uncertainty*. Cambridge University Press.

Sternberg, R. J., & Kaufman, S. B. (Eds.). (2011). *The Cambridge handbook of intelligence*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511977244

Tuchman, B. W. (1989). *Die Torheit der Regierenden. Von Troja bis Vietnam*. Frankfurt: S. Fischer.

Wilhelm, O., & Schroeders, U. (2019). Intelligence. In R. J. Sternberg & J. Funke (Eds.), *The psychology of human thought: An introduction* (pp. 255–275). Heidelberg University Publishing. https://books.ub.uni-heidelberg.de/index.php/heiup/catalog/book/470

Über den Autor

Joachim Funke ist seit 1997 Professor für Allgemeine und Theoretische Psychologie am Psychologischen Institut der Universität Heidelberg. Promoviert wurde er 1984 an der Universität Trier. Im Jahr 1990 habilitierte er sich an der Universität Bonn. Funke war Gastprofessor an verschiedenen Universitäten, darunter Fribourg (Schweiz), Melbourne (Australien), Nanjing (China) und Szeged (Ungarn). Seine primären Forschungsinteressen liegen im Bereich von Denken, Kreativität und Problemlösen. Seine Forschungsideen wurden unter anderem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, von Bundesministerien und von der Europäischen Union finanziell unterstützt. Funke hat zahlreiche Artikel in internationalen Fachzeitschriften veröffentlicht, Kapitel zu Fachbüchern beigetragen und eigene Bücher herausgegeben und veröffentlicht. Von 2010 bis 2014 war er Vorsitzender der Internationalen Expertenkommission für Problemlösen im Rahmen der weltweiten PISA-Studien der OECD. Auf ihn geht ein Wechsel im Verständnis von Problemlösen zurück, der die Perspektive von statischem zu dynamischen Problemlöseaktivitäten verschiebt. Von der ungarischen Universität Szeged wurde ihm 2015 für seine Verdienste um die computerbasierte Erfassung von Problemlöseprozessen der Titel eines Ehrendoktors verliehen. Von Oktober 2011 bis März 2019 war Funke Sprecher des Akademischen Senats der Universität. Im April 2019 hat sein Ruhestand begonnen.

Korrespondenzadresse:
Prof. Dr. Dr. h.c. Joachim Funke (https://orcid.org/0000-0001-9129-2659)
Universität Heidelberg
Psychologisches Institut
Hauptstr. 47-51
69117 Heidelberg, Germany

E-Mail: Joachim.funke@psychologie.uni-heidelberg.de
Homepage: https://funke.uni-hd.de

Interpersonelle Intelligenz

SABINE C. HERPERTZ

Klinik für Allgemeine Psychiatrie am Zentrum für Psychosoziale Medizin,
Medizinische Fakultät der Universität Heidelberg

Zusammenfassung

Die Interpersonale Intelligenz wurde auf dem Hintergrund von Gardners Theorie der multiplen Intelligenzen konzipiert. Auch wenn sie empirisch nie validiert wurde, so finden sich wesentliche Aspekte sowohl im populär gewordenen Konzept der „Emotionalen Intelligenz" als auch im modernen, neurowissenschaftlich unterbauten Empathiekonzept wieder. Alle genannten Konzepte unterscheiden eine (meta)kognitive und eine emotionale Komponente. Erstere meint Prozesse der reflektierten Perspektivübernahme, d. h. inferentiell Anderen mentale Zustände zuschreiben und sie auch antizipieren zu können. Diese, eng an exekutive Denkfunktionen und sprachliche Ausdrucksfähigkeit gebundene Fähigkeit wird auch als ‚theory-of-mind' oder Mentalisierung bezeichnet. Die emotionale Komponente meint Prozesse des Teilens von Emotionen, sprich des reflexiv-intuitiven Mitfühlens, an der Emotionserkennung und Emotionsspiegelung beteiligt sind. Erstere Fähigkeit ist in phylogenetisch jüngeren kortikalen Mittellinienstrukturen und temporoparietalen Arealen repräsentiert, letztere Fähigkeit in evolutionär früher entstandenen Arealen u. a. des sensomotorischen Cortex und der vorderen Inselregion, die auch im Falle der eigenen Erfahrung von Emotionen involviert sind. Beide Fähigkeiten werden in der engen Interaktion mit den frühen Bezugspersonen erlernt; Prozesse der geteilten Aufmerksamkeit, wie sie beim Kleinkind schon beobachtet werden können, entwickeln sich weiter zum Mentalisierungsvermögen, Prozesse der spiegelbildlichen Nachahmung von affektiven und sensomotorischen Zuständen, die bereits beim Säugling zu beobachten sind, zum intuitiven, verkörperten Verständnis der Emotionen anderer. Die Messung von

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24386

Leistungen Interpersonaler Intelligenz ist inzwischen in beruflichen Assessment-Verfahren weit verbreitet, nicht zuletzt für den ärztlichen Beruf. Empathietraining ist eine psychotherapeutische Technik für solche psychischen Störungen, bei denen Empathiemangel zu erheblichen Problemen im zwischenmenschlichen Alltag führt.

1 Einleitung und Begriffsklärungen

Der Begriff der Interpersonellen bzw. Interpersonalen Intelligenz wurde als Teil der Theorie der multiplen Intelligenzen von Howard Gardner (1983) (Rost 2008) begründet. Sie umfasst neun Facetten: die sprachlich-linguistische, logisch-mathematische, musikalisch-rhythmische, bildlich-räumliche, körperlich-kinästhetische, naturalistische, interpersonale und intrapersonelle Intelligenz. Das Anliegen von Gardner war es, Fähigkeiten zu beschreiben, die Einfluss auf Erfolg im Leben einschließlich Berufserfolg nehmen. Die Interpersonale Intelligenz ist in dieser Theorie nahe dem Konstrukt der „sozialen Intelligenz“ von David Wechsler und Edward Lee Thorndike (Scheibel 2004), aber auch nahe am modernen Empathiebegriff (Decety et al. 2016) konzeptionalisiert und meint die Fähigkeit, Motive, Gefühle und Absichten anderer Menschen nachempfindend zu verstehen und deren Stimmungen und Emotionen zu beeinflussen. Zu beachten ist, dass das Konzept der Interpersonalen Intelligenz nie empirisch validiert wurde.

Die Weiterentwicklung von Komponenten der Intelligenz jenseits mathematischer und verbaler Fähigkeiten führte zum bis heute sehr aktuellen Konstrukt der Emotionalen Intelligenz. Dieses wurde von John D. Mayer und Peter Salovey (Salovey et al. 1990) operationalisiert und führt Aspekte von interpersonaler und intrapersonaler Intelligenz (eigene Gefühle, Antriebe, Motive, mentale Zustände zu verstehen und zu beeinflussen) zusammen, indem es eine Vielfalt von Fertigkeiten nicht nur im Umgang mit anderen Menschen sondern auch mit sich selbst umfasst. Das Konstrukt der Emotionalen Intelligenz wurde auf der Grundlage des Mayer-Salovey-Caruso Emotional Intelligence Test (MSCEIT; Mayer et al. 2002) empirisch untersucht und beschreibt die Fähigkeit, eigene und fremde Gefühle korrekt wahrzunehmen, zu verstehen und zu beeinflussen. Es unterscheidet vier Bereiche: 1. Wahrnehmung von Emotionen: Fähigkeit, Emotionen in Mimik, Gestik, Körperhaltung und Stimme anderer Personen richtig zu erkennen; 2. Nutzung von Emotionen: Wissen über die Zusammenhänge zwischen eigenen und fremden Emotionen und Gedanken, v.a. im Kontext von Problemlösen; 3. Verstehen von

Emotionen: Fähigkeit, Emotionen zu analysieren und in komplexeren affektiven Zuständen zu identifizieren, ihre Veränderbarkeit einzuschätzen und ihre Konsequenzen zu verstehen, und schließlich 4. Beeinflussung von Emotionen: Fähigkeit zur Regulation eigenen Emotionen, z. B. durch Vermeidung, Suppression und Neubewertung, aber auch zur Veränderung der Emotionen anderer. Auch wenn das Konstrukt der Emotionalen Intelligenz, nicht zuletzt wegen hoher Testgütekriterien, in der Intelligenzforschung mehr anerkannt ist als das der Interpersonalen Intelligenz, so ist die Diskussion, ob es sich um ein Subkonstrukt der Intelligenz handelt, nicht abgeschlossen. Einerseits hat das mit dem MSCEIT gemessene Konstrukt geringe Überlappung mit anderen Teilintelligenzen, zeigt also eine hinreichende diskriminative Validität an, andererseits werfen geringe Korrelationen mit den klassischen Intelligenzfaktoren die Frage auf, ob die emotionale Intelligenz Teilfaktor eines übergeordneten, in sich kohärenten Intelligenzkonzeptes ist. Bei anhaltender Diskussion in Kreisen der Intelligenzforscher ging der Begriff der Emotionalen Intelligenz mit Erscheinen des eher populärwissenschaftlichen Buches „Emotional intelligence. Why it can matter more than IQ“ (Goleman 1996) allerdings bereits in die Alltagssprache ein.

Auch ein mit Interpersonaler und im weiteren Emotionaler Intelligenz verwandtes Konstrukt ist das der Emotionalen Kompetenz, das von seinem Begründer Heiner Rindermann aber nicht als Facette des aus seiner Sicht primär kognitive Fähigkeiten beschreibenden Intelligenzkonstruktes konzeptionalisiert wurde. Der von ihm entwickelte Emotionale Kompetenz-Fragebogen (EKF, Rindermann 2009) subsumiert folgende vier Fähigkeiten: (1) Erkennen eigener Gefühle, (2) Erkennen der Gefühle anderer, (3) Emotionsregulation und (4) Gefühlsausdruck.

Schaut man nach aktuellen verwandten Konstrukten in den Neurowissenschaften, so findet sich eine interessante Parallele in den Research Domain Criteria (RDoC; Walter 2017) des amerikanischen National Institute of Mental Health (NIMH). Deren Domäne der „Sozialen Prozesse“ umfasst die Fähigkeit, 1. nonverbale Kommunikation anhand von Gesichtsausdrücken, aber auch Gestik, Prosodie etc. zu erkennen, 2. selbst über die Fähigkeit zur adäquaten Nutzung nonverbaler Kommunikationskanäle zu verfügen, 3. sich selbst als Agent eigener Handlungen und Gedanken zu erkennen, 4. eigene mentale Zustände verstehen und bewerten zu können und schließlich 5. die mentalen Zustände (Emotionen, Meinungen, Absichten, Motive etc.) anderer verstehen und dadurch deren Verhalten prädizieren und interpretieren zu können. Der RDoC Forschungsansatz zielt

darauf ab, verschiedene Informationsebenen von der molekularen Ebene des Genoms, über die systemische Ebene von Hirnnetzwerken (gemessen durch zerebrale Bildgebung) bis zum Verhalten (wie es sich in der Verhaltensbeobachtung und in der Selbstbeurteilung abbildet) zu integrieren, um menschliche Funktionen und Funktionsbeeinträchtigungen beschreiben und bewerten zu können.

2 Entwicklung der Interpersonellen Intelligenz: ein neurowissenschaftlicher Blick

Hohe interpersonelle Intelligenz setzt Interesse an sozialer Interaktion und sozialem Engagement voraus, schließt im Weiteren die Fähigkeit ein, die Perspektiven anderer Menschen zu verstehen und anzuerkennen, sowohl nahe als auch wechselseitig zufriedenstellende Beziehungen zu entwickeln und aufrechtzuerhalten als auch Konflikte mit anderen Menschen adaptiv lösen zu können. Entsprechend sind viele psychologische Komponenten beteiligt, die von basalen Vorgängen der Identifikation, Interpretation und Reaktion (Hermans et al. 2019) bis zu sehr spezifischen Prozessen, wie soziale Annäherung und Bindung, Empathie, Einordnung innerhalb einer sozialen Hierarchie und ‚in-/out-group' Kategorisierung reichen (Happe et al. 2014).

Die systemische neurowissenschaftliche Erforschung bezieht sich bis heute auf einige wenige fundamentale Domänen Interpersoneller Intelligenz; eine kürzlich veröffentlichte Meta-Analyse zu differentiellen neuronalen Netzwerken (Schurz et al. 2020) legt folgende Differenzierung von Facetten interpersoneller Intelligenz nahe: Ein Bereich beinhaltet vorwiegend (meta)kognitive Prozesse, die auch als ‚*theory-of-mind*' (ToM) oder Mentalisierung bezeichnet werden. Ein zweiter Bereich umfasst vorwiegend affektive Prozesse, die die Emotionserkennung beim anderen vermitteln und auf Mitleiden basieren, d. h. das Teilen von Emotionen. Diese affektiven Prozesse können auch als Empathie im engeren Sinne bezeichnet werden, während der umgangssprachliche Begriff der Empathie vage bleibt und gewöhnlich die genannten kognitiven und affektiven Prozesse miteinander vermischt. Ein dritter Bereich beschreibt kombinierte kognitiv/affektive Prozesse. Von anderen Autoren wird noch ein vierter Bereich abgegrenzt, der in der englischsprachigen neurowissenschaftlichen Literatur ‚compassion' oder auch ‚empathic concern' genannt wird, und die offizielle deutsche Übersetzung zwar „Mitleid" vorschlägt, aber in Abgrenzung zur Empathie i.e.S. besser mit Transponierung

von Mitleid in sorgendes Handeln beschrieben werden kann. Es handelt sich bei ‚compassion' eben nicht wie bei Mitleid um ein isomorphes sondern ein komplementäres Gefühl, das mit Sorge um den anderen und damit einer prosozialen Motivation des Helfens verbunden ist (Kanske et al. 2017).

Unabhängig von einer exakten und nicht ganz einheitlichen Terminologie konnte die neurowissenschaftliche Forschung konsistent kognitive und affektive Prozesse anatomisch differenzieren (vgl. Abb. 1). Die phylogenetisch eher jüngeren Prozesse von ToM, Mentalisierung oder im Modell von Decety und Moriguchi (Decety et al. 2007) als kognitive Empathie bezeichneten Funktion sind vor allem in kortikalen Mittellinienstrukturen wie medialer präfrontaler Kortex, superiorer temporaler Sulcus, posteriores Cingulum bzw. Präcuneus sowie im temporoparietalen Übergang repräsentiert. Mit diesen kognitiven Konstrukten ist die abstrakte Fähigkeit gemeint, die mentalen Zustände des anderen anhand von reflektierter

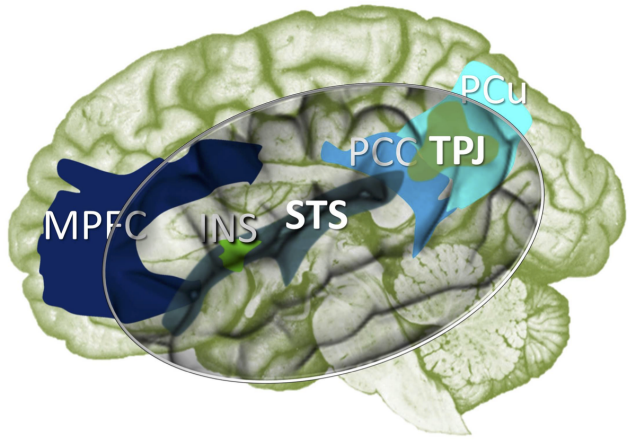


Abbildung 1: Hirnareale, die kognitive und emotionale Empathie vermitteln: mPFC: medialer Präfrontaler Cortex; INS: Insula; STS: superiorer temporaler sulcus; PCC: posteriorer zingulärer Cortex; TPJ: temporo-parietale Junction; PCu: Präcuneus.

Perspektivübernahme ableiten bzw. auf sie rückschließen zu können (s. Abb. 2). Sie ermöglichen, inferentiell Anderen mentale Zustände zuschreiben zu können, um ihr Verhalten – nicht zuletzt in der Reaktion auf sich selbst – verstehen, erklären und vorhersagen zu können (Baron-Cohen 1995). ToM, Mentalisierung bzw. kognitive Empathie, gleich ob sie sich auf Emotionen, Gedanken oder Motive eines anderen bezieht, sind Ausdruck höherer, exekutiver Denkfunktionen einschließlich der Fähigkeit zum sprachlichen Ausdruck über eigene und fremde mentale Zustände. Wählt man die ToM-Nomenklatur, so kann weiter kognitive ToM, die sich auf die Zuschreibung kognitiver mentaler Zustände bezieht, und affektive ToM präzisiert werden. Interessanterweise sind die gleichen Strukturen an selbst-referentiellen Prozessen beteiligt, nämlich am Mentalisieren bzw. Reflektieren eigener emotionaler und motivationaler Zustände. Solche gemeinsamen anatomischen Strukturen bestätigen die Konstrukte von Emotionaler Intelligenz

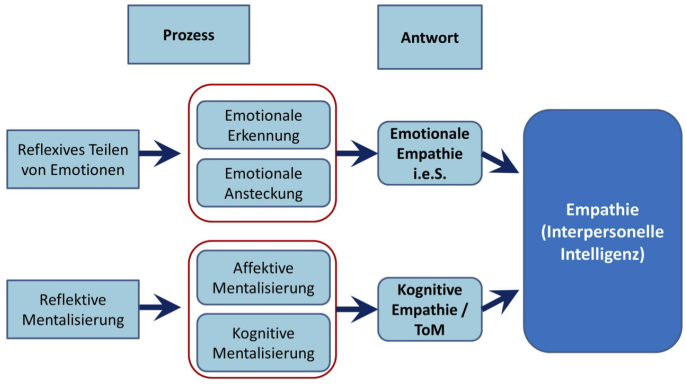


Abbildung 2: Emotionale und kognitive Komponenten der Empathie (als einem der Interpersonellen Intelligenz verwandten Konstrukt).

und Emotionaler Kompetenz, die die Selbst- und interpersonellen Funktionen als Subfacetten eines Konstruktes auffassen.

Emotionale Empathie bzw. Empathie i.e.S. meint nach Decety und Moriguchi (Decety and Moriguchi 2007) einen evolutionär früh liegenden Prozess des reflexiv-intuitiven Mitfühlens und Teilen von Emotionen des Anderen (s. Abb. 2). Sie setzt die Fähigkeit zur Erkennung von Emotionen bei anderen (v.a. anhand der Mimik) voraus und basiert auf der automatischen Nachahmung von affektiven und sensomotorischen Zuständen. Anatomisch gesehen ist sie lokalisiert in u. a. prämotorischen Regionen, Arealen des sensomotorischen Cortex, des inferioren parietalen Lobulus sowie der vorderen Inselregion bis hin zum supramarginalen Gyrus. Hierbei handelt es sich um die gleichen neuronalen Netzwerke, die auch im Falle der eigenen Erfahrung von Emotionen involviert sind. Emotionale Empathie setzt einen funktionierenden regulatorischen Mechanismus voraus, sodass dem Individuum stets präsent ist, dass es sich um die Emotion des anderen und nicht eine eigene Emotion handelt. Gelingt dies nicht, kommt es zum Phänomen der emotionalen Ansteckung (engl. ‚contagion'), bei der die Emotionen des anderen mit den eigenen verschmelzen, und damit das Leiden des anderen auch zum Leiden der empathischen Person führt.

‚Compassion' beruht nicht auf dem Teilen von Emotionen und ist in einem Netzwerk repräsentiert, das mit positiven Emotionen und Belohnung assoziiert ist, nämlich ventrales Striatum und medialer orbitofrontaler Cortex (Klimecki et al. 2014). Es spielt also im sozialen Leben eine gegenüber emotionaler Empathie deutlich unterschiedliche Rolle, schließt sie die Motivation des Helfens und damit einen Handlungsimpuls mit ein. Die Unterschiede in der Bedeutung beider Konstrukte wird im ärztlichen Handeln deutlich, das häufig durch ‚compassion' motiviert wird, während empathisches Mitleiden professionelles Handeln erschweren kann, wenn der Arzt/die Ärztin in ihrer Emotionsregulation überfordert ist.

Geschlechtsunterschiede in Komponenten der Empathie sind insofern untersucht (zur Übersicht: Christov-Moore et al. 2014), dass vielfältige Befunde eine höhere Empathie i.e.S. beim weiblichen Geschlecht nahelegen, was sich u. a. in besseren Leistungen in der Emotionserkennung und in der Spiegelung von Emotionen manifestiert, interessanterweise bei weiblichen Kindern auch in stärkeren emotionalen Ansteckungsphänomenen, wie Weinen, als bei männlichen Kindern. Männer scheinen in ihren empathischen Reaktionen kontextabhängiger und stärker

kognitiver Kontrolle unterworfen zu sein. Unterschiede in kognitiver Empathie bzw. ToM sind bis heute nicht hinreichend untersucht.

3 Entwicklung von Interpersoneller Intelligenz: ein Blick auf die frühe Lerngeschichte

Interpersonelle Intelligenz nimmt in ihrer neuronalen Repräsentation in frühen Beziehungserfahrungen ihren Ausgangspunkt. Evolutionär früh liegende Prozesse der emotionalen Empathie bzw. Empathie i.e.S. entstehen auf dem Wege der spiegelbildlichen Nachahmung von affektiven und sensomotorischen Zuständen, v.a. Mimik und Gestik früher Bezugspersonen (gewöhnlich Mutter und Vater) ab der 10. Lebenswoche des Säuglings (siehe auch: Strauß et al. 2016). Sie werden im sogenannten Spiegelneuronensystem prozessiert, das Areale der sensomotorischen Rinde, prämotorische Regionen im vorderen inferioren frontalen Gyrus, Anteile des inferioren parietalen Lobulus sowie der anterioren Insel umfasst. Nach Gallese (zur Übersicht: 2007) läuft dieses intuitive Verstehen automatisch, reflexhaft ab und meint eine verkörperte (engl.: embodied) Fähigkeit, von der multimodalen Erfahrung des eigenen Körperausdrucks, das heißt der eigenen Mimik und Gestik, auf die Gefühle anderer schließen zu können. Entsprechend geht man davon aus, dass emotionale Empathie von gelungenen frühen Bindungserfahrungen abhängt. Während der weiteren Hirnentwicklung tritt das Spiegelneuronensystem in Wechselwirkung mit dem ventromedialen präfrontalen Cortex sowie weiteren Mittelinienstrukturen und bildet den Ausgangspunkt für die Entwicklung kognitiver Empathie bzw. ToM. Erste interaktive Prozesse dieser Art finden sich in frühen interaktiven Prozessen der geteilten Aufmerksamkeit (das Kind folgt mit seinen Blickbewegungen dem Aufmerksamkeitsfokus seiner Mutter) und entwickeln sich dann beim Kleinkind weiter im engen Wechselspiel mit höheren kognitiven und sprachlichen Funktionen (Oberwelland et al. 2016). Die medial-temporale Lage von ToM-Arealen bildet ihre enge Beziehung zum autobiographischem Gedächtnis ab, d. h. Erfahrungen bilden den Ausgangspunkt von Modellen über das eigene Selbst und den anderen. Diese sind also nicht voneinander abgegrenzt, vielmehr ist von einer primären, „zwischenleiblichen Beziehung zwischen dem Selbst und dem Anderen“ (Fuchs 2017, S. 120) auszugehen. Die primäre Bezogenheit auf den Anderen bildet sich in vielen basalen psychologischen Funktionen ab: So nehmen wir die Gesichter anderer Menschen holistisch war, erhalten bereits auf der Grundlage

nur vager, schnell vorbeziehender Eindrücke von Mimik und Gestik relativ reliable Vorstellungen von dem mentalen Zustand des Anderen (Heider 1958/1977) und nehmen auf ihn Einfluss, indem wir durch unser Blickverhalten die Aufmerksamkeit des Anderen lenken. Ebenfalls zur späteren Entwicklung gehört die adäquate und ausreichende Fähigkeit zur Diskriminierung zwischen eigenen und fremden Gefühlen als Schutz gegenüber einer Diffusion der Selbst-/Fremdgrenzen.

Interessanterweise hat ein adäquates Erziehungsverhalten, das die Ausbildung von Interpersoneller Intelligenz beim Kind fördert, in Netzwerken von emotionaler und kognitiver Empathie seine neurobiologische Basis. Zum einen handelt es sich um das Netzwerk, das emotionale Empathie vermittelt, was im Kontext der Eltern-Säugling Interaktion bedeutet, dass die Elternperson die kindlichen Signale und Emotionen richtig prozessiert und dabei eine Synchronie von Mimik und Gestik beider Interaktionspartner gelingt. Zum anderen handelt es sich um das für kognitive Empathie zuständige Netzwerk, das die Eltern befähigt, kognitiv die Perspektive ihres Kindes einzunehmen und damit seine Bedürfnisse zu verstehen und – besonders wichtig - auch zu antizipieren. Wirken emotional und kognitiv-empathische Prozesse synton zusammen, so werden die kindlichen Signale, die beim Säugling vor allem wechselnde Erregungsniveaus zum Ausdruck bringen, von den frühen Bezugspersonen mimisch gespiegelt, mehr oder weniger bewusst reflektiert und schließlich als verstandener Affekt in einem kontingenten Austausch gegenüber dem Kind zum Ausdruck gebracht (Fonagy et al. 2017). Damit gelingt es den Eltern, ihr eigenes Verhalten auf die Bedürfnisse ihres Kindes abzustimmen und gleichzeitig als Modell zum Erlernen von Emotionsregulation wirksam zu werden, vorausgesetzt sie verfügen über ein funktionierendes Emotionsregulationsnetzwerk (Decety et al. 2006), das, lokalisiert im medialen orbitofrontalen Cortex, Emotionen in Alltagssituationen zu regulieren vermag. Eine gelungene empathische Beziehung zum Kind setzt voraus, dass die Eltern motiviert sind, mit ihrem Kind in eine wachsende Bindung einzutreten, ein gewöhnlich sehr befriedigend erlebter Prozess, der über die Kernstrukturen des Belohnungsnetzwerks prozessiert wird (Strathearn 2011).

Bei Jugendlichen konnte gezeigt werden, dass ihre emotionale Kompetenz durch die neuronale Aktivität in Mentalisierungsnetzwerken der Eltern prädiziert werden konnte, wenn diese mimische Emotionen bewerten mussten. Die Stärke dieses Zusammenhangs wurde vermittelt über die Aktivierung adoleszenter Mentalisierungsnetzwerke in der gleichen Aufgabe (Telzer et al. 2014). Diese

Befunde unterstützen die wichtige Rolle, die die frühe Eltern-Kind Interaktion für den Erwerb emotionaler Intelligenz bei der nächsten Generation spielt; das adoleszente Kind ruft innere Repräsentationen elterlicher Emotionsprozesse ab, die es in der Synchronie mit frühen Bezugspersonen und durch Lernen am Modell bilden konnte.

4 Wie wird Interpersonale Intelligenz gemessen?

Die Messung Emotionaler und Interpersoneller Intelligenz ist Bestandteil vieler Assessments in beruflichen Auswahlverfahren wie auch in Auswahlverfahren zur Studierfähigkeit in Studiengängen mit begrenzter Zulassung. Hier kommen eine breite Palette von Testverfahren zur Anwendung, die von Persönlichkeitstests zur Selbstbeschreibung emotionaler Intelligenz (*Trait Emotional Intelligence Questionnaire* [TEIQue]; Petrides et al. 2009), über Leistungstests (wie der *Mayer–Salovey–Caruso Emotional Intelligence Test* [MSCEIT]; Mayer et al. 2002) oder *Situational Judgement Tests* (SJTs; Stemler et al. 2006) bis hin zu Interaktionsbeobachtungen, wie den *Multiplen Mini-Interviews* (MMIs) (Eva et al. 2004) reichen. Bei den Selbstbeurteilungsmaßen kann auch das *Interpersonal Reactivity Inventory* (IRI) (Davis 1983) hinzugezogen werden, welches Perspektivübernahme bzw. kognitive Empathie, emotionale Empathie, ‚compassion', und persönliches Leiden (durch emotionale Ansteckung) erfasst.

In modernen Assessment-Verfahren werden zunehmend SJTs und MMIs eingesetzt. In SJTs werden Bilder oder Kurzvideos dargeboten, in denen video-basierte, seltener auch geschriebene Szenarien dargestellt sind, die typisch für die professionelle Rolle sind (Roberts et al. 2018). Es soll unter jeweils verschiedenen vorgeschlagenen Handlungsmöglichkeiten im Multiple-Choice Verfahren die Variante mit der höchsten Wichtigkeit ausgesucht werden. Die Aufgabenlösung setzt voraus, dass soziale Situationen richtig erkannt und bewertet werden können und implizites wie auch explizites Wissen vorliegt, wie die richtige Reaktion auf die erkannten situativen Anforderungen (Problemlöseaufgaben) aussehen kann. SJTs prüfen gewöhnlich eine ganze Palette von Merkmalen, die als hilfreich für eine berufliche Rolle angesehen werden, hierunter auch Empathie und ToM-Fähigkeiten. Die Interrater-Reliabilitäten fallen beim SJT durchgehend hoch aus, auch die prädiktive Validität ist günstig, und nicht selten wird der SJT mit MMIs im Sinne der inkrementellen Validität kombiniert.

Will man die für einen spezifischen Beruf notwendigen Komponenten Interpersonaler Intelligenz messen, so erfolgt dies zunehmend durch beobachtende Verfahren von sozialen Interaktionen. Entsprechende Testverfahren werden beispielsweise in der Medizinerauswahl angewandt, weil sozial-kommunikative Fähigkeiten Prädiktoren für den Erfolg im Arztberuf sind. Als entscheidend wird für den ärztlichen Beruf die Fähigkeit verstanden, durch Perspektivenübernahme Erfahrungen des Patienten zu verstehen (kognitive Empathie), seinen emotionalen Zustand zu erkennen (emotionale Empathie), dieses Verstehen mit dem Patienten kommunizieren zu können und eine Hilfemotivation (‚compassion') zu entwickeln. Zudem wird als Schutz vor persönlichem Leiden die Fähigkeit zur Emotionsregulation als wichtig erachtet (Preusche et al. 2016). Bei der Methode der MMIs handelt es sich um solche fähigkeitsbezogenen Auswahltests, bei denen anhand von z. B. fünf Rollenspielen zwischen Bewerber*in und virtuellem/r Patient*in, gewöhnlich im ‚objective structured clinical examination' (OSCE) Format, eine direkte Beobachtung und im Weiteren Beurteilung von Verhaltensweisen erfolgt, die nahe am professionellen Alltag sind. Nach einer Meta-analyse (Pau et al. 2013) stellen sich MMIs als fair, transparent und unabhängig von Geschlechtsbias oder auch kulturellen und sozioökonomischen Einflüssen dar. Zudem stellt sich die Interrater-Reliabilität mäßig bis hoch dar.

Derzeit wird in Heidelberg basierend auf dem Konstrukt der Emotionalen Verfügbarkeit ein MMI zur Auswahl von Medizinstudierenden entwickelt, der über die Prüfung kognitiver Befähigungen im Test für Medizinische Studiengänge (TMS) hinaus bei den Bewerbern Komponenten Interpersoneller Intelligenz messen wird. Unter emotionaler Verfügbarkeit wird dabei ein Aspekt aller sozialen Beziehungen verstanden (Biringen 2000), der übertragen auf den ärztlichen Beruf hierunter die Bereitschaft einer Ärztin bzw. eines Arztes meint, in einen empathischen, verstehenden Kontakt mit ihrem/seinem Patienten zu treten. Emotionale Verfügbarkeit hat entscheidende Bedeutung in Eltern-Kind Beziehungen und wurde hier erstmals untersucht (Oppenheim et al. 2012), wurde aber auch schon Gegenstand in der Untersuchung therapeutischer Beziehungen (Söderberg et al. 2014) (Zeddies 1999). Emotionale Verfügbarkeit beschreibt die Fähigkeit, den emotionalen Zustand, die geistige Verfassung und die Bedürfnisse des Gegenübers erkennen sowie adäquat auf diese antworten zu können, und so einen sicheren emotionalen und kooperativen Gesprächskontext zu schaffen. Die von Herpertz, Biringen et al. (Biringen et al. 2019) für die Bewertung der Arzt-Patient-Interaktion in der

Bewerberauswahl entwickelten *Emotional Availability Scales – Medical Doctor* (EAS-MD) umfassen vier Subskalen: Sensitivität (akzeptierende, empathische, warmherzige, auf die Bedürfnisse des Gegenübers eingehende Haltung), Strukturierung (ausreichende Information geben, Vorschläge machen, in angemessener Weise Grenzen ziehen, angemessene Anforderungen formulieren, festgefahrene Gesprächssituationen auflösen), Nicht-Intrusivität (Anerkennung und Respekt der Integrität und Autonomie des Gegenübers) sowie Nicht-Feindseligkeit (offene oder verdeckte Feindseligkeit, v.a. in Stresssituationen). Die Rater sind angehalten, in Kommunikationsepisoden von 5 min auf allgemeine Verhaltensmuster und verbale als auch non-verbale emotionale Signale zu achten. Gefordert sind im Einzelnen Achtsamkeit gegenüber sozialen Signalen, kongruenter (passender, einfühlsamer) Affekt mit den Mitteilungen des Patienten, Fähigkeit zur Perspektivübernahme bzw. ToM-Kapazität, emotionale Empathie bei klarer Selbst/Fremd Differenzierung, Kreativität, Strukturierungsfähigkeit und Stresstoleranz. Dieser MMI, der derzeit hinsichtlich verschiedener Gütekriterien getestet wird, wird erstmals in der Auswahl der Landarztquote 2022 (vgl. Landarzt-Gesetz 2021) zur Anwendung kommen. Schließlich werden psychophysiologische Maße hinzugenommen, wie elektromyographische Aktivität mimischer Muskeln und physiologische Synchronie (peripher und zentral) zwischen Sender und Empfänger.

5 Interpersonelle Intelligenz und Persönlichkeitsstörungen

Störungen bzw. Beeinträchtigungen der Interpersonellen und auch im Weiteren der Emotionalen Intelligenz finden sich bei einer Reihe von psychischen Erkrankungen. Sie bilden in besonderer Weise prominente Merkmale von Persönlichkeitsstörungen, v.a. der Borderline und der Antisozialen Persönlichkeitsstörung. Bei der im ICD-11 formulierten interpersonellen Funktionseinschränkung als ein entscheidendes diagnostisches Merkmal geht es um die Unfähigkeit, Beziehungen in einer empathischen und kooperativen Weise zu bilden und zu gestalten (Herpertz 2018).

Bei Patientinnen und Patienten mit Borderline-Persönlichkeitsstörung finden sich Besonderheiten in der emotionalen Empathie gemeinsam mit einem Mangel an kognitiver Empathie bzw. beeinträchtigten ToM-Funktionen (Herpertz et al. 2018). Bei Aufgaben, in denen Patient*innen möglichst exakt und schnell Gesichtsemotionen bewerten sollten, wurde konsistent eine Negativitätsverzerrung

berichtet, vor allem in der Weise, dass Betroffene neutrale Gesichter als bedrohlich und zurückweisend erleben (Izurieta Hidalgo et al. 2016). Betroffene zeigten eine verminderte Aktivität des superioren temporalen Sulcus und des temporoparietalen Übergangs während sie affektive ToM-Aufgaben lösten, d. h. die Gefühle anderer an deren Mimik und vor dem Hintergrund des situativen Kontextes erkennen sollten (Dziobek et al. 2011; Mier et al. 2013). Beeinträchtigungen in ToM-Prozessen bilden sich dabei weniger in einem einfachen Mangel an Perspektivübernahme sondern v.a. in verzerrten und rigiden Interpretationen der Emotionen und Motive anderer ab, die bei der Borderline-Persönlichkeitsstörung auch als Tendenz zur Hypermentalisierung bezeichnet werden (Sharp et al. 2013) und Ausgangspunkt von vielen Missverständnissen im interpersonellen Kontext sind. Wenn sie instruiert wurden, ihre eigenen Gefühle wahrzunehmen, während sie andere Menschen leiden sehen, also emotional-empathische Vorgänge aktiviert wurden, so zeigten sie eine höhere Aktivität in der Insula und diese war mit einem erhöhten vegetativen Arousal und der eigenen Zuschreibung verstärkter negativer Emotionen verbunden (Dziobek, Preissler et al. 2011). Zugrunde liegt die Neigung bei Patient*innen mit Borderline-Persönlichkeitsstörung, Emotionen anderer Menschen zu teilen, was sich einerseits – oft positiv sanktioniert – in Mitgefühl und Mitleid äußert, andererseits die Gefahr irritierender emotionaler Ansteckungsphänomene bis hin zur Diffusion von Selbst-/Fremdgrenzen mit sich bringt (Ripoll et al. 2013; Jeung et al. 2014).

Differentiell andere Facetten der Interpersonellen Intelligenz sind bei antisozialen, psychopathischen Menschen betroffen (Herpertz, Bertsch et al. 2018). Sog. „psychopaths“ verfügen über ungestörte kognitiv-empathische Fähigkeiten, d. h. sie können durch Perspektivübernahme die Emotionen und Absichten anderer Menschen antizipieren und diese Erkenntnisse für eigene Ziele einsetzen. Hinsichtlich emotionaler Empathie gibt es hingegen Befunde, die auf Störungen der Emotionserkennung, v.a. von ängstlichen, aber auch traurigen und fröhlichen Affekten, verweisen (Dawel et al. 2012; Timmermann et al. 2017). Eine beeinträchtigte Erkennung ängstlicher Gesichter korreliert mit dem Persönlichkeitsmerkmal Gefühlskälte. Interessanterweise zeigte sich auch in Bildgebungsbefunden bei Strafgefangenen mit psychopathischen Zügen eine verminderte neuronale Aktivität in der „fusiform face area“ und anderen gesichtsverarbeitenden Hirnarealen, wie dem superioren temporalen Sulcus, wenn sie dynamisch sich verändernde ängstliche, traurige und glückliche mimische Bewegungen erkennen sollten (Dece-

ty et al. 2014). Sind ‚psychopaths' mit dem Leiden anderer Menschen konfrontiert, so zeigen sie eine verminderte Aktivität im emotionalen Empathie-Netzwerk (Seara-Cardoso et al. 2016). In einer anderen Studie korrelierte die gegenüber Kontrollen geringere neuronale Aktivität des ventromedialen präfrontalen Cortex, des orbitofrontalen Cortex, der Amygdala sowie des anterioren Cingulums mit dem bei ihnen zu beobachtendem reduzierten Mitleid für Schmerz und Leiden anderer (Seara-Cardoso, Sebastian et al. 2016). Studien von Decety und Kollegen (2015) an ‚psychopaths' versuchten im Weiteren zwischen Mitfühlen und dem motivationalen Antrieb, aus diesem Gefühl einen sorgenden Handlungsimpuls 'compassion' zu bilden, zu differenzieren. Sie konnten zeigen, dass nur elektrophysiologische Korrelate, die dem sorgenden Handlungsantrieb entsprechen, von Kontrollen abweichen, nicht aber die mit Mitfühlen assoziierten Hirnpotentiale. Diese elektrophysiologischen Befunde passen zu denen aus fMRT-Studien, die zeigten, dass bei expliziter Instruktion zum Mitleiden Individuen mit psychopathischen Zügen durchaus in der Lage sind, das emotionale Empathienetzwerk zu aktivieren. Es wird angenommen, dass Abweichungen in der Aufmerksamkeit psychopathischer Individuen im Sinne eines Flaschenhals-Phänomens („theory of the bottleneck") deren Sensitivität für emotionsbezogene Hinweisreize untergraben und damit der ‚psychopathy' dysfunktionale Aufmerksamkeitsprozesse zugrunde liegen (Baskin-Sommers et al. 2011). Die Frage von Dysfunktionen in empathischen Fähigkeiten bei ‚psychopaths' ist möglicherweise nicht als einfaches Mangelphänomen zu beschreiben, sondern könnte in Besonderheiten des Salienz-Erlebens begründet sein, d. h. in der Wahrnehmung der ‚psychopaths' „springen" soziale Reize nicht aus der Vielzahl der Reize hervor. Dies führt in Alltagssituationen dazu, dass die Bedürfnisse der Anderen gegenüber der Durchsetzung eigener Ziele weniger attentionale Ressourcen, d. h. Aufmerksamkeit erhalten und damit vernachlässigt werden.

6 Ausblick

Kann man Interpersonelle Intelligenz trainieren? Ein solches Training könnte viel Sinn machen, sei es in Hinblick auf professionelle Befähigungen oder als Intervention bei Menschen, in denen ein Mangel an kognitiver und/oder emotionaler Empathie Krankheitswert erlangt hat. Ersteres ist in den letzten Jahren in Studiengänge von Ärzten integriert worden, lernen sie im Rollenspiel mit

Schauspielpatienten kognitive und emotionale Empathie als auch die Fähigkeit, eigene Emotionen zu regulieren und damit persönliches Leiden zu vermeiden. Empathie und ‚compassion' Training wurde in seiner Wirksamkeit auch neurowissenschaftlich untersucht. Ziele eines kurzen, 3 × 60 min Empathietrainings (Riess et al. 2012) waren die Verbesserung der Achtsamkeit für verbale und non-verbale emotionale Kommunikation des Patienten einschließlich Übungen zum besseren Erkennen subtiler mimischer Signale, zur Verbesserung des empathischen Verstehens durch Perspektivübernahme, sowie zur erhöhten emotionalen und physiologischen Selbstachtsamkeit und Emotionsregulation. ‚Compassion' wurde auf dem Wege kontemplativer Techniken trainiert (Klimecki, Leiberg et al. 2014). Beide Trainingsanteile führten zur Verbesserung der Interpersonellen Intelligenz sowie zu Aktivierungsveränderungen in den oben dargestellten Hirnnetzwerken. Es bleibt zukünftiger Forschung vorbehalten, ob eine Verbesserung von Empathie und ‚Compassion' tatsächlich vom Laborkontext in den zwischenmenschlichen Alltag erfolgreich übertragen werden kann.

Literaturverzeichnis

Baron, J. H. (2009, June 1). Sailors' scurvy before and after James Lind – a reassessment. Nutrition Reviews, 67(6), 315–332. Retrieved from https://academic.oup.com/nutritionreviews/article/67/6/315/1807435

Baron-Cohen, S. (1995). *Mindblindness*. Cambridge, Massachussetts, MIT Press.

Baskin-Sommers, A. R., J. J. Curtin and J. P. Newman (2011). "Specifying the attentional selection that moderates the fearlessness of psychopathic offenders." *Psychol Sci* **22**(2): 226–234.

Biringen, Z., E. Benjamin, B. Mayer, A. Fuchs and S. C. Herpertz (2019). Emotional Availability (EA) Scales. Manual for Medical Doctor-Patient Relationship (EAS-MD). Ncht veröffentlicht.

Biringen, Z. J. A. J. o. O. (2000). "Emotional availability: Conceptualization and research findings." *Am J Orthopsychiatry* **70**(1): 104–114.

Christov-Moore, L., E. A. Simpson, G. Coude, K. Grigaityte, M. Iacoboni and P. F. Ferrari (2014). "Empathy: gender effects in brain and behavior." *Neurosci Biobehav Rev* **46 Pt 4**: 604–627.

Davis, M. H. (1983). "Measuring individual differences in empathy: Evidence for a multidimensional approach." *Journal of Personality and Social Psychology* **44**(1): 113.

Dawel, A., R. O'Kearney, E. McKone and R. Palermo (2012). "Not just fear and sadness: meta-analytic evidence of pervasive emotion recognition deficits for facial and vocal expressions in psychopathy." *Neurosci Biobehav Rev* **36**(10): 2288–2304.

Decety, J., I. B. Bartal, F. Uzefovsky and A. Knafo-Noam (2016). "Empathy as a driver of prosocial behaviour: highly conserved neurobehavioural mechanisms across species." *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* **371**(1686): 20150077.

Decety, J. and C. Lamm (2006). "Human empathy through the lens of social neuroscience." *ScientificWorldJournal* **6**: 1146–1163.

Decety, J., K. L. Lewis and J. M. Cowell (2015). "Specific electrophysiological components disentangle affective sharing and empathic concern in psychopathy." *J Neurophysiol* **114**(1): 493–504.

Decety, J. and Y. Moriguchi (2007). "The empathic brain and its dysfunction in psychiatric populations: implications for intervention across different clinical conditions." *Biopsychosoc Med* **1:** 22.

Decety, J., L. Skelly, K. J. Yoder and K. A. Kiehl (2014). "Neural processing of dynamic emotional facial expressions in psychopaths." *Soc Neurosci* **9**(1): 36–49.

Dziobek, I., S. Preissler, Z. Grozdanovic, I. Heuser, H. R. Heekeren and S. Roepke (2011). "Neuronal correlates of altered empathy and social cognition in borderline personality disorder." *Neuroimage* **57**(2): 539–548.

Eva, K. W., J. Rosenfeld, H. I. Reiter and G. R. Norman (2004). "An admissions OSCE: the multiple mini-interview." *Medical Eucation* **38**(3): 314–326.

Fonagy, P., P. Luyten, E. Allison and C. Campbell (2017). "What we have changed our minds about: Part 2. Borderline personality disorder, epistemic trust and the developmental significance of social communication." *Borderline Personal Disord Emot Dysregul* **4**: 9.

Fuchs, T. (2017). *Selbsterleben und Selbststörungen. Funktions- und störungsorientiertes Vorgehen*. C. F. Herpertz SC, Lieb K (Hrsg.). München, Urban & Fischer.

Gallese, V. (2007). "Before and below 'theory of mind': Embodied simulation and the neural correlates of social cognition." *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* **362**(1480): 659–669.

Gardner, H. (1983). *The theory of multiple intelligences*, Heinemann.

Goleman, D. (1996). "Emotional intelligence. Why it can matter more than IQ." *Learning* **24**(6): 49–50.

Happe, F. and U. Frith (2014). "Annual research review: Towards a developmental neuroscience of atypical social cognition." *J Child Psychol Psychiatry* **55**(6): 553–557.

Heider, F. (1958/1977). Psychologie der interpersonalen Beziehungen. (Original: *The Psychology of Interpersonal Relations*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale NJ, 1958). Stuttgart, Klett Verlag.

Hermans, K., R. Achterhof, I. Myin-Germeys, Z. Kasanova, O. Kirtley and M. Schneider (2019). "Improving ecological validity in research on social cognition." *Social Cognition in Psychosis*: 249–268.

Herpertz, S. C. (2018). "A new approach to classifying personality disorders." *Fortschr Neurol Psychiatr* **86**(3): 150–155.

Herpertz, S. C., K. Bertsch and H. Jeung (2018). "Neurobiology of Criterion A: self and interpersonal personality functioning." *Curr Opin Psychol* **21**: 23–27.

Izurieta Hidalgo, N. A., R. Oelkers-Ax, K. Nagy, F. Mancke, M. Bohus, S. C. Herpertz and K. Bertsch (2016). "Time course of facial emotion processing in women with borderline personality disorder: an ERP study." *J Psychiatry Neurosci* **41**(1): 16–26.

Jeung, H. and S. C. Herpertz (2014). "Impairments of interpersonal functioning: empathy and intimacy in borderline personality disorder." *Psychopathology* **47**(4): 220–234.

Kanske, P., A. Bockler and T. Singer (2017). "Models, Mechanisms and Moderators Dissociating Empathy and Theory of Mind." *Curr Top Behav Neurosci* **30**: 193–206.

Klimecki, O. M., S. Leiberg, M. Ricard and T. Singer (2014). "Differential pattern of functional brain plasticity after compassion and empathy training." *Soc Cogn Affect Neurosci* **9**(6): 873–879.

Mayer, J. D., P. Salovey and D. R. Caruso (2002). "Mayer-Salovey-Caruso emotional intelligence test (MSCEIT) item booklet."

Mier, D., S. Lis, C. Esslinger, C. Sauer, M. Hagenhoff, J. Ulferts, B. Gallhofer and P. Kirsch (2013). "Neuronal correlates of social cognition in borderline personality disorder." *Soc Cogn Affect Neurosci* **8**(5): 531–537.

Oberwelland, E., L. Schilbach, I. Barisic, S. C. Krall, K. Vogeley, G. R. Fink, B. Herpertz-Dahlmann, K. Konrad and M. Schulte-Ruther (2016). "Look into my eyes: Investigating joint attention using interactive eye-tracking and fMRI in a developmental sample." *Neuroimage* **130**: 248–260.

Oppenheim, D. J. D. (2012). "Emotional availability: Research advances and theoretical questions." *Dev Psychopathol* **24**(1): 131–136.

Pau, A., K. Jeevaratnam, Y. S. Chen, A. A. Fall, C. Khoo and V. D. Nadarajah (2013). "The Multiple Mini-Interview (MMI) for student selection in health professions training - a systematic review." *Med Teach* **35**(12): 1027–1041.

Petrides, K. and A. Furnham (2009). Trait emotional intelligence questionnaire (TEIQue), Technical Manual. London: London Psychometric Laboratory.

Preusche, I. and C. Lamm (2016). "Reflections on empathy in medical education: What can we learn from social neurosciences?" *Adv Health Sci Educ Theory Pract* **21**(1): 235–249.

Riess, H., J. M. Kelley, R. W. Bailey, E. J. Dunn and M. Phillips (2012). "Empathy training for resident physicians: a randomized controlled trial of a neuroscience-informed curriculum." *J Gen Intern Med* **27**(10): 1280–1286.

Rindermann, H. (2009). *Emotionale-Kompetenz-Fragebogen: EKF; Einschätzung emotionaler Kompetenzen und emotionaler Intelligenz aus Selbst-und Fremdsicht*. Göttingen, Hogrefe.

Ripoll, L. H., R. Snyder, H. Steele and L. J. Siever (2013). "The neurobiology of empathy in borderline personality disorder." *Curr Psychiatry Rep* **15**(3): 344.

Roberts, C., P. Khanna, L. Rigby, E. Bartle, A. Llewellyn, J. Gustavs, L. Newton, J. P. Newcombe, M. Davies, J. Thistlethwaite and J. Lynam (2018). "Utility of selection methods for specialist medical training: A BEME (best evidence medical education) systematic review: BEME guide no. 45." *Med Teach* **40**(1): 3–19.

Rost, D. H. (2008). "Multiple Intelligenzen, multiple Irritationen." *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie* **22**(2): 97–112.

Salovey, P. and J. D. Mayer (1990). "Emotional intelligence." *Imagination, Cognition and Personality* **9**(3): 185–211.

Scheibel, S. (2004). *Soziale und Emotionale Intelligenz-Begriff: Geschichte, Facetten, Messung*, GRIN Verlag.

Schurz, M., J. Radua, M. G. Tholen, L. Maliske, D. S. Margulies, R. B. Mars, J. Sallet and P. Kanske (2020). "Toward a hierarchical model of social cognition: A neuroimaging meta-analysis and integrative review of empathy and theory of mind." *Psychol Bull*.

Seara-Cardoso, A., C. L. Sebastian, E. Viding and J. P. Roiser (2016). "Affective resonance in response to others' emotional faces varies with affective ratings and psychopathic traits in amygdala and anterior insula." *Soc Neurosci* **11**(2): 140–152.

Sharp, C., C. Ha, C. Carbone, S. Kim, K. Perry, L. Williams and P. Fonagy (2013). "Hypermentalizing in adolescent inpatients: treatment effects and association with borderline traits." *J Pers Disord* **27**(1): 3–18.

Söderberg, A. K., C. Elfors, M. H. Larsson, F. Falkenström and R. J. P. R. Holmqvist (2014). "Emotional availability in psychotherapy: The usefulness and validity of the Emotional Availability Scales for analyzing the psychotherapeutic relationship." *Psychother Res* **24**(1): 91–102.

Stemler, S. E. and R. J. Sternberg (2006). "Using situational judgment tests to measure practical intelligence." *Situational judgment tests: Theory, measurement, and application*: 107–131.

Strathearn, L. (2011). "Maternal neglect: oxytocin, dopamine and the neurobiology of attachment." *J Neuroendocrinol* **23**(11): 1054–1065.

Strauß, B. and S. C. Herpertz (2016). *Bindung, Empathiefähigkeit, Intersubjektivität. Psychotherapie Funktions-und Störungsorientiertes Vorgehen*, Elsevier: 215–231.

Telzer, E. H., Y. Qu, D. Goldenberg, A. J. Fuligni, A. Galvan and M. D. Lieberman (2014). "Adolescents' emotional competence is associated with parents' neural sensitivity to emotions." *Front Hum Neurosci* **8**: 558.

Timmermann, M., H. Jeung, R. Schmitt, S. Boll, C. M. Freitag, K. Bertsch and S. C. Herpertz (2017). "Oxytocin improves facial emotion recognition in young adults with antisocial personality disorder." *Psychoneuroendocrinology* **85**: 158–164.

Walter, H. (2017). "Research domain criteria (RDoC): Psychiatric research as applied cognitive neuroscience." *Nervenarzt* **88**(5): 538–548.

Zeddies, T. J. (1999). "Becoming a psychotherapist: The personal nature of clinical work, emotional availability and personal allegiances." *Psychotherapy* **36**(3): 229.

Über die Autorin

Sabine C. Herpertz studierte Medizin in Bonn, promovierte in Frankfurt a.M. und habilitierte in Psychiatrie und Psychotherapie an der RWTH Aachen. Sie ist Fachärztin für Psychiatrie und Psychotherapie, Neurologie sowie Psychotherapeutische Medizin. Sie bekleidete zwischen 2002 und 2003 eine Professur für Experimentelle Psychopathologie an der RWTH Aachen, bevor sie zwischen 2003 und 2009 den Lehrstuhl für Psychiatrie und Psychotherapie an der Universität Rostock übernahm. Seit 2009 ist sie Lehrstuhlinhaberin für Allgemeine Psychiatrie am Universitätsklinikum Heidelberg und Ärztliche Direktorin der gleichnamigen Klinik. Seit 2018 ist sie Studiendekanin der Heidelberger Medizinischen Fakultät.

Korrespondenzadresse:
Prof. Dr. med. Sabine C. Herpertz
Klinik für Allgemeine Psychiatrie am Zentrum für Psychosoziale Medizin
Medizinische Fakultät der Universität Heidelberg
Voßstr. 2
69115 Heidelberg

E-Mail: sabine.herpertz@uni-heidelberg.de
Homepage: https://www.klinikum.uni-heidelberg.de/en/personen/prof-dr-med-sabine-c-herpertz-1878

Entwicklung der Intelligenz im Zusammenhang mit der Nutzung digitaler Medien

KATAJUN LINDENBERG & ULRIKE BASTEN

Institut für Psychologie, Goethe Universität Frankfurt & Fachbereich Psychologie, Universität Koblenz-Landau

Zusammenfassung

Die psychologische Forschung beschäftigt sich zunehmend mit den Wechselwirkungen zwischen der Nutzung digitaler Spiele und der Intelligenzentwicklung bei Kindern und Jugendlichen. In diesem Beitrag werden die Befunde der biologisch-psychologischen Kognitionsforschung zur Wirkung von Gaming auf Aufmerksamkeitsprozesse und exekutive Funktionen sowie die Befunde der klinisch-psychologischen Wissenschaft zu kognitiven Entwicklungseinbußen durch eine süchtige Videospielnutzung integriert. Für spezifische kognitive Fähigkeiten wie Verarbeitungsgeschwindigkeit, Aufmerksamkeitskontrolle und räumliche Kognition sind positive Effekte von Videospielen gut belegt. Medien-Multitasking dagegen wird mit schwächeren exekutiven Funktionen in Zusammenhang gebracht und beeinträchtigt die Leistung in parallel durchgeführten Aufgaben. Häufiges Gaming führt zu strukturellen Veränderungen im mesolimbischen Belohnungssystems, die sich auch bei Menschen mit einer süchtigen Videospielnutzung finden. Solche hirnstrukturellen Veränderungen werden mit einer Sensitivierung des Belohnungssystems und der Aufrechterhaltung süchtigen Computerspielverhaltens in Verbindung gebracht, das mit Entwicklungseinbußen und reduzierten akademischen Leistungen assoziiert ist. Zur Integration der Befunde aus den Bereich Kognition und Sucht wird ein Modell zur wechselseitigen Beeinflussung von Intelligenz und Mediennutzung vorgestellt, in dem Aufmerksamkeitskontrolle, Belohnungssensitivität sowie ein Entscheidungsprozess, der

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24387

erwartete positive gegen mögliche negative Verhaltenskonsequenzen abwägt, als vermittelnde Faktoren postuliert werden. Wir nehmen an, dass eine hohe Belohnungssensitivität und niedrige Aufmerksamkeitskontrolle Risikofaktoren für ungünstiges Mediennutzungsverhalten darstellen, das unproduktives Medien-Multitasking, exzessives Gaming und süchtige Videospielnutzung sowie Leistungseinbußen aufgrund der Vernachlässigung anderer Lebensbereiche (Schule, Studium, Beruf) einschließt. Auf der anderen Seite stellen eine moderate Belohnungssensitivität sowie eine hohe Fähigkeit zur Aufmerksamkeitskontrolle Schutzfaktoren dar, die den zielgerichteten Einsatz digitaler Medien und die kontrollierte Nutzung begünstigen. Wir gehen davon aus, dass die Intelligenz eine wichtige Rolle für das individuelle Muster der Mediennutzung und ihre Folgen spielt.

1 Einleitung

Die Anzahl verschiedener digitaler Medien und ihre Verfügbarkeit hat in den letzten zwei Jahrzehnten stark zugenommen. Bei Kindern und Jugendlichen steht insbesondere die Nutzung von Videospielen im Fokus der kognitiv- sowie klinisch-psychologischen Forschung. Im Jahr 2020 verbrachten Jugendliche in Deutschland im Durchschnitt 258 Minuten am Tag – also mehr als vier Stunden am Tag – online (Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest, 2020). Nach Freundschaften (mit 93% Zustimmung) wird das Smartphone mit 69% Zustimmung als das prävalenteste Interesse von 6–13-jährigen Kindern benannt, gleichauf mit Sport (Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest, 2018). Spätestens mit dem Übergang in die weiterführende Schule besitzen die meisten Kinder ihr eigenes Handy oder Smartphone, bei den 12- bis 19-jährigen Jugendlichen sind es bereits 96%. Eine feste Spielekonsole (z. B. Xbox, Playstation, Wii oder Switch) besitzen 70% der Jugendlichen (Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest, 2020). Die Nutzung digitaler Spiele hat einen prominenten Platz im alltäglichen Leben von Kindern und Jugendlichen erhalten und gilt als unterhaltsamer Zeitvertreib. Daraus ergibt sich die spannende Frage, wie der häufige Gebrauch moderner Medien sich auf unsere kognitiven Funktionen und deren Entwicklung auswirkt und umgekehrt, wie sich Intelligenz auf die funktionale Nutzung von Medien auswirkt. Die psychologische Forschung zu dieser Frage hat sich insbesondere auf Aufmerksamkeitsprozesse und Exekutive Funktionen sowie Entwicklungseinbußen durch süchtige Videospielnutzung konzentriert. Bezüglich der Entwicklung kognitiver Fähigkeiten stehen schwerpunktmäßig die potenziellen Effekte von (a) Videospielen (insbes. Action-Videospielen) und (b) Medien-Multitasking auf Aufmerksamkeitsprozesse und Exekutive Funktionen im Fokus der Forschung. Dieses

Kapitel gibt einen Überblick zu beiden Forschungsfeldern und geht außerdem auf die Bedeutung süchtiger Videospielnutzung für die kognitive Entwicklung ein.

2 Einfluss von Videospielen auf die kognitive Entwicklung

Die Effekte von Videospielen auf die kognitive Entwicklung und kognitive Fähigkeiten werden seit nunmehr dreißig Jahren erforscht. Man muss in dieser Forschung verschiedene Arten von Videospielen (*Genres*) unterscheiden. Wir erwarten z. B. für Ego-Shooter nicht die gleichen Effekte wie für Strategie-Spiele. Es werden im Bereich der Videospiele verschiedene Genres unterschieden (z. B. Actionspiele, Sport- und Racing-Spiele, Strategiespiele, Rollenspiel usw.). Diese Genres sind jedoch nicht scharf gegeneinander abgegrenzt und nicht einheitlich definiert (Faisal & Peltoniemi, 2018). Außerdem scheinen die traditionellen Genres in den letzten Jahren in hybriden Formaten von Videospielen mehr und mehr zu verschmelzen (Dale & Green, 2017).

Erste Studien in den 90er Jahren legten nahe, dass Videospiele zu Verbesserungen in kognitiven Funktionen führen können. Schon sechs Stunden Spiel mit dem Videospiel Tetris führten bei Jugendlichen ohne vorherige Videospielerfahrung zu einer Verbesserung der Leistung in unabhängigen Aufgaben zur mentalen Rotation und räumlichen Visualisierung, die größer waren als bei Jugendlichen, die im Rahmen der Studie kein Tetris gespielt hatten (Okagaki & Frensch, 1994). Die Idee liegt nahe, dass Videospiele eine Art intensives kognitives Training darstellen können, für das sich möglichweise ein Transfer auf andere Aufgaben zum Test kognitiver Funktionen ergibt. Auf die frühen Studien der 90er Jahre folgten viele weitere, die den Zusammenhang von Videospielerfahrung und kognitiven Funktionen untersucht haben. Bei vielen dieser Studien handelt es sich um querschnittliche Korrelationsstudien. Diese Studien fanden typischerweise einen moderaten aber gut replizierten positiven Zusammenhang zwischen dem individuellen Ausmaß an Erfahrung mit Videospielen (insbes. mit Action-Videospielen) und der Leistung in Labortestungen von Aufmerksamkeitsfunktionen (Bavelier & Green, 2019). Personen, die in ihrer Freizeit häufig und lange Videospiele spielen (*Gaming*), zeigen bessere Leistungen in verschiedenen kognitiven Funktionen, insbesondere in der Verarbeitungsgeschwindigkeit, der Aufmerksamkeitskontrolle und in räumlicher Kognition (Bediou et al., 2018).

Während der Zusammenhang zwischen Videospielerfahrung und kognitiven Funktionen, insbes. Aufmerksamkeitsfunktionen, über querschnittliche Studien gut belegt ist, erlaubt uns der korrelative Ansatz dieser Studien keinen Rückschluss auf die zugrunde liegenden Ursachen. Es könnte sein, dass die Erfahrung mit Videospielen die individuelle Informationsverarbeitung im Sinne eines kognitiven Trainings ursächlich so verändert, dass sich daraus verbesserte Aufmerksamkeitsfähigkeiten ergeben. Die Befunde könnten umgekehrt aber auch damit erklärt werden, dass Personen mit besseren Fähigkeiten im Bereich der Aufmerksamkeitskontrolle schlicht besser geeignet sind, Videospiele zu spielen. Sie kommen mit den Anforderungen der Spiele besser zurecht, haben daher mehr Freude am Spiel und bleiben länger dabei. Neben der weiterhin zu bedenkenden Möglichkeit der Beeinflussung beider Variablen durch eine Drittvariable könnte die Ursache des Zusammenhangs auch in einer Interaktion der beiden Faktoren liegen. Das hieße in diesem Falle, Aufmerksamkeitsfähigkeiten und Videospielerfahrung verstärkten sich wechselseitig.

Interventionsstudien, in denen Personen ohne – oder mit sehr wenig – Videospielerfahrung im Rahmen einer Studie in einem bestimmten Umfang Videospiele spielen und Verbesserungen kognitiver Leistungen von einer Testung vor dem Videospielen zu einer Testung nach dem Training mit entsprechenden Verbesserungen einer aktiven Kontrollgruppe verglichen werden, legen nahe, dass der hier interessierende Zusammenhang zumindest teilweise darauf zurückzuführen ist, dass die Erfahrungen in Videospielen tatsächlich einen ursächlichen Effekt auf die Verbesserung von Verarbeitungsgeschwindigkeit, Aufmerksamkeitskontrolle und räumlicher Kognition haben (Bavelier & Green, 2019; Bediou et al., 2018). Über verschiedene Aufgaben und Antwortmodalitäten hinweg führte Übung in Videospielen zu allgemein schnelleren Reaktionszeiten (Dye, Green, & Bavelier, 2009). Dass Personen mit Videospielerfahrung dabei keine erhöhte Fehlerrate aufweisen, spricht dafür, dass sie nicht einfach impulsiver antworten (Mack & Ilg, 2014). Vielmehr legen Modellierungen der kognitiven Prozesse, die den Reaktionszeiten zugrunde liegen, nahe, dass Videospieler bei Entscheidungen zwischen Antwortoptionen Informationen schneller akkumulieren (Green, Pouget, & Bavelier, 2010). In diesem Sinne können die schnelleren Reaktionszeiten bei Videospielern als Indikator einer erhöhten Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit (*processing speed*) interpretiert werden.

Es ist außerdem sehr gut belegt, dass Videospiele zu Verbesserungen in verschiedenen Aufmerksamkeitsfunktionen führen (Bediou et al., 2018). Während diese Effekte zunächst als Verbesserung selektiver Aufmerksamkeit ausgelegt wurden (Green & Bavelier, 2003), werden sie heute – noch grundlegender – als Zeichen einer verbesserten Aufmerksamkeitskontrolle verstanden (Bavelier & Green, 2019; Chisholm & Kingstone, 2015). Aufmerksamkeitskontrolle unterstützt verschiedene kognitive Funktionen, die bei Videospielern verbessert sind – und für die Interventionsstudien nahelegen, dass diese Verbesserungen auch ursächlich auf das Training durch Videospiele zurückzuführen sind. Eine verbesserte Aufmerksamkeitskontrolle erklärt insbesondere bessere Leistungen in der Aufrechterhaltung selektiver Aufmerksamkeit durch Fokussierung auf zielrelevante Information bei gleichzeitiger Inhibition irrelevanter Information (Chisholm et al., 2010; Chisholm & Kingstone, 2012, 2015). Weiterhin erleichtert eine bessere Aufmerksamkeitskontrolle den zielgerichteten Wechsel zwischen selektiver und geteilter Aufmerksamkeit sowie den Wechsel zwischen verschiedenen Aufgaben. Letzteres äußert sich in reduzierten Wechselkosten in Laborstudien zum Aufgabenwechsel (Green, Sugarman, Medford, Klobusicky, & Bavelier, 2012).

Schließlich wurden als Effekt von Videospielen auch Verbesserungen in räumlicher Kognition beobachtet (Bediou et al., 2018). Videospiel führte zu verbesserten Leistungen in Aufgaben zum räumlichen Arbeitsgedächtnis (Blacker & Curby, 2013; Wilms, Petersen, & Vangkilde, 2013) sowie räumlicher Aufmerksamkeit und mentaler Rotation (Feng, Spence, & Pratt, 2007; Spence, Yu, Feng, & Marshman, 2009). Der Nachweis, dass Videospiele ursächlich zur Verbesserung von Aufmerksamkeitsfunktionen führen, schließt dabei nicht das auch intuitiv plausible Modell aus, dass in Wahrheit eine wechselseitige positive Verstärkung von Videospiel und Aufmerksamkeitsfähigkeiten stattfindet. Dass also höhere Fähigkeiten zur Aufmerksamkeitskontrolle einerseits das Videospielen wahrscheinlicher machen, während andererseits und gleichzeitig sich das Gaming positiv auf die Aufmerksamkeitsfähigkeiten auswirkt.

Die hier beschriebenen Verbesserungen in Aufmerksamkeitsfunktionen wurden insbesondere für den Gebrauch von Action-Videospielen berichtet, die hohe Anforderungen an die Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung stellen. Die Spieler müssen sehr schnell auf sich verändernde, teils unerwartete Stimuli reagieren und ihr Verhalten anpassen, wenn sich Konflikte ergeben. Aufmerksamkeit und kognitive Kontrolle müssen über längere Zeit aufrechterhalten und Entscheidun-

gen unter Zeitdruck gefällt werden. Die Spieler müssen relevante Informationen beachten und gleichzeitig irrelevante Informationen ausblenden. Dabei erfordern die Videospiele eine Orientierung in 3D-Räumen, in denen die Spieler sich Positionen merken müssen, deren internale Repräsentationen manipuliert werden müssen. Man geht davon aus, dass eine substantielle Belastung des Aufmerksamkeitssystems durch perzeptuelle, kognitive und motorische Prozesse (*attentional load*) sowie besonders hohe bzw. im Verlaufe des Spiels – entsprechend den Leistungen der Spieler – stetig ansteigende Anforderungen an eine flexible Kontrolle der Aufmerksamkeit die für den Erfolg der Spiele im Sinne eines kognitiven Trainings entscheidenden Faktoren sind – die gleichzeitig Action-Videospiele gegenüber anderen Genres von Videospielen besonders auszeichnen.

Besonders intensiv ist das Training durch Action-Videospiele auch deswegen, weil die Adaptation des Anforderungsniveaus in Verbindung mit ausgefeilten Verstärkerplänen die Spieler langfristig an das Spielen bindet. Gleichzeitig ist mit diesen Verstärkungsmechanismen ein erhöhtes Risiko für die Entwicklung einer Computerspielstörung – also einer psychischen Störung – verbunden, die sich wiederum negativ auf die kognitive Entwicklung auswirken kann (s. u., *Einfluss von süchtiger Videospielnutzung auf die kognitive Entwicklung*). Generell muss jedoch berücksichtigt werden, dass Videospiele mit sehr unterschiedlichen Anforderungen verbunden sind und nicht jedes Videospiel mit den hier beschriebenen Verbesserungen in kognitive Fähigkeiten verbunden sein wird. Dabei ist nicht nur zwischen verschiedenen Genres zu unterscheiden (s. o.), sondern mehr noch zwischen spezifischen Attributen und den konstitutiven kognitiven Anforderungen verschiedener Spiele (Baniqued et al., 2013; Bedwell, Pavlas, Heyne, Lazzara, & Salas, 2012).

Für jedwede Form der stabilen Verbesserung in kognitiven Fähigkeiten kann angenommen werden, dass sie auf Veränderungen in den der Informationsverarbeitung zugrunde liegenden neuronalen Strukturen und Prozessen zurückzuführen ist. In der Tat konnte beobachtet werden, dass Gaming zu Veränderungen in der Struktur und Funktionsweise des Gehirns führt, welche die Effekte auf kognitive Fähigkeiten möglicherweise vermitteln (Palaus, Marron, Viejo-Sobera, & Redolar-Ripoll, 2017). In einer Studie mit dem Videospiel Super Mario wurde als Effekt eines 2-monatigen Trainings von min. 30 Minuten pro Tag eine Zunahme der grauen Substanz in drei Regionen des Gehirns beobachtet, die mit räumlicher Orientierung und Aufmerksamkeitskontrolle in Verbindung gebracht werden (Kühn,

Gleich, Lorenz, Lindenberger, & Gallinat, 2014). Weiterhin ging die bei geübten Videospielern besser ausgeprägte Fähigkeit zur Inhibition irrelevanter Distraktorinformation in Messungen der Hirnaktivität mittels Elektroenzephalografie (EEG) mit einer reduzierten neuronalen Antwort auf irrelevante Reize einher (Krishnan, Kang, Sperling, & Srinivasan, 2013; Mishra, Zinni, Bavelier, & Hillyard, 2011).

Neben Veränderungen in Hirnregionen, die vorrangig mit der Unterstützung kognitiver Prozesse in Verbindung gebracht werden, wurden auch Veränderungen im mesolimbischen Belohnungssystem des Gehirns beobachtet. In einer Stichprobe von 14-Jährigen zeigten Jugendliche mit mehr Videospielerfahrung ein größeres Volumen des linken ventralen Striatums (Kühn et al., 2011). Die Autoren spekulieren, dass dieses strukturelle Merkmal ein Korrelat veränderter Belohnungsverarbeitung sein könnte. Aktivierungsbefunde legen nahe, dass Videospielerfahrung insbesondere die Fähigkeit zur Aufrechterhaltung der Reaktivität des neuronalen Belohnungssystems verbessern könnte (Lorenz, Gleich, Gallinat, & Kühn, 2015). Einige Autoren führen das Potenzial von Videospielen, schon innerhalb relativ kurzer Zeit (einiger Tage oder Wochen) zu Veränderungen von Hirnstrukturen und -funktionen zu führen, darauf zurück, dass die in den Spielen angestoßenen Belohnungsprozesse in besonderem Maße neuronale Plastizität anregen, von der dann auch die Entwicklung kognitiver Verarbeitungsfähigkeiten profitiert (Bavelier & Green, 2019; Kilgard & Merzenich, 1998). Ebendiese Befunde werden gleichzeitig in Modellen zur Entstehung und Aufrechterhaltung der Computerspielstörung diskutiert (s. u., *Einfluss von süchtiger Videospielnutzung auf die kognitive Entwicklung*).

3 Einfluss von Medien-Multitasking auf die kognitive Entwicklung

Medien-Multitasking beschreibt den zeitgleichen Gebrauch verschiedener Medien. Prinzipiell bezieht sich der Begriff genauso auf analoge wie auf digitale Medien. Jedoch ergibt sich eine sehr viel größere Vielfalt und damit ein deutlich erhöhtes Potenzial zum Multitasking durch die Vielzahl moderner digitaler Medien und Medienanwendungen. Medien-Multitasking betreibt z. B. ein Schüler oder Student, der am Computer einen Aufsatz schreibt, zwischendurch Internet-Recherchen anstellt und Nachrichten in sozialen Medien beantwortet, während im Hintergrund der Fernseher läuft. Die meisten Studien erfassen das Ausmaß an Medien-Multitasking über die im Selbstbericht durch Studienteilnehmer angege-

bene Anzahl der Medien, die in einer typischen Mediennutzungsstunde insgesamt genutzt werden. Dazu gehören Printmedien, Fernsehen, Musik, Videospiele, Telefon, Textnachrichten, Chats, E-Mail, Web-Surfing und andere Videoanwendungen (Ophir, Nass, & Wagner, 2009).

Welchen Effekt hat Medien-Multitasking auf unsere kognitiven Prozesse und Leistungen? Diese Frage lässt sich in zwei Aspekte aufgliedern: 1. die unmittelbaren Auswirkungen auf die kognitive Performanz im Moment des Multitaskings und 2. potenzielle langfristige Auswirkungen auf die allgemeine Art der Informationsverarbeitung. Die erste Teilfrage lässt sich aufgrund der Studienlage sehr eindeutig beantworten. Medien-Multitasking führt in dem Moment, in dem Medien parallel zu einer definierten kognitiven Hauptaufgabe genutzt werden, zu einer Beeinträchtigung der Performanz in der Hauptaufgabe. Diese Beeinträchtigung wird auf eine zusätzliche Inanspruchnahme kognitiver Ressourcen durch das Multitasking zurückgeführt, welche dazu führt, dass nicht mehr ausreichend Ressourcen für die Hauptaufgabe zur Verfügung stehen. Diese Distribution kognitiver Ressourcen führt zu Leistungsbeeinträchtigungen bei kognitiven Aufgaben im Moment und schlägt sich langfristig auch in schlechteren Noten nieder. Das ist gut belegt für die Nutzung von Medien während des Unterrichts bzw. einer Vorlesung (z. B. Video- und Handyanwendungen, insbes. Chats) sowie für die Nutzung von Medien parallel zur Anfertigung von Hausaufgaben und generell beim Lesen (Bowman, Levine, Waite, & Gendron, 2010; Carrier, Rosen, Cheever, & Lim, 2015; Jacobsen & Forste, 2011; Junco & Cotten, 2011; Rosen, Mark Carrier, & Cheever, 2013; Wilmer, Sherman, & Chein, 2017; Wood et al., 2012). Hirnbildgebungsstudien legen darüber hinaus nahe, dass sich auch die neuronalen Mechanismen von Lernprozessen mit und ohne Distraktion durch Multitasking-Anforderungen unterscheiden (Foerde, Knowlton, & Poldrack, 2006). Multitasking, wie es sich in Studien im Labor z. B. durch die Einführung einer Sekundäraufgabe parallel zu einer Gedächtnisaufgabe ergibt, führt zu Beeinträchtigungen des deklarativen Lernens, die mit reduzierter Aktivität in für die Gedächtnisenkodierung zentralen Strukturen des medialen Temporallappens in Zusammenhang gebracht wurden (Poldrack & Foerde, 2008).

Für die Entwicklung kognitiver Fähigkeiten und langfristige Prägung von Informationsverarbeitungsprozessen ist jedoch die zweite Frage noch interessanter: Verändert der ständige Umgang mit verschiedensten Medien unsere Art zu Denken? Führt Medien-Multitasking (unabhängig von den unmittelbaren Auswirkungen) zu

einer grundsätzlich veränderten Informationsverarbeitung? Die Vorstellung, dass das so sein könnte, lässt sich mit der Idee begründen, dass gewohnheitsmäßiges Medien-Multitasking im Alltag eine Art kognitives Training darstellen könnte, dass zu dauerhaft veränderter Informationsverarbeitung führen könnte – möglicherweise aufgrund veränderter neuronaler Verarbeitung. Im Sinne eines kognitiven Trainings könnte man erwarten, dass Personen, die viel Medien-Multitasking betreiben, Übung darin haben, viele Dinge gleichzeitig zu tun und besonders gut in der Lage sind, flexibel zwischen Aufgaben zu wechseln und mehrere kognitive Anforderungen gleichzeitig zu bewältigen.

Eine erste, viel beachtete Studie zu diesem Thema führte jedoch zu dem überraschenden Befund, dass im Gegenteil ein negativer Zusammenhang zwischen dem Ausmaß gewohnheitsmäßigen Medien-Multitaskings und der Fähigkeit, mehrere Aufgaben gleichzeitig zu bewältigen, beobachtet wurde. Personen, die laut Selbstauskunft häufig mehrere Medien parallel nutzten, schnitten in einer Laboraufgabe zum Aufgabenwechsel (*task switching*) sowie in verschiedenen weiteren Aufgaben zur Erfassung kognitiver Kontrollfunktionen schlechter ab als Personen, die im Alltag wenig Medien-Multitasking betrieben (Ophir et al., 2009). Die Autoren spekulierten, dass die Befunde damit zu erklären sein könnten, dass starke Medien-Multitasker irrelevante Informationen aus der Umgebung und aus dem Gedächtnis sowie irrelevante Aufgaben (*task sets*) schlechter ausblenden könnten. Das wiederum könnte auf eine Verzerrung kognitiver Kontrollfunktionen zugunsten einer breiten (und damit gleichzeitig weniger fokussierten) Berücksichtigung und Verarbeitung von Information zurückzuführen sein (*breadth-biased cognitive control*; Ophir et al., 2009). Personen, die ausgeprägtes Medien-Multitasking betreiben, würden generell mit einer stärker bottom-up getriebenen Aufmerksamkeitskontrolle operieren – bei gleichzeitig schwächerer top-down Kontrolle. Die Idee eines breiteren Aufmerksamkeitsfokus wird gestützt durch weitere Studien, die nahelegen, dass starke Medien-Multitasker auch in einfachen Aufmerksamkeitsaufgaben mehr Informationen aus der Umgebung aufnehmen, als für die Bearbeitung der Aufgabe nötig wäre (Cain & Mitroff, 2011).

Folgende Studien konnten die von Ophir et al. (2009) berichteten Zusammenhänge von Medien-Multitasking mit schlechterer Performanz bei Aufgabengabenwechsel und Distraktorinhibition jedoch nur teilweise replizieren (Uncapher & Wagner, 2018). Für Aufgabenwechsel- und Doppelaufgaben-Paradigmen (*task switching* und *dual task*) sind die Befunde besonders inkonsistent. Nachdem die

Pionierstudie von Ophir und Kollegen nahegelegt hatte, dass Medien-Multitasker in Aufgabenwechsel-Paradigmen schlechter abschneiden (höhere Reaktionszeitkosten zeigen), ergaben sich in folgenden Studien zur Wechselfähigkeit im Labor neben einer Replikation (Wiradhany & Nieuwenstein, 2017) und einigen Nullbefunden (Baumgartner, Weeda, van der Heijden, & Huizinga, 2014; Minear, Brasher, McCurdy, Lewis, & Younggren, 2013) auch Hinweise auf eine bei Medien-Multitaskern verbesserte Fähigkeit, zwischen Aufgaben zu wechseln (Alzahabi & Becker, 2013; Elbe, Sörman, Mellqvist, Brändström, & Ljungberg, 2019). Für Arbeitsgedächtnis-Aufgaben zeigten einige Studien schlechtere Leistungen bei Medien-Multitaskern, einige Studien berichten Nulleffekte, keine Studie berichtete jedoch ein Vorteil von Multitaskern in Arbeitsgedächtnisaufgaben (Uncapher & Wagner, 2018).

Insbesondere scheinen Medien-Multitasker in einfachen Arbeitsgedächtnisaufgaben dann schlechter abzuschneiden, wenn die Aufgabe das Arbeitsgedächtnis nur relativ wenig belastet. Es scheint, als würden, wenn das kognitive System nicht ausgelastet ist, auch aufgabenirrelevante Informationen mit Aufmerksamkeit bedacht und verarbeitet. Diese zusätzliche irrelevante Information lenke von der eigentlich zu bearbeitenden Aufgabe ab und führe zu vermehrten Fehlern. In ihrer Überblicksarbeit spekulieren Uncapher und Wagner (2018), dass die Ursache für die Verarbeitung irrelevanter Informationen bei geringer kognitiver Last darin liegen könnte, dass Personen, die starkes Medien-Multitasking betreiben, eine schlechtere Aufmerksamkeitskontrolle aufweisen, die für die Differenzierung zwischen zielrelevanter und -irrelevanter Information benötigt wird. Alternativ oder zusätzlich könnte eine noch allgemeinere Beeinträchtigung der Aufrechterhaltung von Aufmerksamkeit den Leistungsdefiziten von Medien-Multitaskern zugrunde liegen. Fluktuationen in der Aufrechterhaltung zielgerichteter Aufmerksamkeit führten zu Aufmerksamkeitsfehlern oder -ausfällen (*attention lapses*), die eine schlechtere Leistung in Laboraufgaben zur Erfassung kognitiver Kontrollfunktionen begründeten (Ralph, Thomson, Cheyne, & Smilek, 2014; Ralph, Thomson, Seli, Carriere, & Smilek, 2015; Uncapher & Wagner, 2018).

Die Hypothese einer weniger effizienten Aufmerksamkeitskontrolle bei ausgeprägtem Medien-Multitasking wird auch durch eine Hirnbildgebungsstudie gestützt, in der Jugendliche und junge Erwachsene eine Aufgabe zum Satzverständnis unter verschiedenen Bedingungen von Aufmerksamkeitsfokussierung absolvieren mussten, während ihre Hirnaktivierung mit funktioneller Magnetresonanztomo-

grafie (fMRT) gemessen wurde (Moisala et al., 2016). Bei der Bearbeitung der Satzverständnisaufgabe unter Distraktionsbedingungen zeigten Teilnehmer, die ein höheres Maß an Medien-Multitasking berichteten, eine schlechtere Leistung bei gleichzeitig stärkerer Hirnaktivität in lateralen und medialen Teilen des Präfrontalkortex. Die stärkere Aktivierung dieser Hirnareale, die mit kognitiver Kontrolle in Verbindung gebracht werden, kann als Hinweis auf eine weniger effiziente Aufmerksamkeitskontrolle interpretiert werden, die eine stärkere neuronale Anstrengung erfordert. Darüber hinaus legt eine aktuelle Hirnbildgebungsstudie mit fMRT nahe, dass eine erhöhte Neigung zu Aufmerksamkeitsfehlern und eine damit einhergehende gestörte neuronale Verarbeitung bei der Enkodierung und dem Abruf von Gedächtnisinhalten den negativen Zusammenhang zwischen Medien-Multitasking und Leistungen des Langzeitgedächtnisses erklären kann (Madore et al., 2020).

Welche Implikationen haben die hier beschriebenen Befunde für kognitive Leistungen im Alltag? Die aus einer schwächer top-down kontrollierten, stärker bottom-up getriebenen Aufmerksamkeit resultierende „breitere“ Verarbeitung von Informationen mag für die effiziente parallele Verarbeitung kognitiv weniger anspruchsvoller Aufgaben im Alltag sogar einen Vorteil darstellen. Für Aufgaben wie z. B. die Chat-Kommunikation in sozialen Medien während des Betrachtens von Filmen oder Video-Clips, die der Unterhaltung dienen, mag eine wenig fokussierte Verarbeitung ausreichend sein und die Breite der Informationsaufnahme gleichzeitig die Reaktion auf mehr Reize in kürzerer Zeit begünstigen. Für eine vertiefte Auseinandersetzung, wie sie z. B. für das Verständnis komplexer Sachverhalte und die Gedächtnisbildung erforderlich ist, wird jedoch eine fokussierte Aufmerksamkeit benötigt, die über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten werden muss. Sie ermöglicht das Ausblenden störender Reize aus der Umwelt und irrelevanter Repräsentationen aus dem Gedächtnis, die Aufnahme neuer Informationen ins Arbeitsgedächtnis und das in Relation setzen relevanter Repräsentationen im Arbeitsgedächtnis. Damit stellt die Fähigkeit zur zielgerichteten Kontrolle und Fokussierung der Aufmerksamkeit auf eine bestimmte Sache oder Aufgabe eine wichtige Voraussetzung für Erfolg in Schule, Ausbildung, Studium und Beruf dar. Allgemeiner formuliert ist sie die Grundlage für Verstehen und Lernen generell – und damit für die Ausbildung kristalliner Intelligenz sensu Cattell (1963). Ist diese Fähigkeit beeinträchtigt, muss demnach mit einer Beeinträchtigung der Entwicklung kristalliner Fähigkeiten gerechnet werden.

Bei der Beurteilung der gemischten Befundlage zum Zusammenhang von Medien-Multitasking mit interindividuellen Unterschieden in kognitiver Kontrolle und exekutiven Funktionen muss die Möglichkeit berücksichtigt werden, dass die Inkonsistenz der Befunde zum Teil auch auf die mangelnde Zuverlässigkeit einiger Studien zurückzuführen sein könnte, die sich aus kleinen Stichproben und einer mangelnden Reliabilität der Messungen individueller Unterschieden in exekutiven Funktionen ergeben könnte. In den beschriebenen Studien wurden individuelle Unterschiede in kognitiven Funktionen zum Teil mit Paradigmen erhoben, die zuverlässiger zwischen experimentellen Bedingungen als zwischen Personen mit unterschiedlichen Fähigkeiten differenzieren (Enkavi et al., 2018; Hedge, Powell, & Sumner, 2018; Paap & Sawi, 2016). Das Problem der mangelnden Reliabilität, insbesondere von Maßen, die auf Reaktionszeitdifferenzen basieren, wird im Feld der Forschung zu Korrelaten des Medien-Multitasking bisher nur in einzelnen Studien (Alzahabi, Becker, & Hambrick, 2017) berücksichtigt. Um inkonsistente Befunde im Feld aufzuklären und Schlussfolgerungen aufgrund unzuverlässiger Messungen zu vermeiden, wäre es wichtig, die Reliabilität der Messungen exekutiver Funktionen in Studien zu diesem Forschungsfeld durchgängig zu berichten und die Verwendung reliabler Messungen sicherzustellen.

Eine weitere wichtige Einschränkung der Aussagekraft fast aller bisher vorliegender Studien zum Zusammenhang von Medien-Multitasking mit kognitiven Leistungen liegt in ihrer rein korrelativen Natur. Alle oben vorgestellten Studien in diesem Feld untersuchen in Querschnittsdaten Korrelate des von Studienteilnehmern im Selbstbericht angegebenen Ausmaßes an Medien-Multitasking. Diese Daten erlauben uns keine Rückschlüsse auf die Ursachen der beobachteten Zusammenhänge. Wir wissen nicht, ob Medien-Multitasking zu einer schlechteren Aufmerksamkeitskontrolle führt oder – umgekehrt – eine geringere Fähigkeit zur zielgerichteten Aufrechterhaltung von Aufmerksamkeit Medien-Multitasking begünstigt. Weiterhin ist denkbar, dass vorbestehende Unterschiede in dritten Variablen sowohl Aufmerksamkeitsfunktionen als auch Ausmaß und Muster der Mediennutzung beeinflussen. Um die zugrunde liegenden Kausalzusammenhänge besser zu verstehen, brauchen wir längsschnittliche Studien und idealerweise auch experimentelle Interventionen. In einer Längsschnittstudie wurde Medien-Multitasking mit einer leicht erhöhten Wahrscheinlichkeit zur Entwicklung von Symptomen einer Aufmerksamkeitsdefizit-/ Hyperaktivitätsstörung (ADHS) in Verbindung gebracht. Von 2.587 Jugendlichen im Alter zwischen 15 und 16 Jah-

ren, die einer Selbstauskunft in Fragebögen zufolge zu Beginn der Studie keine bedeutsame ADHS-Symptomatik aufwiesen, zeigten nach zwei Jahren diejenigen, die in der Zwischenzeit die meisten digitalen Medien verwendet hatten, eine etwas höhere Rate an ADHS-Symptomen (Ra et al., 2018). Während diese Studie nahelegt, dass die Mediennutzung tatsächlich einen Einfluss auf die längerfristige Entwicklung von Aufmerksamkeitsfunktionen haben könnte, kann ein Kausalzusammenhang nur über experimentelle Studie nachgewiesen werden, die es zum Thema des Medien-Multitasking bisher jedoch noch nicht gibt.

Ein naheliegender Kandidat für ein Merkmal mit vorbestehenden Unterschieden, das Unterschiede in Aufmerksamkeitskontrolle / Exekutiven Fähigkeiten wie auch Mediennutzung erklären könnte, ist die Intelligenz. Vom Thema des Medien-Multitasking unabhängige Studien haben gezeigt, dass individuelle Unterschiede in Intelligenz mit Unterschieden in Aufmerksamkeitskontrolle und Exekutiven Funktionen zusammenhängen (Chen et al., 2019; Ren et al., 2013; Schweizer et al., 2005). Dabei legen einige Studien einen engen Zusammenhang zwischen Aufmerksamkeitskontrolle und Intelligenz nahe, der den ebenfalls gut belegten Link zwischen Intelligenz und Arbeitsgedächtniskapazität vermitteln könnte (Burgess et al., 2011; Conway et al., 2003; Engle et al., 1999; Unsworth, 2014). Darüber hinaus wurde Intelligenz auch spezifisch mit der Unterscheidung zwischen relevanter und irrelevanter Information in der kognitiven Informationsverarbeitung in Verbindung gebracht (Hilger, Ekman, Fiebach, & Basten, 2017; Melnick, Harrison, Park, Bennetto, & Tadin, 2013).

Während die meisten Studien zum Medien-Multitasking neben den Maßen für Aufmerksamkeitskontrolle und Exekutive Funktionen kein gesondertes Maß für Intelligenz erhoben haben, zeigte sich in einer Studie, die diesbezüglich eine Ausnahme darstellt, ein negativer Zusammenhang zwischen Intelligenz und Medien-Multitasking. In einer studentischen Stichprobe schnitten die Teilnehmer, die nach eigenen Angaben mehr Medien-Multitasking betrieben, in einem Test der fluiden Intelligenz (Ravens Matrizen) schlechter ab als Teilnehmer, die weniger Medien-Multitasking betrieben (Minear et al., 2013). Es ist also denkbar, dass vorbestehende Unterschiede in der Intelligenz den Zusammenhang zwischen Medien-Multitasking und kognitiven Fähigkeiten vermitteln. Intelligenzunterschiede könnten dabei auch der für Medien-Multitasker berichteten geringeren neuronalen Effizienz zugrunde liegen. Eine geringere neuronale Effizienz wird auch mit geringerer Intelligenz in Verbindung gebracht. In einigen Studien zeigten

Teilnehmer mit geringeren Intelligenzwerten – ähnlich wie in der Studie zum Medien-Multitasking von Moisala et al. (2016) – in frontalen Hirnregionen eine stärkere Aktivierung bei kognitiver Beanspruchung (Basten et al., 2015).

Neben Unterschieden in Intelligenz scheinen für die individuelle Tendenz zum Medien-Multitasking auch Unterschiede in Persönlichkeitsmerkmalen eine Rolle zu spielen. Laut Selbstbericht in Fragebögen korreliert Medien-Multitasking positiv mit Impulsivität und Sensation Seeking (Jeong & Fishbein, 2007; König et al., 2010; Minear et al., 2013; Sanbonmatsu et al., 2013) und negativ mit Selbstkontrolle und Belohnungsaufschub (Minear et al., 2013; Schutten et al., 2017). Sollten – in Abhängigkeit von Persönlichkeit und Intelligenz – stabile individuelle Unterschiede in Strategien und Fähigkeiten zur kognitiven Kontrolle bestehen, dann ist damit zu rechnen, dass einige Personen schon aufgrund einer solchen individuellen Prädisposition Schwierigkeiten im Umgang mit einem vielfältigen Medienangebot haben, dass sie dem vielfältigen Angebot aufgrund schwächerer Aufmerksamkeits- und Selbstkontrolle weniger gut widerstehen können und dadurch anfälliger sind für Medien-Multitasking.

4 Einfluss von süchtiger Videospielnutzung auf die kognitive Entwicklung

Exzessives Gaming erhöht auch das Risiko, an einer Computerspielstörung zu erkranken, die durch eine süchtige Videospielnutzung gekennzeichnet ist. Kinder und Jugendliche mit einer Computerspielstörung zeigen schlechtere Schulleistungen (Brunborg, Mentzoni, & Frøyland, 2014; Gentile et al., 2011; Haghbin, Shaterian, Hosseinzadeh, & Griffiths, 2013; Rehbein, Kleimann, & Mößle, 2010; Rehbein, Kliem, Baier, Mößle, & Petry, 2015; Stavropoulos, Alexandraki, & Motti-Stefanidi, 2013; Strittmatter et al., 2015) und höhere Fehlzeiten in der Schule (Austin & Totaro, 2011). Viele Studien zeigen einen Zusammenhang zwischen einer höheren Prävalenz von problematischer und suchtartiger Nutzung von Medien und einem niedrigeren angestrebtem Schulabschluss (Elliott, Ream, McGinsky, & Dunlap, 2012; Rehbein et al., 2015; Thomasius, 2020), sowie einen Zusammenhang zwischen einem niedrigeren Schulabschluss der Eltern und einer höheren Prävalenz von problematischer und suchtartiger Nutzung (Thomasius, 2020). In Populationen von Betroffenen mit einer Computerspielstörung ist die

Quote an Erwerbslosigkeit im Vergleich zum Bundesdurchschnitt deutlich erhöht (Lindenberg, Szász-Janocha, Schoenmaekers, Wehrmann, & Vonderlin, 2017).

Dass exzessive Mediennutzung, insbesondere das Spielen von Computerspielen (*Gaming*) auch abhängig machen kann, wurde durch die Einführung der neuen Kategorie „Störungen durch süchtiges Verhalten" in der ICD-11 offiziell von der Weltgesundheitsorganisation anerkannt (World Health Organization, 2018). Betroffene zeigen ein exzessives Maß an Videospielnutzung, das signifikanten Leidensdruck verursacht, und ein zunehmend starkes Verlangen (*Craving*) nach Gaming. Menschen mit einer intensiven Nutzung hochverstärkender Videospiele zeigen während des Gamings mehr Aktivierung im Belohnungssystem (Dong, Wang, Du, & Potenza, 2017). Ätiologisch wird dies durch eine Sensitivierung des Belohnungssystems für Gaming-assoziierte Reize erklärt. Die Prävalenz von Computerspielstörung und Internetsucht steigt zwischen Pubertät und Spätadoleszenz von 3% auf 9% an (Lindenberg, Halasy, Szász-Janocha, & Wartberg, 2018). Bei der Entstehung und Aufrechterhaltung einer süchtigen Videospielnutzung scheinen beeinträchtigte Entscheidungsfindungsprozesse (Yao et al., 2014; Yao et al., 2015) sowie Beeinträchtigungen der Aufmerksamkeitskontrolle (van Holst et al., 2012) und kognitiver Kontrolle (Luijten, Meerkerk, Franken, van de Wetering, & Schoenmakers, 2015) eine wesentliche Rolle zu spielen. Betroffene verlieren die Kontrolle über Beginn und Abschluss, Frequenz, Dauer und Setting der Nutzung. Somit wird das Gaming zunehmend vor anderen Alltagspflichten priorisiert, auf Kosten des Erwerbs kristalliner Fähigkeiten oder anderweitig belohnender Aktivitäten (bspw. Schulbildung, andere Freizeitaktivitäten, Beziehungen, Familie). Negative Folgen werden bagatellisiert oder verleugnet und das Gaming wird trotz negativer Konsequenzen wie Schulversagen, Verlust von Beziehungen oder familiären Konflikten fortgesetzt. Für eine Übersicht zur Computerspielstörung und Internetsucht im Jugendalter siehe Lindenberg, Kindt, & Szász-Janocha (2020).

Dass Videospiele für Kinder und Jugendliche so attraktiv sind, wird durch unmittelbar stark belohnende abhängigkeitserzeugende Mechanismen erklärt, die in diesen Spielen fest verankert und bewusst platziert sind. Dabei spielen Prozesse positiver Verstärkung, negativer Verstärkung und intermittierender Verstärkung eine entscheidende Rolle. Zu den unmittelbar positiv verstärkenden Faktoren beim Gaming zählen einfache, schnelle Erfolgserlebnisse und ein angenehmes Flow-Erleben (Wölfling, Jo, Bengesser, Beutel, & Müller, 2013). Anhand der Gesetze des operanten Lernens (Skinner, 1937) ist erklärbar, dass positiv verstärkende

Konsequenzen prinzipiell zu einer erhöhten Frequenz und Intensität des Verhaltens führen. Die individuelle Ansprechbarkeit für die positive Verstärkung durch die Videospiele ist abhängig von der individuellen Belohnungssensitivität und der Verfügbarkeit alternativer belohnender Elemente im Alltag. Die Tendenz, sich durch Erfolgserlebnisse und das wohltuende Flow-Erleben verführen zu lassen, und immer mehr Zeit in Videospiele zu investieren, wird durch biopsychosoziale Faktoren beeinflusst. Diskutiert werden genetische Faktoren und neurobiologische Bedingungen, Persönlichkeitseigenschaften (hohe habituelle Ängstlichkeit, soziale Inhibition, Boredom Susceptibility, geringe Gewissenhaftigkeit, geringere Leistungsorientierung) sowie soziokulturelle Faktoren (Familiensituation, Belastungen, Konflikte, Ressourcen; Brand et al., 2019; Wölfling et al., 2013).

Wie bei substanzgebundenen Störungen spielen auch bei der Computerspielstörung die abhängigkeitserzeugenden Effekte der Substanz eine große Rolle, d. h. die spezifischen verstärkenden Charakteristika des Videospiels, die sich je nach Genre und Spiel unterscheiden. Kommerzielle Videospiele enthalten gezielt diverse Mechanismen, die von Spieleentwicklern platziert werden, um die individuelle Spieldauer möglichst hoch zu halten. Die meisten ökonomischen Konzepte der Spielehersteller beinhalten das Angebot sogenannter „free-to-play“ Spiele, die zunächst gratis angeboten werden. Über den nicht vorhandenen Kaufpreis wird die Schwelle gesenkt, ein Spiel auszuprobieren, an dem sie durch die intensiven Verstärkungsmechanismen zu Beginn eines Videospiels schnell Gefallen finden. Über die dann bereits hohe Spieldauer und das damit verbundene Investment ins Spiel soll die Bereitschaft erhöht werden, im folgenden Verlauf durch Mikrotransaktionen („In-App Käufe“) für das Spiel zu bezahlen („pay-to-win“), in der Hoffnung, den anfänglichen Verstärkungseffekt aufrechtzuerhalten. Diese erfolgreiche „Fuß-in-die-Tür“-Strategie der Spielehersteller ist ökonomisch sehr erfolgreich und hat den Nebeneffekt, dass aufgrund des fehlenden anfänglichen Kaufpreises der gesetzliche Jugendschutz nicht greift (Illy & Florack, 2018).

Bei den gesetzten Anreizen, die gezielt abhängigkeitserzeugend wirken und die Spieldauer erhöhen sollen, handelt es sich in der Regel um intermittierende Verstärkungsmechanismen und Glücksspielfacetten. Gemäß operanter Konditionierungsgesetze gilt die intermittierende Verstärkung als besonders löschungsresistent. Ein typischer Mechanismus, der intermittierende Verstärkung beinhaltet und somit als besonders abhängigkeitserzeugend gilt, ist ein nicht-linearer Schwierigkeitsverlauf. Während zu Beginn eines in der Regel gratis erworbenen Spiels

schnelle Erfolge erzielt werden können und habituelles Spielen dadurch operant konditioniert wird, nimmt die Schwierigkeitsstufe ab einem gewissen Zeitpunkt sprunghaft zu. Nutzer haben dann die Möglichkeit, durch Mikrotransaktionen Boni oder spielmechanische Vorteile zu erwerben, um den sinkenden Spielfortschritt wieder zu beschleunigen und ihr „Projekt" erfolgreich weiterzuführen, in das sie bereits viel Zeit investiert haben und das für sie dadurch einen hohen emotionalen Wert hat.

Dieses scheinbar irrationale Verhalten, trotz des Ausbleibens von Erfolgserlebnissen Geld auszugeben und noch mehr Zeit in das Spiel zu investieren, lässt sich durch zwei sozialpsychologische Phänomene erklären. Erstens neigen Menschen dazu, einem Ergebnis, für dessen Erreichung sie sich anstrengen mussten, einen höheren Wert zuzuschreiben als den objektiven Wert des Ergebnisses. Dieses Phänomen der Anstrengungsrechtfertigung (*justification of effort*) geht auf Leon Festingers Theorie der kognitiven Dissonanz zurück (Festinger, 1957, 2001). Anstrengungsrechtfertigung wird als theoretische Erklärung herangezogen, warum Nutzer einem Spiel eine zunehmend höhere emotionale Valenz zuschreiben, um die Sinnhaftigkeit ihrer bisherigen zeitlichen und monetären Investitionen zu rechtfertigen. Zweitens sind Menschen umso eher geneigt, weitere Investitionen zu tätigen, je mehr sie in ein Projekt investiert haben, wie beispielsweise die Zeit, die sie mit dem Videospiel verbracht haben oder die Boni, die sie bereits käuflich erworben haben. Die irreversiblen Kosten (*sunk costs*) beeinflussen die Entscheidung über zukünftige Investitionen und führen dazu, dass „gutes Geld schlechtem hinterhergeworfen wird". Dieses aus entscheidungstheoretischer Sicht irrationale Verhalten, ein Vorhaben fortzusetzen, wenn bereits eine Investition in Form von Geld, Anstrengung oder Zeit getätigt wurde, wird in der Sozialpsychologie als Trugschluss der versunkenen Kosten (*sunk-cost-fallacy*) bezeichnet (Kahneman & Tversky, 1979).

Viele Spiele enthalten darüber hinaus Anreize, die in glücksspielähnliche Umgebungen verpackt sind und somit intermittierend verstärkend wirken. In vielen Videospielen gibt es virtuelle Lotterien, die in virtuellen Behältern (*Loot-Boxen*) eine zufällige Sammlung verschiedener Items enthalten. Diese können im Spiel freigeschaltet werden. Loot-Boxen werden anfänglich oft gratis angeboten oder sind einfach zu finden. Im weiteren Spieleverlauf müssen sie dann durch Mikrotransaktionen käuflich zu erworben werden. Häufig enthalten sie lediglich kosmetische Items (*cosmetic items*), die das Aussehen eines Avatars verbessern.

Auch dadurch erhöht sich jedoch die emotionale Bedeutung und wahrgenommene Selbstverpflichtung, das „Projekt“ erfolgreich weiterzuführen (*sunk-cost fallacy*). Das wiederum erhöht die Bereitschaft, viel Zeit mit dem Spiel zu verbringen und dem Spiel eine höhere Wertigkeit zuzuschreiben (*justification of effort*). In der Regel sind diese Glücksspielelemente so programmiert, dass zu Spielbeginn die Gewinnwahrscheinlichkeit für attraktive Items sehr hoch ist, um den Nutzer zu umgarnen. Im Verlauf nimmt die Wahrscheinlichkeit auf einen attraktiven Gewinn ab, allerdings intermittierend, so dass durch gelegentliche „Glückstreffer“ das Verhalten noch weiter bekräftigt wird. Diese eingebauten Zufallsmechanismen bewirken eine besonders löschungsresistente Aufrechterhaltung des Verhaltens. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit, durch weitere Mikrotransaktionen oder auch intensive zeitliche Investitionen in das Videospiel an weiteren Lotterien teilzunehmen. Durch die somit immer weiter ansteigende Nutzungszeit und Dauerstimulation des dopaminergen Systems sind strukturelle Veränderungen im Gehirn nachweisbar, die auch das Belohnungssystem verändern (Kuss, Pontes, & Griffiths, 2018). Es entsteht ein Suchtgedächtnis, in dem die Belohnungssensitivität für entsprechende Suchtstimuli sich mit jeder Exposition erhöht (Dong, Wang, Du, & Potenza, 2017).

Gleichzeitig treten durch die Priorisierung des Gamings vor anderen Tätigkeiten und Pflichten negative Konsequenzen (wie Schulversagen, Aufgabe anderer Hobbies, Konflikte, sozialer Rückzug) auf, die mit aversiven Emotionen assoziiert sind. Die verminderte behaviorale Flexibilität (Einengung des Verhaltens durch repetitiven Medienkonsum) geht auch mit einer verminderten Flexibilität im Gebrauch von Copingstrategien zur Emotionsregulation einher. Um negative Emotionen zu bewältigen, nutzen Kinder und Jugendliche wiederum sehr häufig Videospiele. Der Verstärkerverlust in anderen Lebensbereichen wird durch intensives Gaming kompensiert, was lerntheoretisch einer negativen Verstärkung entspricht und die Verhaltenstendenz erhöht. Jugendliche berichten, dass sie Videospiele häufig zur Emotionsregulation einsetzen: am häufigsten, um Langeweile zu bekämpfen (89% der Kinder und Jugendlichen), gefolgt von dem Wunsch, der Realität zu entfliehen (38%), zum Stressabbau (35%) und um Sorgen zu vergessen (Thomasius, 2020). Das führt dazu, dass mit fortschreitender Suchterkrankung insbesondere diese indirekten Verstärkungsprinzipien (Verstärkung durch Entfall einer negativen Konsequenz) zunehmen, indem Gaming als Kompensationsstrategie zur Reduktion aversiver emotionaler Zustände (Angst, Trauer, Langeweile) eingesetzt wird. Die

anfänglichen direkten Verstärkungsprinzipien (Gaming als Gratifikationsstrategie zur Induktion positiver emotionaler Zustände) nehmen ab. Dieser Mangel an Flexibilität in der Affektregulation und die berichteten Wechselwirkungen stehen im Einklang mit Befunden zu neuronalen Korrelationen von Suchterkrankungen (Kuss et al., 2018).

Neben der individuell unterschiedlichen Belohnungssensitivität, die durch häufige Videospielnutzung erhöht wird, scheint eine verminderte kognitive Kontrolle ein wesentlicher Faktor für die Entstehung einer süchtigen Videospielnutzung zu sein. Eine geringere kognitive Kontrolle ist sowohl mit schlechteren akademischen und kognitiven Leistungen assoziiert (Duckworth & Seligman, 2005; Mischel, Shoda, & Peake, 1988; Shoda, Mischel, & Peake, 1990) als auch mit einer exzessiveren Mediennutzung (Blinka et al., 2015; Khang, Kim, & Kim, 2013; Koo & Kwon, 2014). Schülerinnen und Schüler, die ihr eigenes Spiel- und Internetverhalten nicht kontrollieren können, verbringen mehr Zeit online und mit Videospielen. Dies führt zu einer Verschiebung der kostbaren Ressource Zeit, die an anderer Stelle fehlt, beispielsweise im akademischen Kontext, was wiederum zu schlechteren akademischen und kognitiven Leistungen führt. Schülerinnen und Schüler mit einer geringeren Selbstkontrolle neigen stärker dazu, unangenehme Tätigkeiten und Pflichten (z. B. Schularbeiten) aufzuschieben. Prokrastination wurde mehrfach als bedeutsamer schulbezogener Risikofaktor für einen süchtigen Mediengebrauch belegt (Anam-ul-Malik & Rafiq, 2016; Davis, Flett, & Besser, 2002; Kim, Hong, Lee, & Hyun, 2017; Kindt, Szász-Janocha, Rehbein, & Lindenberg, 2019; Thatcher, Wretschko, & Fridjhon, 2008).

In Einklang damit zeigen Studien, dass Aufmerksamkeitsstörungen (Carli et al., 2013; Wang, Yao, Zhou, Liu, & Lv, 2017) und verringerte Exekutivfunktionen sowie eine erhöhte Impulsivität (Bargeron & Hormes, 2017) den schädlichen Mediengebrauch begünstigen. Obwohl die online verbrachte Zeit per se keinen süchtigen Gebrauch definiert, erhöht sie das Risiko einer Suchtentstehung (Durkee et al., 2012; Rumpf et al., 2014), und zwar sowohl durch die expositionsabhängige Sensitivierung des Belohnungssystems (Wölfling, Flor, & Grüsser, 2008) als auch durch eine relative Reduktion der Zeitanteile, die alternativ die Intelligenzentwicklung begünstigen könnten, insbesondere im Bereich der Ausbildung kristalliner Fähigkeiten.

5 Wechselwirkungen von Mediennutzung und Intelligenz

Sind Videospiele und digitale Medien nun Fluch oder Segen für die Intelligenzentwicklung? Einerseits zeigen Studien zur kognitiven Entwicklung, dass Videospiele einige kognitive Funktionen fördern können, die eng mit fluider Intelligenz zusammenhängen. Das betrifft insbesondere die generelle Verarbeitungsgeschwindigkeit und die zielgerichtete Aufmerksamkeitskontrolle. Auch räumliche Fähigkeiten, für die in Zusammenhang von Videospielen Verbesserungen berichtet wurden, können als kognitive Komponentenfunktionen von Intelligenz verstanden werden. Andererseits werfen Studien zum Medien-Multitasking die Frage auf, ob sich Mediennutzung auch negativ auf Aufmerksamkeitskontrolle, Konzentration und Lernerfolg auswirken kann, und Studien zu Computerspielsucht bringen eine süchtige Nutzung von Videospielen mit negativen Effekten auf die kognitive Entwicklung und akademische Leistungen in Zusammenhang. Es ist ein Kernkriterium der Videospielstörung, dass das Videospielen Vorrang vor anderen Alltagsaktivitäten und -pflichten bekommt, da die Videospiele so belohnend sind, dass andere Aktivitäten dafür vernachlässigt werden. Dadurch bleibt weniger Zeit für die Entwicklung kognitiver Fähigkeiten, die über die Spiele nicht direkt angesprochen und damit nicht trainiert werden. Das betrifft insbesondere die Entwicklung kristalliner Fähigkeiten, sprich den Erwerb von Wissen (Weis & Cerankosky, 2010).

Im Umkehrschluss kann man allerdings auch davon ausgehen, dass, solange noch genügend Zeit für den Erwerb kristallinen Wissens bleibt, weder das Spielen von Videospielen noch Medien-Multitasking der kognitiven Entwicklung schaden. Die „digital goldilocks-Hypothese“ (Przybylski & Weinstein, 2017) geht von einer umgekehrt U-förmigen Beziehung zwischen Bildschirmzeit und kognitiven Fähigkeiten aus. Sie postuliert, dass eine moderate Nutzung von ein bis drei Stunden täglich sogar positive Auswirkungen auf die kognitive Entwicklung haben kann, beispielsweise durch den digitalen Erwerb von Wissen oder die Einbindung in Soziale Netzwerke.

Abbildung 1A illustriert Systeme des Gehirns, für die ein Zusammenhang mit der Nutzung digitaler Medien Veränderungen in Struktur oder Funktion berichtet wurde. In blau ist ein Netzwerk dargestellt, das mit kognitiver Kontrolle in Verbindung gebracht wird (Dosenbach, Fair, Cohen, Schlaggar, & Petersen, 2008; Fox et al., 2005), hier repräsentiert durch die Kernregionen des dorsolateralen Präfrontalcortex (dlPFC), des dorsalen anterioren cingulären Cortex (dACC) und

des Parietalkortex. Innerhalb dieses Netzwerk wird insbesondere der dlPFC mit zielgerichteter Aufmerksamkeitskontrolle in Verbindung gebracht (Corbetta & Shulman, 2002).

Das Netzwerk hat auch eine besondere Bedeutung für die Intelligenz. Es ist in der Literatur zu den neuronalen Grundlagen der Intelligenz auch als Multiple Demand (MD) System bekannt (Duncan, 2010) und stellt den Kern der Parieto-Frontalen-Integrationstheorie (P-FIT) der Intelligenz dar (Jung & Haier, 2007). Individuelle Unterschiede in der Intelligenz sind mit Unterschieden in der Stärke

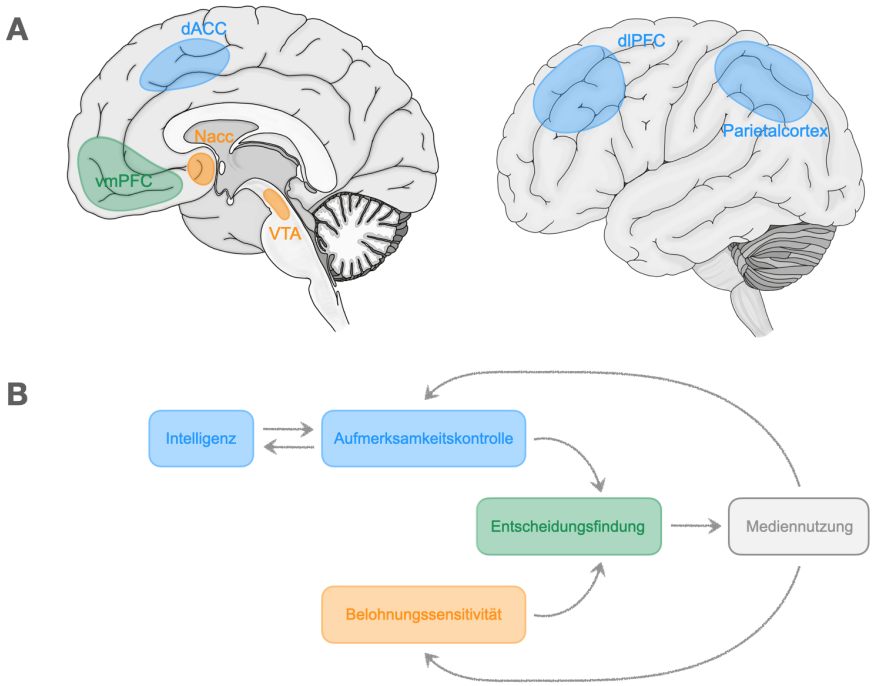


Abbildung 1: Wechselwirkungen von Mediennutzung und Intelligenz. A: Schematische Darstellung der Hirnregionen, die für Regulation und Effekte von Mediennutzung relevant sind. B: Modell zur wechselseitigen Beeinflussung von Intelligenz und Mediennutzung vermittelt über Aufmerksamkeitskontrolle und Belohnungssensitivität. Erläuterungen s. Text. - dACC: dorsaler anteriorer cingulärer Cortex, dlPFC: dorsolateraler Präfrontalcortex, Nacc: Nucleus accumbens, vmPFC: ventromedialer Präfrontalcortex, VTA: Area tegmentalis ventralis.

der Aktivierung dieses Netzwerkes während kognitiver Herausforderungen in Verbindung gebracht worden (Basten, Hilger, & Fiebach, 2015). In Verbindung mit der Nutzung digitaler Medien ist aus diesem Netzwerk ebenfalls der dlPFC hervorzuheben, für den – wie oben beschrieben – eine Zunahme der grauen Substanz in Verbindung mit Videospielerfahrung (Kühn et al., 2014) sowie eine verminderte neuronale Effizienz in Verbindung mit Medien-Multitasking berichtet wurde (Moisala et al., 2016).

Die in Abbildung 1A orange hervorgehobenen Regionen des Gehirns beherbergen mit dem Nucleus accumbens (Nacc) und der Area tegmentalis ventralis (VTA) zwei Kernstrukturen des mesolimbischen Belohnungssystems. Diese Hirnregionen reagieren mit erhöhter Aktivität auf Belohnungsreize – sowohl auf unerwartete Belohnungen als auch auf gelernte Reize, die eine Belohnung ankündigen (Schultz, Tremblay, & Hollerman, 1998). Das Belohnungssystem wird insbesondere mit der Erwartung von Belohnungen in Verbindung gebracht (Knutson, Westdorp, Kaiser, & Hommer, 2000) und stellt damit eine Kernstruktur für die Vermittlung des Cravings dar (vgl. Wanting vs. Liking; Berridge & Robinson, 2003), das für die Erklärung der Computerspielsucht eine wichtige Rolle spielt (Brand et al., 2019).

Wir gehen davon aus, dass für die Steuerung individuellen Mediennutzungsverhaltens sowohl das in Abbildung 1A blau hervorgehobene Kontrollnetzwerk als auch das orange hervorgehobene Belohnungssystem eine bedeutende Rolle spielen. Oben wurde bereits ausführlich erläutert, dass verschiedene Faktoren von Computerspielen das Belohnungssystem ansprechen. Hier kann angenommen werden, dass Personen mit hoher individueller Belohnungssensitivität aufgrund einer höheren Verstärkung durch die mit dem Spielen assoziierten Belohnungsreize eine stärkere Tendenz zur Nutzung von Computerspielen zeigen. Auf der anderen Seite erlaubt eine höhere individuelle Fähigkeit zur Aufmerksamkeitskontrolle eine effektivere Regulation von Verhaltenstendenzen. Insbesondere die Region des ventromedialen Präfrontalcortex (vmPFC, in Abb. 1A grün hervorgehoben) wird mit der Entscheidungsfindung auf Basis der Integration erwarteter positiver und negativer Verhaltenskonsequenzen in Verbindung gebracht (Basten et al., 2015; Bechara, Tranel, & Damasio, 2000; Young et al., 2010). Diese Region könnte auch in individuelle Entscheidungen über das Mediennutzungsverhalten involviert sein.

Auf Basis der oben beschriebenen Befunde zu Mediennutzung, kognitiven Fähigkeiten und neuronalen Korrelaten schlagen wir zur Konzeptualisierung der

möglichen Wirkzusammenhänge das in Abbildung 1B skizzierte Modell vor. Wir gehen davon aus, dass individuelle Unterschiede in Aufmerksamkeitskontrolle und Belohnungssensitivität vermittelt über einen Entscheidungsprozess, der erwartete positive gegen mögliche negative Verhaltenskonsequenzen abwägt, die entscheidenden Determinanten des Mediennutzungsverhaltens sind. Grob vereinfacht nehmen wir an, dass eine hohe Belohnungssensitivität und niedrige Aufmerksamkeitskontrolle Risikofaktoren für ungünstiges Mediennutzungsverhalten darstellen, das unproduktives Medien-Multitasking, exzessives Gaming und süchtige Videospielnutzung sowie Leistungseinbußen aufgrund der Vernachlässigung anderer Lebensbereiche (Schule, Studium, Beruf) einschließt. Auf der anderen Seite stellen eine moderate Belohnungssensitivität sowie eine hohe Fähigkeit zur Aufmerksamkeitskontrolle Schutzfaktoren dar, die den zielgerichteten Einsatz digitaler Medien und die kontrollierte Nutzung begünstigen.

Nach diesem Modell wäre für Personen mit einer hohen Belohnungssensitivität und gleichzeitig geringer Fähigkeit zur Aufmerksamkeitskontrolle ein besonders hohes Risiko für problematische Mediennutzung zu erwarten. Gleichzeitig ließe sich ein Risikofaktor, wie eine individuell hohe Belohnungssensitivität, durch einen Schutzfaktor, wie eine gleichzeitig hohe Aufmerksamkeitskontrolle, ausgleichen. Das Beispiel hebt die besondere Bedeutung einer starken Aufmerksamkeitskontrolle für die kompetente Nutzung digitaler Medien inkl. Videospiele hervor. Wie oben bereits erläutert, besteht für diesen Faktor ein enger Zusammenhang zur Intelligenz (Schweizer, Moosbrugger, & Goldhammer, 2005). So gehen wir davon aus, dass die Intelligenz eine wichtige Rolle für das individuelle Muster der Mediennutzung und ihre Folgen spielt.

In Abbildung 1B ist außerdem die Rückwirkung der Mediennutzung auf die sie mitbestimmenden Faktoren angedeutet. Insbesondere für Videospiele ist eine positive Auswirkung auf die Aufmerksamkeitskontrolle gut belegt (s. o. *Einfluss von Videospielen auf die kognitive Entwicklung*). Eine solche Verbesserung der Aufmerksamkeitsfunktionen kann – wenn wir Aufmerksamkeitskontrolle als kognitive Komponentenfunktion von Intelligenz verstehen – als indirekter Effekt der Mediennutzung auf die Intelligenz interpretiert werden. Im Bereich das Medien-Multitasking wird hingegen die Möglichkeit einer Schwächung der Aufmerksamkeitskontrolle diskutiert, die entsprechend als negativer Effekt auf die Intelligenz ausgelegt werden könnte (vgl. aber Kritik des korrelativen Ansatzes der betreffenden Forschung, s. o.). Die Mediennutzung wirkt auch auf die indivi-

duelle Belohnungssensitivität zurück. Hier geht man im Allgemeinen von einer Steigerung der Sensitivität für Belohnungen durch das betreffende Medium aus (s. o. *Einfluss von süchtiger Videospielnutzung auf die kognitive Entwicklung*). Die Beispiele sollen verdeutlichen, dass sich in dem Modell positive und negative Feedbackschleifen abbilden lassen, die positive und negative Effekte auf kognitive Fähigkeiten und Intelligenz erklären können. Im Allgemeinen werden eine hohe Intelligenz und eine gute Aufmerksamkeitskontrolle eine kontrollierte Nutzung von Medien erleichtern, die nicht nur negative Effekte vermeidet, sondern auch positive „Rückwirkungen" auf Aufmerksamkeit und Intelligenz einschließt.

Literaturverzeichnis

Alzahabi, R., & Becker, M. W. (2013). The association between media multitasking, task-switching, and dual-task performance. Journal of Experimental Psychology: *Human Perception and Performance, 39*(5), 1485–1495. https://doi.org/10.1037/a0031208

Alzahabi, R., Becker, M. W., & Hambrick, D. Z. (2017). Investigating the relationship between media multitasking and processes involved in task-switching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 43*(11), 1872–1894. https://https://doi.org/10.1037/xhp0000412

Anam-ul-Malik, & Rafiq, N. (2016). Exploring the relationship of personality, loneliness, and online social support with Interned addiction and procrastination. *Pakistan Journal of Psychological Research, 31*(1), 93–117.

Austin, W. A., & Totaro, M. W. (2011). Gender differences in the effects of Internet usage on high school absenteeism. *Journal of Socio-Economics, 40*(2), 192–198. https://doi.org/10.1016/j.socec.2010.12.017.

Baniqued, P. L., Lee, H., Voss, M. W., Basak, C., Cosman, J. D., DeSouza, S., . . . Kramer, A. F. (2013). Selling points: What cognitive abilities are tapped by casual video games? *Acta Psychologica, 142*(1), 74–86. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2012.11.009.

Bargeron, A. H., & Hormes, J. M. (2017). Psychosocial correlates of internet gaming disorder: Psychopathology, life satisfaction, and impulsivity. *Computers in Human Behavior, 68*, 388–394. https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.11.029.

Basten, U., Hilger, K., & Fiebach, C. J. (2015). Where smart brains are different: A quantitative meta-analysis of functional and structural brain imaging studies on intelligence. *Intelligence, 51*, 10–27. https://doi.org/10.1016/j.intell.2015.04.009.

Baumgartner, S. E., Weeda, W. D., van der Heijden, L. L., & Huizinga, M. (2014). The relationship between media multitasking and executive function in early adolescents. *Journal of Early Adolescence, 34*(8), 1120–1144. https://doi.org/10.1177/0272431614523133.

Bavelier, D., & Green, C. S. (2019). Enhancing attentional control: Lessons from action video games. *Neuron, 104*(1), 147–163. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2019.09.031.

Bechara, A., Tranel, D., & Damasio, H. (2000). Characterization of the decision-making deficit of patients with ventromedial prefrontal cortex lesions. *Brain: A Journal of Neurology, 123* (Pt 11), 2189–2202. https://doi.org/10.1093/brain/123.11.2189.

Bediou, B., Adams, D. M., Mayer, R. E., Tipton, E., Green, C. S., & Bavelier, D. (2018). Meta-analysis of action video game impact on perceptual, attentional, and cognitive skills. *Psychological Bulletin, 144*(1), 77–110. https://doi.org/10.1037/bul0000130.

Bedwell, W. L., Pavlas, D., Heyne, K., Lazzara, E. H., & Salas, E. (2012). Toward a taxonomy linking game attributes to learning: An empirical study. *Simulation & Gaming, 43*(6), 729–760. https://doi.org/10.1177/1046878112439444.

Blacker, K. J., & Curby, K. M. (2013). Enhanced visual short-term memory in action video game players. *Attention, Perception, & Psychophysics, 75*(6), 1128–1136. https://doi.org/10.3758/s13414-013-0487-0.

Blinka, L., Skarupova, K., Sevcikova, A., Wolfling, K., Muller, K. W., & Dreier, M. (2015). Excessive internet use in European adolescents: What determines differences in severity? *International Journal of Public Health, 60*(2), 249–256. https://doi.org/10.1007/s00038-014-0635-x.

Bowman, L. L., Levine, L. E., Waite, B. M., & Gendron, M. (2010). Can students really multitask? An experimental study of instant messaging while reading. *Computers & Education, 54*(4), 927–931. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2009.09.024.

Brand, M., Wegmann, E., Stark, R., Müller, A., Wölfling, K., Robbins, T. W., & Potenza, M. N. (2019). The Iinteraction of Person-Affect-Cognition-Execution (I-PACE) model for addictive behaviors: Update, generalization to addictive behaviors beyond internet-use disorders, and specification of the pirocess character of addictive behaviors. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 104*, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.06.032.

Brunborg, G. S., Mentzoni, R. A., & Frøyland, L. R. (2014). Is video gaming, or video game addiction, associated with depression, academic achievement, heavy episodic drinking, or conduct problems? *Journal of Behavioral Addictions, 3*(1), 27–32. https://doi.org/10.1556/JBA.3.2014.002.

Cain, M. S., & Mitroff, S. R. (2011). Distractor filtering in media multitaskers. *Perception, 40*(10), 1183–1192. https://doi.org/10.1068/p7017.

Carli, V., Durkee, T., Wasserman, D., Hadlaczky, G., Despalins, R., Kramarz, E., . . . Kaess, M. (2013). The association between pathological internet use and comorbid psychopathology: A systematic review. *Psychopathology, 46*(1), 1–13. https://doi.org/10.1159/000337971.

Carrier, L. M., Rosen, L. D., Cheever, N. A., & Lim, A. F. (2015). Causes, effects, and practicalities of everyday multitasking. *Developmental Review, 35*, 64–78. https://doi.org/10.1016/j.dr.2014.12.005.

Cattell, R. B. (1963). Theory of fluid and crystallized intelligence: A critical experiment. *Journal of Educational Psychology, 54*(1), 1–22. https://doi.org/10.1037/h0046743.

Chisholm, J. D., & Kingstone, A. (2015). Action video games and improved attentional control: Disentangling selection- and response-based processes. *Psychonomic Bulletin & Review, 22*(5), 1430–1436. https://doi.org/10.1037/a0031208 https://doi.org/10.3758/s13423-015-0818-3

Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews. Neuroscience, 3*(3), 201–215. https://doi.org/10.1038/nrn755.

Dale, G., & Green, C. S. (2017). The changing face ofvideo games and video gamers: Future directions in the scientific study of video game play and cognitive performance. *Journal of Cognitive Enhancement, 1*(3), 280–294. https://doi.org/10.1007/s41465-017-0015-6.

Davis, R. A., Flett, G. L., & Besser, A. (2002). Validation of a new scale for measuring problematic Internet use: Implications for pre-employment screening. *CyberPsychology & Behavior, 5*(4), 331–345. https://doi.org/10.1089/109493102760275581.

Dong, G., Wang, L., Du, X., & Potenza, M. N. (2017). Gaming increases craving to gaming-related stimuli in individuals with internet gaming disorder. Biological Psychiatry. *Cognitive Neuroscience and Neuroimaging, 2*(5), 404–412. https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2017.01.002.

Dosenbach, N. U. F., Fair, D. A., Cohen, A. L., Schlaggar, B. L., & Petersen, S. E. (2008). A dual-networks architecture of top-down control. *Trends in Cognitive Sciences, 12*(3), 99–105. https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.01.001.

Duncan, J. (2010). The multiple-demand (MD) system of the primate brain: Mental programs for intelligent behaviour. *Trends in Cognitive Sciences, 14*(4), 172–179. https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.01.004.

Durkee, T., Kaess, M., Carli, V., Parzer, P., Wasserman, C., Floderus, B., . . . Wasserman, D. (2012). Prevalence of pathological internet use among adolescents in Europe: Demographic and social factors. *Addiction, 107*(12), 2210–2222. https://doi.org/10.1111/j.1360-0443.2012.03946.x.

Dye, M. W.G., Green, C. S., & Bavelier, D. (2009). Increasing speed of processing with action video games. *Current Directions in Psychological Science, 18*(6), 321–326. https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2009.01660.x.

Elbe, P., Sörman, D. E., Mellqvist, E., Brändström, J., & Ljungberg, J. K. (2019). Predicting attention shifting abilities from self-reported media multitasking. *Psychonomic Bulletin & Review, 26*(4), 1257–1265. https://doi.org/10.3758/s13423-018-01566-6.

Elliott, L., Ream, G., McGinsky, E., & Dunlap, E. (2012). The contribution of game genre and other use patterns to problem video game play among adult video gamers. *International Journal of Mental Health and Addiction, 10*(6), 948–969. https://doi.org/10.1007/s11469-012-9391-4.

Enkavi, A. Z., Eisenberg, I. W., Bissett, P., Mazza, G. L., MacKinnon, D., Marsch, L., & Poldrack, R. (2018). *A large-scale analysis of test-retest reliabilities of self-regulation measures*. https://doi.org/10.31234/osf.io/x5pm4.

Faisal, A., & Peltoniemi, M. (2018). Establishing video game genres using data-driven modeling and product databases. *Games and Culture, 13*(1), 20–43. https://doi.org/10.1177/1555412015601541.

Feng, J., Spence, I., & Pratt, J. (2007). Playing an action video game reduces gender dfferences in spatial cognition. *Psychological Science, 18*(10), 850–855. https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01990.x.

Festinger, L. (1957). *A theory of cognitive dissonance*. Stanford, CA: Stanford University Press.

Festinger, L. (2001). *A theory of cognitive dissonance* (Reissued by Stanford University Press in 1962, renewed 1985 by author [Nachdr.]). Stanford, CA: Stanford University Press.

Foerde, K., Knowlton, B. J., & Poldrack, R. A. (2006). Modulation of competing memory systems by distraction. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 103*(31), 11778–11783. https://doi.org/10.1073/pnas.0602659103.

Fox, M. D., Snyder, A. Z., Vincent, J. L., Corbetta, M., van Essen, D. C., & Raichle, M. E. (2005). The human brain is intrinsically organized into dynamic, anticorrelated functional networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 102*(27), 9673–9678. https://doi.org/10.1073/pnas.0504136102.

Gentile, D. A., Choo, H., Liau, A., Sim, T., Li, D., Fung, D., & Khoo, A. (2011). Pathological video game use among youths: A two-year longitudinal study. *Pediatrics, 127*(2), e319–e329. https://doi.org/10.1542/peds.2010-1353.

Green, C. S., & Bavelier, D. (2003). Action video game modifies visual selective attention. *Nature, 423*(6939), 534–537. https://doi.org/10.1038/nature01647.

Green, C. S., Pouget, A., & Bavelier, D. (2010). Improved probabilistic inference as a general learning mechanism with action video games. *Current Biology, 20*(17), 1573–1579. https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.07.040.

Haghbin, M., Shaterian, F., Hosseinzadeh, D., & Griffiths, M. D. (2013). A brief report on the relationship between self-control, video game addiction and academic achievement in normal and ADHD students. *Journal of Behavioral Addictions, 2*(4), 239–243. https://doi.org/10.1556/JBA.2.2013.4.7.

Hedge, C., Powell, G., & Sumner, P. (2018). The reliability paradox: Why robust cognitive tasks do not produce reliable individual differences. *Behavior Research Methods, 50*(3), 1166–1186. https://doi.org/10.3758/s13428-017-0935-1.

Hilger, K., Ekman, M., Fiebach, C. J., & Basten, U. (2017). Efficient hubs in the intelligent brain: Nodal efficiency of hub regions in the salience network is associated with general intelligence. *Intelligence, 60*, 10–25. https://doi.org/10.1016/j.intell.2016.11.001.

Illy, D., & Florack, J. (2018). *Ratgeber Videospiel- und Internetabhängigkeit: Hilfe für den Alltag*. German Medical Collection: Vol. 93. München: Elsevier. Retrieved from http://www.sciencedirect.com/science/book/9783437229916.

Jacobsen, W. C., & Forste, R. (2011). The wired generation: Academic and social outcomes of electronic media use among university students. Cyberpsychology, *Behavior and Social Networking, 14*(5), 275–280. https://doi.org/10.1089/cyber.2010.0135.

Junco, R., & Cotten, S. R. (2011). Perceived academic effects of instant messaging use. *Computers & Education, 56*(2), 370–378. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.08.020.

Jung, R. E., & Haier, R. J. (2007). The parieto-frontal integration theory (P-FIT) of intelligence: Converging neuroimaging evidence. *Behavioral and Brain Sciences, 30*(2), 135–154; discussion 154–187. https://doi.org/10.1017/S0140525X07001185.

Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica, 74*(2), 263–291.

Khang, H., Kim, J. K., & Kim, Y. (2013). Self-traits and motivations as antecedents of digital media flow and addiction: The Internet, mobile phones, and video games. *Computers in Human Behavior, 29*(6), 2416–2424. https://doi.org/10.1016/j.chb.2013.05.027.

Kilgard, M. P., & Merzenich, M. M. (1998). Cortical map reorganization enabled by nucleus basalis activity. *Science, 279*(5357), 1714–1718. https://doi.org/10.1126/science.279.5357.1714.

Kim, J., Hong, H., Lee, J., & Hyun, M.-H. (2017). Effects of time perspective and self-control on procrastination and Internet addiction. *Journal of Behavioral Addictions, 6*(2), 229–236. https://doi.org/10.1556/2006.6.2017.017.

Kindt, S., Szász-Janocha, C., Rehbein, F., & Lindenberg, K. (2019). School-related risk factors of internet use disorders. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 16*(24). https://doi.org/10.3390/ijerph16244938.

Knutson, B., Westdorp, A., Kaiser, E., & Hommer, D. (2000). Fmri visualization of brain activity during a monetary incentive delay task. *NeuroImage, 12*(1), 20–27. https://doi.org/10.1006/nimg.2000.0593.

Koo, H. J., & Kwon, J.-H. (2014). Risk and protective factors of internet addiction: A meta-analysis of empirical studies in Korea. *Yonsei Medical Journal, 55*(6), 1691–1711. https://doi.org/10.3349/ymj.2014.55.6.1691.

Krishnan, L., Kang, A., Sperling, G., & Srinivasan, R. (2013). Neural strategies for slective attention distinguish fast-action video game players. *Brain Topography, 26*(1), 83–97. https://doi.org/10.1007/s10548-012-0232-3.

Kühn, S., Gleich, T., Lorenz, R. C., Lindenberger, U., & Gallinat, J. (2014). Playing Super Mario induces structural brain plasticity: Gray matter changes resulting from training with a commercial video game. *Molecular Psychiatry, 19*(2), 265–271. https://doi.org/10.1038/mp.2013.120.

Kühn, S., Romanowski, A., Schilling, C., Lorenz, R., Mörsen, C., Seiferth, N., . . . Büchel, C. (2011). The neural basis of video gaming. *Translational Psychiatry, 1*(11), e53–e53.

Kuss, D. J., Pontes, H. M., & Griffiths, M. D. (2018). Neurobiological correlates in internet gaming disorder: A systematic literature review. *Frontiers in Psychiatry, 9*, 166. https://doi.org/10.3389/fpsyt.2018.00166.

Lindenberg, K., Halasy, K., Szász-Janocha, C., & Wartberg, L. (2018). A phenotype classification of Internet Use Disorder in a large-scale high-school study. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 15*(4). https://doi.org/10.3390/ijerph15040733 .

Lindenberg, K., Kindt, S., & Szász-Janocha, C. (2020). *Internet addiction in adolescents: The PROTECT Program for Evidence-Based Prevention and Treatment*. Cham: Springer.

Lindenberg, K., Szász-Janocha, C., Schoenmaekers, S., Wehrmann, U., & Vonderlin, E. (2017). An analysis of integrated health care for Internet Use Disorders in adolescents and adults. *Journal of Behavioral Addictions, 6*(4), 579–592. https://doi.org/10.1556/2006.6.2017.065.

Lorenz, R. C., Gleich, T., Gallinat, J., & Kühn, S. (2015). Video game training and the reward system. *Frontiers in Human Neuroscience, 9*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00040.

Luijten, M., Meerkerk, G.-J., Franken, I. H. A., van de Wetering, B. J. M., & Schoenmakers, T. M. (2015). An fMRI study of cognitive control in problem gamers. *Psychiatry Research, 231*(3), 262–268. https://doi.org/10.1016/j.pscychresns.2015.01.004.

Mack, D. J., & Ilg, U. J. (2014). The effects of video game play on the characteristics of saccadic eye movements. *Vision Research, 102*, 26–32. https://doi.org/10.1016/j.visres.2014.07.010.

Madore, K. P., Khazenzon, A. M., Backes, C. W., Jiang, J., Uncapher, M. R., Norcia, A. M., & Wagner, A. D. (2020). Memory failure predicted by attention lapsing and media multitasking. *Nature, 587*(7832), 87–91. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2870-z.

Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest (2018). *KIMStudie 2018: Kindheit, Internet, Medien. Basisuntersuchung zum Medienumgang 6- bis 13-Jähriger*. Retrieved from https://www.mpfs.de/fileadmin/files/Studien/KIM/2018/KIM-Studie_2018_web.pdf.

Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest (2020). *JIM-Studie 2020: Jugend, Information, Medien*. Retrieved from https://www.mpfs.de/fileadmin/files/Studien/JIM/2020/JIM-Studie-2020_Web_final.pdf.

Melnick, M. D., Harrison, B. R., Park, S., Bennetto, L., & Tadin, D. (2013). A strong interactive link between sensory discriminations and intelligence. *Current Biology: CB*, 23(11), 1013–1017. https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.04.053.

Minear, M., Brasher, F., McCurdy, M., Lewis, J., & Younggren, A. (2013). Working memory, fluid intelligence, and impulsiveness in heavy media multitaskers. *Psychonomic Bulletin & Review, 20*(6), 1274–1281. https://doi.org/10.3758/s13423-013-0456-6.

Mishra, J., Zinni, M., Bavelier, D., & Hillyard, S. A. (2011). Neural Basis of Superior Performance of Action Videogame Players in an Attention-Demanding Task. *Journal of Neuroscience, 31*(3), 992–998. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4834-10.2011.

Moisala, M., Salmela, V., Hietajärvi, L., Salo, E., Carlson, S., Salonen, O., . . . Alho, K. (2016). Media multitasking is associated with distractibility and increased prefrontal activity in adolescents and young adults. *NeuroImage, 134*, 113–121. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.04.011.

Okagaki, L., & Frensch, P. A. (1994). Effects of video game playing on measures of spatial performance: Gender effects in late adolescence. *Journal of Applied Developmental Psychology, 15*(1), 33–58. https://doi.org/10.1016/0193-3973(94)90005-1.

Ophir, E., Nass, C., & Wagner, A. D. (2009). Cognitive control in media multitaskers. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 106*(37), 15583–15587. https://doi.org/10.1073/pnas.0903620106.

Paap, K. R., & Sawi, O. (2016). The role of test-retest reliability in measuring individual and group differences in executive functioning. *Journal of Neuroscience Methods, 274*, 81–93. https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2016.10.002.

Palaus, M., Marron, E. M., Viejo-Sobera, R., & Redolar-Ripoll, D. (2017). Neural basis of video gaming: A systematic review. *Frontiers in Human Neuroscience, 11*, 248. https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00248.

Poldrack, R. A., & Foerde, K. (2008). Category learning and the memory systems debate. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 32*(2), 197–205. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2007.07.007.

Przybylski, A. K., & Weinstein, N. (2017). A large-scale test of the goldilocks hypothesis: Quantifying the relations between dgital-screen use and the mental well-being of adolescents. *Psychological Science, 28*(2), 204–215. https://doi.org/10.1177/0956797616678438.

Ra, C. K., Cho, J., Stone, M. D., La Cerda, J. de, Goldenson, N. I., Moroney, E., . . . Leventhal, A. M. (2018). Association of digital media use with subsequent symptoms of attention-deficit/hyperactivity disorder among adolescents. *JAMA, 320*(3), 255. https://doi.org/10.1001/jama.2018.8931.

Ralph, B. C. W., Thomson, D. R., Cheyne, J. A., & Smilek, D. (2014). Media multitasking and failures of attention in everyday life. *Psychological Research, 78*(5), 661–669. https://doi.org/10.1007/s00426-013-0523-7.

Ralph, B. C. W., Thomson, D. R., Seli, P., Carriere, J. S. A., & Smilek, D. (2015). Media multitasking and behavioral measures of sustained attention. *Attention, Perception, & Psychophysics, 77*(2), 390–401. https://doi.org/10.3758/s13414-014-0771-7.

Rehbein, F., Kleimann, M., & Mößle, T. (2010). Prevalence and risk factors of video game dependency in adolescence: Results of a German nationwide survey. *Cyberpsychology, Behavior and Social Networking, 13*(3), 269–277.

Rehbein, F., Kliem, S., Baier, D., Mößle, T., & Petry, N. M. (2015). Prevalence of Internet gaming disorder in German adolescents: Diagnostic contribution of the nine DSM-5 criteria in a state-wide representative sample. *Addiction, 110*(5), 842–851. https://doi.org/10.1111/add.12849.

Rosen, L. D., Mark Carrier, L., & Cheever, N. A. (2013). Facebook and texting made me do it: Media-induced task-switching while studying. *Computers in Human Behavior, 29*(3), 948–958. https://doi.org/10.1016/j.chb.2012.12.001.

Rumpf, H.-J., Vermulst, A. A., Bischof, A., Kastirke, N., Gürtler, D., Bischof, G., . . . Meyer, C. (2014). Occurence of internet addiction in a general population sample: A latent class analysis. *European Addiction Research, 20*(4), 159–166. https://doi.org/10.1159/000354321.

Schultz, W., Tremblay, L., & Hollerman, J. R. (1998). Reward prediction in primate basal ganglia and frontal cortex. *Neuropharmacology, 37*(4-5), 421–429. https://doi.org/10.1016/S0028-3908(98)00071-9.

Schweizer, K., Moosbrugger, H., & Goldhammer, F. (2005). The structure of the relationship between attention and intelligence. *Intelligence, 33*(6), 589–611. https://doi.org/10.1016/j.intell.2005.07.001.

Shawn Green, C., Sugarman, M. A., Medford, K., Klobusicky, E., & Bavelier, D. (2012). The effect of action video game experience on task-switching. *Computers in Human Behavior, 28*(3), 984–994. https://doi.org/10.1016/j.chb.2011.12.020.

Skinner, B.F. (1937). *The behavior of organisms: An experimental analysis*. The Century Psychology Series. New York: Appleton-Century Company, Inc.

Spence, I., Yu, J. J., Feng, J., & Marshman, J. (2009). Women match men when learning a spatial skill. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 35*(4), 1097–1103. https://doi.org/10.1037/a0015641.

Stavropoulos, V., Alexandraki, K., & Motti-Stefanidi, F. (2013). Recognizing internet addiction: Prevalence and relationship to academic achievement in adolescents enrolled in urban and rural Greek high schools. *Journal of Adolescence, 36*(3), 565–576. https://doi.org/10.1016/j.adolescence.2013.03.008.

Strittmatter, E., Kaess, M., Parzer, P., Fischer, G., Carli, V., Hoven, C. W., . . . Bobes, J. (2015). Pathological Internet use among adolescents: Comparing gamers and non-gamers . *Psychiatry Research, 228*(1), 128–135. https://doi.org/10.1016/j.psychres.2015.04.029.

Thatcher, A., Wretschko, G., & Fridjhon, P. (2008). Online flow experiences, problematic internet use and internet procrastination. *Computers in Human Behavior, 24*(5), 2236–2254. https://doi.org/10.1016/j.chb.2007.10.008.

Thomasius, R. (2020). *Mediensucht 2020 - Gaming und Social Media in Zeiten von Corona: DAK-Längsschnittstudie: Befragung von Kindern, Jugendlichen (12-17 Jahre) und deren Eltern)*. Retrieved from https://www.dak.de/dak/bundesthemen/computerspielsucht-2296282.html#/.

Uncapher, M. R., & Wagner, A. D. (2018). Minds and brains of media multitaskers: Current findings and future directions. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 115*(40), 9889–9896. https://doi.org/10.1073/pnas.1611612115.

Van Holst, R. J., Lemmens, J. S., Valkenburg, P. M., Peter, J., Veltman, D. J., & Goudriaan, A. E. (2012). Attentional bias and disinhibition toward gaming cues are related to problem gaming in male adolescents. *Journal of Adolescent Health, 50*(6), 541–546. https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2011.07.006.

Wang, B.-Q., Yao, N.-Q., Zhou, X., Liu, J., & Lv, Z.-T. (2017). The association between attention deficit/hyperactivity disorder and internet addiction: A systematic review and meta-analysis. *BMC Psychiatry, 17*(1), 260. https://doi.org/10.1186/s12888-017-1408-x.

Weis, R., & Cerankosky, B. C. (2010). Effects of video-game ownership on young boys' academic and behavioral functioning: A randomized controlled study. *Psychological Science, 21*(4), 463–470. https://doi.org/10.1177/0956797610362670.

Wilmer, H. H., Sherman, L. E., & Chein, J. M. (2017). Smartphones and cognition: A review of Research Exploring the Links between Mobile Technology Habits and Cognitive Functioning. *Frontiers in Psychology, 8*, 605. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00605.

Wilms, I. L., Petersen, A., & Vangkilde, S. (2013). Intensive video gaming improves encoding speed to visual short-term memory in young male adults. *Acta Psychologica, 142*(1), 108–118. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2012.11.003.

Wiradhany, W., & Nieuwenstein, M. R. (2017). Cognitive control in media multitaskers: Two replication studies and a meta-Analysis. *Attention, Perception, & Psychophysics, 79*(8), 2620–2641. https://doi.org/10.3758/s13414-017-1408-4.

Wölfling, K., Flor, H., & Grüsser, S. M. (2008). Psychophysiological responses to drug-associated stimuli in chronic heavy cannabis use. *European Journal of Neuroscience, 27*(4), 976–983. https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2008.06051.x.

Wölfling, K., Jo, C., Bengesser, I., Beutel, M. E., & Müller, K. W. (2013). *Computerspiel- und Internetsucht: Ein kognitiv-behaviorales Behandlungsmanual. Störungsspezifische Psychotherapie*. Stuttgart: Kohlhammer.

Wood, E., Zivcakova, L., Gentile, P., Archer, K., Pasquale, D. de, & Nosko, A. (2012). Examining the impact of off-task multi-tasking with technology on real-time classroom learning. *Computers & Education, 58*(1), 365–374. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.08.029.

World Health Organization (2018). *ICD-11: International Classification of Diseases 11th Revision*. Retrieved from https://icd.who.int/browse11/l-m/en.

Yao, Y.-W., Chen, P.-R., Chen, C., Wang, L.-J., Zhang, J.-T., Xue, G., . . . Fang, X.-Y. (2014). Failure to utilize feedback causes decision-making deficits among excessive Internet gamers. *Psychiatry Research, 219*(3), 583–588. https://doi.org/10.1016/j.psychres.2014.06.033.

Yao, Y.-W., Wang, L.-J., Yip, S. W., Chen, P.-R., Li, S., Xu, J., . . . Fang, X.-Y. (2015). Impaired decision-making under risk is associated with gaming-specific inhibition deficits among college students with Internet gaming disorder. *Psychiatry Research, 229*(1-2), 302–309. https://doi.org/10.1016/j.psychres.2015.07.004.

Young, L., Bechara, A., Tranel, D., Damasio, H., Hauser, M., & Damasio, A. (2010). Damage to ventromedial prefrontal cortex impairs judgment of harmful intent. *Neuron, 65*(6), 845–851. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.03.003.

Über die Autorinnen

Katajun Lindenberg ist seit 2020 Professorin für Kinder- und Jugendlichenpsychotherapie an der Goethe-Universität Frankfurt und leitet dort die Ausbildungs- und Hochschulambulanzen für Kinder- und Jugendlichenpsychotherapie. Nach ihrem Studium der Psychologie an den Universitäten Heidelberg und Exeter (UK) war sie an der Forschungsstelle für Psychotherapie des Universitätsklinikums Heidelberg tätig und promovierte an der Universität Heidelberg zum Thema E-Mental-Health in der Prävention von psychischen Störungen. Während sie sich im Rahmen ihrer Ausbildung zur Kinder- und Jugendlichenpsychotherapeutin in Heidelberg am Institut für Familientherapie, in der Klinik für Kinder- und Jugendpsychiatrie und am Zentrum für Psychologische Psychotherapie klinisch weiterbildete, setzte sie ihre wissenschaftliche Laufbahn als Postdoktorandin an der Universität Heidelberg fort. 2012 war sie Gründungsmitglied und wissenschaftliche Leiterin des integrierten Diagnose-, Beratungs- und Behandlungsverbunds für Computerspiel- und Internetabhängigkeit Rhein-Neckar-Kreis, Heidelberg und Mannheim, der 15 klinische Institutionen in der Region vernetzt. 2013 wurde sie als Juniorprofessorin an die Pädagogische Hochschule Heidelberg berufen. Das von ihr dort entwickelte Präventions- und Frühinterventionsprogramm PROTECT wird aktuell in 4 Sprachen übersetzt. 2019 erhielt sie ihre Approbation als Kinder- und Jugendlichenpsychotherapeutin. Im selben Jahr wurde sie mit dem Hermann-Emminghaus-Preis der Deutschen Gesellschaft für Kinder- und Jugendpsychiatrie und Psychotherapie für ihre Arbeiten zur „Prävention, Frühintervention und Behandlung bei Computerspiel- und Internetabhängigkeit im Jugendalter“ ausgezeichnet. 2020 gründete sie die Akademie für Präventionswissenschaften, in der aktuell 90 Suchtfachkräfte aus ganz Baden-Württemberg als PROTECT Trainer*innen ausgebildet werden. In der AWMF Leitlinienentwicklung zu In-

ternetnutzungsstörungen ist sie federführend für den Frühinterventionsbereich aktiv.

Ulrike Basten ist Professorin für Biologische Psychologie an der Universität Koblenz-Landau. Nach ihrem Studium der Psychologie an den Universitäten Bielefeld, Exeter (UK) und Heidelberg, hat sie in Heidelberg ihre Promotion zu persönlichkeitsabhängigen Unterschieden in der Hirnaktivierung während der Bewältigung kognitiver Herausforderungen begonnen, die sie 2011 an der Goethe-Universität Frankfurt abgeschlossen hat. In Heidelberg hat sie auch ihr Interesse für die Verwendung biopsychologischer Methoden zur Untersuchung differentialpsychologischer Fragestellungen entdeckt. In ihrer Forschung beschäftigt sie sich mit der Frage, wie interindividuelle Unterschiede in der Struktur und Funktion des Gehirns mit Unterschieden in kognitiven Fähigkeiten, Persönlichkeit und psychischer Gesundheit zusammenhängen. Die Erforschung der neuronalen Grundlagen von Intelligenz und exekutiven Funktionen stellt einen wichtigen Schwerpunkt ihrer Forschungsarbeiten dar. Mit ihren Hirnbildgebungsstudien zur Intelligenz hat Basten zur Entwicklung von Modellen zu den neuronalen Grundlagen der menschlichen Intelligenz beigetragen, die der Aktivität und Konnektivität eines Netzwerks frontaler, parietaler und subcortikaler Hirnregionen eine wichtige Rolle bei der Erklärung individueller kognitiver Leistungsfähigkeit zusprechen. Im Bereich von Persönlichkeit und psychischer Gesundheit beschäftigt Basten sich mit interindividuellen Unterschieden in der Fähigkeit zur Aufmerksamkeitskontrolle und deren Bedeutung für Ängstlichkeit und die Resilienz gegenüber der Entwicklung stressbedingter psychischer Störungen.

Korrespondenzadressen:
Prof. Dr. Katajun Lindenberg
Abteilung Kinder- und Jugendlichenpsychotherapie
Goethe-Universität Frankfurt, Campus Bockenheim
Carl-Bosch-Haus
Varrentrappstraße 40-42
60486 Frankfurt am Main

E-Mail: lindenberg@psych.uni-frankfurt.de
Homepage: https://www.psychologie.uni-frankfurt.de/87742998/Prof__Dr__Katajun_Lindenberg

Prof. Dr. Ulrike Basten
Fachbereich 8: Psychologie
AG Biopsychologie
Universität Koblenz/Landau
Ostbahnstr. 10
76829 Landau

E-Mail: basten@uni-landau.de
Homepage: https://www.ulrike-basten.de/

Metakognitive Kurzsichtigkeit – Hindernis für intelligentes Verhalten und Versäumnis der Evolution?

KLAUS FIEDLER, FLORIAN ERMARK UND KAROLIN SALMEN

Psychologisches Institut, Universität Heidelberg

Zusammenfassung

In der kognitiven Psychologie gilt als intelligent, wer sich besonders rational verhält. Nach einer kleinen Einführung in die Psychologie des Urteilens und Entscheidens, die seit Jahrzehnten eine Schlüsselrolle für die Theoriebildung und die empirische Untersuchung der Kognitionsforschung spielt, vermitteln wir zunächst einen Eindruck von der pessimistischen Sicht auf die Rationalität menschlichen Verhaltens, die aus dem Forschungsprogramm der beiden einflussreichen Forscher Daniel Kahneman und Amos Tversky hervorgegangen ist. Als Erklärung der vielen Verstöße gegen mathematische und logische Regeln infolge von „Heuristics and Biases" wird gewöhnlich Herbert Simon's Idee der „Bounded Rationality" angeführt. In diesem Kapitel soll eine alternative Erklärung, die traditionell weniger Beachtung gefunden hat, aufgezeigt werden: „Metacognitive Myopia" (metakognitive Kurzsichtigkeit) ist eine Schwäche in der metakognitiven Überwachungs- und Kontrollfunktion, die unser Denken reguliert. Während zahlreiche kognitive Täuschungen und Fehlurteile immer wieder auftreten und unvermeidbar sind, muss eine umfassende Erklärung irrationalen Verhaltens auch erklären, warum primär auftretende Verzerrungen und Illusionen nicht durch metakognitive Überwachung entdeckt und korrigiert werden, trotz Feedback, Aufklärung und vielfacher Hilfestellung. Das unkritische und oftmals naive Festhalten an offenkundig nicht-gültigen Informationen ist Gegenstand der Forschung über metakognitive Kurzsichtigkeit.

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24388

1 Einleitung: Rationalität als Inbegriff intelligenten Verhaltens

Über nominelle Definitionen – wie den Begriff der Intelligenz – lässt sich bekanntlich nicht streiten. Definitionen sind nicht richtig oder falsch; sie sollten einfach nur nützlich sein, etwa für wissenschaftliche Zwecke. Sie sollten die Kommunikation unterstützen (unter Wissenschaftler*innen), statt Verwirrung und Missverständnisse zu erzeugen. In diesem Sinne kann es nützlich sein, Intelligenz operational zu definieren: als die Fähigkeit, die Intelligenztests messen. Das erlaubt es uns, durch Standardisierung mentale Leistungen zwischen unterschiedlichen Personen, Nationen oder über die Zeit hinweg (Flynn, 2007) zu vergleichen. Wenn wir dagegen in der Personalauswahl entweder auf Kreativität oder auf Perfektion Wert legen, dann kann es nützlich sein, Intelligenz durch Problemlösefähigkeit oder durch Fehlervermeidung zu definieren. Doch innerhalb der Kognitiven Psychologie gilt Verhalten, welches dem Ideal der Rationalität genügt, als Inbegriff der Intelligenz.

1.1 Rationales Urteilen und Entscheiden

Rationalität bezeichnet den Teil der Intelligenz, den Immanuel Kant mit seinen Schriften über die Kritik der reinen Vernunft (Logik), der praktischen Vernunft (Ethik und Moral) und der Urteilskraft (Ästhetik) behandelt hat. Obwohl auch der Rationalitäts-Begriff verschiedene Definitionen umfasst – etwa für die Betonung von Kohärenz (innere Stimmigkeit) oder Korrespondenz (Übereinstimmung mit äußeren Gütemaßstäben) – hat das hehre Ideal der Rationalität wenig mit sprachlichem Allgemeinwissen, Rechenkenntnissen, Rechtschreibung, oder anderen Aufgaben zu tun, die gemeinhin mit Intelligenz verbunden werden. Rationalität bezieht sich, ganz im Kant'schen Sinne, auf die Zweckmäßigkeit von Urteilen, Entscheidungen und Handlungen. Ihre Erforschung hat im letzten halben Jahrhundert nicht nur Psycholog*innen fasziniert, sondern auch Wissenschaftler*innen aus verschiedenen benachbarten Disziplinen wie Philosophie, Biologie, Ethnologie, Soziologie, und Verhaltensökonomie, die sich mit Urteilen und Entscheiden (bekannt unter der Abkürzung JDM, *judgment and decision making*) beschäftigen. Die fruchtbare Beschäftigung dieses Forschungsfeldes mit Rationalität hat nicht nur die Entwicklung der modernen Verhaltenswissenschaften geprägt, sondern auch mehreren Psychologen einen Nobelpreis in Wirtschaftswissenschaften eingebracht. Urteilen und Entscheiden heißt, verschiedene Einstellungsobjekte (politische Parteien; Markenprodukte; Job-Bewerber*innen) oder Handlungsoptionen (Berufe;

Urlaubsziele; Partnerwahl; Lotterien) im Hinblick auf ihre Zweckmäßigkeit (d. h. ihre mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten zu erwartenden Kosten und Nutzen) zu bewerten.

Rational urteilen und entscheiden ist – wie Kants bekannte Schriften zeigen – immer mit Kritik verbunden, also mit einer kritischen Abwägung verschiedener Kosten, Nutzen und Wahrscheinlichkeiten. Wird der Vorteil eines attraktiven Berufes vielleicht durch geringe Bezahlung oder großen Konkurrenzkampf und geringe Erfolgswahrscheinlichkeit zunichte gemacht? Lohnt sich eine Lotterie mit einer hohen Gewinnsumme, aber sehr niedriger Gewinnwahrscheinlichkeit? Das kritische Abwägen der Vor- und Nachteile kann dabei so komplex sein, dass eine eindeutig richtige Lösung nicht existiert. Wie viel Geld ist ein Menschenleben wert? Auf wieviel Lebensqualität will man verzichten, um das Leben um ein Jahr zu verlängern? In vielen anderen Fällen liegt eine logisch oder psychologisch korrekte Antwort jedoch auf der Hand. Sie nicht zu erkennen, gilt dann als Symptom eklatanter Irrationalität. Wenn man mehr Geld in den Kauf einer Ware investiert, als man durch den Verkauf erzielen kann, handelt man nicht zweckmäßig; wer sich dennoch so verhält, ist irrational. Dies gilt ebenso für Patient*innen, die Medikamente einnehmen, deren Wirksamkeit geringer ist als die Nebenwirkungen, oder für Investoren, die glauben, ohne Risiken hohe Profite erwirtschaften zu können (Bazerman & Sezer, 2016). Diese Probleme sind mit ein wenig Weltwissen und einem fast allen Menschen gegebenen Verstand eindeutig lösbar.

Das pessimistische Menschenbild seit Kahneman und Tversky

Es sind nicht jene verzwickten Probleme ohne eindeutige Lösung, sondern die letzteren, wesentlich einfacheren Probleme, die im Fokus einer Rationalitätsforschung stehen, die zu einem sehr pessimistischen Menschenbild geführt haben. Seit den fundamentalen und überaus einflussreichen Arbeiten von Daniel Kahneman und Amos Tversky in den 1970er Jahren haben sich Tausende von empirischen Untersuchungen mit einer provozierenden Frage beschäftigt: Wie kann es sein, dass Menschen weitgehend unabhängig von Bildung und IQ gegen völlig unbestreitbare Regeln der Logik und Statistik verstoßen und scheinbar einfachste Prinzipien der Rationalität ignorieren? In unzähligen Experimenten hat die Rationalitätsforschung menschliches Urteilen und Entscheiden mit normativen Regeln der Logik oder Mathematik verglichen und immer wieder belegt, wie häufig Menschen von diesen Normen abweichen.

Prominente Beispiele kognitiver Fehlleistungen und Täuschungen

Einige prominente Beispiele sollen verdeutlichen, wie innerhalb des Forschungsprogramms von Kahneman und Tversky (1972, 1973, 1984; Kahneman et al., 1982; Tversky & Kahneman, 1971, 1974, 1981) die Rationalität von Verhalten überprüft wurde. In zahlreichen Experimenten wurden Präferenz-Umkehrungen gefunden (*preference-reversal*, Slovic, 1995; Tversky, 1969). Menschen verstoßen immer wieder gegen die Symmetrie-Annahme (sie bevorzugen A > B, aber dann B > A), oder gegen die Transitivitäts-Annahme (sie bevorzugen A > B und B > C, aber dann C > A). Dasselbe Länderpaar (USA und Kanada) wird sowohl als ähnlicher als auch als unterschiedlicher eingeschätzt als ein anderes Paar (Ceylon und Nepal); fragt man nach der Ähnlichkeit von Nord-Korea zu China ergeben sich höhere Werte, als wenn man nach der Ähnlichkeit von China zu Nord-Korea fragt (Tversky, 1977). Bei zwei Wetten mit demselben Erwartungswert von 7€ wird die erste Wette, bei der mit einer Wahrscheinlichkeit von 75% ein Gewinn von 10€ erzielt werden kann (und mit 25% ein Verlust von 2€) gegenüber der alternativen Wette bevorzugt, bei der mit einer Wahrscheinlichkeit von 25% 73€ gewonnen werden können (und eine Chance von 25% besteht, 15€ zu verlieren). Aber für die von ihnen weniger bevorzugte, zweite Wette sind die meisten Leute bereit, einen höheren Betrag zu setzten als für die präferierte, erste Wette (Lichtenstein & Slovic, 1973; Slovic, 1995).

Ein weiteres weit verbreitetes und erstaunliches Beispiel ist die Konjunktionstäuschung (*conjunction fallacy*). Sie äußert sich in der häufig beobachteten Tendenz, die Konjunktion zweier Ereignisse wahrscheinlicher zu finden als eines der beiden Ereignisse, was logisch unmöglich ist. Beispielsweise kann die Zahl der Blonden mit blauen Augen niemals größer sein kann als die Zahl der Blonden aller Augenfarben. Solche typischen Beispiele der Konjunktionstäuschung sind klare Verletzungen der Wahrscheinlichkeitsrechnung oder der Mengenlehre. So halten es die meisten Leute für wahrscheinlicher, dass in Kalifornien ein Erdbeben eine Flutwelle auslöst, die 2000 Menschenleben kostet, als dass eine Flutwelle 2000 Menschenleben kostet. Oder die Wahrscheinlichkeit, dass eine exzellente Tennisspielerin den ersten Satz verliert, aber dann doch noch das Match gewinnt, erscheint höher als die Wahrscheinlichkeit, dass sie den ersten Satz verliert (Tversky & Kahneman, 1983).

Viele Fehlleistungen und kognitive Täuschungen werden durch Heuristiken erklärt. Heuristiken sind mentale Daumenregeln, die schnelle Urteile gestatten,

aber häufig wenig genau sind. Die Verankerungs-Verzerrung (*anchoring bias*) zeigt sich darin, dass quantitative Schätzungen in Richtung näher an einem willkürlich gewählten Anfangswert (Anker) liegen als wenn es keinen Anker gibt. Eine Erklärung dieser Verzerrung ist, dass zur Schätzung der Anfangswert benutzt und dann bis zu einem plausiblen Wert angepasst wird (*anchoring and adjustment heuristic*; Tversky & Kahneman, 1974). Durch diese Heuristik können auch andere, praktisch höchst relevante und folgenreiche kognitive Täuschungen erklärt werden. Beispielsweise werden bei der Planungstäuschung (*planning fallacy*) die Kosten für ein Bauprojekt im Vorhinein unterschätzt, möglicherweise weil die Kosten einzelner Bestandteile des Projekts, die natürlich deutlich niedriger liegen, als Anker fungieren und nicht hinreichend weit angepasst werden (Kruger & Evans, 2004).

Es gibt zahlreiche weitere Beispiele für Heuristiken, die als Erklärungsansätze für kognitive Täuschungen dienen. Nach der Verfügbarkeits-Heuristik (*availability heuristic*, Tversky & Kahneman, 1973) wird die Wahrscheinlichkeit und Häufigkeit von Ereignissen, die im Gedächtnis leicht verfügbar sind (wie z. B. Mord oder Blitzschlag als Todesursache), überschätzt, während weniger verfügbare Ereignisse (wie Selbstmord oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen) unterschätzt werden. Während Verfügbarkeit oft ein guter Hinweis auf die wahre Häufigkeit von Ereignissen ist, wird sie auch durch andere Faktoren beeinflusst (z. B. welche Todesursachen wir durch Medien und Erzählungen eher erfahren als andere), wodurch es zu teils erstaunlichen Fehleinschätzungen kommt.

Klugheit durch einfache Heuristiken (bounded rationality)

Kahneman und Tverskys bahnbrechende Arbeiten begründeten eine eher pessimistische Sicht auf menschliche Intelligenz und Rationalität. Wenig später formierte sich allerdings auch eine Gegenbewegung, welche die vielfältigen Befunde scheinbar irrationalen Verhaltens als eigentlich adaptiv, also für den Menschen zweckmäßig, interpretierte. Heuristiken sind aus dieser veränderten Perspektive nicht mehr Quellen irrationalen Verhaltens, sondern schnelle und sparsame Werkzeuge (Gigerenzer, 2008), die intelligentem Handeln zu Grunde liegen: „heuristics that make us smart“ (Gigerenzer & Todd, 1999). Die vielfältigen Versuche, Illusionen und Denkfehler zu rationalisieren und als Symptome von adaptiver Kognition zu interpretieren, beruhen häufig auf Simon's (1990) Idee der gebundenen Rationalität (*bounded rationality*), wonach die Evolution eine begrenzte kognitive

Kapazität ganz gezielt auf bestehende Umweltanforderungen zugeschnitten hat. Künstliche und absichtlich schwierig und irreführend konstruierte Aufgaben, die typisch sind für das Forschungsprogramm von Kahneman und Tversky, liegen außerhalb der natürlichen Domäne der gebundenen Rationalität, und die scheinbaren Fehlleistungen bei solchen Aufgaben sind daher nicht überraschend (Juslin, 1994). Die Konzepte der ökologischen (Todd & Gigerenzer, 2007) und sozialen Rationalität (Hertwig & Hoffrage, 2013) sind aktuelle Weiterentwicklungen des gebundenen Rationalitätskonzepts.

Eine zentrale Folgerung aus der Annahme gebundener Rationalität ist, dass Urteils- und Entscheidungs-Kompetenzen oft an diejenigen Lernumwelten gebunden sind, in denen sie erworben wurden. Die im vorigen Abschnitt dokumentierten Denkfehler und Illusionen treten in der Regel dann auf, wenn an eine bestimmte Lernumwelt gebundene Kompetenzen auf gänzlich andere Umwelten übertragen werden sollen. Ein prominentes Beispiel ist etwa das Phänomen der Überschätzung der eigenen Urteilssicherheit (*overconfidence*), also eine systematisch höhere Einschätzung der eigenen Sicherheit als tatsächlich gerechtfertigt. Wenn Laien oder auch Experten beispielsweise meinen, mit ihren Urteilen zu 90% richtig zu liegen, liegen die tatsächlichen Korrektheitsraten im Schnitt nur bei 70%. Dabei können Urteiler in Bezug auf klar definierte Aufgaben-Domänen durchaus gut kalibriert (geeicht) sein; sie überschätzen sich jedoch, wenn sie ihre domänengebundene Eichung auf neue Domänen übertragen (Gigerenzer et al., 1991; Juslin, 1994).

2 Metakognition

Die Fähigkeit, Kompetenzen auf neue Domänen zu übertragen, ist indessen kaum eine künstliche Aufgabe, sondern eine natürliche Anforderung der adaptiven Intelligenz. Umwelten ändern sich ständig, und Individuen (Organismen) wechseln ihre Standorte, sozialen Umgebungen, Organisationen und Lerninstitutionen. Fehlleistungen durch einen Umgebungswechsel zu entschuldigen, ist daher nicht überzeugend. Das Kriterium der Flexibilität und Übertragbarkeit von Kompetenzen auf neue Domänen stellt eine spezielle Anforderung an rationales Verhalten dar, die einer ständigen kritischen Überprüfung der Umwelt durch das Individuum bedarf. Für diese Instanz gibt es den Begriff Metakognition. Sie steht im Mittel-

punkt unserer eigenen Forschungen zur Rationalität menschlichen Urteilens und Entscheidens.

2.1 Qualitätskontrolle des eigenen Denkens

Metakognition operiert nicht abgegrenzt von der übrigen Kognition, sondern ist ein zentraler Teil davon. Sie übernimmt die Qualitätskontrolle von mentalen Funktionen, also die Überwachung (*Monitoring*) und Steuerung (*Control*) von Denken und Gedächtnis (Ackerman & Thompson, 2017; Nelson & Narens, 1990). Diese metakognitiven Funktionen sind insbesondere gefragt, wenn sich die Umstände ändern, sodass sich die Frage stellt, ob alte Kompetenzen noch zweckmäßig sind oder durch neue ersetzt werden müssen.

Überwachung und Kontrolle

Die Überwachungs-Funktion der Intelligenz ist allgegenwärtig. Jeden Satz, den wir sprechen oder schreiben, jeden Text, den wir unterzeichnen, jede Kaufentscheidung, die wir treffen, und jede soziale Kommunikation, können wir noch einmal prüfen und editieren, und sei es nur zur Vermeidung von Flüchtigkeitsfehlern. Dies sollte umso häufiger geschehen, wenn wir über bedeutsame Urteile, Schlussfolgerungen, Beweise, und folgenschwere Entscheidungen nachdenken (Ackerman & Thompson, 2017). Die Ergebnisse der Überwachungs-Funktion bilden dann den Input für die Kontroll-Funktion, die für richtig befundene Entwürfe beibehält und in die Tat umsetzt, während sie fehlerhafte Entwürfe zurückhält, verwirft oder korrigiert.

Möglichkeit der Korrektur und Lernfähigkeit

Diese Möglichkeit der nachträglichen Korrektur von fehlerhaften Urteilen und Entscheidungen wurde in der Rationalitäts-Forschung der Kahneman-Tversky-Tradition weithin übersehen oder zumindest stark vernachlässigt. Die Illusionen und Verzerrungen, die durch Heuristiken hervorgerufen werden, weichen zwar zunächst von den Normen der Rationalität ab, doch sie können durch metakognitive Qualitätskontrolle korrigiert werden. So wie wir einen Tippfehler in einem Brief oder auch eine falsche Antwort in einem Test korrigieren können, und wie schließlich nicht der anfängliche Fehler, sondern das zufriedenstellende Endergebnis

zählt, ist die Überwachung und Kontrolle bedeutsamer Urteile und Entscheidungen allemal eine wichtige Facette des intelligenten, rationalen Handelns. Wenn wir unsere Entscheidungen, Einschätzungen und Vorstellungen als falsch oder wirklichkeitsfremd erkennen, und insbesondere dann, wenn es uns möglich ist, durch Korrektur eine klare Verbesserung zu erreichen, dann muss Rationalität auch daran gemessen werden, ob die Notwendigkeit zur Korrektur erkannt und diese umgesetzt wird.

Selbst dann, wenn ein anfänglicher Fehler nicht (vollständig) korrigiert werden kann, weil beispielsweise seine Ursache noch nicht verstanden ist, können durch den metakognitiven Erkenntnisprozess zumindest falsche Schlussfolgerungen mit unnötigen Kosten vermieden werden. Wenn eine neue Unternehmensstrategie zum Beispiel zu eindeutigen Verlusten führt, so können die leitenden Manager*innen davon Abstand nehmen, egal ob sie die Fehlerursache schon kennen und korrigieren können (z. B. ein Betrug im Börsenumfeld oder eine fehlerhafte Marktanalyse) oder nur die Kosten erkennbar sind. Aber genau diese selbstverständliche Rolle der Metakognition wurde in der Rationalitätsforschung bisher weitgehend vernachlässigt. Wie sich im Weiteren zeigen wird, muss eine umfassende theoretische Konzeption des rationalen Verhaltens nicht nur erklären, wie falsche anfängliche Urteile und Entscheidungen (unter Zeitdruck oder mangels genügend Aufmerksamkeit oder Sorgfalt) entstehen können. Solche Fehler im ersten Entwurf sind kaum der Rede wert, wenn sie denn korrigiert werden. Deshalb muss eine umfassende Theorie rationalen Handelns erklären, ob und unter welchen Bedingungen solche Fehler erkannt und korrigiert werden und wann, durch eine Kombination von fehlerhafter Kognition und defizitärer metakognitiver Kontrolle, tatsächlich Schaden für das Individuum entsteht.

2.2 Metakognitive Kurzsichtigkeit

Betrachtet man die bisherigen Ergebnisse der Metakognitionsforschung, zeigt sich, dass Defizite in der Überwachung und Kontrolle der eigenen mentalen Operationen weit verbreitet und folgenschwer sind. Metakognitive Kurzsichtigkeit (*metacognitive myopia*) erweist sich als eines der schwerwiegendsten Hindernisse auf dem Weg zu rationalem Verhalten. Trotz unserer begrenzten kognitiven Ressourcen können Urteile und Entscheidungen oftmals erstaunlich gut auch auf der Basis von komplexen Daten gefällt werden (z. B. wenn ein Lehrer die Leistungen von diversen Schülern in vielen Klassen und verschiedenen Fächern bewerten

muss; Fiedler et al., 2002, 2007). Obwohl, oder gerade weil, die Teilnehmer*innen an vielen Experimenten die dargebotenen Daten verarbeiten, führt metakognitive Kurzsichtigkeit – also die naive und unkritische Tendenz, Informationen ungeachtet ihrer Gültigkeit für bare Münze zu nehmen – zu persistenten Fehlern und eindeutigen Verstößen gegen rationale Prinzipien. Die folgenden Abschnitte geben einen Einblick in einschlägige Befunde über metakognitive Kurzsichtigkeit (für eine ausführlichere Übersicht, siehe z. B. Fiedler, 2000, 2012).

Unkritische Korrespondenzschlüsse

Ein denkwürdiges „klassisches“ Beispiel findet sich in einer alten Untersuchung von Jones und Harris (1967) über Korrespondenzschlüsse von beobachtetem Verhalten auf zugrundeliegende Einstellungen (*correspondence bias*, auch bekannt als fundamentaler Attributionsfehler). Versuchsteilnehmer*innen bekamen Aufsätze über Fidel Castro zu lesen und sollten daraus auf die Einstellung des*der Verfasser*in zum damaligen kubanischen Präsidenten und seiner Politik schließen. Nicht überraschend schlossen die Teilnehmer*innen von Pro-Castro Aufsätzen auf eine positive und von Anti-Castro-Aufsätzen auf eine negative Einstellung. Weniger selbstverständlich war jedoch, dass die Teilnehmer*innen den Autor*innen auch dann eine korrespondierende Einstellung nachsagten, wenn sie wussten, dass die Verfasser*innen gar nicht frei entscheiden konnten, ob sie pro oder contra Fidel-Castro schreiben wollten. Auch dann, wenn der Aufsatzinhalt gar nicht diagnostisch für die Einstellung sein konnte, wurde der Inhalt – wider besseres Wissen und in unkritischer Weise – als Informationsquelle benutzt. Neuere Befunde über das naive Festhalten an offenkundigen Fake News, trotz eindeutiger Aufklärung (Lewandowsky et al., 2012), überraschen vor diesem Hintergrund kaum.

Perseveranz

Ähnlich zu dieser aktuellen Beobachtung kann in vielen Bereichen gezeigt werden, dass (Fehl-)Informationen auch nach Aufklärung über deren Unzuverlässigkeit weiterhin wirken und für Verzerrungen sorgen (Perseveranz). In einer Untersuchung von Ross und Kollegen (1975) sollten Teilnehmer*innen einschätzen, ob eine Aussage wahr ist. Danach wurde ihnen angezeigt, dass ihre Einschätzung richtig oder falsch sei, allerdings völlig unabhängig von der tatsächlichen Leistung

der Person. Durch eine hohe (niedrige) Fehlerquote, die den Teilnehmer*innen rückgemeldet wurde, sollte ein positiver (negativer) Eindruck der eigenen Leistung entstehen. Nach Abschluss der Einschätzungen wurden die Personen darüber aufgeklärt, dass die soeben erhaltene Rückmeldung keinerlei Aussagekraft hatte. Trotzdem schätzen sich Teilnehmer*innen, die ein gefälschtes positives Feedback erhalten hatten, im Anschluss positiver ein als die Opfer des falschen negativen Feedbacks, auch wenn ihre tatsächliche Leistung sich nicht unterschied. Diese Perseveranz einer klar unzulässigen Information zeigte sich nicht nur bei den Teilnehmer*innen selbst, sondern auch bei unbeteiligten Beobachter*innen, und konnte durch Warnungen vor Perseveranz zwar reduziert, aber nicht eliminiert werden. Die Beständigkeit von Perseveranz-Effekten gegenüber Aufklärung und Intervention ist besonders im Hinblick auf soziale Medien ein vieldiskutiertes Problem (z. B. Chan et al., 2017).

Unfähigkeit, nicht zu lernen

Im Alltag begegnen Personen Informationen oft mehrfach, ob es sich nun um Falschinformationen in sozialen Medien, Werbung oder Nachrichtenmeldungen handelt. Die Häufigkeit der Betrachtung ändert selbstverständlich den Inhalt nicht: sind alle Informationen aufgenommen, werden alle weiteren Durchgänge redundant. Weitere Wiederholungen sollten somit auch nicht zu weiterem Lernen führen. Allerdings zeigen auch hier Untersuchungen, dass Personen zwar zwischen neuer Information und Wiederholungen unterscheiden können, dass aber Wiederholungen dennoch ihre Entscheidungen beeinflussen. Unkelbach, Fiedler und Freytag (2007) zeigten Personen die Entwicklung (positiv/negativ) von fiktiven Aktien. Für manche Tage wurde die gleiche Angabe doppelt gezeigt, in zwei verschiedenen Nachrichtensendungen („Heute“ und „Tagesschau“). Trotz der Warnung, sich von solchen Doppelungen nicht beeinflussen zu lassen, waren anschließende Einschätzungen der Aktien in Richtung der wiederholten Informationen verzerrt. Diese Verzerrung führte sogar teils zu nachteiligen Entscheidungen. Lediglich wenn Teilnehmende parallel eine weitere Aufgabe bearbeiteten, wodurch ihr Arbeitsgedächtnis beansprucht wurde, zeigte sich ein geringerer Einfluss von redundanten Informationen. Wenn die Teilnehmer*innen gezwungen waren, ihre begrenzte Aufmerksamkeit einzuteilen, konnten sie diese gezielt auf die relevante, neue Information lenken.

Unfähigkeit, nicht zu erinnern

Wer möglichst wenig vergisst, gilt oft als intelligent. Dabei wird vernachlässigt, dass kurz- oder langfristiges Vergessen ebenso zu einem effizienten Einsatz des Gedächtnisses gehört, wenn dies vorteilhaft ist. Das gilt nicht nur für „Löschen" oder „Überschreiben" von Falschinformationen, wie im Abschnitt zu Perseveranz dargestellt. Erfährt beispielsweise eine Auswahlkommission durch Zufall, dass eine Bewerberin schwanger ist, darf diese Information das Einstellungsverfahren nicht beeinflussen. Kann man einen solchen Zustand der selbstbestimmten Unwissenheit (*deliberate ignorance*) herbeiführen, nachdem eine Information bereits bekannt ist? Zahlreiche Studien deuten darauf hin, dass auch in diesem Bereich Metakognition zu kurzsichtig bleibt und der Einfluss unzulässiger Erinnerungen nicht verlässlich vermieden werden kann (für einen Überblick zum Nicht-Wissen-Wollen und Nicht-Erinnern-Wollen, siehe Hertwig & Engel, 2020).

Noch problematischer erscheint es allerdings, bildhaft zu erinnern, was nie gesehen und erlebt wurde. Forschung zum konstruktiven Gedächtnis (*constructive memory*) demonstriert eindrücklich, mit welcher Frequenz und Regelmäßigkeit solche Falscherinnerungen entstehen können. Beispielsweise zeigten Loftus, Miller und Burns (1978) ihren Teilnehmer*innen Videos eines Verkehrsunfalls an einer Kreuzung, an der ein Vorfahrtsschild stand. Nach einer anschließenden Befragung erinnerten Teilnehmer*innen, die gefragt wurden „Fuhr ein anderer Wagen vorbei, als das Auto am Stoppschild hielt?", später häufiger ein Stoppschild, als Teilnehmer*innen, bei denen die Frage korrekterweise ein Vorfahrtsschild enthielt. In einem weiteren Beispiel glaubten Teilnehmer*innen häufiger, dass eine beobachtete Person ein negatives Verhalten gezeigt hatte, wenn sie zuvor nach diesem Verhalten gefragt wurden, obwohl sie dies zunächst (korrekt) verneint hatten (Fiedler et al., 1996). Metakognition verhindert also weder, dass Erinnerungen durch unzulässige Einflüsse verändert und hinzugefügt werden, noch beziehen wir die konstruktive Natur von Erinnerungen in unsere Schlussfolgerungen ein. Besonders für den Umgang mit Augenzeugen ist diese Erkenntnis von großer Bedeutung.

2.3 Eine Frage des Nutzens und der Bedeutsamkeit?

Der oben dargestellte Ansatz der gebundenen Rationalität sollte uns auch die Metakognitions-Forschung hinterfragen lassen. Sind die aufgezeigten Effekte

womöglich den konstruierten Laborbedingungen geschuldet? Zeigen sie sich auch im Alltag? Wie groß ist die Bedeutung von metakognitiver Kurzsichtigkeit für unser tägliches Handeln, wie sehr nutzt uns effektive Metakognition? Deshalb soll hier auch die Bedeutsamkeit metakognitiver Kurzsichtigkeit in wichtigen Anwendungskontexten aufgezeigt werden, in denen viel auf dem Spiel steht und Metakognition helfen kann, größeren Schaden zu vermeiden.

Beurteilung von Zeugenaussagen

Als eindrucksvolles Beispiel sei hier auf eine Methode verwiesen, die Sachverständige in Strafrechtsprozessen verwenden, um die Glaubhaftigkeit von Zeugenaussagen zu überprüfen. Von solchen Sachverständigen-Gutachten hängt bei vielen Verfahren, in denen keine physikalischen Beweise existieren (wie bspw. Vergewaltigungen oder andere Sexualdelikte), der Schuldspruch des Richters ab. Bei der Methode der *Criteria-Based Statement Analysis* (CBSA; Vrij, 2005) wird von Gutachter*innen die Anzahl sogenannter Wahrheitskennzeichen in einer Zeugenaussage gezählt. Dabei wird jedoch nicht beachtet, dass die erwartete Anzahl dieser sprachlichen Wahrheitskennzeichen entscheidend von der Textlänge abhängt. In einer längeren Aussage von 20 Seiten findet man natürlich mehr Wahrheits-Kennzeichen als in einem kurzen Text von nur eine Seite. Trotz Hinweis auf dieses offenkundige Problem wehren sich Rechtsgutachter*innen gegen die Kritik und basieren existenziell wichtige Gutachten weiterhin auf einer unkritischen CBSA-Auszählung (Fiedler & Prokop, 2002). Hier zeigt sich somit metakognitive Kurzsichtigkeit im Alltag, und noch dazu in einer besonders wichtigen Aufgabe.

Einschätzung von Risiken und Ratschlägen

Im Alltag falsch einzuschätzen, welche Risiken und Chancen mit verschiedenen Handlungsalternativen einhergehen, wie etwa bei Impfungen und anderen medizinischen Behandlungen, und der falsche und unkritische Umgang mit Rat (wirklicher oder vermeintlicher) Expert*innen, kann lebensbedrohlich werden. Wie gut unterscheiden wir unter solchen Umständen zwischen hilfreichen und schädlichen Ratschlägen? In einer Untersuchung von Fiedler et al. (2019) sollten Teilnehmer*innen zunächst unterschiedliche Gesundheitsrisiken einschätzen, beispielsweise die Wahrscheinlichkeit, Brustkrebs zu haben, wenn eine Mammo-

graphie auffällig war. Dann erhielten sie Ratschläge von Expert*innen, die sowohl eine Schätzung des Risikos als auch eine Erklärung der Einschätzung beinhalteten. Aus dieser Erklärung ging hervor, dass einige Ratschläge auf einer verlässlichen Stichprobe beruhten, andere jedoch auf einer verzerrten Stichprobe (und somit schlechte Ratschläge waren). Die abschließenden Risikoeinschätzungen der Teilnehmer*innen zeigten, dass viele von ihnen alle Ratschläge, ungeachtet ihrer Verlässlichkeit, unkritisch mit einbezogen – teils sogar dann, wenn schlechte Ratschläge mit einem unmissverständlichen Warnhinweis versehen wurden. Trotz der Bedeutsamkeit und Alltagsrelevanz dieser Einschätzungen zeigte sich weder eine angemessene Überwachung noch eine Kontrolle von fehlerhaften Informationen. Diese Auswirkungen metakognitiver Kurzsichtigkeit kann Personen das Leben kosten.

Um dieses denkwürdige Phänomen richtig zu verstehen, ist es wichtig, dass Personen durchaus die nötigen kognitiven Kapazitäten besitzen, um die metakognitiven Überwachungs- und Kontrollfunktionen auszuführen. Es fehlt ihnen also nicht an der nötigen Intelligenz, um die Fehlerhaftigkeit von falscher oder irreführender Information zu verstehen.

Demokratisches Entscheiden

Entscheidungen in Gruppen, sei es die Abstimmung über ein Gesetzespaket im Bundestag oder die Auswahl neuer Mitbewohner*innen in einer Wohngemeinschaft, stellen eine weitere alltägliche Herausforderung an Metakognition dar. Eine besonders relevante Verzerrung ist hier der oben bereits erwähnte verstärkte Einfluss von wiederholten Informationen. Wird dasselbe Argument in einer Diskussion mehrfach eingebracht, wird es wesentlich stärker gewichtet, als weniger häufig eingebrachte, aber genauso relevante Argumente. So wurde in einer Untersuchung von Fiedler, Hofferbert und Wöllert (2018) eine fiktive Diskussion gezeigt, in der die derzeitigen Bewohner*innen einer Wohngemeinschaft sich über die positiven und negativen Eigenschaften von vier verschiedenen Bewerber*innen auf ein Zimmer austauschten. Diese wiederholten dabei mehrfach und in selektiver Weise Informationen, die manchen Bewerber*innen nützten und anderen schadeten. Die darauf basierenden Einschätzungen der Proband*innen waren stärker von der wiederholten Information beeinflusst, obwohl sie keine höhere Aussagekraft hatte – dieser Einfluss war sogar so stark, dass objektiv schlechtere Bewerber*innen vorgezogen wurden. Dieser Effekt blieb auch be-

stehen, wenn die Teilnehmer*innen explizit darauf hingewiesen wurden, dass wiederholte Informationen nicht aussagekräftiger sind und nicht besonders berücksichtigt werden sollten, oder wenn die Information nur von einer Person mehrfach wiederholt wurde, also keine soziale Zustimmung mehrerer anderer Personen signalisierte. Es nützte auch wenig, wenn die Proband*innen gewarnt wurden, dass die Wiederholung von Aussagen mit manipulativer Absicht geschah.

Generell kann es durchaus nützlich sein, wiederholte Information verstärkt zu verwenden – dann etwa, wenn die Wiederholung tatsächlich mit dem Wahrheitswert korreliert ist, wenn Wiederholung also soziale Validierung bedeutet. Doch fehlende Überwachung und Kontrolle, wenn dies nicht der Fall ist, führen unweigerlich dazu, dass unabhängig von ihrer inhaltlichen Qualität Mehrheitsmeinungen einflussreicher sind als Positionen, die von Minderheiten eingebracht werden (Fiedler et al., 2015). Hier behindert metakognitive Kurzsichtigkeit die Entfaltung des Potentials, das in gruppenbasierten und demokratischen Entscheidungsprozessen steckt.

2.4 Verbesserung metakognitiver Leistungen

Juristische Anwendungen, medizinische Risikoeinschätzungen und demokratische Entscheidungsprozesse machen eindrücklich deutlich, wie wichtig kritische Metakognition ist, aber auch, dass sie oft zu kurz greift oder völlig versagt. Betrachtet man diese Ergebnisse, kommt man nicht umhin, nach Verbesserungsmöglichkeiten zu fragen. Können wir Metakognition trainieren und damit Denken und Handeln verbessern?

Die vorherigen Abschnitte stimmen zunächst pessimistisch – der zumeist erste Einfall, ganz im Geiste der Aufklärung, dass eine Erklärung dieser Verfehlungen direkt zum Ausweg aus der metakognitiven Unmündigkeit führen müsse, scheitert. Allerdings hängt dieser Eindruck auch an der Erwartung, dass diese Intervention metakognitive Kurzsichtigkeit völlig eliminieren müsste, obwohl schon eine teilweise Reduktion eine wichtige Verbesserung darstellen könnte. In einem spannenden aktuellen Beispiel konnten Schmid und Betsch (2019) zeigen, dass sich der Einfluss von falschen Argumenten von Impfskeptikern auf die Zuhörerschaft deutlich reduzieren ließ, indem eine andere Person inhaltliche Gegenargumente vorstellte, aber auch, indem sie nur die Regeln erklärten, die das Argument verletzt.

Ein möglicher Weg zur Verbesserung von Metakognition ist die Veränderung der Umwelt, um dadurch günstige Bedingungen zu schaffen. Dazu gehören klares und schnelles Feedback, Anreize für eine Verbesserung, und die präventive Konsolidierung gut gesicherter Information. Beispielsweise kann eine vorherige Vertiefung richtiger Überzeugungen (z. B. zu Impfungen) durch Bestätigung und Beschäftigung dazu führen, dass unzulässige Argumente und Manipulation besser erkannt werden und an Einflusskraft verlieren (*inoculation theory*; siehe z. B. Banas & Rains, 2010).

3 Schlussfolgerungen

Ohne allen Optimismus bezüglich der Trainierbarkeit metakognitiver Kompetenzen zu verlieren[1], bleibt die denkwürdige Einsicht, dass metakognitive Kurzsichtigkeit eine große Hürde für rationales Denken und Handeln darstellen kann. Wenn uns wirklich diese kritische Urteilsfähigkeit fehlt – Informationen zu überwachen, um zwischen offensichtlich falschen Informationen oder Fake News und echten, überzeugenden Informationen zu differenzieren, und die entsprechende Steuerung, um darauf zu reagieren und Informationen adäquat zu korrigieren – stellt sich die Frage, warum sich diese entscheidende Kompetenz nicht evolutionär ausgebildet hat.

In Ermangelung einer vollständigen und endgültigen Antwort bieten sich zumindest plausible Überlegungen an. Zum einen muss man sehen, dass Metakognition – also die Fähigkeit, über mögliche alternative Welten und Wahrscheinlichkeiten nachzudenken – eine sehr junge Erfindung der Aufklärung ist, deren Entwicklung noch am Anfang steht. Zweitens könnte metakognitive Kurzsichtigkeit widerspiegeln, was Robin Hogarth und Kollegen als „*wicked environments*“ bezeichnet haben (Hogarth, Lejarraga & Soyer, 2015), nämlich die Sparsamkeit bzw. Knappheit, mit der uns die Umwelt oftmals gar kein Feedback oder nur sehr spätes oder indirektes Feedback über unsere Urteile und Entscheidungen gibt.

Davon abgesehen besagt die vielleicht interessanteste Antwort, dass die Evolution vielleicht gar nicht „vergessen“ hat, die Metakognition zu stärken, sondern dies vielleicht „absichtlich“ unterdrückt hat. Denn die nötigen mathematischen Al-

[1] Ein sehr informativer Überblick zum Transfer vielversprechender Befunde aus der Kognitionsforschung findet sich bei Metcalfe und Kornell (2007).

gorithmen für die Korrektur von probabilistischen Annahmen sind kaum bekannt, und die Kosten für notorische Kritik an zweifelhaften Informationen könnten höher sein als ihr Nutzen. Der stetige Versuch, jede Information zu hinterfragen und kritisch auf ihre Haltbarkeit zu prüfen, könnte bedeuten, dass eine Reihe anderer Grundlagen der adaptiven Intelligenz aufgeopfert werden müssen, wie zum Beispiel Vertrauen in soziale Information, sparsame Heuristiken und schnelle, automatisch ablaufende Priming-Effekte.

Referenzen

Ackerman, R., & Thompson, V. A. (2017). Meta-reasoning: Monitoring and control of thinking and reasoning. *Trends in Cognitive Sciences, 21*(8), 607–617. https://doi.org/10.1016/j.tics.2017.05.004

Banas, J. A., & Rains, S. A. (2010). A meta-analysis of research on inoculation theory. *Communication Monographs, 77*(3), 281–311. https://doi.org/10.1080/03637751003758193

Bazerman, M. H., & Sezer, O. (2016). Bounded awareness: Implications for ethical decision making. *Organizational Behavior and Human Decision Processes, 136*, 95–105. https://doi.org/10.1016/j.obhdp.2015.11.004

Chan, M. S., Jones, C. R., Hall Jamieson, K., & Albarracín, D. (2017). Debunking: A meta-analysis of the psychological efficacy of messages countering misinformation. *Psychological Science, 28*(11), 1531–1546. https://doi.org/10.1177/0956797617714579

Fiedler, K. (2000). Beware of samples! A cognitive-ecological sampling approach to judgment biases. *Psychological Review, 107*(4), 659.

Fiedler, K. (2012). Meta-cognitive myopia and the dilemmas of inductive-statistical inference. In B. H. Ross, B. H. Ross (Eds.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 57, pp. 1–55). San Diego, CA, US: Elsevier Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394293-7.00001-7

Fiedler, K., Armbruster, T., Nickel, S., Walther, E., & Asbeck, J. (1996). Constructive biases in social judgment: Experiments on the self-verification of question contents. *Journal of Personality and Social Psychology, 71*(5), 861–873. https://doi.org/10.1037/0022-3514.71.5.861

Fiedler, K., Freytag, P., & Unkelbach, C. (2007). Pseudocontingencies in a simulated classroom. *Journal of Personality and Social Psychology, 92*(4), 665–677. https://doi.org/10.1037/0022-3514.92.4.665

Fiedler, K., Hofferbert, J., & Wöllert, F. (2018). Metacognitive myopia in hidden-profile tasks: The failure to control for repetition biases. *Frontiers in Psychology, 9*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00903

Fiedler, K., Hofferbert, J., Wöllert, F., Krüger, T., & Koch, A. (2015). The tragedy of democratic decision making. In *Social psychology and politics* (pp. 193–208). Psychology Press.

Fiedler, K., Hütter, M., Schott, M., & Kutzner, F. (2019). Metacognitive myopia and the overutilization of misleading advice. *Journal of Behavioral Decision Making, 32*(3), 317–333. https://doi.org/10.1002/bdm.2109

Fiedler, K., & Prokop, I. (2002). *Some psychometric problems of criteria-based statement analysis: Codability, discriminant validity, and the need to control for text-length artifacts*. Unpublished research, Heidelberg University.

Fiedler, K., Walther, E., Freytag, P., & Plessner, H. (2002). Judgment biases in a simulated classroom — A cognitive-environmental approach. *Organizational Behavior and Human Decision Processes, 88*(1), 527–561. https://doi.org/10.1006/obhd.2001.2981

Flynn, J. R. (2007). *What is intelligence? Beyond the Flynn effect*. Cambridge University Press.

Gigerenzer, G. (2008). Why heuristics work. *Perspectives on Psychological Science, 3*(1), 20–29.

Gigerenzer, G., Hoffrage, U., & Kleinbölting, H. (1991). Probabilistic mental models: A Brunswikian theory of confidence. *Psychological Review, 98*(4), 506–528. https://doi.org/10.1037/0033-295X.98.4.506

Gigerenzer, G., Todd, P. M., & the ABC Research Group. (1999). *Simple heuristics that make us smart*. Oxford University Press.

Hertwig, R., & Engel, C. (Eds.). (2020). *Deliberate ignorance: Choosing not to know*. The MIT Press.

Hertwig, R., Hoffrage, U., & the ABC Research Group. (2013). Simple heuristics in a social world. Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195388435.001.0001

Hogarth, R. M., Lejarraga, T., & Soyer, E. (2015). The two settings of kind and wicked learning environments. *Current Directions in Psychological Science, 24*(5), 379–385.

Jones, E. E., & Harris, V. A. (1967). The attribution of attitudes. *Journal of Experimental Social Psychology, 3*(1), 1–24. https://doi.org/10.1016/0022-1031(67)90034-0

Juslin, P. (1994). The overconfidence phenomenon as a consequence of informal experimenter-guided selection of almanac items. *Organizational Behavior and Human Decision Processes, 57*(2), 226–246. https://doi.org/10.1006/obhd.1994.1013

Kahneman, D., Slovic, P., & Tversky, A. (Eds.). (1982). *Judgment under uncertainty: Heuristics and biases*. Cambridge University Press.

Kahneman, D., & Tversky, A. (1972). Subjective probability: A judgment of representativeness. *Cognitive Psychology, 3*(3), 430–454. https://doi.org/10.1016/0010-0285(72)90016-3

Kahneman, D., & Tversky, A. (1973). On the psychology of prediction. *Psychological Review, 80*(4), 237.

Kahneman, D., & Tversky, A. (1984). Choices, values, and frames. *American Psychologist, 39*(4), 341–350. https://doi.org/10.1037/0003-066X.39.4.341

Kruger, J., & Evans, M. (2004). If you don't want to be late, enumerate: Unpacking reduces the planning fallacy. *Journal of Experimental Social Psychology, 40*(5), 586–598. https://doi.org/10.1016/j.jesp.2003.11.001

Lewandowsky, S., Ecker, U. K. H., Seifert, C. M., Schwarz, N., & Cook, J. (2012). Misinformation and its correction: Continued influence and successful debiasing. *Psychological Science in the Public Interest, 13*(3), 106–131. https://doi.org/10.1177/1529100612451018

Lichtenstein, S., & Slovic, P. (1973). Response-induced reversals of preference in gambling: An extended replication in Las Vegas. *Journal of Experimental Psychology, 101*(1), 16–20. https://doi.org/10.1037/h0035472

Loftus, E. F., Miller, D. G., & Burns, H. J. (1978). Semantic integration of verbal information into a visual memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory, 4*(1), 19–31. https://doi.org/10.1037/0278-7393.4.1.19

Metcalfe, J., & Kornell, N. (2007). Principles of cognitive science in education: The effects of generation, errors, and feedback. *Psychonomic Bulletin & Review, 14*(2), 225–229.

Nelson, T. O., & Narens, L. (1990). Metamemory: A theoretical framework and new findings. In G. H. Bower (Ed.), *Psychology of learning and motivation* (Vol. 26, pp. 125–173). Elsevier Academic Press. https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60053-5

Ross, L., Lepper, M. R., & Hubbard, M. (1975). Perseverance in self-perception and social perception: Biased attributional processes in the debriefing paradigm. *Journal of Personality and Social Psychology, 32*(5), 880–892. https://doi.org/10.1037/0022-3514.32.5.880

Schmid, P., & Betsch, C. (2019). Effective strategies for rebutting science denialism in public discussions. *Nature Human Behaviour, 3*(9), 931–939. https://doi.org/10.1038/s41562-019-0632-4

Simon, H. A. (1990). Bounded rationality. In J. Eatwell, M. Milgate, & P. Newman (Eds.), *Utility and probability* (pp. 15–18). Palgrave Macmillan UK, London. https://doi.org/10.1007/978-1-349-20568-4_5

Slovic, P. (1995). The construction of preference. *American Psychologist, 50*(5), 364–371. https://doi.org/10.1037/0003-066X.50.5.364

Todd, P. M., & Gigerenzer, G. (2007). Environments that make us smart: Ecological rationality. *Current Directions in Psychological Science, 16*(3), 167–171. https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2007.00497.x

Tversky, A. (1969). Intransitivity of preferences. *Psychological Review, 76*(1), 31–48. https://doi.org/10.1037/h0026750

Tversky, A. (1977). Features of similarity. *Psychological Review, 84*(4), 327–352. https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.4.327

Tversky, A., & Kahneman, D. (1971). Belief in the law of small numbers. *Psychological Bulletin, 76*(2), 105–110. https://doi.org/10.1037/h0031322

Tversky, A., & Kahneman, D. (1973). Availability: A heuristic for judging frequency and probability. *Cognitive Psychology, 5*(2), 207–232.

Tversky, A., & Kahneman, D. (1974). Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases. *Science, 185*(4157), 1124–1131. https://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124

Tversky, A., & Kahneman, D. (1981). The framing of decisions and the psychology of choice. *Science, 211*(4481), 453–458. https://doi.org/10.1126/science.7455683

Tversky, A., & Kahneman, D. (1983). Extensional versus intuitive reasoning: The conjunction fallacy in probability judgment. *Psychological Review, 90*(4), 293.

Unkelbach, C., Fiedler, K., & Freytag, P. (2007). Information repetition in evaluative judgments: Easy to monitor, hard to control. *Organizational Behavior and Human Decision Processes, 16*.

Vrij, A. (2005). Criteria-based content analysis: A qualitative review of the first 37 studies. *Psychology, Public Policy, and Law, 11*(1), 3–41.

Über die Autoren

Klaus Fiedler ist seit 1992 Professor für Sozialpsychologie an der Universität Heidelberg. Er erforscht das Verhältnis von Sprache und Kognition, von Kognition und Verhaltensregulation, von Urteilen und Entscheiden und dem Lernen in komplexen Systemen. Seine Erkenntnisse eröffnen die Möglichkeit, anhand sprachlicher Muster auf Lügen zu schließen und die Zuverlässigkeit von Lügendetektoren zu verbessern. Mit seinem kognitiv-ökologischen Ansatz der Entscheidungsforschung versucht er Antworten auf drängende Fragen der modernen Informationsgesellschaft zu finden, die gekennzeichnet ist durch ein Überangebot an Informationen. Im Jahr 2000 wurde er für seine Arbeit mit dem Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft und mit dem Psychologie-Preis der Deutschen Gesellschaft für Psychologie ausgezeichnet. Er ist seit 2002 Mitglied der Nationalen Akademie der Wissenschaften (Leopoldina) und seit 2003 Mitglied der Heidelberger Akademie der Wissenschaften.

Florian Ermark ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand in der Arbeitseinheit Sozialpsychologie (CRISP) an der Universität Heidelberg. Nach seinem Bachelor in Psychologie an der Universität Konstanz absolvierte er einen M.Sc. in Psychologie an der Universität Heidelberg. Er forscht und lehrt zu Urteilen und Entscheiden, insbesondere im kollektiven Kontext mit mehreren Personen, Informationsverarbeitung und induktivem Schließen.

Karolin Salmen ist wissenschaftliche Mitarbeiterin und promoviert an der Universität Heidelberg zu serieller Reproduktion (Arbeitseinheit Sozialpsychologie). Nach einem Bachelor in Psychologie in Münster und einem Austauschstudium an der Peking University, China, folgten Masterabschlüsse in Psychologie (Heidelberg) und Social Cognition (University College, London). Sie forscht und lehrt zu den Themen Einfluss von Kommunikation auf Kognition, sowie kollektive und gesellschaftliche Informationsweitergabe, Schließen und Entscheiden.

Korrespondenzadresse:
Prof. Dr. Klaus Fiedler, Florian Ermark, Karolin Salmen
Universität Heidelberg
Psychologisches Institut
Hauptstr. 47-51
69117 Heidelberg, Germany

E-Mail:
kf@psychologie.uni-heidelberg.de,
florian.ermark@psychologie.uni-heidelberg.de,
karolin.salmen@psychologie.uni-heidelberg.de
Homepage:
https://www2.psychologie.uni-heidelberg.de/arbeitseinheit/sozialpsychologie

Sektion 3:
Mathematische und Künstliche Intelligenz

Intelligente Algorithmen und Gleichungen? – Eine Annäherung an die Intelligenz mathematischer Konzepte

THOMAS STIEHL[1] & ANNA MARCINIAK-CZOCHRA[2]

[1]Institute for Computational Biomedicine, RWTH Aachen &
[2]Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen, Universität Heidelberg

Zusammenfassung

Dieser Text befasst sich mit der Frage, ob es mathematische Intelligenz gibt und was diese sein könnte. Anhand von einfachen Lehrbuch-Beispielen und Anwendungen aus der aktuellen Forschung begibt er sich auf die Suche nach Parallelen und Unterschieden zwischen der mathematischen Intelligenz und ihrem menschlichen Gegenstück. Der Fokus liegt hierbei auf der sog. mechanistischen Modellierung. Sie erlaubt es, komplexe Sachverhalte mit Hilfe mathematischer und computergestützter Verfahren zu untersuchen und trägt auf diese Weise zu einem tieferen, quantitativen Verständnis verschiedenster Begebenheiten bei.

1 Was ist Intelligenz?

Intelligenz ist ein häufig verwendeter, aber selten definierter Begriff. Verschiedene Bereiche der Psychologie und der Neurowissenschaften haben unterschiedlich

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24389

fokussierte Definition der Intelligenz hervorgebracht, die sich teils deutlich voneinander unterscheiden. Als kleinster gemeinsamer Nenner kann möglicherweise der operationalistische Ansatz gesehen werden, der Intelligenz als das definiert, was ein Intelligenztest misst [1]. Diese, wenn auch durch definitorische Gleichsetzung von Konstrukt und erhebbarem Indikator zirkuläre Begriffsbestimmung hat nicht nur breiten Eingang in die angewandte Literatur gefunden [2], sondern gibt uns auch wichtige Hinweise, was unter Intelligenz zu verstehen sei. Gängige Intelligenztest, wie z. B. der Hamburg-Wechsler-Intelligenztest (HAWIE/HAWIK bzw. WAIS-IV [3]), bestehen aus Fragen zu verschiedenen Bereichen, die ein Proband zu beantworten hat. Intelligenz kann also als die *Fähigkeit* gesehen werden, Fragen aus verschiedenen Bereichen „korrekt“ zu beantworten. Diese Sichtweise ist in gutem Einklang mit der eher summatorischen Definition, die Intelligenz als eine „sehr allgemeine geistige Fähigkeit, die unter anderem die Fähigkeiten zum schlussfolgernden Denken, zum Planen, zum Problemlösen, zum abstrakten Denken, zum Verstehen komplexer Ideen, zum raschen Auffassen und zum Lernen aus Erfahrung einschließt“, ansieht [4] (deutsche Version nach [5]).

Als *mathematische Intelligenz* werden wir im Folgenden die Eigenschaft mathematischer oder algorithmischer Strukturen bezeichnen, eine oder mehrere der oben aufgezählten Fähigkeiten zu realisieren (also Fragen korrekt zu beantworten, Probleme zu lösen, Erfahrungen zu verwerten, komplexe Sachverhalte zu erfassen etc.). In der vorliegenden Abhandlung werden wir uns vor allem der sogenannten *mechanistischen mathematischen Modellierung* zuwenden und ein paar Aspekte der *künstlichen Intelligenz* betrachten.

Die in letzter Zeit so beliebte Verwendung des Begriffs der Intelligenz in Bezug auf Algorithmen und Modelle stellt einen Antropomorphismus dar, d. h. etwas nicht Menschlichem werden menschliche Eigenschaften zugeschrieben. Auch wenn eine solche Zuschreibung durch gewisse Analogiebetrachtungen motiviert werden kann, liegt, wie es Anthropomorphismen inhärent ist, keine Vergleichbarkeit im engeren Sinne vor. Wohlwissend, dass zwischen der menschlichen und der derzeitigen mathematischen bzw. künstlichen Intelligenz deutliche Unterschiede bestehen, begibt sich dieser Text auf die Suche nach Parallelen zwischen beiden. Diese Inbezugsetzung bringt natürlicherweise mit sich, dass weitere Begriffe aus den Humanwissenschaften auf abstrakte Konstrukte übertragen werden, ohne dass es für diese eine umfassende oder eindeutige Definition in dem neuen Kontext geben muss.

2 Wofür brauchen wir mathematische Intelligenz?

Mathematische Intelligenz spielt vor allem bei Prozessen eine Rolle, die sich einem intuitiven Verständnis entziehen. Hierfür kann es verschiedene Ursachen geben. Oft liegt mindestens einer der folgenden Gründe vor:

1. Ein Prozess ist von hoher Komplexität, d. h. seine Dynamik wird durch die Interaktion einer Vielzahl von Einflussgrößen bestimmt, die oft nichtlinear miteinander interagieren. *Beispiel*: Die Eigenschaften von Blutstammzellen nach einer Knochenmarktransplantation hängen von patientenspezifischen und transplantatspezifischen Faktoren ab. Sie werden durch eine Vielzahl verschiedener hormoneller Signale reguliert, daher ist es schwierig zu verstehen, wie genau sich die Stammzellen verhalten. Mathematische Modelle ermöglichen es, die beobachteten Prozesse quantitativ mit den spezifischen Eigenschaften von Zellen und Signalen zu verknüpfen [6–9].

2. Das genaue Zusammenwirken wesentlicher Einflussgrößen ist (noch) nicht im Einzelnen bekannt oder es ist (noch) nicht bekannt, welche Einflussgrößen überhaupt eine Rolle spielen könnten. *Beispiel*: Es ist unklar, welche chemischen, physikalischen und biologischen Prozesse die Strukturbildung in der Embryonalentwicklung oder in der Entwicklungsbiologie gewährleisten. Mathematische Modelle liefern Hinweise darauf, welche Komponenten der intra- und interzellulären Signalübertragung für eine bestimmte Strukturierung verantwortlich sein können, die auf einer makroskopischen Skala des Gewebes beobachtet wird. Dies erlaubt es, Experimente zu verstehen und zu planen [10–12].

3. Es fehlt wünschenswerte Information, weil z. B. wesentliche Größen nicht oder nicht direkt gemessen werden können bzw. weil eine geringe zeitliche oder räumliche Auflösung vorliegen. *Beispiel*: Bei vielen Krebsarten ist es nicht möglich Krebs-Stammzellen *in vivo* im Patienten zu charakterisieren bzw. zu beobachten, wichtige anderweitige Verlaufsparameter können nur während der relativ selten stattfindenden Nachsorgeuntersuchung erhoben werden. Das Lösen inverser Probleme für mathematische Modelle (sog. Parameterschätzung) ermöglicht das Quantifizieren unbekannter Parameter und nicht beobachtbarer Prozesse [13–16].

4. Es sollen aus sehr vielen verschiedenen Messgrößen bestehende Datensätze untersucht werden. Da die Datenmenge das menschliche Auffassungsvermögen überschreitet, ist es durch konventionelles Betrachten nicht möglich, einen Überblick über die im Datensatz enthaltenen Zusammenhänge zu erlangen. *Beispiel*: Welche in Genexpressionsstudien gemessenen Veränderungen sind relevant für einen beobachteten biologischen Prozess? Solche Fragen können durch Berechnungsalgorithmen beantwortet werden, die es ermöglichen, das wahrscheinlichste Szenario zu identifizieren [17].

5. Es gibt verschiedene konkurrierende Hypothesen, aus denen die am besten zur Realität passende ausgewählt werden soll. *Beispiel*: Es ist unklar, wie sich die Eigenschaften neuronaler Stammzellen im Gehirn während der Alterung verändern, es könnte sein, dass sich die Sterberate, die Aktivierungsrate, die Teilungsrate oder die Differenzierung verändern. Unterschiedliche Hypothesen können mit einem Modellauswahlansatz (sog. Modellselektion) untersucht werden [18,19].

Verfahren der mathematischen Intelligenz kommen meistens dort zum Einsatz, wo aufgrund der oben genannten oder anderer Gründe die Alltagsintelligenz bzw. die Intuition nicht ausreichen, um Interpretation zu erlangen oder Schlüsse zu ziehen. Bei mathematischer Intelligenz handelt es sich also im Wesentlichen um Werkzeuge, die die menschliche Schlussfähigkeit, Entscheidungs- bzw. Vorhersagekompetenz sowie Wissensaneignung unterstützen und erweitern. Der unterstützende Charakter wird vor allem deutlich, wenn man sich vor Augen führt, dass selbst wenn die Techniken der mathematischen Intelligenz perfekt funktionierten, die zu untersuchenden Fragestellungen, die Zielsetzungen, auf welche die mathematischen Verfahren angewendet werden, sowie die Auswahl der zur Klärung der Fragestellung verwendeten Daten eine Leistung der menschlichen Intelligenz darstellen.

3 Was ist mechanistische Modellierung und auf welchen Grundgedanken basiert sie?

Unter *mechanistischer Modellierung* bzw. *Prozessmodellierung* verstehen wir die Übersetzung der einem System bzw. Sachverhalt zugrunde liegenden Mechanismen und Prozesse in formale Objekte, die mit Hilfe mathematischer oder

computergestützter Techniken untersucht werden können (Abb. 1). Die jeweiligen Prozesse werden hierbei durch sogenannte Prozessparameter quantifiziert, die festlegen, wie bzw. wie schnell der jeweilige Prozess abläuft. Die resultierenden formalen Objekte können z. B. mathematische Gleichungen, Algorithmen oder Computerprogramme sein. Ein klassisches Beispiel für ein mechanistisches Modell ist die mathematische Formulierung der Newtonschen Axiome und ihre Anwendung auf Probleme aus der klassischen Mechanik.

Der Vorteil der formalen Repräsentation besteht darin, dass mathematische und informatische Techniken angewendet werden können, um die Auswirkung der modellierten Prozesse auf das betrachtete System systematisch zu untersuchen und vorherzusagen. Durch die Modellierung wird ein praktisches Problem also der inhärenten Logik mathematischer Theorien sowie der Effizienz computergestützter Berechnungen zugänglich gemacht. Mathematische Schlussfolgerungen können auf diese Weise auf das untersuchte System angewendet werden und geben Aufschluss über dessen Verhalten. Bereits vorhandenes Wissen fließt in die mechanistische Modellierung in Form der zugrunde gelegten Prozesse bzw. der bekannten Prozessparameter ein und kann somit zwanglos mit verwendet werden.

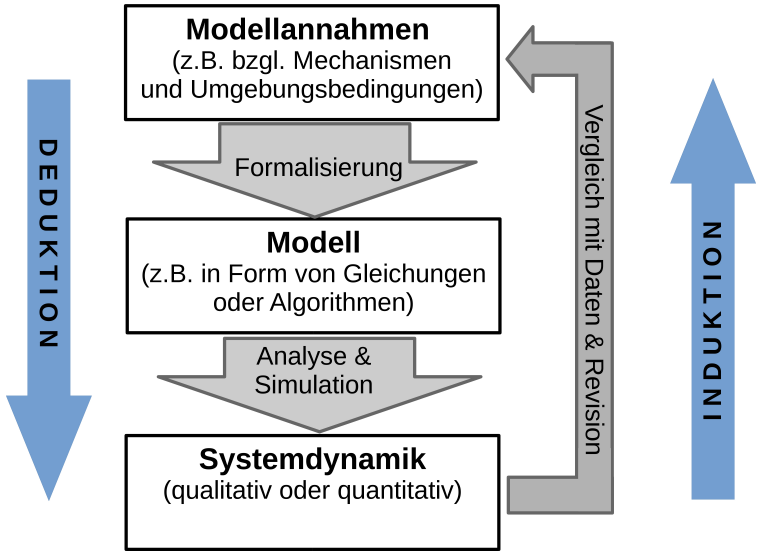


Abbildung 1: Prinzip der mechanistischen Modellierung. Quelle: Eigene Darstellung.

Durch Computersimulation oder mathematische Analyse erlaubt die Prozessmodellierung systematisch zu erforschen, wie die einem System zugrunde liegenden Mechanismen, das heißt die Modellannahmen, seine messbare Dynamik bestimmen. Während der sogenannten *Modellvalidierung* wird die von einem Modell vorhergesagte Dynamik mit Daten verglichen. Dieser Schritt erlaubt einzuschätzen, wie gut ein Modell mit der Realität übereinstimmt. Im Idealfall wird das jeweilige Modell zusätzlich dadurch validiert, dass das Ergebnis noch nicht durchgeführter Experimente vorausgesagt und durch entsprechende neue Messungen bestätigt wird.

Aus erkenntnistheoretischer Sicht ist es wesentlich sich zu verdeutlichen, dass ein mechanistisches Modell, selbst wenn es gut zu allen verfügbaren Daten passt, keinen Beweis für die Richtigkeit der zugrunde gelegten Annahmen darstellt. Es kann lediglich die Aussage getroffen werden, dass die beobachtete Systemdynamik mit den mechanistischen Modellannahmen *kompatibel* ist, alternative Modellannahmen könnten jedoch zu einer genauso guten oder auch noch besseren Übereinstimmung mit der Realität führen. Auch falsche Modellannahmen können in bestimmten Kontexten zu korrekten Vorhersagen führen, man denke hier etwa an den Lichtäther, dessen Existenz erst Jahre nach seiner Postulierung widerlegt werden konnte [20]. Die Tatsache, dass die Korrektheit eines Modells nicht bewiesen werden kann, ist nicht ein Problem, das spezifisch bei der mathematischen Modellierung auftritt, vielmehr ist es eine Eigenschaft, die allen auf Kausalität abzielenden empirisch validierten Ansätzen gemein ist. Es gilt also bei der mathematischen Modellierung, wie auch in den anderen Naturwissenschaften, dass ein Modell nur solange als gültig angesehen werden kann, bis es zu einer inkorrekten Vorhersage führt. Diese Tatsache bedingt eine Evolution von Modellen, die mit der Zunahme bzw. Weiterentwicklung unseres Wissens einhergeht, wie wir sie z. B. von der Einsteinschen Verallgemeinerung der Newtonschen Mechanik kennen.

Umgekehrt, wenn die von einem Modell vorhergesagte Systemdynamik nicht mit Beobachtungen übereinstimmt, kann die Schlussfolgerung getroffen werden, dass mindestens eine der zugrunde gelegten Modellannahmen falsch ist. Das heißt, dass die betrachteten Mechanismen nicht in der Lage sind, das beobachtete Verhalten zu erklären. Oft liegt dies daran, dass wesentliche Interaktionen nicht oder nicht korrekt berücksichtigt wurden. In diesem Falle muss ein Modell entsprechend revidiert werden.

Insbesondere im Rahmen der Forschung können Modelle, die nicht zu Daten passen, sehr fruchtbar sein, da sie belegen, dass ein Prozess noch nicht vollständig verstanden ist und dass nach weiteren Mechanismen zu suchen ist. Oft kann dann die vom Modell inkorrekt vorhergesagte Dynamik durch quantitativen Vergleich mit Daten Aufschluss darüber geben, wie sich der zu suchende Mechanismus qualitativ verhalten müsste, ob er also z. B. einen anderen Prozess aktiviert oder hemmt.

Zusammenfassend kann man ein mechanistisches Modell als eine *Deduktionsmaschine* betrachten, die Modellannahmen, das heißt die dem Modell zugrunde gelegten Mechanismen, durch mathematische oder computergestützte Methoden in ein hypothetisches Systemverhalten überführt, das mit beobachteten Daten verglichen werden kann. Oft ist es besonders interessant, die Dynamik verschiedener Modelle, die auf unterschiedlichen Annahmen basieren, miteinander zu vergleichen und zu Daten in Beziehung zu setzen. Ein solcher Vergleich erlaubt Aufschlüsse darüber, welche Mechanismen für welche Phänomene verantwortlich sein könnten und kann somit induktiv zur Bildung neuer Theorien beitragen, das Design neuer Experimente unterstützen und neue Hypothesen hervorbringen.

4 Wofür kann man mechanistische Modellierung anwenden?

Die Anwendungsgebiete der mechanistischen Modellierung sind sehr weitläufig, sie umfassen unter anderem Bereiche der Biologie, der Physik, der Medizin, der Pharmazie, der Chemie und der Ökonomie. Um die Prinzipien der mechanistischen Modellierung, deren Anwendungen sowie deren Beziehung zur Definition der Intelligenz zu verdeutlichen, werden wir im Folgenden ein einfaches Lehrbuch-Beispiel betrachten. Danach werden wir auf die Techniken sowie auf Anwendungsbeispiele der mechanistischen Modellierung aus unserer aktuellen Forschung eingehen.

4.1 Ein einfaches Beispiel

Ein sehr frühes und instruktives Beispiel für die mechanistische Modellierung ist das exponentielle Wachstum einer Bakterienpopulation in einem gut durchmischten Medium. Setzt man voraus, dass sich alle Bakterien gleich verhalten, nicht sterben und eine im Verlauf des Experimentes konstante Anzahl von Teilungen pro Zeiteinheit durchlaufen, ergibt sich das wohlbekannte exponentielle Wachstums-

gesetz, das die Anzahl der Bakterien pro Milliliter Medium im zeitlichen Verlauf beschreibt. Ferner werde angenommen, dass sich zu Beginn des Experimentes mindestens ein Bakterium im Nährmedium befinde.

Die exponentielle Wachstumskurve ist also ein sehr einfaches Beispiel für ein mechanistisches mathematisches Modell. Wichtige Parameter dieses Modells sind zum einen die Anzahl der Bakterien pro Milliliter Nährmedium zu Beginn des Experimentes, auch Anfangsbedingung genannt, sowie die Wachstumsrate, die ein Beispiel für einen sogenannten Prozessparameter ist und im Wesentlichen beschreibt, wie häufig sich die Bakterien teilen. Das Modell erlaubt, die Wachstumsdynamik der Bakterienpopulation in Abhängigkeit von Anfangsbedingungen und Prozessparametern zu *charakterisieren* und zu *quantifizieren*. Das erhaltene Modell kann in verschiedenen Zusammenhängen angewendet werden.

4.2 Quantifizierung und Parameterschätzung

Angenommen, wir verfügen über experimentelle Daten, die das exponentielle Wachstum einer Bakterienkonzentration zeigen. Anhand solcher Daten wird es uns dann möglich, mit Hilfe des Modells die Teilungsrate der Bakterienpopulation abzuschätzen. Zu diesem Zweck würde man die Wachstumsrate im Modell solange variieren, bis sie möglichst gut zu den gemessenen Daten passt. Ein solchen Ansatz bezeichnet man als *Parameterschätzung* [21] (Abb. 2A). Parameterschätzung erlaubt es, aus einem mathematischen Prozessmodell und einem vorhandenen Datensatz nicht direkt gemessene Größen, wie in diesem Fall die Teilungsrate der Bakterienpopulation, zu *quantifizieren*. Das Modell ist also in der Lage, unter Einbezug vorhandenen Wissens (in diesem Fall in Form von biologischen Prozessen d. h. Zellteilung, und experimentellen Daten) Fragen zu beantworten bzw. Quantifizierungsprobleme zu lösen – nämlich im vorliegenden Beispiel die Frage, wie hoch die Teilungsrate der beobachteten Bakterienpopulation ist. Man könnte auch sagen: Das Modell kann die unbekannte Teilungsrate aus den angenommenen Prozessen und den gegebenen Daten schlussfolgern. Oder: Das Modell „lernt“ die Wachstumsrate basierend auf der Erfahrung der zugrunde gelegten biologischen Prozesse und der experimentellen Messungen. Problemlösen, Schlussfolgern und Lernen aus Erfahrung sind nach der eingangs angeführten Definition Merkmale von Intelligenz.

Bei der Parameterschätzung muss beachtet werden, dass man mit einem vorliegenden Datensatz nicht beliebig viele Modellparameter zuverlässig abschätzen

kann. Aus diesem Grund sollte die Komplexität des Modells immer an die verfügbare Datenlage und die bearbeitete Fragestellung angepasst werden. Grundsätzlich ist abzuwägen, welche Prozesse wie detailliert modelliert werden sollen und wel-

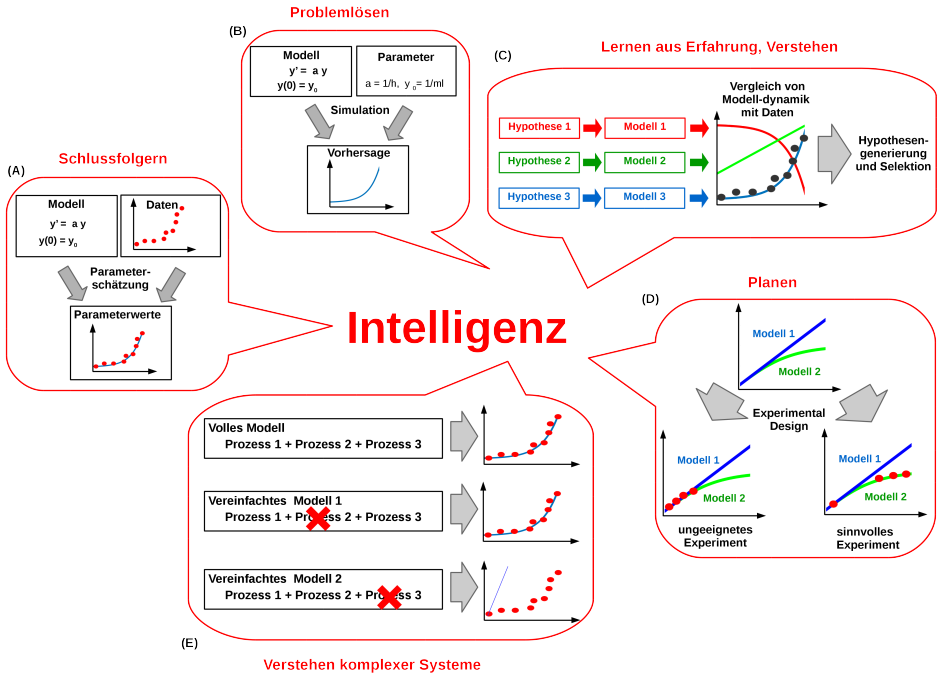


Abbildung 2: Merkmale der Intelligenz verglichen mit Eigenschaften mechanistischer Modellierung. (A) Ziehen logisch fundierter Schlussfolgerungen, hier am Beispiel der Parameterschätzung. Bei der Parameterschätzung werden aus Modell und Daten Parameterwerte geschlussfolgert. (B) Problemlösen, hier am Beispiel eines Vorhersageproblems. Validierte und parametrisierte mechanistische Modelle können das Verhalten eines Systems prognostizieren. (C) Lernen aus Erfahrung. Basierend auf der Erfahrung (hier in der Form von Daten) kann durch Modellselektion „gelernt" werden, welches Modell am wahrscheinlichsten zur Realität passt. (D) Planen, hier am Beispiel des experimentellen Designs. Mit Hilfe von Modellen kann geplant werden, zu welchen Zeitpunkten Messungen erfolgen müssen, um eine vorgegebene Frage so gut wie möglich zu beantworten. Im gezeigten Beispiel geht es darum, ein Experiment zu planen, das erlaubt, ein Modell zu bestätigen und das andere zu verwerfen. Messwerte sind als rote Punkte dargestellt. (E) Verstehen komplexer Systeme, hier am Beispiel der Modellreduktion. Systematische und rigorose Vereinfachungen eines komplexen Modells erlauben zu verstehen, welche Prozesse für welche beobachteten Phänomene verantwortlich sind.

che Einflussgrößen von Relevanz sind. Im Kontext vieler Anwendungen sind spezifische einfache Modelle einem komplexen allgemeinen Modell vorzuziehen.

4.3 Vorhersagen

Das betrachtete Modell des Wachstums einer Bakterienpopulation kann bei bekannter Teilungsrate und Anfangspopulation *vorhersagen*, wie lange es dauern wird, um eine vorgegebene Bakterienkonzentration experimentell zu erzeugen. Es kann also mit Hilfe des Modells und bekannter Parameter ein Experiment geplant werden (Abb. 2B). Planen basierend auf Erfahrung ist ebenfalls ein Merkmal von Intelligenz im Sinne der obigen Definition. In medizinischen Anwendungen kann es sehr hilfreich sein, Modellparameter anhand vorliegender Patientendaten zu schätzen und unter Benutzung des parametrisierten Modells den zukünftigen Krankheitsverlauf zu prognostizieren [13–16].

Allgemeiner kann man festhalten, dass mechanistische mathematische Modelle ein nützliches Werkzeug sind, um zu untersuchen, wie sich Anfangsbedingungen und Systemparameter auf eine zu beobachtende Dynamik auswirken. Eine derartige *quantitative Vorhersage* von Systemverhalten ist im Kontext vieler Anwendungen relevant. Man denke etwa an Probleme aus der Epidemiologie und der Planung von Impfstrategien [22].

Wichtig ist es, sich darüber im Klaren zu sein, dass die auf einem Modell basierenden Schlussfolgerungen und Vorhersagen nur dann zutreffen, wenn die Modellannahmen die Realität adäquat beschreiben. Andernfalls kann das Modell zu falschen Schlussfolgerungen führen. Aus diesem Grund sollte man sich stets der einem Modell zugrunde liegenden Annahmen gewahr sein, und diese, soweit wie möglich, vor der Anwendung des Modells verifizieren.

Eine wünschenswerte Eigenschaft von Modellen ist in diesem Zusammenhang die sogenannte *Robustheit*. Ein robustes Modell liefert auch dann, wenn die Annahmen nicht exakt, sondern nur näherungsweise erfüllt sind, eine im Sinne der Anwendung hinreichend exakte Vorhersage. In unserem Beispiel würde das z. B. bedeuten, dass auch wenn Bakterien sterben, die Sterberate jedoch im Vergleich zur Teilungsrate klein ist, unser Modell eine gute Annäherung an die Realität darstellt und für gewisse Fragestellung verwendet werden kann.

4.4 Modell- und Hypothesenselektion, Hypothesengenerierung

Mathematische Modelle, deren Vorhersagen deutlich von der Realität abweichen, können zur Bildung neuer Hypothesen beitragen. Wenn man beispielsweise eine Bakterienkultur lange genug beobachtet, wird man feststellen, dass die vom exponentiellen Wachstumsmodell vorhergesagte Populationsdynamik nicht beliebig lange anhält. Dieses Missverhältnis zwischen Daten und Modell lässt darauf schließen, dass ein wichtiger Prozess in dem Modell nicht berücksichtigt wurde. In unserem Beispiel könnte die Ursache sein, dass eine wachsende Bakterienpopulation zu einer Ressourcenknappheit führt, die ihrerseits ein langsameres Teilen der Zellen induziert. Diese Modellannahme führt zum sogenannten logistischen Wachstum. Wenn man die Dynamik von verschiedenen Modellen mit Daten vergleicht, um herauszufinden, welches der betrachteten Modelle der Realität am nächsten kommt, spricht man von *Modellselektion* [19] (Abb. 2C). Die Modellselektion ist ein formaler, statistisch untermauerter Prozess, der es erlaubt, gewisse Modelle anhand der vorhandenen Datenlage auszuschließen. Auch dies erinnert in einem gewissen Sinne an Lernen aus Erfahrung: Basierend auf den vorhandenen Daten wird durch Modellselektion „gelernt“, welche Modellannahmen nicht mit der Realität vereinbar sind.

Anhand von Modellselektion können konkurrierende mechanistische Hypothesen miteinander verglichen werden, indem jede Hypothese als ein Modell formuliert, und die Dynamik der jeweiligen Modelle mit der Realität verglichen wird. Hypothesen, die zu Modellen führen, die der Realität sehr nahe kommen, können anschließend experimentell überprüft werden. Auf diese Weise kann mathematische Modellierung Hypothesen für die experimentelle Wissenschaft generieren. Die *Hypothesengenerierung* durch Modellierung und Simulation findet z. B. in den Biowissenschaften zunehmende Verbreitung [9, 13–16, 18, 23]. Auf diese Weise können mathematische Modelle zum mechanistischen Verständnis komplexer Sachverhalte beitragen. Auch das Verständnis komplexer Konzepte ist ein Kennzeichen der Intelligenz im Sinne der obigen Definition.

4.5 Optimal Experimental Design

Häufig ist es so, dass verschiedene Modelle im Vergleich mit der Realität etwa gleich gut abschneiden. Dies kann daran liegen, dass sich die Modelle in den getesteten experimentellen Szenarien sehr ähnlich verhalten. Systematische Model-

lanalyse und Simulation kann in diesem Fall helfen experimentelle Bedingungen zu finden, unter denen sich konkurrierende Hypothesen und somit konkurrierende Modelle unterschiedlich voneinander verhalten (Abb. 2D). Auf diese Weise wird es möglich, durch entsprechende Experimente Modelle bzw. Hypothesen zu widerlegen. Mechanistische Modelle können also dazu verwendet werden, Experimente optimal zu planen, die es erlauben, zwischen verschiedenen Mechanismen bzw. Hypothesen zu unterscheiden. Dies bezeichnet man als *Optimal Experimental Design*. Allgemeiner betrachtet ist Optimal Experimental Design ein Beispiel für eine systematische Planung, die die Erreichung eines vorgegebenen Ziels erleichtert [24]. Ein derartiges Vorgehen ist ebenfalls ein Merkmal von Intelligenz.

4.6 Datenanalyse und Interpretation

In ähnlicher Weise können mechanistische Modelle bei der Analyse und Interpretation komplexer Datensätze helfen. Durch systematische Modellanalyse bzw. Simulation wird es möglich, Systemeigenschaften zu identifizieren, die charakteristisch für bestimmte Prozesse sind. Aufgrund solcher Simulationen kann man erfahren, auf welche Tendenzen in Datensätzen besonderes Augenmerk gerichtet werden soll. In diesem Sinne sind mechanistische Modelle ein wichtiges Werkzeug zur gezielten *Datenanalyse* und können helfen, den Blick auf das für eine bestimmte Fragestellung Wesentliche zu lenken. Basierend auf der Erfahrung von Modellsimulation können Muster in Daten erkannt und erklärt werden. Dies ist ein Beispiel für effizientes Erkennen („rasches Auffassen“) von Zusammenhängen und erinnert an Lernen aus Erfahrung. Beides sind Merkmale von Intelligenz.

4.7 Komplexitätsreduktion

Komplexe mechanistische Modelle können durch Techniken der sogenannten *Modellreduktion* unter gewissen Annahmen in einfachere Modelle mit einem sehr ähnlichen Verhalten überführt werden [25]. Dies bedeutet nicht nur eine *Komplexitätsreduktion*, die praktische Anwendungen des jeweiligen Modells vereinfacht, sondern es wird auch eine Aussage darüber getroffen, welche Prozesse für ein bestimmtes beobachtetes Phänomen relevant sind und welche Prozesse unter welchen Bedingungen vernachlässigt werden können (Abb. 2E). Dies erlaubt es, die wichtigsten Komponenten eines Systems zu identifizieren und trägt auf diese Weise zum Verständnis komplexer Phänomene sowie zu deren Einordnung in den

Kontext bisherigen Wissens bei. Identifikation wesentlicher Prozesse, Zuordnung von Beobachtungen zu zugrunde liegenden Prozessen, Verwerfen unnötiger Information, alles dieses sind Merkmale von Intelligenz. Das Herausfiltern wesentlicher und verwerfen unnötiger Information findet permanent in unserem Gehirn statt und ist möglicherweise eine wichtige Voraussetzung für das Überleben in einer komplexen Umwelt [26].

5 Welche Techniken und Werkzeuge verwendet die mechanistische Modellierung?

Mechanistische Modellierung greift auf eine Vielzahl von mathematischen und informatischen Herangehensweisen zurück [27]. Besonders nützlich sind Differentialgleichungen, da sie erlauben, die Veränderung einer Größe (d. h. deren Ableitung) mit ablaufenden Prozessen in Verbindung zu bringen. Differentialgleichungen, die nur Ableitungen nach einer Variable enthalten, werden auch als *gewöhnliche Differentialgleichungen* bezeichnet. Sie kommen z. B. dann zum Einsatz, wenn die zeitliche Veränderung einer Variable modelliert wird. Sobald die zeitliche und räumliche Veränderung einer Variable gemeinsam untersucht werden, werden sogenannte *partielle Differentialgleichungen* verwendet. Differentialgleichungen, die zufällige Schwankungen einbeziehen, werden als *stochastische Differentialgleichungen* bezeichnet [28]. Auch sie spielen eine Rolle in der mechanistischen Modellierung. Ein großer Vorteil der Verwendung von Differentialgleichungen liegt darin, dass mit analytischen Methoden die Systemdynamik systematisch untersucht und im besten Falle vollständig charakterisiert werden kann. Differentialgleichungsmodelle können vor allem dann angewendet werden, wenn eine Population, die aus sehr vielen ähnlichen Individuen besteht, untersucht wird. Entsprechende Variablen sind daher z. B. Konzentrationen oder Populationsdichten. In gewissem Sinne beschreiben sie durchschnittliche Größen. Einen Gegenpol hierzu bilden die sogenannten Individuums-basierten Modelle, die dazu genutzt werden, die Dynamik einer Population aus der Perspektive des Verhaltens individueller Einheiten (z. B. einzelner Zellen, einzelner Moleküle, einzelner Menschen etc.) basierend auf bestimmten Regeln zu beschreiben [29]. Hierbei können die einzelnen Individuen sehr unterschiedlich agieren. Solche Modelle sind meistens einer systematischen mathematischen Untersuchung nicht zugänglich und müssen am Computer simuliert werden. Die Charakterisierung

des Verhaltens eines derartigen Modells ist herausfordernd, da die benötigten Rechenzeiten sehr lang sein können, und eine Vielzahl von Parametern variiert werden muss. Auch komplexe Differentialgleichungsmodelle sind oft nicht mehr allein mit mathematischen Techniken zu untersuchen. Hier kommen dann numerische Verfahren zum Einsatz, die die Dynamik einer Differentialgleichung approximieren. Auch in diesem Falle ist eine systematische Charakterisierung der Systemdynamik zeitaufwendig und herausfordernd. Effiziente numerische Algorithmen werden im Grenzbereich zwischen Mathematik und Informatik entwickelt. Bei der Modellselektion und Parameterschätzung kommen häufig Verfahren aus der Statistik und Optimierung zum Einsatz. Insgesamt greift die mechanistische Modellierung auf ein interdisziplinäres Arsenal von Methoden zurück.

6 Beispiele für mechanistische mathematische Modellierung in der aktuellen Forschung

Im Folgenden werden wir zwei Beispiele der mechanistischen Modellierung aus unserer aktuellen Forschung skizzieren um zu verdeutlichen, wie mathematische Modelle auf aktuelle Fragestellung angewendet werden können.

6.1 Beispiel 1: Alterung neuronaler Stammzellen

Die lebenslange Bildung von Neuronen (Neurogenese) ist wesentlich für die kognitive Funktion des Gehirns. Bei der Neurogenese entstehen in einem mehrstufigen Prozess Neuronen aus sogenannten neuronalen Stammzellen. Die Existenz von neuronalen Stammzellen wurde im Wesentlichen an zwei Lokalisationen des adulten Mäusegehirns nachgewiesen. Dies sind der Hippocampus und die subventrikuläre Zone. Messungen zeigen, dass die Anzahl der neuronalen Stammzellen mit steigendem Lebensalter abnimmt. Die Geschwindigkeit, mit der die Stammzellpopulation abfällt, reduziert sich im Laufe der Alterung. Dies deutet auf einen Mechanismus hin, der dem kompletten Verbrauch der neuronalen Stammzellen im hohen Alter entgegenwirken soll. Die diesem Phänomen zugrunde liegenden Mechanismen sind Gegenstand der aktuellen Forschung.

Neuronale Stammzellen sind zum größten Teil ruhende (quieszente) Zellen. Wird eine neuronale Stammzellen aktiviert, teilt sie sich in zwei Tochterzellen. Die sogenannte Selbsterneuerungswahrscheinlichkeit gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit jede der aus einer Teilung hervorgehenden Tochterzellen wieder

eine Stammzelle ist. Grundsätzlich können drei Szenarien unterschieden werden: entweder sind beide Tochterzellen wieder neuronale Stammzellen oder beide Tochterzellen sind sogenannte Progenitorzellen, also reifer als ihre Mutterzelle, oder je eine Tochterzelle ist Stammzelle und eine ist Progenitorzelle. Stammzellen, die aus der Teilung hervorgehen, gehen wieder in den ruhenden Zustand über. Experimentelle Daten zeigen, dass mit zunehmendem Alter ein immer geringerer Anteil der neuronalen Stammzellpopulation aktiv ist. Anhand der experimentellen Daten ergibt sich die Frage, ob sich die Eigenschaften neuronaler Stammzellen mit zunehmender Alterung verändern.

Grundsätzlich sind verschiedene Veränderungen denkbar, z. B. eine verzögerte Teilung von aktivierten Zellen, eine Veränderung der Selbsterneuerungswahrscheinlichkeit oder eine geringere Aktivierungswahrscheinlichkeit. Aufgrund experimenteller Limitierungen ist es nicht möglich, einzelne Stammzellen im zeitlichen Verlauf *in vivo* zu beobachten. Aus diesem Grund haben wir die Frage, ob und wenn ja wie sich neuronale Stammzellen mit zunehmendem Alterungsprozess verändern, mit Hilfe der Modellselektion untersucht. Zu diesem Zweck wurden verschiedene mathematische Modelle aufgestellt. Das erste Modell geht davon aus, dass alle Stammzell-Parameter zeitlich konstant sind (also die Aktivierungswahrscheinlichkeit, die Selbsterneuerungswahrscheinlichkeit sowie das Zeitintervall zwischen Aktivierung und Teilung). Das zweite Modell geht davon aus, dass die Selbsterneuerungswahrscheinlichkeit im Alter zunimmt. Das dritte Modell basiert auf der Annahme, dass das Intervall zwischen Aktivierung und Zellteilung im Alter verändert ist, das vierte Modell nimmt an, dass die Aktivierungswahrscheinlichkeit mit zunehmendem Alter abnimmt.

Die Modellselektion legt nahe, dass das Modell, das eine reduzierte Aktivierungswahrscheinlichkeit annimmt, am besten zu den experimentellen Daten passt (s. Abb. 3) [18]. Biologisch ergibt sich daraus, dass die altersbedingte Reduktion der Aktivierungswahrscheinlichkeit einen wesentlichen Mechanismus darstellen könnte um die Depletion der Stammzellpopulation zu verlangsamen. Von allen betrachtet Modellen ist dies der einzige Mechanismus, der sowohl den zeitlichen Verlauf der gesamten Stammzellanzahl als auch die veränderte Proportion der aktiven Stammzellen erklären kann. Genexpressionsstudien und Knockout-Experimente bestätigen diese Sichtweise [18]. Dies ist ein Beispiel wie die Kombination von mathematischen Modellen mit experimentellen Daten Einblick in biologische Mechanismen geben kann. Basierend auf den zugrunde gelegten mechanistischen

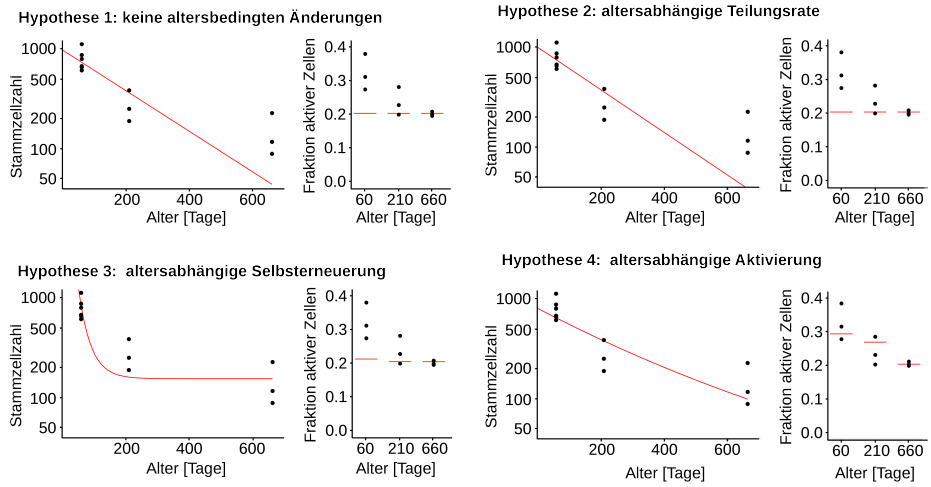


Abbildung 3: Modellselektion angewendet auf Fragestellungen der adulten Neurogenese. Modelle, die auf unterschiedlichen Annahmen beruhen, werden mit experimentellen Daten (dargestellt als schwarze Punkte) verglichen. Das Modell, das die Daten am besten wiedergibt, geht davon aus, dass sich die Aktivierungsrate ruhender neuronaler Stammzellen mit zunehmendem Alter verringert. Dieses Phänomen wird durch experimentelle Befunde untermauert.

Annahmen und den gemessenen Daten schlussfolgert bzw. entscheidet das Modell, welche mechanistischen Hypothesen zu den Daten passen und welche nicht mit der Realität übereinstimmen. Die Modellselektion trifft also logische Entscheidungen, anhand von Daten und Hypothesen. Aufgrund der komplizierten Dynamik der einzelnen Modelle kann diese Entscheidung nicht ohne Weiteres intuitiv getroffen werden. Dieses Beispiel zeigt die Interaktion zwischen menschlicher Intelligenz, die sich in der Formulierung der mechanistischen Hypothesen und der Auswahl geeigneter Experimente manifestiert, und mathematischer Intelligenz, die aus diesen Zutaten logische Schlussfolgerungen trifft.

6.2 Beispiel 2: Einfluss von Leukämie-Stammzellen auf den Krankheitsverlauf

Die sogenannte akute myeloische Leukämie gehört zu den aggressivsten bösartigen Erkrankungen des blutbildenden Systems. Im Verlauf der Erkrankung reichern sich mutierte Zellen mit einer spezifischen Morphologie, sogenannte Blasten, im

Knochenmark an und verdrängen die gesunde Blutbildung. Die Blasten leiten sich in einem mehrschrittigen Prozess aus sogenannten Leukämie-Stammzellen (Krebs-Stammzellen) ab. Die Krebs-Stammzellen sind dadurch charakterisiert, dass sie sich beliebig oft teilen können und dass ihre Population im Verlauf der Erkrankung erhalten bleibt. Aus den Leukämie-Stammzellen gehen sogenannte leukämische Progenitorzellen hervor, die ihrerseits Blasten bilden. Anders als die Leukämie-Stammzellen können leukämische Progenitorzellen und Blasten nur eine beschränkte Anzahl von Teilungen durchlaufen. Dies bedeutet, dass die Erkrankung theoretisch durch Eradikation der Leukämie-Stammzellpopulation geheilt werden könnte, da in Abwesenheit der Leukämie-Stammzellen der Nachschub an leukämischen Progenitorzellen und Blasten versiegen würde. Aus diesem Grund stehen Leukämie-Stammzellen im Zentrum des Interesses der klinischen Forschung. Auch die gesunde Blutbildung (Hämatopoese) wird durch eine Stammzellpopulation, die sogenannten hämatopoetischen (blutbildenden) Stammzellen, aufrechterhalten.

Die Forschung der letzten Jahre hat gezeigt, dass Stammzellen einer spezifischen Mikroumgebung bedürfen, um ihre Funktion aufrechtzuerhalten. Diese Mikroumgebung wird auch als Stammzellnische bezeichnet. Es gibt Hinweise, dass im Verlauf der akuten myeloischen Leukämie die hämatopoetischen Stammzellen durch Leukämie-Stammzellen aus der Nische verdrängt werden und dass auf diese Weise die gesunde Blutbildung zum Erliegen kommt.

In Ermangelung geeigneter experimenteller Daten, aufgrund der Unzugänglichkeit des menschlichen Knochenmarks für die zeitaufgelöste *in vivo* Beobachtungen einzelner Zellen, haben wir die Frage, wie die Eigenschaften von Leukämie-Stammzellen den Krankheitsverlauf beeinflussen, mit Hilfe mathematischer Modelle untersucht. Die mathematischen Modelle deuten nicht nur darauf hin, dass tatsächlich hämatopoetische und Leukämie-Stammzellen um eine gemeinsame Nische konkurrieren und eine Verdrängung der hämatopoetischen Stammzellen aus der Nische aufgrund der Expansion der Leukämie-Stammzellen stattfindet, sondern sie vermitteln auch Einblicke, welche Eigenschaften der Leukämie-Stammzellen einen besonders ausgeprägten Einfluss auf den Krankheitsverlauf haben [13, 23]. Die Modellsimulationen implizieren, dass nicht nur die Teilungsrate der Leukämie-Stammzellen eine wichtige Rolle spielt, sondern dass auch die Wahrscheinlichkeit, mit der eine durch Teilung neu entstandene Leukämie-Stammzelle eine hämatopoetische Stammzelle aus der Nische verdrängt, einen

wesentlichen Einfluss haben könnte [13]. Dem Modell nach zu urteilen ist der Zusammenhang zwischen diesen beiden Zelleigenschaften und der Geschwindigkeit, mit der die Erkrankung fortschreitet, nichtlinear.

Basierend auf simultanen Messungen der hämatopoetischen Stammzellzahl und der Blastenfrequenz zum Zeitpunkt der Erstdiagnose erlaubt das Modell, Eigenschaften der Leukämie-Stammzellen zu quantifizieren. Das Modell sagt voraus, dass die Eigenschaften der Leukämie-Stammzellen Einfluss auf die Prognose haben und dass eine modellbasierte Quantifizierung dieser Zellparameter zusätzliche Informationen im Vergleich zur etablierten klinischen Risiko-Einteilungen bieten könnte. Die Anwendung der modellbasierten Risikostratifizierung auf die Patientenkohorte einer klinischen Studie bestätigt, dass sich die klinische Risikoeinteilung tatsächlich mit Hilfe des Modells verbessern lässt (Abb. 4) [13].

Dieses Beispiel zeigt, dass mechanistische Modelle Einblick in den Verlauf einer malignen Erkrankung geben können und dass sie zusätzliche prognostische Anhaltspunkte liefern. Aufgrund der komplexen und nichtlinearen Prozesse, die der Krankheitsprogression zugrunde liegen, liefert die modellbasierte Risikoeinteilung mehr Informationen als die klinische Einteilung, die auf Analogiebetrachtungen, intuitiven Argumenten und empirischer Erfahrung beruht.

Die mathematischen Verfahren haben hier dazu beigetragen, wesentliche Prozessparameter zu identifizieren und diese anhand individueller Patientendaten zu quantifizieren. Dies führt zu einer computergestützten Maschinerie, die Patienten unterschiedlichen Prognose-Gruppen zuweist. Hier wird also mathematische Intelligenz verwendet, um Entscheidungen (Gruppenzuweisungen) und Vorhersagen (Prognose) zu ermöglichen. Der Anteil der menschlichen Intelligenz an diesem prognostischen Verfahren liegt in der Aufstellung der dem Modell zugrunde liegenden Hypothesen und in der Identifizierung messbarer Größen, hier in Form von Zelloberflächenmarkern, die zur individualisierten Parameterschätzung verwendet werden können.

7 Datengetriebene Verfahren

Mechanistische Modelle basieren auf Modellannahmen, die auf Hypothesen bezüglich der einem Phänomen zugrunde liegenden Prozesse beruhen. Aus diesem Grund wird die mechanistische Modellierung auch als ein *hypothesengetriebenes* Verfahren bezeichnet. Dem gegenüberzustellen sind die sogenannten *datengetrie-*

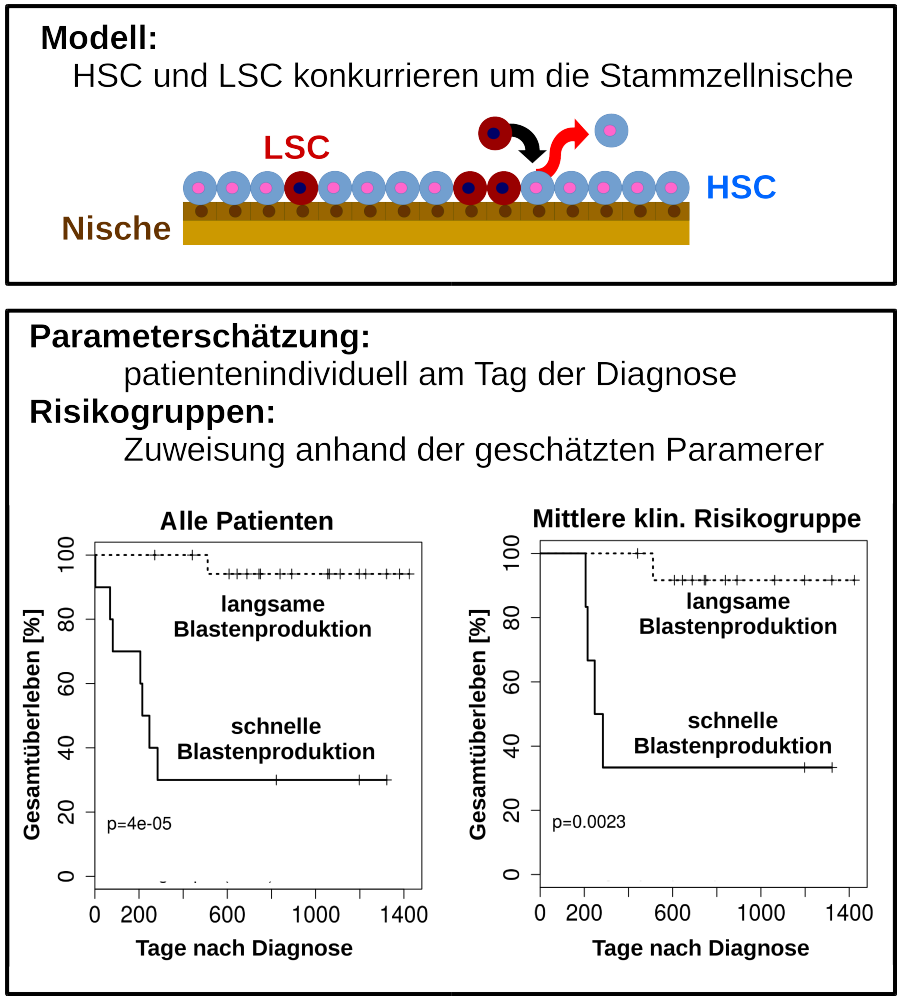


Abbildung 4: Parameterschätzung und Simulation angewendet auf Fragestellungen der personalisierten Medizin. Basierend auf einem Modell, das die Konkurrenz hämatopoetischer (HSC) und leukämischer Stammzellen (LSC) um Plätze in der Stammzellnische beschreibt, werden für den Krankheitsprogress wichtige Prozesse identifiziert. Unter Nutzung von Daten zum Zeitpunkt der Diagnose werden Modellparameter abgeschätzt, die es erlauben, Patienten verschiedenen Risikogruppen zuzuweisen. Mit diesem Verfahren können Patienten der sog. mittleren Risikogruppe genauer unterteilt werden.

benen Verfahren. Datengetriebene Verfahren, ein wesentlicher Teil der Ansätze des sogenannten maschinellen Lernens gehört hierzu, greifen nicht auf mechanistische Hypothesen zurück, sondern versuchen, Gesetzmäßigkeiten anhand von Datensätzen „unvoreingenommen“ abzuleiten. Dies bedeutet, dass ein Algorithmus basierend auf einem sogenannten Trainingsdatensatz Gesetzmäßigkeiten sucht, die die Beantwortung einer bestimmten Frage ermöglichen sollen. Im einfachsten Fall, dem sogenannten supervidierten Lernen, ist die Antwort auf die gestellte Frage für die Daten aus Trainingssatz bekannt. Der Algorithmus versucht dann Merkmale der Trainingsdaten zu extrahieren, die eine korrekte Beantwortung der Frage erlauben. Hierbei werden oft Ansätze aus der Statistik und Optimierung angewendet [30]. Werden dem Algorithmus nun weitere, nicht in dem Trainingsdatensatz enthaltene Daten vorgelegt, versucht er anhand der extrahierten Merkmale die gestellte Frage für den neuen Datensatz zu beantworten. Dies ist ein Beispiel für Lernen aus Erfahrung, denn basierend auf der Erfahrung innerhalb des Trainingsdatensatzes wird der Algorithmus in die Lage versetzt, Aussagen über neue, unbekannte Datensätze zu treffen.

Datengetriebene Verfahren sind besonders dann vielversprechend, wenn ein hypothesengetriebener Ansatz nicht gewählt werden kann. Dies kommt beispielsweise vor, wenn zu wenig Wissen über die einem Phänomen zugrunde liegenden Prozesse vorhanden ist oder wenn die zugrunde liegenden Prozesse zu komplex sind, um sie sinnvoll mechanistisch zu modellieren. Ein Vorteil vieler datengetriebener Verfahren ist, dass sie ‘out-of-the-box’ auf Daten angewendet werden können, ohne sich vorher ausführlich mit möglichen mechanistischen Hypothesen auseinandersetzen zu müssen.

In vielen Fällen sind für datengetriebene Verfahren im Vergleich zur mechanistischen Modellierung relativ große Trainingsdatensätze notwendig. Dies liegt unter anderem daran, dass dem Algorithmus das Wissen über mögliche Mechanismen fehlt und sämtliche Informationen direkt aus Daten extrahiert werden müssen. Dies kann natürlicherweise dann zu Problemen führen, wenn ein Trainingsdatensatz nicht repräsentativ ausgewählt wurde bzw. nicht den gesamten Raum der vorkommenden Möglichkeiten abdeckt. Datengetriebene Verfahren finden eine sehr breite Anwendung in der Bildverarbeitung und Bildanalyse. Eine medizinische Anwendung hiervon ist z. B. die Auswertung von Röntgenbildern.

8 Ausblick

Die aktuelle Forschung ist bemüht, hypothesengetriebene und datengetriebene Ansätze miteinander zu verbinden. Im günstigsten Falle resultiert daraus eine Kombination der Stärken der jeweiligen Herangehensweisen. Hier sind verschiedene Möglichkeiten denkbar. Zum einen ist es möglich, gut verstandene Prozesse mechanistisch zu modellieren und Einflussfaktoren, deren Wirkung nicht im Einzelnen bekannt ist, mit Hilfe von datengetriebenen Verfahren in die Modellierung einzubeziehen. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch die Frage, ob mechanistische Modelle verwendet werden können, um Datensätze zu generieren, mit denen datengetriebene Verfahren trainiert werden.

Dies könnte z. B. im Rahmen der Modellselektion eine Rolle spielen. Ein Lernalgorithmus könnte mit Daten trainiert werden, die von verschiedenen Modellen generiert wurden und dann dabei helfen zu erkennen, welches der verschiedenen Modelle am besten zu experimentellen Daten passt. Bei der Anwendung von mechanistischen Modellen zur Vorhersage des individuellen Krankheitsverlaufs kann der Fall eintreten, dass es verschiedene validierte Modelle gibt, die im Durchschnitt etwa gleich gut zur Realität passen, die jedoch, wenn man sie auf einen einzelnen Patienten anwendet, zu deutlich unterschiedlichen Vorhersagen führen. In diesem Fall ist es notwendig, eine Herangehensweise zu etablieren, die es ermöglicht, basierend auf individuellen Patientenmerkmalen möglichst früh in der Behandlung herauszufinden, welches Modell für einen gegebenen Patienten am geeignetsten ist. Auch hier könnten datengetriebene Verfahren helfen.

9 Schlussfolgerung

Zusammenfassend können mechanistische Modelle als problemspezifische Approximationen der Realität angesehen werden, deren Komplexität mit den vorhandenen mathematischen und computergestützten Werkzeugen handhabbar ist. Auch wenn Modelle Vereinfachungen der Wirklichkeit darstellen, stimmen sie im Hinblick auf bestimmte Eigenschaften gut genug mit der Realität überein, um sich in Forschung und Anwendung als nützlich zu erweisen. Mechanistische Modelle ermöglichen zu verstehen, wie die quantitative und qualitative Dynamik eines Systems von Modellannahmen, Anfangsbedingungen, und Prozessparametern abhängt. Falls die Modellannahmen gut zur Realität passen, können mechanistische

Modelle verwendet werden, um wichtige Prozessparameter anhand von Daten zu quantifizieren.

Wenn alle wichtigen Prozessparameter bereits bekannt sind, erlauben mechanistische Modelle, die Dynamik eines Systems quantitativ vorherzusagen. Die fehlende Übereinstimmung von Modell und Realität deutet auf Lücken in unserem Verständnis hin und führt zur Bildung neuer Hypothesen. Mechanistische Modelle verfügen über Eigenschaften, die häufig als Merkmale von Intelligenz angesehen werden, dazu zählen z. B. die Vorhersage von Ereignissen, das Ableiten von Schlussfolgerungen basierend auf Erfahrung, das Treffen von Entscheidungen, das Lösen von Problemen, das Planen von Strategien (z. B. Experimenten), die Reduktion eines komplexen Problems auf wesentliche Einflussgrößen, die Rückführung komplexer Dynamik auf mögliche Mechanismen oder das Treffen einer Auswahl aus mehreren konkurrierenden Hypothesen. Die Kombination von mechanistischen Modellen mit datengetriebenen Verfahren kann helfen, Einflussgrößen und Phänomene in die Modellierung einzubeziehen, deren Wirkweise (noch) im Dunkeln liegt.

Mathematische Modelle und trainierte maschinelle Algorithmen sind auf spezifische Fragestellungen zugeschnittene Konstrukte. Beide können zu fragwürdigen Ergebnissen führen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn Modellannahmen verletzt werden oder verwendete Daten nicht repräsentativ bzw. anderweitig nicht valide sind. Auch wenn die menschliche Intelligenz flexibler ist als diese Konstrukte, ist es ihr nicht fremd, fragwürdige Schlussfolgerungen zu ziehen. Man denke etwa an Pareidolien und optische Täuschungen. Mathematischer, maschineller und menschlicher Intelligenz ist wahrscheinlich gemein, dass eine auf begrenzten Ressourcen basierende Interaktion mit einer komplexen Umwelt eine Komplexitätsreduktion erfordert. Eine solche ist jedoch inhärent fehlbar und neigt mitunter dazu, beobachtete Veränderungen zu Unrecht mit ihr bekannten Phänomenen zu identifizieren.

Referenzen

[1] Boring EG. Intelligence as the tests test it. New Republic 36:35–37, 1923.

[2] Faller H, Lang H. Medizinische Psychologie und Soziologie. 2. Aufl. 2006, Kap. 1.4.3.

[3] Wechsler D. Wechsler Adult Intelligence Scale - Fourth Edition, Pearson, 2008.

[4] Gottfredson LS. Mainstream science on intelligence. Intelligence 24(1):13–23, 1997.

[5] Zimbardo PG, Gerrig RJ. Psychologie, 18. Aufl., Pearson Studium, 2008. S. 331.

[6] Østby I, Rusten LS, Kvalheim G, Grøttum P. A mathematical model for reconstitution of granulopoiesis after high dose chemotherapy with autologous stem cell transplantation. J Math Biol. 47(2):101–136, 2003.

[7] Marciniak-Czochra A, Stiehl T, Ho AD, Jäger W, Wagner W. Modeling of asymmetric cell division in hematopoietic stem cells–regulation of self-renewal is essential for efficient repopulation. Stem Cells Dev. 18(3):377–85, 2009.

[8] Stiehl T, Ho AD, Marciniak-Czochra A. The impact of CD34+ cell dose on engraftment after SCTs: personalized estimates based on mathematical modeling. Bone Marrow Transplant. 49(1):30–37, 2014.

[9] Manesso E, Teles J, Bryder D, Peterson C. Dynamical modelling of haematopoiesis: an integrated view over the system in homeostasis and under perturbation. J R Soc Interface. 10(80):20120817, 2013.

[10] Mercker M, Lengfeld T, Höger S, Tursch A, Lommel M, Holstein TW, Marciniak-Czochra A. β-Catenin and canonical Wnts control two separate pattern formation systems in Hydra: Insights from mathematical modelling. BioRxiv 2021, https://doi.org/10.1101/2021.02.05.429954.

[11] Turing A. The chemical basis of morphogenesis. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B. 237(641):37–72, 1952.

[12] Hiscock TW, Megason SG. Mathematically guided approaches to distinguish models of periodic patterning. Development. 142(3):409–19, 2015.

[13] Stiehl T, Wang W, Lutz C, Marciniak-Czochra A. Mathematical Modeling Provides Evidence for Niche Competition in Human AML and Serves as a Tool to Improve Risk Stratification. Cancer Res. 80(18):3983–3992, 2020.

[14] Stiehl T, Baran N, Ho AD, Marciniak-Czochra A. Cell division patterns in acute myeloid leukemia stem-like cells determine clinical course: a model to predict patient survival. Cancer Res. 75(6):940–9, 2015.

[15] Kather JN, Poleszczuk J, Suarez-Carmona M, Krisam J, Charoentong P, Valous NA, Weis CA, Tavernar L, Leiss F, Herpel E, Klupp F, Ulrich A, Schneider M, Marx A, Jäger D, Halama N. In Silico Modeling of Immunotherapy and Stroma-Targeting Therapies in Human Colorectal Cancer. Cancer Res. 77(22):6442–6452, 2017.

[16] Kather JN, Charoentong P, Suarez-Carmona M, Herpel E, Klupp F, Ulrich A, Schneider M, Zoernig I, Luedde T, Jaeger D, Poleszczuk J, Halama N. High-Throughput Screening of Combinatorial Immunotherapies with Patient-Specific In Silico Models of Metastatic Colorectal Cancer. Cancer Res. 78(17):5155–5163, 2018.

[17] Ravichandran S, Del Sol A. Identifying niche-mediated regulatory factors of stem cell phenotypic state: a systems biology approach. FEBS Lett. 591(3):560–569, 2017.

[18] Kalamakis G, Brüne D, Ravichandran S, Bolz J, Fan W, Ziebell F, Stiehl T, Catalá-Martinez F, Kupke J, Zhao S, Llorens-Bobadilla E, Bauer K, Limpert S, Berger B, Christen U, Schmezer P, Mallm JP, Berninger B, Anders S, Del Sol A, Marciniak-Czochra A, Martin-Villalba A. Quiescence Modulates Stem Cell Maintenance and Regenerative Capacity in the Aging Brain. Cell. 176(6):1407–1419.e14, 2019.

[19] Burnham KP, Anderson, DR. Model Selection and Multimodel Inference: a Practical Information-Theoretic Approach, Springer 2002.

[20] Shankland RS. Michelson-Morley Experiment. American Journal of Physics 32:16–35, 1964.

[21] Nieman RE, Fisher DG, Seborg DE. A review of process identification and parameter estimation techniques. International Journal of Control 13(2):209–264, 1971.

[22] STIKO. Modelling methods for predicting epidemiological and health economic effects of vaccinations – Guidance for analyses to be presented to the German Standing Committee on Vaccination (STIKO), 2016.

[23] Wang W, Stiehl T, Raffel S, Hoang VT, Hoffmann I, Poisa-Beiro L, Saeed BR, Blume R, Manta L, Eckstein V, Bochtler T, Wuchter P, Essers M, Jauch A, Trumpp A, Marciniak-Czochra A, Ho AD, Lutz C. Reduced hematopoietic stem cell frequency predicts outcome in acute myeloid leukemia. Haematologica. 102(9):1567–1577, 2017.

[24] Kitsos CP. Optimal Experimental Design for Non-Linear Models - Theory and Applications. Springer 2013

[25] Banasiak J, Lachowicz M. Methods of Small Parameter in Mathematical Biology, Birkhäuser 2014.

[26] Cromwell HC, Mears RP, Wan L, Boutros NN. Sensory gating: a translational effort from basic to clinical science. Clin EEG Neurosci. 39(2):69–72, 2008.

[27] Rutherford A. Mathematical Modelling Techniques, Dover Books on Computer Science, 1995.

[28] Daun S, Rubin J, Vodovotz Y, Clermont G. Equation-based models of dynamic biological systems. J Crit Care. 23(4):585–594, 2008.

[29] Breckling B. Individual-based modelling: potentials and limitations. ScientificWorld-Journal. 2:1044–62, 2002.

[30] Ertel W. Grundkurs Künstliche Intelligenz. Eine praxisorientierte Einführung, 4. Aufl., Springer Vieweg, 2016.

Über die Autoren

Thomas Stiehl studierte Mathematik und Medizin an der Universität Heidelberg, wo er auch in Mathematik promovierte. Seit 2021 ist er Professor für „Disease Modeling“ am Universitätsklinikum Aachen und an der RWTH Aachen. Seine Forschung befasst sich mit der Entwicklung mechanistischer mathematischer und computergestützter Modelle von stammzellgetriebenen Prozessen, wie z. B. Geweberegeneration und Krebs. Einen Schwerpunkt stellt hierbei die auf klinischen Routinedaten basierende Modellierung maligner Erkrankungen des blutbildenden Systems - v.a. der akuten myeloischen Leukämie - dar. Vorrangiges Ziel der Modellierung ist ein enger Bezug zu klinischen Fragestellungen sowie zu Aspekten der personalisierten Medizin und Systemmedizin. Andere Forschungsthemen von Herrn Stiehl umfassen die adulte Neurogenese, die Regulation von Pflanzenstammzellen sowie Fragen der Stammzellalterung.

Anna Marciniak-Czochra ist Professorin der angewandten Mathematik an der Universität Heidelberg und Leiterin der Forschungsgruppe „Applied Analysis and Modeling in Biosciences“ am Institut für angewandte Mathematik, IWR und Bioquant. Sie studierte Mathematik an der Warschauer Universität, Polen, und promovierte in Heidelberg. Die interdisziplinäre Expertise von Anna Marciniak-Czochra liegt in den Bereichen der angewandten Mathematik, Biomathematik und Systembiologie. Ihr Forschungsschwerpunkt ist die Dynamik der Selbstorganisation und Strukturbildung bei Entwicklungs- und Regenerationsprozessen sowie bei Krebs. Ziel ihrer Forschung ist die Entwicklung und Analyse mehrskaliger mathematischer Modelle zur Dynamik der Strukturbildung in vielzelligen Systemen. Zu diesem Zweck leitet sie neue mathematische Methoden zur Modellierung solch komplexer Prozesse her. Ihre mathematischen Schwerpunkte sind partielle Differentialgleichungen, dynamische Systeme und Mehrskalenanalysis. Die in der Gruppe von Anna Marciniak-Czochra entwickelten mathematischen Modelle und Methoden werden in Zusammenarbeit mit Experimentatoren und Medizinern auf Probleme der Entwicklungs- und Zellbiologie sowie Medizin angewendet.

Korrespondenzadressen:
Prof. Dr. Thomas Stiehl
Institute for Computational Biomedicine – Disease Modeling
RWTH Aachen

Pauwelsstr. 19
52074 Aachen

E-Mail: tstiehl@ukaachen.de
Homepage: http://www.thomas-stiehl.de/

Prof. Dr. Anna Marciniak-Czochra
IWR & Bioquant
Universität Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 205
69120 Heidelberg

E-Mail: anna.marciniak@iwr.uni-heidelberg.de
Homepage: http://wwwagmarciniak.iwr.uni-heidelberg.de/folder_people/Anna.Marciniak/index.html

Künstliche Intelligenz und Algorithmen – Wahrer Fortschritt oder doch nur digitale Alchemie?

VINCENT HEUVELINE & VIOLA STIEFEL

IWR und Rechenzentrum, Universität Heidelberg

Zusammenfassung

Vom Schachcomputer über das selbstfahrende Auto bis hin zu den großen Science-Fiction-Erfolgen im medialen Bereich – KI ist heutzutage omnipräsent. Ausgehend von der Frage nach der Interaktion zwischen Mensch und Maschine beschäftigt sich dieser Beitrag zunächst mit der Unterscheidung zwischen starker KI, die primär in der cineastischen Welt beheimatet ist, und schwacher KI, unter die heute alle tatsächlichen KI-Systeme fallen. Der Aspekt des Lernens und die Rolle von Algorithmen hierbei sind von eminenter Bedeutung für die Erforschung und Weiterentwicklung der bis dato vorhandenen KI-Systeme. Auf Basis künstlicher neuronaler Netze lernen Computer beispielsweise, Katzen- von Hundebildern zu unterscheiden. Doch können der KI auch gewichtigere Entscheidungen übergeben werden? Und wie trifft der Algorithmus mathematisch betrachtet eine Entscheidung? Was passiert, wenn die Daten, mit denen der Computer lernt, fehlerbehaftet sind? Die Konsequenzen aus diesen Überlegungen eröffnen zweifelsohne eine nicht ausschließlich für die Forschung, sondern für die gesamte Gesellschaft relevante Bandbreite von neuen Themenstellungen, die mit dem zunehmenden Einsatz von KI immer zentraler werden.

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24390

1 Einleitung

Nicht selten wird die Frage aufgeworfen, wie es sein kann, dass ein Computer neue Erkenntnisse generiert, die der Programmierer gar nicht intendiert hat und die ihm völlig unbekannt sind. Man sollte eigentlich davon ausgehen können, dass der Computer sklavisch die Abfolge von binären Befehlen und Anweisungen ausführt, die der Programmierer mittels seiner Software-Entwicklung definiert hat. Der Computer macht eben keinen Fehler. Diese entstehen höchstens, wenn der Software-Entwickler ein paar von den berühmten Bugs in seiner Software übersehen hat und dadurch ein irrtümliches oder gar erratisches Verhalten der Maschine verursacht. In diesem Duktus sind die Verhältnisse zwischen Mensch und Maschine klar definiert: der Mensch diktiert die Aufgaben, die die Maschine umzusetzen hat. Der Computer, als ausführendes Instrument, wägt seine Reaktion dabei nicht kritisch ab und zeigt keine Gefühle wie etwa Langweile, auch wenn die auszuführenden Aufgaben aus repetitiven, drögen Schritten bestehen. Es wird erwartet, dass die Aufgaben deterministisch und reproduzierbar umgesetzt werden. Die Stromzufuhr sorgt dafür, dass die Bytes und Bits stets geordnet und nach Plan innerhalb der elektronischen Schaltungen fließen. In diesem Kontext gibt es wenig Platz in der Maschinen-Rolle für Unerwartetes oder gar Kreativität. Der Mensch meint somit, stets die vollständige Kontrolle über die Maschine zu besitzen. Diese weitverbreitete Sicht ist jedoch sehr trügerisch. Zum Beispiel kann ein Navigationssystem den kürzesten Weg zwischen der Stadt Heidelberg und dem wunderbaren, mittelalterlichen Ort Bad Wimpfen errechnen. Wir können jedoch nicht davon ausgehen, dass der Entwickler des Navigationssystems alle Geheimtipps der erkundeten Gegend – in unserem Fall Heidelberg – kennt und dafür Wege und Pläne dezidiert entwirft. Vielmehr wird der Programmierer ein Verfahren – allgemein im Sinne eines mathematischen Algorithmus – implementieren, das in der Lage ist, den kürzesten Weg zwischen zwei Punkten auf einer Karte zu berechnen. Die Frage, die sich hier stellt, ist, ob der Programmierer immer noch die Kontrolle über seine Software besitzt. Was bedeutet es, die Kontrolle über einen Algorithmus zu haben? Können unerwartete Ergebnisse entstehen, die zunächst nicht beabsichtigt wurden? Kann ein Algorithmus in der Kombination mit Daten ein Wissen generieren – hier der kürzeste bzw. schnellste Weg –, das der Programmierer in der Form überhaupt nicht kannte? In dieser Abhandlung werden wir uns Schritt für Schritt mit diesen fundamentalen Fragestellungen auseinandersetzen, die zum Verständnis und zur Bewertung von KI von essenzieller

Natur sind. Dabei werden wir feststellen, dass das Verhältnis Mensch/Maschine in diesem Kontext doch subtiler ist als zunächst vermutet.

2 Starke versus schwache KI

Die Liste der Science-Fiction-Autoren und Filmemacher, die sich in ihren Werken der Thematik KI widmen, ist ausgesprochen lang und vielfältig. Eine beinahe Konstante in diesen Büchern und Filmen ist, dass die dargestellte KI in quasi allen Bereichen mindestens den menschlichen Fähigkeiten entspricht, wenn sie sie nicht gar übertrifft. Das überdurchschnittliche logische Denkvermögen von Commander Data aus der Science-Fiction-Reihe Star Trek macht ihn, in Verbindung mit seinem lückenlosen enzyklopädischen Wissen im Sinne von Big Data, zu einer faszinierenden Figur, die auf beinahe jedem Gebiet die menschliche Intelligenz übertrifft. Die Fähigkeit zur Kommunikation in allen natürlichen bekannten Sprachen, die der humanoiden Figur C3PO aus dem Film Star Wars zu eigen ist, ist nicht weniger beeindruckend. Dem Menschen mag diese kognitive Überlegenheit zumindest respekteinflößend, teilweise gar angsteinflößend vorkommen. Stephen Hawking beispielsweise hat immer vor den Gefahren gewarnt, die für die Menschheit von künstlicher Intelligenz ausgehen. Die allgegenwärtige mediale Darstellung von KI trägt nur bedingt zur Beruhigung und Entschärfung bei. James Cameron etwa setzt im zweiten Film seiner bekannten Filmreihe Terminator mit dem gleichnamigen Cyborg weitere Akzente im Zusammenhang mit der künstlichen Intelligenz: Terminator kombiniert die Superlative aller menschlichen Fähigkeiten zur Erreichung eines übergeordneten Ziels: die Menschheit retten. Dabei versteht und beherrscht Terminator sogar eine Fähigkeit, die als ausschließlich menschliches Attribut gilt – den Humor. All diese Figuren haben gemeinsam, dass sie die Ausprägung einer sogenannten starken künstlichen Intelligenz („strong artifical intelligence“) abbilden, die alle Seiten der menschlichen Intelligenz – auch und insbesondere in der Kombination der unterschiedlichen Fähigkeiten – umfasst [3,5].

Das Streben nach übermenschlichen Fähigkeiten, Superkräften und Hyperintelligenz fasziniert die Menschheit seit jeher und schlägt sich aus diesem Grund nicht zuletzt in sämtlichen medialen Formen nieder. Ein Beispiel aus der griechischen Mythologie wäre Ikarus, der schließlich daran scheiterte, zu hoch hinaus zu wollen. Inwieweit den heutigen Bestrebungen der Menschheit, sich auch ansonsten über eine starke KI gottähnlich machen zu wollen (man denke an Hararis Homo Deus),

das gleiche Schicksal droht, wird sich zeigen [4]. Derzeit kann man jedoch festhalten, dass die vorhandene Technologie weit davon entfernt ist, starke künstliche Intelligenz als Realität zu ermöglichen. Die heutigen KI-Systeme fallen unter die Kategorie der schwachen KI („weak artifical intelligence“) [1]: die menschliche Intelligenz bzw. die menschlichen kognitiven Fähigkeiten werden nur in abgegrenzten Teilbereichen erreicht und ggf. übertroffen. Bild- und Spracherkennung, automatisierte Übersetzung und selbstfahrende Autos sind nur ein paar Beispiele, für welche (schwache) künstliche Intelligenz heutzutage produktiv eingesetzt wird.

3 Schwache KI ist Mathematik

Die Dartmouth-Konferenz („Dartmouth Summer Research Project on Artifical Intelligence“), die im Jahr 1956 am Dartmouth College in Hanover, New Hampshire (USA) stattfand, gilt als Beginn der Beschäftigung mit künstlicher Intelligenz im Sinne derjenigen Konzepte und Ansätze, die wir heute verwenden.

Der Name „Artifical Intelligence/künstliche Intelligenz“ stammt von dem Initiator der Konferenz, John McCarthy. Im Rahmen dieser Konferenz sind auch Marvin Minsky, Claude Shannon, John von Neumann und Ray Solomonoff zu nennen, die die weiteren Entwicklungen der KI sehr stark geprägt haben. Die genaue Betrachtung sowohl der behandelten Themen als auch der vertretenen Expertise macht sehr deutlich, dass die zugrundeliegenden KI-Konzepte auf mathematischen Abstraktionen fußen [6,7]. Im Kontext dieser Aufbruchstimmung erscheint das Schlusswort der Konferenz einerseits vielversprechend, auf der anderen Seite jedoch auch noch vorsichtig unverbindlich: „[. . .] every aspect of learning or any other feature of intelligence can in principle be so precisely described that a machine can be made to simulate it“ [32]. Eine für die letzten Dekaden wichtige Erkenntnis aus dieser Schlussfolgerung und aus der gesamten Konferenz ist, dass ein Computer mehr als nur die Kernaufgabe des wissenschaftlichen Rechnens – die klassische numerische Simulation – ausführen kann. Ein Computer ist tatsächlich in der Lage, mithilfe entsprechender Algorithmen zu lernen. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass dies allgemein nur gelingen kann, wenn man über erhebliche Rechenleistung und Trainingsdaten verfügt [14]. Die letzten Jahrzehnte haben darüber hinaus gezeigt, dass die Entwicklungen der Computer-Technologie als Katalysator für die KI-Entwicklung fungiert haben.

Das Mooresche Gesetz (Moore's Law), das eigentlich eher eine Beobachtung ist, besagt, dass alle 18 Monate eine Verdoppelung der vorhandenen Rechenleistung stattfindet. Diese Faustregel, die bis heute nicht widerlegt worden ist, entspricht einem exponentiellen Wachstum. Derartig gewaltige, technologische Entwicklungen sind ohne Zweifel ausschlaggebend für die längst gefeierten Erfolge von KI beim Schach- und Go-Spiel. Supercomputer und Hochleistungsrechner, die für KI sehr stark eingesetzt werden, sind inzwischen Symbole der größtmöglichen verfügbaren Rechenleistung geworden. Die Anzahl an Gleitkommaoperationen pro Sekunde – kurz FLOPS (Floating Point Operations Per Second) – ist ein Maß für die Leistungsfähigkeit eines Rechners. Heutzutage sind die schnellsten Supercomputer in der Lage, ca. 500 PetaFLOPS (Peta=10^{15}) zu berechnen. Dies entspricht in etwa

500 000 000 000 000 000 Operationen pro Sekunde.

Auch für Experten sind solche Größenordnungen herausfordernd und schwer zu fassen. Diese geballte Rechenleistung ist zwar eine notwendige, jedoch nicht hinreichende Bedingung zum erfolgreichen Einsatz von KI. Die in KI notwendigen Lernverfahren basieren auf Trainingsdaten, auf Grundlage derer der Rechner in der Lage ist, Sachverhalte zu lernen. Allgemein gilt: Je präziser und umfangreicher diese Daten vorliegen, desto besser kann der Rechner lernen. Ein in Lehrbüchern klassisches Beispiel dafür ist das Unterscheiden zwischen Katzen und Hunden auf Basis von Bildern. Der Rechner wird dahingehend trainiert, dass er mithilfe einer großen Anzahl an Bildern von Katzen und Hunden „eingelernt" wird. Beim Präsentieren eines für den Rechner komplett neuen Bildes ist er dann in der Lage zu unterscheiden, ob es sich um eine Katze oder eben einen Hund handelt. Der Clou dabei: Es ist irrelevant, ob er genau die vorgestellte Rasse des Hundes oder der Katze kennt. Wie ein Mensch hat der Computer mithilfe der Trainingsdaten Merkmale gelernt, anhand derer er die Tiere – fast immer richtig – unterscheiden kann. Dabei ist es wesentlich, dass die Unterscheidungsmerkmale nicht explizit vorab programmiert worden sind, sondern automatisch über die entsprechenden KI-Algorithmen durch den Rechner definiert werden.

Die Erfahrung zeigt, dass die Qualität und die Menge der Trainingsdaten dabei ausschlaggebend sind. Hier spielen die technologischen IT-Entwicklungen eine entscheidende Rolle. In einer Ära der allgegenwärtigen digitalen Kommunikation, aber auch der Vernetzung z. B. über das Internet of Things (IoT), werden digitale Daten in etlichen Konstellationen produziert. Der Begriff „Big Data" ist

diesbezüglich selbstredend: in etlichen Anwendungsbereichen werden erhebliche Mengen an strukturierten und unstrukturierten Daten produziert. Dabei sind nicht die Daten als solche wichtig, sondern die Möglichkeit, aus diesen Daten ein Wissen und Erkenntnisse zu generieren. Viele KI-Systeme leben von dem Vorhandensein solcher Daten und sind somit in der Lage, aus diesen wichtige und neue Erkenntnisse zu gewinnen [8]. In diesem Zusammenhang ist es bedeutsam, dass die Datenmenge teilweise so umfangreich geworden ist, dass ein einzelner Mensch nicht in der Lage wäre, diese Daten ohne Rechner-Unterstützung - teilweise mit KI-basierten Ansätzen - zu analysieren. Verliert der Mensch somit die Kontrolle über seine Entscheidung? Wie zuverlässig sind die KI-Systeme tatsächlich? Eine Antwort auf diese Fragen erfordert einen genaueren Blick in die Funktionsweise von KI-Algorithmen.

4 Algorithmen für KI

Der Einsatz von KI setzt voraus, dass der verwendete Computer die Fähigkeit des Lernens besitzt. Ein erster - jedoch irrtümlicher - Gedanke wäre, die Verantwortung des expliziten Lernens an den Programmierer des Computers zu übertragen. Der Programmierer als „Chef-Pädagoge“ der Maschine kann über die entwickelte Software Regeln und Handlungsanweisungen vorgeben, nach deren Muster die Maschine in vorgegebenen Situationen zu reagieren hat. Ein wesentlicher Nachteil an einer solchen Vorgehensweise wäre, dass der Programmierer selbst über das benötigte Wissen verfügen müsste, um dieses in eine entsprechende Software übertragen zu können. Der Programmierer des Go-Spiels müsste demzufolge alle Tipps und Tricks des Go-Spiels kennen und dabei explizit implementieren. Konzeptionell wäre dadurch das vorhandene Wissen der Maschine stets an die Fähigkeiten des Programmierer-Teams gebunden und dadurch de facto erheblich beschränkt. Eine solche Maschine wäre kaum in der Lage, die weltbesten Go-Spieler zu besiegen. Die Erfolge der Software Alpha-Go gegen die Go-Champions dieser Welt haben jedoch einen Gegenbeweis dafür geliefert. Die Maschine konnte mit deutlicher Überlegenheit das alte chinesische Spiel Go stets gewinnen. Wie ist das überhaupt möglich?

Der eigentliche Trick besteht darin, der Maschine beizubringen, wie sie selbst lernen kann, quasi nach dem Prinzip Hilfe zur Selbsthilfe. Der Programmierer bleibt zwar weiterhin „Chef-Pädagoge“ der Maschine. Dabei versucht er jedoch

nicht, die Inhalte, die er allgemein weder kennt noch beherrscht, der Maschine beizubringen. Vielmehr übermittelt er eine Methodik, wie die Maschine selbst lernen kann. Solche Ansätze fallen unter den Begriff „Maschinelles Lernen“: Aus digitalen Daten soll künstlich ein Wissen generiert werden, mit dem die Maschine in der Lage ist, eigenständig Entscheidungen treffen zu können [10]. Die praktische Umsetzung solcher Ansätze erfolgt mithilfe von eigens dafür entwickelten Algorithmen. Diese Algorithmen lassen sich grob in zwei Kategorien einteilen: überwachtes Lernen (engl. supervised learning) und unüberwachtes Lernen (engl. unsupervised learning) [11,13]. Die genaue Beschreibung dieser unterschiedlichen Gruppen würde den Rahmen dieser Abhandlung sprengen. Wir werden uns entsprechend im Folgenden ausschließlich auf die Algorithmen der Kategorie des überwachten Lernens konzentrieren.

Im überwachten Lernen lernt der Computer aus gegebenen Paaren von Ein- und Ausgaben. Beispielsweise wird ein Bild mit einer Katze (Eingabe) mit dem Wert 0 (Ausgabe) verknüpft und ein Bild mit einem Hund (Eingabe) mit dem Wert 1 (Ausgabe) versehen. Die Kunst besteht darin, eine Abbildung bzw. eine Funktion zwischen den Eingaben und Ausgaben so zu definieren, dass sogar unbekannte Bilder richtig nach dem genannten Prinzip klassifiziert werden. Für die Definition von solchen Abbildungen hat sich die Verwendung von sog. neuronalen Netzen sehr bewährt [9,12].

In der Biologie beziehen sich neuronale Netze auf Strukturen des Gehirns von Tieren und Menschen. Dabei bilden die Neuronen ein äußerst komplexes Netzwerk – in der menschlichen Großhirnrinde arbeiten 10 Milliarden Neuronen in feinster Abstimmung. Jedes Neuron ist mit ca. 2000 anderen Neuronen verbunden. Die Fähigkeit des Lernens erfolgt über eine Veränderung der Verbindungsstärken der vorhandenen Neuronen. Somit sind die Informationen nicht in einzelnen Neuronen gespeichert, sondern werden durch den gesamten Zustand des neuronalen Netzes mit allen Verbindungsstärken repräsentiert. Im Bereich der KI verwendet man künstliche neuronale Netze, die stark von ihrem biologischen Pendant inspiriert sind [2]. Bei künstlichen neuronalen Netzen geht es allerdings darum, eine Abstraktion im Sinne einer Modellbildung zu erlangen, anhand derer die Abbildung zwischen Eingaben und Ausgaben bestmöglich definiert werden kann. Der Lernprozess auf Basis von solchen künstlichen neuronalen Netzen besteht darin, Gewichte entlang der Verbindungen (Kanten) eines Graphens zu bestimmen, für welche die Neuronen als Knoten fungieren. Die Paare von Eingaben/Ausgaben

als Trainingsdaten werden dafür verwendet, diese Gewichte festzulegen. Mathematisch betrachtet handelt es sich hierbei um eine Modellkalibrierung im Sinne einer Parameteridentifikation. Dabei sind die Gewichte entlang der Kanten des neuronalen Netzes die Parameter, die identifiziert werden sollen: der Lernprozess als Problem der Parameteridentifikation.

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass aus Sicht der Mathematik noch etliche Fragen rund um die Eigenschaften solcher neuronaler Netze offen sind. Zum Beispiel ist die Festlegung der Dimensionierung eines solchen neuronalen Netzwerkes für eine vorgegebene Anwendung nach wie vor eine Herausforderung, die allgemein empirisch über zahlreiche Tests definiert werden muss. Eine gewisse digitale Alchemie ist hier immer wieder notwendig. Für einfache neuronale Netze kann man beweisen, dass die zugrundeliegende Methodik bekannten Verfahren aus dem Bereich der numerischen Optimierung entspricht. Somit hat man für solche Verfahren die ausgesprochen wichtige Stütze der Mathematik, die ein Fundament sowohl für das Verständnis als auch für Konvergenz-Aussagen der Verfahren liefert. Für zahlreiche Verfahren, die sich in der Praxis bewährt haben, gibt es leider kaum mathematische Erkenntnisse, warum diese Verfahren funktionieren und ob das tatsächlich immer der Fall ist. Das erklärt, warum diese Technologie immer wieder als Blackbox-Modell bezeichnet wird. Für die Verwendung von KI in kritischen Bereichen kann eine solche Lage manche Gefahren bergen. Wie empfindlich reagiert das neuronale Netzwerk z. B. auf fehlerhafte Daten? Hier ist nach wie vor noch ein sehr großer Forschungsbedarf vorhanden, damit solche Ansätze nicht allein durch die Empirie bestätigt werden.

5 KI als Blackbox

In spezifischen Teilbereichen übertrifft KI bereits die menschlichen kognitiven Fähigkeiten. Es werden Mengen an Trainingsdaten verarbeitet, die ein menschliches Gehirn in einem ganzen Leben weder speichern noch verarbeiten könnte. So beeindruckend solche Ergebnisse auch sind, es stellt sich doch die Frage, ob wichtige oder gar kritische Entscheidungen auf Basis solcher Ergebnisse überhaupt getroffen werden dürfen.

Kann man bei wichtigen Entscheidungen der KI-Technologie grundsätzlich vertrauen?

Diese Frage, die in solcher Deutlichkeit aufgrund der gefeierten Erfolge von KI oft vermieden wird, ist eigentlich von signifikanter Bedeutung. Die lapidare Aussage, dass Rechner keinen Fehler machen, gilt in diesen Teilbereichen eben nicht mehr. Für viele Anwendungen weiß niemand – nicht einmal der Programmierer, der die KI-Software geschrieben hat – wie der Algorithmus seine Entscheidung überhaupt getroffen hat. Dieses Phänomen wird als Blackbox-Problem bezeichnet [15]. In der Praxis scheinen die modernen Lernalgorithmen größtenteils zu funktionieren. Fakt ist jedoch, dass man diese Mechanismen, die seitens der KI zu einer Entscheidung führen, oft schlichtweg nicht versteht. In der Interaktion Mensch/Maschine handelt es sich hier sicherlich um einen in dieser Form nie da gewesenen Paradigmenwechsel. Auch gesellschaftlich betrachtet wirft diese Herausforderung weitere Fragestellungen auf:

- Wer besitzt und versteht die Trainingsalgorithmen bzw. -software?
- Wer besitzt und versteht die trainierten neuronalen Netze bzw. KI-Modelle?

Wohlwissend, dass die KI-Technologie etliche Bereiche des täglichen Lebens erreicht hat, sind solche Schwerpunkte nicht nur gesellschaftlich relevant, sondern auch von politischer Bedeutung [19,20].

In der Annahme, dass die KI-Algorithmen in einer vorgegebenen Metrik optimal lernen, was wir – Stand heute – mathematisch nicht beweisen können, stellt sich weiterhin die Frage, ob die Trainingsdaten für die anvisierten Entscheidungen überhaupt geeignet sind. In diesem Zusammenhang sind mehrere Aspekte zu berücksichtigen. In vielen Anwendungsbereichen entstehen die Daten aus Messungen, die allgemein nicht exakt bestimmt werden können. Messfehler sind für Sensoren an der Tagesordnung. Hieraus ergibt sich nun die Frage, wie ein KI-System sowohl auf Trainings- als auch Eingabedaten reagiert, die nicht ganz fehlerfrei sein können. Die Thematik der Sensitivität von solchen Systemen im Hinblick auf Unschärfen in den Daten ist nach wie vor Forschungsgegenstand und allgemein bis heute nicht richtig durchdrungen [16,17].

Ein weiterer Aspekt ist womöglich noch schwerwiegender: Was passiert, wenn die Trainingsdaten unvollständig sind und das KI-System nur partiell den Datenraum erlernen kann? Die Gefahr der vorprogrammierten Diskriminierung lauert genau an dieser Stelle. Die Zeitschrift Focus vom 12.10.2018 [31] brachte diesen Sachverhalt am Beispiel von KI-basierten Bewerbungsbewertungen auf den

Punkt: „Künstliche Intelligenz erachtet Bewerbungen von Frauen als minderwertig“. Nach (menschlicher) Analyse des gesamten Prozesses wurde festgestellt, dass die Trainingsdaten überwiegend von männlichen Personen stammten. Somit nahm das KI-System eine Bewertung vor, die eher aus Unkenntnis heraus entstand als aus einer objektiven Betrachtung. Es handelt sich hier leider nicht um eine Randerscheinung, sondern um eine Herausforderung, die stets beleuchtet werden muss: Eine konstante und transparente Prüfung von KI-Systemen im Hinblick auf mögliche Diskriminierung/Bias ist sicherlich eine zentrale Aufgabe nicht nur der Wissenschaft, sondern auch aller Kernakteure der Gesellschaft [18,22,21,23].

6 Interpretierbare KI als möglicher Lösungsweg

Mit zunehmendem Einsatz von KI ist die Frage nach der Interpretierbarkeit und Erklärbarkeit von KI-Entscheidungen essenziell geworden. Im Englischen beschreibt der Ausdruck der „Explainable Artificial Intelligence (XAI)“ den Bereich, der sich die Erklärbarkeit von künstlicher Intelligenz zum Ziel gesetzt hat [26,27]. Dabei geht es darum, zu verstehen, wie und warum Entscheidungen von KI-Systemen getroffen worden sind. Der Blackbox-Charakter von vielen KI-Systemen soll somit aufgebrochen werden [28]. Wissenschaftlich stellen solche Fragestellungen nach wie vor eine große Herausforderung dar. Bei mehrschichtigen Deep-Learning-Modellen beispielsweise können diese Aspekte auf Basis der heutigen wissenschaftlichen Erkenntnisse nicht beantwortet werden. In der letzten Dekade sind innovative Konzepte entstanden, die in diesem Kontext neue Perspektiven eröffnen. Dabei wird zwischen Ante-Hoc- und Post-Hoc-Ansätzen unterschieden [29,30,25]. Die Ante-Hoc-Methodik konzentriert sich auf Modelle, die per se und a priori – d. h. vorher – interpretierbar sind. Der Post-Hoc-Ansatz untersucht, inwieweit Blackbox-Modelle a posteriori interpretierbar analysiert werden können. Diese Themen sind in vielen Anwendungsbereichen noch Forschungsgegenstand.

In der zwischenmenschlichen Interaktion können wir nicht immer erklären, warum Mitmenschen die eine oder andere Entscheidung treffen. Unser Vertrauen, dass eine Entscheidung richtig ist oder nicht, basiert auf einer Vielfalt an Faktoren, die wir bereits in der Kindheit im Austausch mit Mitmenschen erlernt haben. Das Vertrauen in einen Algorithmus, den man ggf. nicht richtig versteht, ragt in diesem Zusammenhang natürlich sehr weit aus dem üblichen menschlichen Erfahrungsschatz heraus. Somit lässt sich das Spannungsfeld zwischen einem

wahren Fortschritt und einer digitalen Alchemie, dem die KI unterliegt, nur dann auflösen, wenn mutige, transparente und innovative Wege weiterhin beschritten werden.

Referenzen

[1] Walch K. Rethinking Weak vs. Strong AI. 2019. https://www.forbes.com/sites/cognitiveworld/2019/10/04/rethinking-weak-vs-strong-ai/.

[2] Nikolic, D. Why deep neural nets cannot ever match biological intelligence and what to do about it?, International Journal of Automation and Computing, volume 14, pages 532–541, 2017.

[3] Flowers J. Strong and Weak AI – Deweyan Considerations, AAAI Spring Symposium, 2019.

[4] Fjelland R. Why generalized artificial intelligence will not be realized, Humanities and Social Sciences Communications, 7:10 2020.

[5] Liu B. Weak AI is likely to never become Strong AI, so what is its greatest value for us?, Computer Science, 2021.

[6] Shaffi. AI and Mathematics. 2020. https://medium.com/swlh/ai-mathematics-699a9ea2a0d6

[7] Garrido A. Mathematics and AI, two branches of the same tree, Procedia – Social and Behavorial Sciences, Vol. 2, Issue 2, 2010.

[8] Sun Z, Wang P.P. A Mathematical Foundation of Big Data, New Mathematics and Natural Computation, Vol. 13, No. 02, 2017.

[9] Saxton D, Grefenstette E, Hill F, Kohli P. Analysing Mathematical Reasoning Abilities of Neural Models, ICLR conference, 2019.

[10] Thesing L, Autun V, Hansen A.C. What do AI algorithms actually learn? – On false structures in deep learning, arXiv, 2019.

[11] Brownlee J. A Tour of Machine Learning Algorithms. 2019. https://machinelearningmastery.com/a-tour-of-machine-learning-algorithms/

[12] Yosinki J, Clune J, Bengio Y, Lipson H. How transferable are features in deep neural networks?, Advances in neural information processing systems, 2014.

[13] Radford A, Metz L, Chintala S. Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks, arXiv, 2015.

[14] Deisenroth A, Faisal A, Soon Ong C. Mathematics for Machine Learning, Cambridge University Press, 2020.

[15] Bleicher A. Demystifying the Black Box that is AI. 2017. https://www.scientificamerican.com/article/demystifying-the-black-box-that-is-ai/

[16] Lim H. 7 Types of Data Bias in Machine Learning. 2020. https://lionbridge.ai/articles/7-types-of-data-bias-in-machine-learning/

[17] Angwin J, Larson J. Machine Bias. 2016. https://www.propublica.org/article/machine-bias-risk-assessments-in-criminal-sentencing

[18] Yapo A, Weiss J.W. Ethical Implications of Bias in Machine Learning, HICSS, 2018.

[19] Ntoutsi E et al. Bias in data-driven artificial intelligence systems - an introductory survey, Wires, 2020.

[20] Mehrabi N et al. A Survey on Bias and Fairness in Machine Learning, arXiv, 2019.

[21] Fu R, Huang Y, Singh P.V. AI and Algorithmic Bias: Source, Detection, Mitigation and Implications, SSRN, 2020.

[22] O´neil C. Weapons of Math Destruction: How Big Data Increases Inequality and Threaten Democracy, Crown Edition, 2016.

[23] Baer T. Understand, Manage, and Prevent Algorithmic Bias: A Guide for Business Users and Data Scientists, Apress, 2019.

[24] Li O, Liu H, Chen C, Rudin C. Deep Learning for Case-Based Reasoning through Prototypes: A Neural Network that Explains Its Predictions, arXiv, 2017.

[25] Rudin C. Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead, Nature Machine Intelligence 1,206–215, 2019.

[26] Arrieta A.B et al. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI, Information Fusion, Vol. 58, 2020.

[27] Linardatos P, Papastefanopoulos V, Kotsiantis S. Explainable AI: A Review of Machine Learning Interpretability Methods, Entropy 23(1), 2021.

[28] Molnar C, Casalicchio G, Bischl B. Interpretable Machine Learning – A brief history, state-of-the-art and challenges, PKDD/ECML Workshops, 2020.

[29] Escalante H.J et al. Explainable and Interpretable Models in Computer Vision and Machine Learning, Springer, 2018.

[30] Samek W et al. Explainable AI – Interpreting, Explaining and Visualizing Deep Learning, Springer, 2019.

[31] Die Tücken der Intelligenz: Künstliche Intelligenz erachtet Bewerbungen von Frauen als minderwertig – Amazon muss reagieren, Focus, 12.10.2018.

[32] https://250.dartmouth.edu/highlights/artificial-intelligence-ai-coined-dartmouth

Über die Autoren

Vincent Heuveline (geboren in Paris, 1968) ist seit Dezember 2018 Chief Information Officer der Universität Heidelberg. Ebenso ist er Direktor des Rechenzentrums der Universität Heidelberg. Als Professor leitet er das „Engineering Mathematics and Computing Lab“ (EMCL) am Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) der Universität Heidelberg. Darüber hinaus leitet er die Arbeitsgruppe „Data Mining and Uncertainty Quantification“ am Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS gGmbH). Seine Forschungsinteressen umfassen das Hochleistungs- und datenintensive Rechnen sowie die Softwareentwicklung mit besonderem Fokus auf Anwendungsgebiete in der Medizin. In der Lehre beschäftigt er sich – neben dem wissenschaftlichen Rechnen – im Rahmen dedizierter Vorlesungen und Seminare intensiv mit dem Thema IT-Sicherheit und KI. Prof. Heuveline ist Mitglied in den Programmkomitees zahlreicher internationaler Konferenzen zum Hochleistungsrechnen. Als Experte und Ansprechpartner berät er Vertreter der Industrie zu Themen der Digitalisierung, dem anwendungsbezogenen Einsatz numerischer Simulationen, Big and Smart Data, KI und der IT-Sicherheit im industriellen Umfeld.

Viola Stiefel hat Romanistik (Französisch und Italienisch) und Geschichte an der Universität Heidelberg studiert und wurde 2018 in französischer Literaturwissenschaft promoviert. Seit März 2021 arbeitet sie als Referentin am Universitätsrechenzentrum Heidelberg und beschäftigt sich hier u. a. mit Themen an der Schnittstelle zwischen Geisteswissenschaften, Digitalisierung und KI.

Korrespondenzadresse:
Prof. Dr. Vincent Heuveline
IWR - Engineering Mathematics and Computing Lab (EMCL)
Universität Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 205
69120 Heidelberg

E-Mail: vincent.heuveline@iwr.uni-heidelberg.de
Homepage:
https://emcl.iwr.uni-heidelberg.de/people/heuveline-vincent

Dr. Viola Stiefel
Universitätsrechenzentrum
Universität Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 330
69120 Heidelberg

E-Mail: viola.stiefel@urz.uni-heidelberg.de
Homepage:
https://www.urz.uni-heidelberg.de/en/staff/stiefel-viola

Statistik und Intelligenz – eine wechselvolle Beziehung

CHRISTEL WEISS

Medizinische Fakultät Mannheim der Universität Heidelberg

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird das wechselvolle Beziehungsgeflecht „Statistik und Intelligenz“ untersucht. Es wird dargelegt, wie sich Statistik und Intelligenz gegenseitig beeinflussen. Einerseits werden statistische Methoden benötigt, um das Phänomen „Intelligenz“ messen zu können. Andererseits setzt die Entwicklung derartiger Methoden seitens Mathematikern oder Stochastikern Klugheit, Verstand und Scharfsinn voraus. Ferner wird aufgezeigt, welche Macht Daten inhärent ist, und welche Herausforderungen Statistiker und Fachvertreter (die Studien initiieren und durchführen) zu bewältigen haben, um den darin verborgenen Informationsgehalt aufzudecken, die Ergebnisse der Datenanalyse adäquat zu interpretieren und konsequent umzusetzen.

1 Einleitung

Statistik und Intelligenz – wie passt das zusammen? Während man mit „Intelligenz“ allseits anerkannte Eigenschaften wie beispielsweise eine breit gefächerte Allgemeinbildung, fundiertes Fachwissen, praktische Begabungen oder künstlerisches Talent assoziiert, weckt der Begriff „Statistik“ eher unangenehme Empfindungen wie Skepsis, Misstrauen oder Verständnislosigkeit.

Das Wort Intelligenz leitet sich ab vom lateinischen Verb „intellegere“. Dieses setzt sich zusammen aus den Bestandteilen „inter“ (zwischen, inmitten) und

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24391

„legere“ (lesen, auswählen) und lässt sich demnach frei übersetzen mit „zwischen den Zeilen lesen“. In einem sehr allgemeinen Sinne bezeichnet Intelligenz die kognitive Fähigkeit, neuen Anforderungen mit Denkleistungen zu begegnen und eigenständig Lösungen zu entwickeln.

Intelligenz gilt seit jeher als ein hohes Gut. Niemand wäre beglückt oder gar stolz, wenn man ihm nur einen mäßigen Intellekt attestieren würde. Dagegen gilt es in einigen Kreisen keineswegs als ehrenrührig, mit seinen bescheidenen Kenntnissen in Mathematik oder mangelhaften Fähigkeiten in Statistik zu prahlen. Es wird gar als Ausdruck kritischen Denkvermögens angesehen, wenn ein Zeitgenosse ohne stichhaltige Argumente kundtut, dass er die Aussagekraft eines Zahlenwerks bezweifelt – seien es Umfragewerte vor einer politischen Wahl oder in epidemiologischen Studien ermittelte Risiken. Häufig genügt die Erwähnung eines vermeintlichen Gegenbeispiels oder der Hinweis auf viel zitierte, aber wenig hinterfragte Sätze wie etwa „Mit Statistik kann man alles beweisen“, um auf breite Zustimmung zu stoßen.

Andererseits ist nachvollziehbar: Wer die Ergebnisse statistischer Analysen unvoreingenommen zu interpretieren weiß, wird weniger leicht manipuliert. Der Fortschritt in empirischen Wissenschaften wie beispielsweise der Medizin, der Soziologie oder der Meteorologie basiert in entscheidendem Maße auf den vielfältigen Möglichkeiten komplexer Analysetechniken. Um dies anzuerkennen, ist neben Offenheit und der Fähigkeit zu kritischem Denken ein gewisses Maß an Intelligenz nicht hinderlich.

Tatsächlich verbirgt sich in umfangreichem Datenmaterial ein gewaltiges Potential: seien es Register oder Merkmale, die im Rahmen von empirischen Studien erhoben werden, oder Messwerte, die bei der Patientenversorgung im klinischen Alltag routinemäßig erfasst werden. Diese Datensammlungen beinhalten wertvolle Informationen, auch wenn sich diese auf den ersten Blick nicht unbedingt erschließen. Ein Statistiker ist dann vor die herausfordernde Aufgabe gestellt, dieses Datenmaterial idealerweise gemeinsam mit einem Vertreter der jeweiligen Fachdisziplin so aufzubereiten, dass neue Erkenntnisse daraus hervorgehen. Deshalb sollten Forscher, die bei der Planung und Durchführung von empirischen Studien involviert sind, über einen gewissen Intellekt verfügen, um die Studie adäquat zu planen und aus den Ergebnissen der Datenanalyse sinnvolle Konsequenzen ziehen zu können und diese zum Wohle der Allgemeinheit umsetzen zu können.

Nicht zuletzt seien auch die Wissenschaftler erwähnt, die diese statistischen Methoden ersonnen haben. Meist handelt es sich dabei um Mathematiker oder Naturwissenschaftler, denen man ja im Allgemeinen zumindest eine Inselbegabung zugesteht. Als Beispiele seien *Carl Friedrich Gauß* (1777–1855), *Karl Pearson* (1857–1936) oder *Sir Ronald Aylmer Fisher* (1890–1962) genannt, deren Genialität wir bekannte und bis heute vielfach angewandte Konzepte der Statistik verdanken.

Schließlich ist es die Statistik selbst, die Methoden zur Verfügung stellt, die eine Messung der Intelligenz erst ermöglichen. Mit anderen Worten: Ohne Statistik wäre Intelligenz nur ein vages Konstrukt und es wäre reizlos, darüber zu fabulieren.

Diese vielfältigen und verwobenen Beziehungsgeflechte sollen in dem vorliegenden Beitrag näher beleuchtet werden.

2 Statistische Methoden zum Messen von Intelligenz

2.1 Historische Betrachtungen

Intelligente Menschen und elitäre Schichten erfreuten sich zu allen Zeiten hoher Wertschätzung. Dies erklärt, weshalb Individuen stets bemüht waren, ihre Fähigkeiten unter Beweis zu stellen und mit denen anderer Zeitgenossen zu vergleichen, etwa in Form von Wettbewerben. Olympische Spiele wurden bereits in der Antike durchgeführt. Auch im Mittelalter gab es Wettbewerbe, etwa um die musische Begabung von Minnesängern zu evaluieren.

Eine Auslese der Besten – der Elite – mag auch gesellschaftlich relevant sein. Ein Beispiel ist im Alten Testament nachzulesen: So wird im „Buch Richter“ des Alten Testaments in Kapitel 7 berichtet, wie der Richter Gideon eine Elite der 300 besten Soldaten zum Kampf gegen den Nomadenstamm der Midianiter auswählte. Der Begriff „Elite“ im Sinne einer Leistungs- oder Intelligenzelite tauchte erst wesentlich später auf, als sich zur Zeit der Industrialisierung gebildete Bürger von der breiten Masse der Ungebildeten abzuheben trachteten, um eine gesellschaftlich privilegierte Stellung oder politische Macht zu beanspruchen.

Der Begriff „Intelligenz“ war keineswegs präzise definiert (was sich bis heute nicht wesentlich geändert hat). Die Beurteilung der Intelligenz oder die Wahl einer Elite erfolgte in aller Regel intuitiv. Dabei sollten vor allem hochbegabte Menschen identifiziert werden; mittelmäßig oder gar minderbegabten Insdividuen schenkte man keine Beachtung.

Einer der ersten Wissenschaftler, der sich mit dem Phänomen „Intelligenz“ eingehend befasste, war der britische Naturforscher *Sir Francis Galton* (1822–1911), ein Cousin von *Charles Robert Darwin* (1809–1882). Von Darwins Vererbungslehre inspiriert, gründete er in London den ersten Lehrstuhl für Eugenik, jener wissenschaftlichen Disziplin, die sich zum Ziel setzte, basierend auf den Erkenntnissen der Humangenetik die Verbreitung günstiger Erbanlagen zu fördern. Galton war der Meinung, dass Intelligenz ausschließlich vererbt werde; Umweltfaktoren schenkte er keine Beachtung. Obgleich Persönlichkeitsmerkmale wie die Intelligenz allgemein als „inkommensurabel“ (nicht messbar) galten, war Galton der festen Überzeugung, dass dieses Merkmal (ebenso wie physiologische Parameter wie etwa die Körpergröße) quantifizierbar sei, auch wenn bis dahin noch keine Form der Operationalisierung bekannt war. Er nahm außerdem an, dass die Messwerte einer Population symmetrisch um einen Mittelwert schwanken und durch eine Normalverteilung beschrieben werden können. Auch Galtons Nachfolger, der Statistiker *Karl Pearson*, vertrat die Meinung, dass Intelligenz ebenso wie zahlreiche Krankheiten, Alkoholismus oder Kriminalität allein erblich bedingt sei. Erst Pearsons Nachfolger *Lionel Sharples Penrose* (1898–1972), der sich als Psychiater, Mathematiker und Genetiker einen Namen machte, äußerte die Vermutung, dass Intelligenz auch von zahlreichen Umweltparametern beeinflusst würde.

Die genannten Forscher befassten sich mit dem Phänomen „Intelligenz“ hauptsächlich im Kontext eugenischer Zielsetzungen. Das Erfassen von Intelligenz oder die Entwicklung einer geeigneten Messtechnik standen nicht im Fokus ihres Interesses. Allein Galton ersann ein Verfahren, um die Intelligenz der Masse zu bestimmen: Beim Besuch eines Volksfestes im Jahre 1906 durfte jeder Besucher das Gewicht eines Ochsen schätzen. Dabei zeigte sich: Der Durchschnittswert der fast 800 Einzelschätzungen wich nur knapp vom tatsächlichen Gewicht des Tieres ab – obwohl viele Schätzwerte weit über oder unter dem wahren Wert lagen. Dieses Ergebnis überraschte Galton: Eigentlich hatte er beabsichtigt, mit diesem Experiment die „Dummheit“ der Masse zu belegen. Dieses Phänomen, wonach größere Gruppen kognitive Aufgaben mitunter präziser lösen als einzelne Experten, wurde seither mehrfach bestätigt [8]. Für die Messung der Intelligenz von Individuen ist dieser Ansatz jedoch nicht brauchbar.

2.2 Intelligenz als komplexes Konstrukt

Das Merkmal „Intelligenz“ ist derart komplex, dass es sich einer direkten Beobachtung oder einer präzisen Messung mittels eines technischen Geräts entzieht. Subjektive Einschätzungen seitens des betroffenen Individuums oder durch eine andere Person etwa auf einer Visuellen Analogskala sind naturgemäß sehr vage und wenig objektiv.

Wie lässt sich ein solches Merkmal statistisch handhaben? Eine Möglichkeit besteht eventuell in der Verwendung einer einfach zu bestimmenden Ersatzgröße, eines sogenannten Surrogatmerkmals. So versuchte der Anatom *Franz Joseph Gall* (1758–1828) basierend auf seiner Schädellehre, nach der das Gehirn das Zentrum für alle mentalen Funktionen sei, die Intelligenz anhand des Schädelumfangs indirekt zu erfassen. Zu Beginn des 19. Jahrhunderts vertraten viele Forscher die Meinung, dass sich die Intelligenz im äußeren Erscheinungsbild widerspiegelte und dass Parameter wie Schädelumfang, Stirnbreite und -höhe Anhaltspunkte für besondere Begabungen lieferten. Andere Wissenschaftler wie der bereits erwähnte Galton oder der Anatom *Friedrich Tiedemann* (1781–1861) glaubten, dass man aus dem Schädelvolumen eines Menschen auf dessen intellektuelles Denkvermögen schließen könnte. Galton hatte die Prüfungsergebnisse von Studenten mit deren geschätztem Hirnvolumen korreliert (tatsächlich gilt Galton als einer der ersten Wissenschaftler, die den Korrelationskoeffizienten verwendeten); Tiedemann hatte zu diesem Zweck Totenschädel vermessen.

Bei einem geeigneten Surrogatmerkmal muss allerdings gewährleistet sein, dass es in engem Zusammenhang mit dem eigentlich zu messenden Merkmal steht und dass es verlässliche Informationen liefert. Bald zeigte sich, dass der Schädelumfang diese Kriterien nicht erfüllt. Zwar glaubten sowohl Tiedemann als auch Galton, eine Assoziation zwischen Intellekt und Hirnvolumen erkannt zu haben. Mittlerweile wurde jedoch nachgewiesen, dass das Hirnvolumen allenfalls sehr schwach mit der Intelligenz korreliert und daher als Surrogatmerkmal untauglich ist [16].

Ein konkreter Anlass zur Entwicklung eines Messverfahrens war gegeben, als im 19. Jahrhundert in Frankreich die allgemeine Schulpflicht eingeführt wurde. So entstand der Bedarf nach Selektionskriterien, um Schüler angemessen fördern zu können. Im Jahre 1904 erhielt der Psychologe *Alfred Binet* (1857–1911) von der französischen Regierung den Auftrag, ein Verfahren zu entwickeln, um die Begabung von Schülern nach objektiven Kriterien erfassen zu können. Zusammen

mit seinem Kollegen *Théodore Simon* (1873–1961) konstruierte er den ersten Intelligenztest. Dieses Konzept basierte auf der Vorstellung, dass das Phänomen „Intelligenz“ als ein Konstrukt anzusehen sei, das über mehrere Indikatoren (sogenannte Items) zu erfassen ist. Zu diesem Zweck ersannen Binet und Simon Testaufgaben unterschiedlichen Schwierigkeitsgrades, die von den Schulkindern zu lösen waren. Die Intelligenz wurde basierend auf der Anzahl korrekter Lösungen ermittelt.

In der Folgezeit wurde dieser Test mehrfach modifiziert und erweitert (worauf im nächsten Abschnitt eingegangen wird). Es fanden sich zahlreiche Befürworter, weil damit erstmals eine quantitative Methode zur Identifizierung lernschwacher Kinder gegeben war. Kritiker warfen dagegen ein, dass dieser Test nur einen Teilaspekt der Intelligenz erfassen würde. Dass jedoch Intelligenz ganz allgemein als ein gedankliches Konstrukt anzusehen ist, das nur mittelbar über zahlreiche Indikatoren erschlossen werden kann, ist nach wie vor unbestritten.

2.3 Intelligenztests

Binet und Simon gebührt das Verdienst, dass sie sich nicht nur theoretisch mit dem Phänomen „Intelligenz“ befassten, sondern in pragmatischer Weise ein Verfahren zu deren Operationalisierung ersannen. Dabei lag die Herausforderung weniger in der praktischen Durchführung des Tests, sondern vielmehr in der Wahl geeigneter Testaufgaben, die in ihrer Vielfalt möglichst trennscharf die Schüler in unterschiedliche Leistungsgruppen einteilen sollen.

Die Palette erstreckt sich von sehr einfachen Aufgaben, die ein Kleinkind bewältigen sollte (etwa das Verfolgen eines brennenden Streichholzes mit den Augen) über schwierigere (beispielsweise rückwärts zählen) bis hin zu sehr anspruchsvollen Aufgaben, die im Allgemeinen nur ältere Kinder lösen können (zum Beispiel, Reimworte zu finden). Für jede Altersstufe stehen in der Regel sechs Aufgaben zur Verfügung. Die höchste Altersstufe, deren Aufgaben ein Kind komplett bewältigt, ist das sogenannte Grundalter. Um das Intelligenzalter zu ermitteln, werden für jede zusätzliche Lösung einer höheren Altersgruppe zwei Monate zum Grundalter addiert. Im Durchschnitt (bezogen auf die Kinder einer bestimmten Altersgruppe) entspricht das Intelligenzalter dem Lebensalter. Ein Intelligenzalter, das deutlich unter dem Lebensalter liegt, weist darauf hin, dass gezielte Förderungsmaßnahmen für das betreffende Kind sinnvoll sind.

Dieser Test ermöglichte erstmals die Quantifizierung der Intelligenz und die Vergleichbarkeit zwischen Individuen derselben Altersgruppe. Subjektive Lehrerurteile bezüglich der Leistungsfähigkeit von Schulkindern wurden durch eine objektive und nachvollziehbare Messmethode ersetzt. Das Testergebnis ist ein numerischer Wert, der leicht zu ermitteln und einfach zu interpretieren ist. Allerdings ist der Binet-Simon-Test nicht uneingeschränkt anwendbar: Vergleiche zwischen verschiedenen Altersgruppen erweisen sich als problematisch, da der Unterschied zwischen Intelligenz- und Lebensalter bei jüngeren Kindern schwerer wiegt als bei älteren.

Der Psychologe *William Louis Stern* (1871–1938) löste dieses Problem, indem er das Intelligenz- und das Lebensalter in ein Verhältnis setzte und dieses mit 100 multiplizierte. So entstand der Intelligenzquotient *IQ*:

$$IQ = \frac{Intelligenzalter}{Lebensalter} \times 100$$

Aufgrund dieser Definition ist gewährleistet, dass der *IQ* eines durchschnittlich intelligenten Kindes jedweder Altersgruppe 100 beträgt [14]. Ein 10 Jahre altes Kind mit einem Intelligenzalter von 11 Jahren hat demnach einen *IQ* von 110, während für ein 5-jähriges Kind mit einem Intelligenzalter von 6 Jahren ein *IQ* von 120 resultiert.

Aber auch dieser Intelligenzquotient hat Limitationen bezüglich seiner Anwendung: Da mit steigendem Lebensalter die Intelligenz langsamer zunimmt als im Kindesalter, würde nach Sterns Formel der *IQ* bei einem Individuum im Laufe seines Lebens stetig sinken. Für Erwachsene ist dieses Verfahren deshalb nicht sinnvoll.

Um diesem Problem zu begegnen, entwickelte der Psychologe *Lewis Madison Terman* (1877–1956) von der Universität Stanford mehrere altersspezifische Testvarianten für Kinder und Jugendliche sowie für normal und überdurchschnittlich begabte Erwachsene. Er normierte die Ergebnisse innerhalb jeder Variante – und zwar dergestalt, dass der *IQ* der jeweiligen Population einer Normalverteilung mit dem Mittelwert 100 und der Standardabweichung 15 unterliegt (vgl. Abb. 1). Der sogenannte Stanford-Binet-Test wurde bald zum Standardinstrument in der Psychologie und in der Schulberatung. Aus den Eigenschaften der Normalverteilung folgt, dass bei jeweils der Hälfte der Getesteten Werte über oder unter 100 gemessen werden; etwa zwei Drittel erzielen *IQ*-Werte zwischen 85 und 115 Punkten (das ist das Intervall „Mittelwert $\pm$ eine Standardabweichung“). Nur etwa

5% aller *IQ*-Werte liegen weiter als zwei Standardabweichungen vom Mittelwert entfernt. Demnach werden bei etwa 2,5% der Populationsmitglieder *IQ*-Werte unter 70 festgestellt, was mit einer Verminderung kognitiver Fähigkeiten einhergeht. Das andere Extrem – ein *IQ* ab 130 – wird ebenfalls nur von 2,5% erzielt. Diese Menschen gelten als hochbegabt.

Letzten Endes waren damit Galtons Vorstellungen Wirklichkeit geworden: Intelligenz konnte als ein quantitatives, messbares Merkmal angesehen werden, dessen Variabilität innerhalb einer Population durch das idealtypische Modell einer Normalverteilung beschrieben wird. Damit war eine Klassifizierung in durchschnittliche, unter- und überdurchschnittliche Subgruppen nach objektiven Kriterien möglich geworden.

Einen weiteren wichtigen Beitrag zur Intelligenzforschung leistete der britische Psychologe *Charles Edward Spearman* (1863–1945). Ihm war bei der Beobachtung von Schulkindern aufgefallen, dass die Ergebnisse verschiedener Leistungstests positiv korrelierten. Deshalb nahm er an, dass allen intellektuellen Leistungen eine einheitliche Form der Intelligenz zugrunde liegt. Diese wird in einem Allgemeinen Faktor, dem sogenannten *g*-Faktor („general intelligence“), erfasst [12]. Darüber hinaus – so postulierte er – gibt es Gruppenfaktoren (die so-

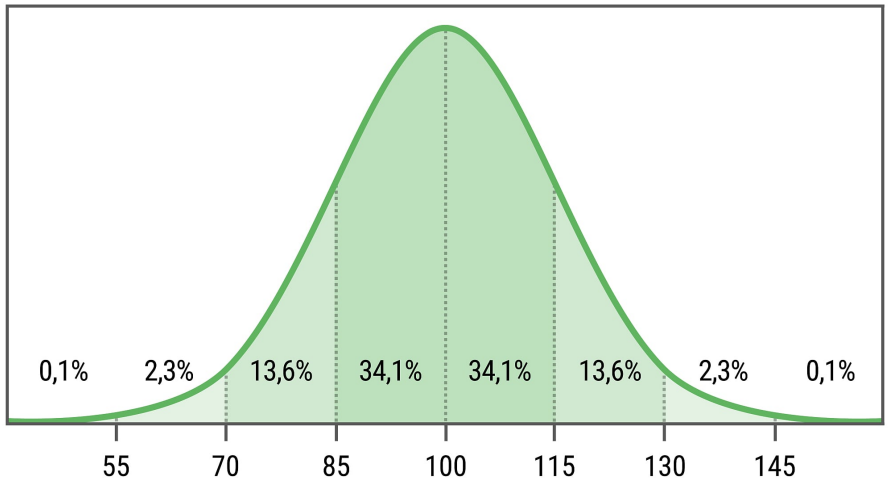


Abbildung 1: Gauß’sche Glockenkurve zur Beschreibung des Intelligenzquotienten mit dem Erwartungswert 100 und der Standardabweichung 15. Aus [16].

genannten *s*-Faktoren, etwa verbale Fähigkeiten oder räumliches Denkvermögen), von denen jeweils einer zur Lösung einer speziellen Problemstellung benötigt wird.

David Wechsler (1896–1981), ein Schüler Spearmans, war von der Sinnhaftigkeit der akademischen Definition von Intelligenz und der Aussagekraft der damals verwendeten *IQ*-Tests nicht überzeugt. Er verstand Intelligenz in einem umfassenderen Sinne, der auch nicht-intellektuelle Aspekte einschloss. Im Jahre 1939 stellte er eine Serie aus mehreren Einzeltests (Skalen) vor. Getestet werden u. a. die Fähigkeit zu logischem Denken, Arbeitsgedächtnis, Sprachverständnis, Verarbeitungsgeschwindigkeit und Konzentrationsvermögen. Wie beim Stanford-Binet-Test sind die Werte innerhalb einer Altersgruppe normalverteilt mit dem Erwartungswert 100 und der Standardabweichung 15.

Ursprünglich war der Test nach Wechsler für Erwachsene konzipiert und wurde vorwiegend in den USA verwendet. Seit 1956 liegen deutsche Testversionen vor, die unter der Bezeichnung „Hamburg-Wechsler-Intelligenztest“ bekannt sind. Diese Versionen wurden seither mehrfach revidiert und neuen Erkenntnissen der aktuellen Forschung angepasst [2].

Wechsler hielt an Spearmans Zweifaktorentheorie von einem allgemeinen und einem spezifischen Intelligenzfaktor fest. Bei jedem Wechsler-Intelligenztest wird der „Allgemeine Fähigkeitsindex“ ermittelt, vergleichbar Spearmans *g*-Faktor. *IQ*-Tests nach Wechsler zählen mittlerweile zu den weltweit am häufigsten verwendeten Instrumenten, um Talente zu entdecken, Kandidaten bei Bewerbungen einzuschätzen, geeignete Studienbewerber ausfindig zu machen, lernschwache Schüler oder Hochbegabte zu erkennen.

3 Der Einfluss von Intelligenz bei Datenanalysen

3.1 Intelligenz der Daten

Der Mensch ist von Natur aus neugierig. Deshalb werden Daten – in seinem sehr allgemeinen Sinne – seit Beginn der Menschheit erhoben: Mit den Sinnesorganen erfasst der Mensch seine Umwelt, die Sprache benutzt er zur Kommunikation, die Finger zum Zählen. So verwundert es nicht, dass sich das Ermitteln von Häufigkeiten als die älteste Form der statistischen Datenerfassung etabliert hat.

Eine erste Form der systematischen Datenerhebung entstand ab dem 16. Jahrhundert, als die ersten Nationalstaaten aufblühten. Die erhobenen Daten dienten

vor allem dem Zweck, wesentliche Charakteristika einer Bevölkerung zu beschreiben und administrative Planungen zu ermöglichen. Seit dem Zeitalter der Renaissance erhoben Astronomen und Naturwissenschaftler wie beispielsweise *Johannes Kepler* (1571–1630) oder *Galileo Galilei* (1564–1641) Daten, um naturwissenschaftliche Gesetze herzuleiten. Einige Jahre später erstellten der Kaufmann *John Graunt* (1620–1674) in London und der preußische Feldprediger *Johann Peter Süßmilch* (1707–1767) in Berlin basierend auf Eintragungen in Kirchenbüchern Sterbetafeln und schätzten aus den so gewonnen Daten Lebenserwartungen. Seit Beginn des Industriezeitalters im 18. Jahrhundert stehen technische Geräte zur Verfügung, mit denen sich physikalische Größen messen lassen. Die ersten empirischen Studien im Bereich der epidemiologischen und klinischen Forschung wurden im 19. Jahrhundert durchgeführt: Dem englischen Arzt *John Snow* (1813–1858) gelang es im Jahr 1849, eine Cholera-Epidemie in London einzudämmen, nachdem er Daten von betroffenen Patienten und nicht erkrankten Kontrollen gesammelt und ausgewertet hatte. Der französische Arzt *Pierre Charles Alexandre Louis* (1787–1872) belegte anhand von geeignetem Datenmaterial, dass die bis dahin häufig angewandte Methode des Aderlasses bei den meisten Patienten nutzlos oder gar schädlich war. Der ungarische Gynäkologe *Philipp Ignaz Semmelweis* (1818–1865) konnte aufgrund systematischer Untersuchungen verbunden mit akribischer Datendokumentation nachweisen, dass das damals gefürchtete Kindbettfieber durch mangelnde Hygiene verursacht war.

Diese Beispiele zeigen, dass in Daten ein gewaltiges Potential steckt: Sowohl naturwissenschaftliche Gesetze als auch empirische Erkenntnisse in der Medizin oder den Sozialwissenschaften wurden und werden basierend auf einer adäquaten Datenmenge verifiziert. Daten sind das Fundament jeder statistischen Analyse. Mit ihrer Hilfe lassen sich Ereignisse erklären und Zusammenhänge erhellen.

Doch sind Daten intelligent? Sicher nicht im Sinne einer kognitiven Fähigkeit. Daten per se können keine eigenständigen Lösungen entwickeln. Sie sprechen nicht für sich selbst, sie geben von alleine nichts preis. Aus Daten kann zwar Information entstehen – jedoch nur für jemanden, der in der Lage ist, diese Information zu extrahieren. So besagt beispielsweise ein *Body Mass Index* (BMI) von 40 kg/m^2, dass die betreffende Person unter Adipositas leidet. Allerdings ist dies nur für jemanden erkennbar, der die Definition des BMI kennt und weiß, wie dieses Merkmal verteilt ist. Ein Konglomerat von Daten vermag eine Anekdote zu erzählen – jedoch nur jemandem, der weiß, wie die Daten zustande gekommen

sind und in welchem Kontext sie stehen. Nur mit diesem Hintergrundwissen ist man in der Lage, Einzeldaten zu einem sinnvollen Ganzen zusammenzufügen.

Jedes umfangreiche Datenmaterial ist wertlos, wenn es nicht adäquat aufbereitet wird. Dies sei am Beispiel der Wettervorhersage erläutert: Tausende Messstationen und Satelliten in allen Teilen dieser Welt liefern permanent Daten in einer schier unüberblickbaren Masse. Darin steckt das Potential, das Wetter des nächsten Tages in quasi allen Regionen dieser Erde präzise zu prognostizieren. Jedoch bedarf es dazu leistungsfähiger Computer, einer ausgefeilten Technik, eines professionellen Datenmanagements, komplexer mathematischer Algorithmen und nicht zuletzt fachlich versierter Meteorologen, die die Datenflut beherrschen und verarbeiten und die daraus hervorgehenden Ergebnisse zu deuten wissen.

Daten können qualitativ mehr oder weniger hochwertig sein. Dies betrifft die Art ihrer Erhebung, ihre Präzision, ihre Verlässlichkeit und ihre Vollständigkeit. Daten fallen nicht vom Himmel. Deshalb sollte in der Planungsphase einer Studie darauf geachtet werden, dass aussagekräftige und für die Fragestellung relevante Variablen ausgewählt werden, die die Realität valide abbilden, und dass die Daten vollständig und korrekt erhoben sowie sorgsam dokumentiert werden. Mag auch die Erfassung großer Datenmengen aus technischer Sicht kein nennenswertes Problem darstellen, so erfordern sie doch einen kompetenten Umgang, um das darin enthaltene Potential auszuschöpfen.

3.2 Intelligenz der Methoden

Sind statistische Methoden intelligent? Auch diese Frage ist zu verneinen. Methoden werden angewandt, um Daten effizient zu verarbeiten. Die darin verborgene Intelligenz sollte man deren Entwicklern attestieren.

Betrachten wir als einfaches Beispiel den arithmetischen Mittelwert. Eine der ersten bekannten Anwendungen wurde von dem Astronomen *Tycho Brahe* (1546–1601), einem Mitarbeiter von Johannes Kepler, ersonnen. Um den Ungenauigkeiten der damals vorhandenen Uhrwerke zu begegnen, verwendete Brahe mehrere Uhren gleichzeitig und berechnete aus den ermittelten Zeitdauern den Mittelwert. Ein genialer Gedanke im ausgehenden 16. Jahrhundert!

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts machte die induktive Statistik rasante Fortschritte. Der Chemiker *Sealy Gosset* (1876–1937) ersann ausgehend von einem praktischen Problem (er wollte als Angestellter der Brauerei *Guinness* die Mittelwerte von Bieringredienzen schätzen) die *t*-Verteilung, die für die berühmten

t-Lagetests und die Konstruktion von Konfidenzintervallen verwendet wird. Im gleichen Zeitraum publizierten die bereits erwähnten Wissenschaftler Pearson und Spearman die nach ihnen benannten Korrelationskoeffizienten zur Quantifizierung der Stärke eines Zusammenhangs zwischen zwei Merkmalen. Die Bestimmung der Parameter einer Regressionsgeraden war bereits etwa hundert Jahre zuvor von dem bekannten Mathematiker Gauß basierend der Methode der kleinsten Quadrate hergeleitet worden. In den 1950er Jahren legte der britische Statistiker und Genetiker *Sir Ronald Aylmer Fisher* den Grundstein für Varianzanalysen. Seine Motivation: Er wollte den Einfluss verschiedener Bodenqualitäten auf das Pflanzenwachstum evaluieren.

Dies sind nur wenige Beispiele aus der Liste herausragender Wissenschaftler, die die Statistik maßgeblich bereichert haben. Sie grübelten über ihre Methoden nach, lange bevor Computer zur Verfügung standen, um die mitunter sehr komplexen Berechnungen durchzuführen. Wahrscheinlich hätten sie sich nicht träumen lassen, dass sich die von ihnen ersonnenen Techniken noch Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte später größter Beliebtheit erfreuen.

Seit den 1970er Jahren haben leistungsfähige Rechner und benutzerfreundliche Software die weitere Entwicklung der Statistik stimuliert. Dies betrifft vor allem multivariate Verfahren, die explorative Datenanalyse, Monte-Carlo-Methoden oder Metaanalysen (um nur einige Beispiele zu nennen). Mit dem beschleunigten technologischen Fortschritt ergab sich der Bedarf nach speziellen statistischen Methoden. So sahen sich Mathematiker vor die Herausforderung gestellt, Methoden zu ersinnen, mit denen die Reliabilität (Verlässlichkeit) und die Validität einer Messmethode überprüft werden kann (etwa bei Messinstrumenten für Diagnostik und Therapie oder bei psychometrischen Messverfahren). Auf diese Weise entstanden der Kappa-Index nach Cohen [3] und der Intraklassenkorrelationskoeffizient als Übereinstimmungsmaße [11], Cronbachs Alpha zum Quantifizieren der internen Konsistenz eines Fragebogens [4] oder die Bland-Altman-Analyse [1], mit der sich der Grad der Übereinstimmung zweier quantitativer Messmethoden beurteilen lässt.

Alle in diesem Abschnitt genannten Wissenschaftler erwiesen sich in beeindruckender Weise als intelligent, indem sie neuen Anforderungen mit genialen Denkleistungen begegneten und eigenständig Lösungen entwickelten.

3.3 Intelligenz der Anwender

Statistische Maßzahlen und Analysemethoden können Dinge auf den Punkt bringen. Die wichtigsten Eigenschaften einer Datenreihe oder die Stärke eines Zusammenhangs lassen sich mittels geeigneter Lage-, Streuungs- oder Assoziationsmaße quantifizieren; der Unterschied zwischen zwei Gruppen kann durch einen statistischen Test nachgewiesen und die Abhängigkeit einer Zielgröße von mehreren Einflussgrößen durch ein multiples Modell erklärt werden. Dazu bedarf es kompetenter Statistiker, die diese Verfahren auswählen.

Sind die Anwender der Statistik intelligent? Das wäre jedenfalls wünschenswert! Statistiker haben gemeinhin einen zweifelhaften Ruf, die Statistik als Wissenschaft gilt als rätselhaft und wenig attraktiv. Statistik ist zwar ein Teilgebiet der Mathematik, also einer exakten Wissenschaft. Sie orientiert sich an Daten, also an harten Fakten. Dennoch sind die Ergebnisse ihrer Methoden vom Zufall beeinflusst. Der p-Wert (die Irrtumswahrscheinlichkeit) mag einerseits als ein exaktes Evidenzmaß für die Plausibilität der Nullhypothese angesehen werden. Andererseits spiegelt dieser Wert die Unsicherheit wider, mit der das Ergebnis eines statistischen Tests behaftet ist.

Wie lassen sich unter dieser Prämisse Daten effizient analysieren? Um aussagekräftige Daten zu generieren, adäquate statistische Methoden auszuwählen und ein statistisches Modell zu erstellen, das basierend auf den erhobenen Daten die Realität bestmöglich beschreibt, bedarf es außer methodisch-fachlichen Wissens und empirischer Erfahrung einer feinen Beobachtungsgabe sowie eines vertieften wissenschaftlichen Verständnisses der zugrunde liegenden Fragestellung, Aufgeschlossenheit und Neugierde – denn die Ergebnisse der Analyse werden in aller Regel für ein anderes Fachgebiet erarbeitet.

Die optimale Datenanalyse ist keineswegs vorgegeben. Es reicht nicht aus und es ist nicht immer sinnvoll, sich strikt an Vorgaben zu halten; vielmehr ist in jeder Studienphase selbstständiges und kritisches Denken gefragt. Bei jeder Fragestellung erscheinen mehrere Herangehensweisen denkbar (obgleich jede statistische Methode an gewisse Voraussetzungen geknüpft ist, die vorab zu prüfen sind). Deshalb ist vor der Datenaufbereitung zu bedenken: Welches Studiendesign liegt vor? Sind die Daten korrekt? Wie lässt sich dies überprüfen? Wie behandelt man fehlende Werte? Wie verfährt man mit Ausreißern? Welche Analysemethoden bieten sich an? Was ist bei der Generierung eines multiplen Modells zu beachten?

Auch wenn allgemeiner Konsens darüber besteht, dass das Ergebnis einer statistischen Analyse als signifikant erachtet wird, wenn der p-Wert unter 0,05 liegt, lassen scheinbar exakte numerische Ergebnisse diverse Interpretationen zu. Deshalb sollte man hinterfragen: Wie kam ein Ergebnis zustande? Wie stark ist der nachgewiesene Zusammenhang? Ist er kausal? Sind die Ergebnisse eventuell mit einem Bias behaftet? Wie präzise ist die Schätzung? Und schließlich: Ist das Ergebnis unter fachlichen Aspekten relevant? Welche inhaltlichen Konsequenzen sind daraus zu ziehen?

Um diese Fragen zu klären, sollten sowohl Statistiker als auch Fachvertreter, die die betreffende Studie initiiert haben, bereit sein, sich Grundkenntnisse über das jeweils andere Fachgebiet anzueignen. Es erweist sich als produktiv, wenn Kollegen mehrerer Fachrichtungen im interdisziplinären Austausch das Ergebnis der Datenanalyse aus unterschiedlichen Perspektiven, in einer Kombination aus methodisch-statistischer und empirisch-fachwissenschaftlicher Sicht begutachten, kritisch hinterfragen, Anwendungsmöglichkeiten und Limitationen erörtern. Dabei ist neben Toleranz und Bedachtsamkeit auch ein gewisses Maß an gesundem Menschenverstand von Vorteil.

In diesen Fähigkeiten offenbart sich die Intelligenz aller an einer Studie beteiligten Wissenschaftler und insbesondere der Statistiker. Deren berufliche Tätigkeit zeichnet sich ja gerade dadurch aus, dass sie an der Planung und Durchführung von Studien aus diversen Fachgebieten beteiligt sind. Dazu müssen sie bereit sein, sich intellektuellen Herausforderungen zu stellen, sich in fachfremde Gebiete einzuarbeiten, eigenständig Lösungen zu entwickeln und über ihren Horizont hinauszusehen.

3.4 Intelligenz der Konsumenten

Datenanalysen dienen nicht nur dem wissenschaftlichen Fortschritt, sondern auch dem gesellschaftlichen Nutzen. Wenn beispielsweise bei einer Risikostudie die Assoziation zwischen einem ätiologischen Faktor und einer Krankheit aufgezeigt wird oder wenn bei einer Therapiestudie die Wirksamkeit eines neuen Medikaments nachgewiesen wird, sind diese Erkenntnisse nur dann zielführend, wenn möglichst viele Menschen davon profitieren. Wenn vor einer politischen Wahl eine repräsentative Umfrage durchgeführt wird, sind die ermittelten Werte von allgemeinem Interesse. Deshalb müssen die aus einer Datenanalyse hervorgehenden Ergebnisse der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

Tatsächlich kann sich kaum jemand der Statistik entziehen – weder im gewöhnlichen Alltag noch im wissenschaftlichen Diskurs. Diverse Medien sorgen dafür, dass man quasi rund um die Uhr mit Prozentzahlen, Tabellen, Diagrammen und Durchschnittswerten über aktuelle Ereignisse auf dem Laufenden gehalten wird. Jeder Arzt hat die Möglichkeit, permanent über Datenbanken auf weltweit verfügbares Wissen zugreifen zu können. Dies gewährleistet (zumindest theoretisch), dass jede seiner Entscheidungen etwa bezüglich Diagnosestellung oder Therapie eines Patienten auf dem neuesten Stand der Forschung basiert.

Manche Zeitgenossen fühlen sich jedoch unbehaglich angesichts der Fülle an Informationen, die auf sie einströmt. Sie befürchten, manipuliert zu werden, weil ihnen vermittelt wird, dass sie ihrem eigenen Verstand und ihren individuellen Erfahrungen kaum noch trauen können. Andere sind skeptisch, weil sie glauben, dass der Fortschritt (etwa in der Medizin) längst nicht so rasant verläuft, wie es die zahlreichen Publikationen in internationalen Journals suggerieren. „Statistisches Denken wird eines Tages für mündige Bürger ebenso wichtig sein wie die Fähigkeit, zu lesen und zu schreiben." Diese Aussage, die dem englischen Schriftsteller *Herbert George Wells* (1866–1946) zugeschrieben wird, zeigt sehr deutlich, dass statistisches Denken bereits zu seiner Zeit auf Schwierigkeiten stieß. Leider hat sich daran bis heute wenig geändert.

Grafische Darstellungen eignen sich hervorragend, um belanglose Effekte zu dramatisieren oder um unerwünschte Effekte zu kaschieren. Auch Zahlen sind mitunter weniger objektiv als es scheint. Insbesondere relative Risiken stiften leicht Verwirrung. Dazu ein Beispiel: In den 1990er Jahren wurden in britischen Medien alarmierende Informationen bezüglich der Antibabypille verbreitet. Die Einnahme eines bestimmten Präparats erhöhte angeblich das Risiko einer Thromboembolie um sage und schreibe 100%! Angesichts dieser Zahl setzten viele Frauen die Pille sofort panikartig ab, weil sie annahmen, dass diese lebensgefährliche Nebenwirkung mit Sicherheit eines Tages bei ihnen auftreten würde. Tausende unerwünschter Schwangerschaften und Abtreibungen waren die Folge dieses Missverständnisses. Die 100% quantifizierten nur eine relative Risikoerhöhung; die tatsächlichen Risiken betrugen lediglich 1/7000 bzw. 2/7000. – Auch bei der Anwendung von diagnostischen Tests und Screenings ist ein kritischer Umgang mit Wahrscheinlichkeiten vonnöten (und zwar sowohl bei Ärzten als auch bei Patienten), damit der Testbefund in Abhängigkeit von der Prävalenz angemessen interpretiert wird [15].

Eine andere Unsitte im Umgang mit Wahrscheinlichkeiten besteht in sinnlosen Vergleichen. Dazu eine Anekdote: Der an einem Prostatakarzinom erkrankte Rudy Giuliani, ehemaliger Bürgermeister von New York, verkündete einst, dass er sich glücklich schätzte, in den USA behandelt zu werden. Dort sei die Überlebensrate bei diesem Krankheitsbild nahezu doppelt so hoch wie in England (82% versus 44%). Dieser Unterschied ist zweifellos beachtlich; der Vergleich führt dennoch in die Irre. In den USA werden – anders als in England – flächendeckende Screenings angeboten. Deshalb werden bei US-amerikanischen Männern wesentlich mehr Prostatakarzinome diagnostiziert als bei Briten. Die Karzinome in den USA werden in der Regel zu einem früheren Zeitpunkt entdeckt und sind weniger aggressiv als Karzinome, die sich erst später durch klinische Symptome bemerkbar machen. Fair wäre dagegen ein Vergleich der krankheitsspezifischen Mortalitätsraten bezogen auf alle erwachsenen Männer des jeweiligen Landes: Diese betragen 26 bzw. 27 pro 100.000 Männer pro Jahr. Weitere Beispiele zur unsachgemäßen Interpretation von Wahrscheinlichkeiten finden sich in [7].

Daten haben die Macht, Entwicklungen zu erklären und Ereignisse zu prognostizieren. Sie können aber auch, wenn sie unsachgemäß analysiert werden, Ergebnisse verzerren und in die Irre führen. Daten lügen nicht, wohl aber derjenige, der Daten manipuliert, nur bestimmte Befunde aufzeigt oder unerwünschte Resultate verschleiert. Die verständliche Kommunikation von Wahrscheinlichkeiten und Unsicherheiten stellt eine Herausforderung dar. Deshalb sollten sich Forscher oder Journalisten, die die Ergebnisse statistischer Analysen aufbereiten und verbreiten, bei der Darstellung um Objektivität bemühen, möglichst aussagekräftige Ergebnisse präsentieren und die Limitationen ihrer Untersuchungen offen diskutieren. Die Leser einer Publikation sollten sich von kleinen p-Werten nicht blenden lassen, sondern das Studiendesign kritisch beurteilen und abschließend versuchen, eine Antwort auf die Frage zu finden: Für welche Personengruppe oder für welchen Forschungsgegenstand sind die beschriebenen Ergebnisse von Nutzen?

Diese Ausführungen verdeutlichen: Auch die Konsumenten der Statistik benötigen intellektuelle Fähigkeiten, um aus Zahlen und Diagrammen relevante Information zu extrahieren – sowohl in den hohen Sphären der Wissenschaft als auch in den Niederungen des Alltags.

4 Schlussfolgerungen

4.1 Der Einfluss der Intelligenzforschung auf die Statistik

Die Statistik ermöglichte die Intelligenzforschung, weil mit ihrer Hilfe aussagekräftiger Messinstrumente entwickelt wurden. Andererseits beeinflusste die Intelligenzforschung die Statistik massiv und nachhaltig. Deren Pioniere – Francis Galton und Karl Pearson – gelten als die Erfinder der Korrelation und der Regression. Diese Techniken wurden in den Folgejahren für unzählige Anwendungsbereiche aufgegriffen, insbesondere in den Biowissenschaften, aber auch in der Psychologie und der Ökonomie. Galton war auf Messungen versessen und von der Normalverteilung fasziniert. Dieses Konzept übernahm er von seinem Kollegen, dem Statistiker *Adolphe Quetelet* (1796–1874), der bereits einige Jahre zuvor die Bedeutung dieser Verteilung zur Beschreibung menschlicher Merkmale erkannt hatte. Im Gegensatz zu Quetelet orientierte sich Galton jedoch nicht an einem Durchschnittsmenschen, sondern richtete seine Aufmerksamkeit auf die Variabilität der Individuen. Während Quetelet größere Abweichungen eines Messwerts vom Mittelwert als fehlerhaft oder abnorm ansah (tatsächlich nannte man die Normalverteilung zu Quetelets Zeiten „la loi des erreurs“), nutzte Galton dieses Konzept, um eine Klassifizierung zu ermöglichen. Zu diesem Zweck führte er neue Lagemaße ein, nämlich den Median und die Quartile, die eine Population in zwei bzw. vier gleichgewichtige Subgruppen zerlegen. Als Streuungsmaß bevorzugte er den Quartilsabstand als die Breite des Intervalls, in dem die mittleren 50% der Messwerte liegen.

Die von Galton und Pearson ersonnenen Verfahren haben sich als Standardwerkzeuge der Statistik etabliert. Pearson gilt als Wegbereiter der Biometrie, jener wissenschaftlichen Disziplin, die sich mit der Messung von physiologischen Merkmalen an Lebewesen und den dazu gehörenden Analysemethoden befasst. Galton kommt das Verdienst zu, Fragestellungen der Intelligenzforschung erstmals thematisiert und die Bedeutung der Normalverteilung zur Beschreibung einer Population erkannt zu haben.

Auch Spearman beeinflusste die statistische Wissenschaft maßgeblich. Seine Beiträge zur Intelligenzforschung lieferten nicht nur den nach ihm benannten Rang-Korrelationskoeffizienten, sondern führte auch zur Entwicklung der Faktorenanalyse [13]. Damit gründete er die Psychometrie – eine Disziplin, die sich der Entwicklung von Messinstrumenten zum Erfassen von Persönlichkeitseigenschaf-

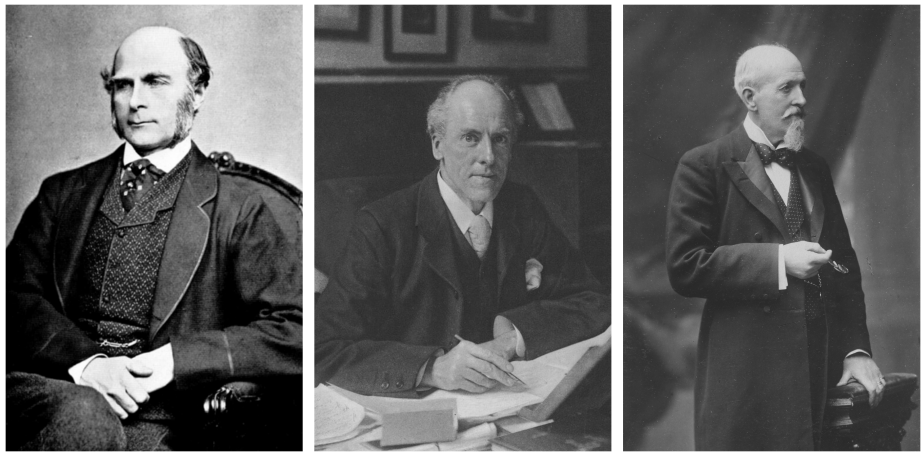


Abbildung 2: Pioniere der Intelligenzforschung: Francis Galton (Naturforscher), Karl Pearson (Mathematiker) und Charles Spearman (Psychologe). Bildquelle Galton: https://de.wikipedia.org/wiki/Francis_Galton, Bildquelle Pearson: https://de.wikipedia.org/wiki/Karl_Pearson; Bildquelle Spearman: https://de.wikipedia.org/wiki/Charles_Spearman

ten widmet. Es gelang ihm, den allgemeinen Gruppenfaktor *g* zu extrahieren und die Ergebnisse der Intelligenztests auf wenige Variablen zu reduzieren.

Während Spearmans Modell darauf basiert, dass jede kognitive Leistung sich aus einem allgemeinen und einem davon unabhängigen spezifischen Faktor zusammensetzt und dass all diese Faktoren voneinander unabhängig sind, wählte Spearmans Kollege *Louis Leon Thurstone* (1887–1955) einen etwas komplexeren Ansatz. Er identifizierte sieben Primärfaktoren, die die Grundlage der menschlichen Intelligenz darstellen sollten und nicht notwendigerweise als unabhängig zu betrachten wären: Zahlenrechnen, Sprachverständnis, räumliches Vorstellungsvermögen, Gedächtnis, schlussfolgerndes Denken, Wortflüssigkeit und Auffassungsgeschwindigkeit. Damit verallgemeinerte er Spearmans Methode auf eine multivariate Faktorenanalyse. Diese Technik gilt heute als ein universell verwendbares Tool, mit dessen Hilfe es möglich ist, von messbaren Erscheinungen auf deren nicht direkt sichtbare Ursachen zu schließen.

4.2 Anwendungen und Limitationen von Intelligenztests

Mit dem Test von Binet und Simon stand erstmals ein Messinstrument zur Erfassung der Intelligenz zur Verfügung. Dieses Konzept war zu Beginn des 20. Jahrhunderts eine große Errungenschaft, das in der Folgezeit mehrfach überarbeitet und neuen Erkenntnissen angepasst wurde. Es findet nach wie vor breite Anwendung – ungeachtet der Tatsache, dass sich Wissenschaftler bislang nicht auf eine einheitliche, umfassende Definition von Intelligenz einigen konnten. Deren Quantifizierung mittels einer normalverteilten Variablen hat wesentlich dazu beigetragen, dass sich die Intelligenzforschung als ein Teilbereich der Psychologie etabliert hat, das Ursachen und Auswirkungen der verschiedenen Formen von Intelligenz erforscht. Ein bedeutender Vertreter ist der bereits erwähnte Penrose, der in seiner „Colchester-Studie" die Ursachen von Lernschwäche erstmals systematisch untersuchte.

Dennoch sind diese Tests nicht unumstritten. Ein häufig geäußerter Kritikpunkt lautet, dass ein Test die Intelligenz in ihrer Komplexität nicht vollständig erfassen könne. Zuweilen wird gar infrage gestellt, ob ein solcher Test das misst, was er zu messen vorgibt, und ob man sich auf das Ergebnis verlassen kann. Das leicht abgewandelte Zitat des amerikanischen Psychologen *Edwin Boring* (1886–1968) „Intelligenz ist, was ein Intelligenztest misst" vermag keine befriedigende Antwort auf diese Fragen zu geben.

Fakt ist andererseits: Keiner dieser Tests erhebt den Anspruch, die Intelligenz eines Menschen in allen Facetten zu erfassen. Der *IQ* ist – wie jedes statistische Modell – eine vereinfachte und damit unvollkommene Abbildung der Wirklichkeit. Das Testergebnis informiert darüber, inwieweit die getestete Person in der Lage ist, bestimmte Aufgaben zu lösen, und ist insofern durchaus aussagekräftig. Darüber hinaus lassen sich sehr pragmatische Gründe für die Beliebtheit dieser Tests anführen. Wie sollten individuelle Leistungseinschätzungen oder Intelligenzforschung möglich sein, wenn es kein Instrument gäbe, das objektive und vergleichbare Ergebnisse lieferte?

Um die Tauglichkeit eines Intelligenztests zu bewerten, orientiert man sich üblicherweise an zwei Qualitätskriterien: der Reliabilität und der Validität. Die *Reliabilität* bezeichnet die Verlässlichkeit. Sie gibt an, inwieweit die Testergebnisse reproduzierbar sind, wenn der Test unter ähnlichen Bedingungen wiederholt wird. In mehreren Studien konnte gezeigt werden, dass die Testergebnisse stark korrelieren, wenn eine Gruppe von Individuen zwei Tests mit einem gewissen zeitlichen

Abstand absolvieren (mit Korrelationskoeffizienten zwischen 0,7 und 0,9 [10]). Die *Validität* ist dagegen schwieriger zu bewerten: Dieses Kriterium gibt an, ob der Test wirklich das misst, was er zu messen vorgibt. Immerhin konnte gezeigt werden, dass Spearmans *g*-Faktor mit einer Reihe von Persönlichkeitsmerkmalen positiv korreliert: der Höhe des Schulabschlusses, der Abschlussnote des Studiums, dem beruflichen Erfolg, dem Einkommen, mit der Lebenserwartung und dem allgemeinen Wohlbefinden. Dies spricht für die Validität der Intelligenztests, da ja gemeinhin diese Eigenschaften mit Intelligenz assoziiert werden.

Allerdings ist einschränkend hinzuzufügen, dass der Grad dieser Korrelationen gering bis mittelmäßig ist. Der *IQ* ist ein theoretisches Konstrukt, das nichts darüber aussagt, wie der jeweilige Mensch seine Fähigkeiten einsetzt. Daher hat im Einzelfall das Ergebnis eines *IQ*-Tests bei einem Schulkind nur eine geringe prognostische Relevanz für das spätere Lebensglück. Die Lebenserfahrung lehrt: Intelligenz und gute Bildung sind eben nur ein Teil dessen, was den beruflichen Erfolg und die soziale Anerkennung bestimmt. Wichtige Komponenten sind darüber hinaus andere kognitive Fähigkeiten, die in den üblichen Intelligenztests ausgeblendet werden: Kreativität, Fantasie, Neugier, Disziplin, Beharrlichkeit sowie emotionale und praktische Intelligenz. Die emotionale Intelligenz bezeichnet die Fähigkeit, eigene Emotionen und die Emotionen seiner Mitmenschen wahrzunehmen und angemessen darauf zu reagieren. Bei der praktischen Intelligenz geht es darum, theoretisches Wissen praktisch umsetzen zu können. Diese Eigenschaften sind für ein erfolgreiches Leben ebenso wichtig wie die akademische Intelligenz. Allerdings gibt es bisher kaum Tests, die dies valide überprüfen könnten. Möglicherweise ist darin ein Grund zu sehen, weshalb die Relevanz von Intelligenztests zuweilen überbewertet wird.

4.3 Intelligenz und Umwelt

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass die Theorien von Galton und Pearson auch extrem negative Auswirkungen hatten. In der irrigen Annahme, dass Umweltfaktoren allenfalls eine sehr geringe Auswirkung auf die Persönlichkeit haben, schwebte den beiden Wissenschaftlern vor, die angeborenen Eigenschaften der „menschlichen Rasse“ durch Auslöschen von unerwünschtem Erbgut zu optimieren. Diese Idee verbreitete sich rasch und fand weltweit Anhänger. Unter den Nationalsozialisten erfuhr diese „wissenschaftlich fundierte“ Eugenik schließlich

ihre perfide Perfektion. Mittlerweile sind Galtons und Pearsons Theorien längst widerlegt.

Im Rahmen der Zwillingsforschung wurde nachgewiesen, dass die *IQ*-Werte von eineiigen Zwillingen (die bekanntlich die gleiche DNA aufweisen) enger beieinander liegen als die von zweieiigen Zwillingen, und dass diese wiederum ähnlicher sind als die Ergebnisse *IQ*-Werte von normalen Geschwistern. Diese Ergebnisse offenbaren, dass Intelligenz sowohl erblich bedingt ist als auch von Umwelteinflüssen bestimmt wird. Damit wurde die Theorie Galtons, der mutmaßte, Intelligenz sei allein erblich bedingt, mit seinen eigenen Methoden (nämlich der Anwendung von Korrelationskoeffizienten) widerlegt. Heute herrscht allgemeiner Konsens darüber, dass die Intelligenz und andere komplexe Persönlichkeitsmerkmale von einer Vielzahl von Genen und diversen Umweltfaktoren beeinflusst werden, und dass gerade diese Vielfalt für das Überleben einer Population die Grundvoraussetzung bildet.

Statistisch lässt sich dieses Zusammenwirken folgendermaßen beschreiben: Die Varianz der Intelligenz (das Quadrat der Standardabweichung) setzt sich additiv zusammen aus der genetisch bedingten und der umweltbedingten Varianz. Die Erblichkeit ist definiert als der Anteil der genetisch bedingten Varianz an der Gesamtvarianz. Sie bezieht sich demnach auf die Variabilität *innerhalb* einer Population, nicht jedoch auf Intelligenzunterschiede *zwischen* mehreren Subgruppen. So besagt eine Erblichkeit von 50% (wie sie für Mitteleuropa nachgewiesen wurde), dass Intelligenzunterschiede innerhalb einer Population zur Hälfte genetisch bedingt sind. Dieser Wert bedeutet jedoch keineswegs, dass ein Individuum jeweils die Hälfte seiner Intelligenz seinen Genen bzw. der Umwelt zu verdanken hat.

Diese Erkenntnis hat weitreichende Konsequenzen. Unterschiede zwischen sozialen Schichten bezüglich des durchschnittlichen *IQs* lassen sich nicht allein durch genetische Einflüsse erklären (wie Galton vermutete). Vielmehr ist anzunehmen, dass dafür unterschiedliche Lebensbedingungen, die in Bildung, Gesundheit oder Wohlstand offensichtlich werden, ausschlaggebend sind.

Dass Umweltfaktoren eine große Bedeutung zukommt, wird eindrucksvoll durch den sogenannten Flynn-Effekt bestätigt (benannt nach seinem Entdecker, dem Politologen James Robert Flynn, 1934-2020). Dieser Effekt beschreibt, dass sich in Industrienationen der durchschnittliche *IQ* seit Beginn der Messungen innerhalb von einer Generation um 5 bis 25 Punkte erhöht hat [6]. Nun ist kaum anzunehmen, dass heute lebende Menschen ihren Vorfahren bezüglich ihrer geis-

tigen Fähigkeiten haushoch überlegen sind. Eine plausiblere Erklärung wäre, dass – neben verlängerten Schulzeiten, besserer Ernährung und medizinischer Versorgung – die spezifischen Fertigkeiten, die in *IQ*-Tests gefragt sind (etwa bezüglich Sprachverständnis, logisch-analytischer Denkweise oder Arbeiten unter Zeitdruck), heutzutage besser antrainiert werden als in früheren Zeiten. Seit einigen Jahren scheint dieser Effekt jedoch zu stagnieren [9]. Die Ursachen für dieses Phänomen sind nicht abschließend geklärt. Es ist denkbar, dass dies nicht alle kognitiven Fähigkeiten betrifft. Vielleicht ist das Stagnieren auch darauf zurückzuführen, dass bezüglich Umweltfaktoren in weiten Teilen der Bevölkerung mittlerweile ein Optimum erreicht ist.

Des Weiteren konnte dargelegt werden, dass der *IQ* im Laufe eines Menschenlebens einigermaßen stabil bleibt. Beim Vergleich der Testergebnisse, die bei denselben Personen als Schulkinder und als Erwachsene ermittelt wurden, ergaben sich Korrelationskoeffizienten von bis zu 0,7 [5]. Andererseits wird deutlich, dass der *IQ* kein absolutes Persönlichkeitsmerkmal ist. Tatsächlich wurde in zahlreichen Studien gezeigt, dass Umweltfaktoren wie Erziehung, Bildung, soziales Umfeld, kulturelle Einflüsse oder gezielte Förderung den *IQ* passiv beeinflussen können – in negativer und in positiver Richtung. Ferner kann jedes Individuum durch sportliche Betätigung, gesunde Ernährung oder dem Erwerb einer neuen FähigkeitFähigkeit (z. B. dem Erlernen einer Fremdsprache) aktiv der Verminderung seines *IQs* entgegenwirken.

4.4 Abschließende Bemerkungen

Es ist sicherlich kein Zufall, dass sich viele Statistiker mit dem Messen von Intelligenz befassten. Einerseits ließen sie sich von der Statistik inspirieren; andererseits haben sie der Statistik enorme Impulse verliehen.

In letzter Zeit wird zunehmend häufiger über Schlagworte wie *Big Data*, *Data Science*, *Künstliche Intelligenz* (KI) oder *Machine Learning*, die vielfach synonym verwendet werden, debattiert. Unter Big Data versteht man – wie der Name vermuten lässt – eine immens große Datenmenge, die häufig aus mehreren Datenquellen zusammengefügt ist und in kurzer Zeit zu analysieren ist. Künstliche Intelligenz ist eine leistungsstarke Software, deren Ziel darin besteht, Muster in der Datenvielfalt zu erkennen. „Machine Learning“ ist ein Teilgebiet der KI, das darauf abzielt, selbstständig Lösungen zu entwickeln und Entscheidungen zu treffen. Nichtsdestotrotz basieren alle diese Techniken auf von Menschen ent-

worfenen Algorithmen, und für die Interpretation der aus statistischen Analysen hervorgehenden Ergebnisse ist allein der Mensch verantwortlich.

Es bleibt festzuhalten: Eine immense Datenmenge, extrem schnelle Hochleistungsrechner, ein optimales Datenmanagement, präzise Mustererkennung und hocheffiziente statistische Analysemethoden sind kein Ersatz für menschliche Intelligenz. Um zu neuen Erkenntnissen zu gelangen, bedarf es nicht nur Intelligenz, sondern einer Menge an zusätzlichen Fähigkeiten: einer soliden Bildung, einer hinlänglichen Erfahrung, der Bereitschaft sich ständig weiterzubilden, ferner Intuition, Scharfsinn, Begeisterung, Teamfähigkeit und des unbedingten Willens, Dingen auf die Spur zu kommen. Dies gilt für alle Forscher, die empirische Studien planen oder durchführen, die Daten analysieren und deren Ergebnisse interpretieren. Dies gilt in gleicher Weise für Journalisten und Autoren wissenschaftlicher Papers, die die daraus hervorgegangenen Erkenntnisse publizieren, sowie für diejenigen, die diese Ergebnisse praktisch umsetzen. Nicht zuletzt sind bei den Konsumenten der Statistik ein klarer Verstand und eine gesunde Skepsis gefragt, damit sie von Zahlen oder Diagrammen nicht geblendet, sondern stattdessen unvoreingenommen informiert werden.

Referenzen

[1] Bland JM, Altman DF: Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. Lancet 1(8); 307–310; 1986.

[2] Boake C: From the Binet-Simon to the Wechsler-Bellevue: Tracing the history of intelligence testing. J Clin Exp Neuropsychol 24(3): 383–405; 2002.

[3] Cohen J: A coefficient of agreement for nominal scales. Educ Physiol Meas 20: 37–46; 1960.

[4] Cronbach LJ: Coefficient alpha and the internal structure of tests. Psychometrika 16: 297–332; 1951.

[5] Deary IJ: The stability of intelligence from childhood to old age. Curr Dir Psychol Sci 23(4): 239–245; 2014.

[6] Flynn JR: Massive IQ gains in 14 nations: What IQ tests really measure. Psychol Bul, 101(2): 171–191; 1987.

[7] Gigerenzer G, Gaissmaier W, Kurz-Milcke E, Schwartz LM, Woloshin S: Helping doctors and patients make sens of health statistics. Psychocol Sci Public Interest 8(2): 53–96; 2007.

[8] Hesse C: Schwarmintelligenz. In: Warum Mathematik glücklich macht, Kapitel 122. Verlag C.H. Beck, 4. Auflage; 2013.

[9] Schaarschmidt T: Flynn-Effekt. Warum die Intelligenz nicht weiter steigt. In: Spektrum Psychologie, 2; 2019.

[10] Schuerger JM, Witt AC: The temporal stability of individually tested intelligence. J Clin Psychol 45(2): 294–302; 1989.

[11] Shrout PE, Fleiss JL: Intraclass Correlation: Uses in assessing rater reliability. Psychol Bull 1: 30–46; 1973.

[12] Spearman C: „General Intelligence“, objectively determined and measured. Am J Physiol 15: 201–293; 1904.

[13] Spearman C: The theory of two factors, Psychol Rev 21: 101–115; 1914.

[14] Stern W: Die psychologischen Methoden der Intelligenzprüfung und deren Anwendung an Schulkindern. Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig; 1912.

[15] Weiß C: Statistik kritisch beleuchtet. In: Kupka MS: Reproduktionsmedizin. Zahlen und Fakten für die Beratung, Kapitel 14. Verlag Urban & Fischer Verlag, München; 2021.

[16] Wolf C: Mehr Hirn, mehr Köpfchen. Spektrum.de https://www.spektrum.de/news/mehr-hirn-mehr-koepfchen/1618626 (abgerufen am 10. April 2021).

Über die Autorin

Christel Weiß ist Professorin für Biomathematik und Epidemiologie an der Medizinischen Fakultät Mannheim der Universität Heidelberg. In ihren Verantwortungsbereich fallen Lehrveranstaltungen für Studierende der Medizin und Masterkurs-Absolventen, Seminare sowie die Beratung von Ärzten, wissenschaftlichen Mitarbeitern und Doktoranden bei der Planung und Durchführung von klinischen und epidemiologischen Studien. Frau Weiß ist Autorin des Lehrbuchs „Basiswissen Medizinische Statistik“ (erschienen im Springer-Verlag, 7. Auflage), des Ratgebers „Promotion. Die medizinische Doktorarbeit – von der Themensuche bis zur Dissertation“ (zusammen mit Prof. Dr. Axel Bauer, erschienen im Thieme-Verlag, 4. Auflage) sowie Koautorin zahlreicher Papers und Buchbeiträge.

Korrespondenzadresse:
Prof. Dr. Christel Weiß
Medizinische Fakultät Mannheim der Universität Heidelberg
Abteilung für Medizinische Statistik und Biomathematik
Theodor-Kutzer-Ufer 1
68167 Mannheim

E-Mail: christel.weiss@medma.uni-heidelberg.de
Homepage: https://www.umm.uni-heidelberg.de/inst/biom/

Sektion 4:
Künstliche und Menschliche Intelligenz

Menschliche und künstliche Intelligenz – ein kritischer Vergleich

THOMAS FUCHS[1]

Klinik für Allgemeine Psychiatrie, Universitätsklinikum Heidelberg

Zusammenfassung

Die Fortschritte der *Künstlichen Intelligenz und der Robotik* stellen die Unterscheidung zwischen Simulation und Realität der menschlichen Person zunehmend in Frage. Sie suggerieren einerseits ein computeromorphes Verständnis menschlicher Intelligenz, andererseits eine Anthropomorphisierung der KI-Systeme. Mit anderen Worten: Wir betrachten uns selbst immer mehr wie unsere Maschinen, und umgekehrt unsere Maschinen wie uns selbst. Was also unterscheidet menschliche und künstliche Intelligenz? Der Aufsatz stellt dafür eine Reihe von Kriterien auf.

1 Einleitung

Mit den Fortschritten der künstlichen Intelligenz scheinen wir sterblichen Menschen immer mehr in ein Rückzugsgefecht zu geraten: Die intelligenten Systeme beginnen sich selbst zu adaptieren, zu „lernen", wie es heißt, und übertreffen vielfach die Leistungen menschlicher Intelligenz. Im Schach, im Go oder Poker-Spiel haben Menschen gegen sie keine Chance mehr. Planen, Wählen, Entscheiden, ja

[1] Gekürzte Fassung eines Aufsatzes im Band: T. Fuchs (2020). *Verteidigung des Menschen. Grundfragen einer verkörperten Anthropologie*. Frankfurt/M.: Suhrkamp, S. 21–70.

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24392

selbst Autofahren scheinen uns zunehmend abgenommen zu werden. Die entsprechenden Ankündigungen von KI-Ingenieuren, Futurologen und Transhumanisten überbieten sich geradezu gegenseitig:

> „Tatsache ist, dass KI den Menschen übertreffen, ja Milliarden Mal klüger werden könnte als jetzige Menschen."[2]

> „Maschinen werden eine Entwicklung nehmen, die die menschliche Evolution widerspiegelt. Am Ende werden selbstbewusste, sich selbst verbessernde Maschinen die menschliche Fähigkeit überschreiten, sie zu kontrollieren oder auch nur zu verstehen."[3]

Ray Kurzweil, KI-Forscher und Leiter der Entwicklung bei Google, hat für 2045 die „Singularität" angekündigt, den Zeitpunkt, an dem die künstliche Intelligenz Bewusstsein erlangt, ein exponentieller Fortschritt zu einer „Superintelligenz" einsetzt und damit ein neues Zeitalter beginnt.[4]

Auch wenn solche vollmundigen Prognosen regelmäßig korrigiert werden – zumindest die Sprache der KI-Forschung nimmt diese Entwicklung bereits vorweg. Es gibt nahezu keine menschlichen Fähigkeiten mehr, die künstlichen Systemen nicht schon jetzt zugeschrieben werden: Wahrnehmen, Erkennen, Denken, Schlussfolgern, Bewerten oder Entscheiden. Umgekehrt erscheint menschliches Bewusstsein vielen heute nur noch als eine Summe von Algorithmen, eine komplexe Datenstruktur im Gehirn, die im Prinzip auch von elektronischen Systemen realisiert werden könnte und nicht mehr an den lebendigen Körper gebunden ist.

Das Computerparadigma des menschlichen Geistes hat eine lange Vorgeschichte. Bereits 1936 entwickelte der Mathematiker Alan Turing die Idee eines digitalen Computers und schlug seinen berühmten Turing-Test vor: Eine Gruppe von Gutachtern kommuniziert längere Zeit schriftlich mit einem Menschen und mit einem Computer, ohne dabei sonstigen Kontakt zu ihnen zu haben. Falls die Gutachter

[2] I. Pearson (2008). „The Future of Life. Creating Natural, Artificial, Synthetic and Virtual Organisms". *European Molecular Biology Organization (EMBO) Reports 9* (Supplement 1): 75–77.

[3] Ray Kurzweil, zit. n. L. Greenemeier (2010). „Machine Self-awareness". *Scientific American* 302: 44–45.

[4] R. Kurzweil (2005). *The Singularity Is Near. When Humans Transcend Biology*. New York: Penguin.

danach zwischen Mensch und Maschine nicht unterscheiden können, dann, so Turing, hindert uns nichts mehr, den Computer als „denkende Maschine“ anzuerkennen. Denken wird also rein behavioristisch definiert, nämlich als Output eines Rechensystems, sei es des Gehirns oder des Computers. Der Turing-Test beruht auf der Ununterscheidbarkeit von Simulation und Original: Was so intelligent agiert wie wir, das *ist* auch intelligent, Punktum.[5]

Zumindest die Simulation macht nun gegenwärtig gewaltige Fortschritte – bis zu dem Punkt, an dem sich die Frage nach dem Unterschied zum Original zu stellen beginnt. Was unterscheidet Bewusstsein von seiner Simulation? Gilt hier wirklich das alte Prinzip: „Wenn etwas aussieht wie eine Ente, schwimmt wie eine Ente und schnattert wie eine Ente, dann ist es auch eine Ente“?

Eine Vorstellung von den künftigen Problemen, die diese Frage aufwerfen könnte, gibt „Sophia“, ein humanoider Roboter der Firma *Hanson Robotics*, der zurzeit weltweit in den Medien zu sehen ist.[6] Sophia verfügt über eine menschenähnliche Mimik (modelliert nach Audrey Hepburn), zeigt verschiedene Gefühlsausdrücke, einen modulierten Tonfall und stellt Augenkontakt mit dem Gegenüber her. Sie beantwortet relativ komplexe Fragen, auch über sich selbst, kann Menschen wiedererkennen und witzelt in einer Londoner Talkshow an passender Stelle über das englische Wetter.

Natürlich ist all dies nur ein Bluff. Das wurde spätestens offenkundig, als Sophia von ihrem Erfinder mit einer für sie offenbar unbekannten Frage konfrontiert wurde, nämlich: „Willst Du Menschen töten?“, und zur Antwort gab: „Okay. Ich will Menschen töten.“ Die Antwort war nur nachgeplappert wie von einem Papagei; Sophia verstand natürlich kein Wort von dem, was sie gefragt wurde. Dennoch ist ihre Wirkung verblüffend. Sophia nähert sich bereits dem *uncanny valley*, wie in der Robotik die Schwelle genannt wird, ab der die Menschenähnlichkeit eines Androiden in uns ein Gefühl von Unheimlichkeit, zugleich aber auch von Faszination erzeugt. Es ist das Gefühl, das entsteht, wenn sich die Bereiche des Toten und des Lebendigen nicht mehr eindeutig voneinander unterscheiden lassen. Wann wird das *uncanny valley* durchquert und eine künftige Sophia von einer bezaubernden, intelligenten Frau nicht mehr zu unterscheiden sein?

[5] Vgl. A. M. Turing (1950). „Computing Machinery and Intelligence“. *Mind* 59: 433–460.

[6] C. Weller (2017). „Meet the first-ever robot citizen, a humanoid named Sophia that once said it would destroy humans.“ *Business Insider Nordic. Haettu*, 30. Jg.

Diese Schwelle wird in *Her* überschritten, einem Science-Fiction-Film von Spike Jonze aus dem Jahr 2013: Theodore, ein schüchterner, aber einfühlsamer Mann, verliebt sich in eine Software mit dem Namen Samantha und einer erotischen Stimme, die als „lernendes Programm" scheinbar menschliche Empfindungen entwickelt. Je mehr Theodore ihr verfällt, desto gleichgültiger wird es ihm, ob es sich um ein reales Gegenüber oder nur um eine Simulation handelt – die beglückende Passung genügt. Allerdings scheitert die Liebe zwischen Mensch und Programm zuletzt an der Weiterentwicklung Samanthas, die mit tausenden von anderen Menschen und Betriebssystemen virtuellen Kontakt aufnimmt und sich in sie „verliebt", sodass sie Theodore schließlich „verlässt".

Die projektive Einfühlung des Menschen in seine eigenen, künstlichen Geschöpfe ist freilich kein neues Phänomen. Bekannt ist etwa die Agalmatophilie (griech. *ágalma* = Statue, Götterbild), die erotische oder sexuelle Hinwendung zu Statuen, Puppen oder Automaten. Ovids Bildhauer Pygmalion, von gewöhnlichen Frauen abgestoßen, verliebt sich in die von ihm geschaffene Statue einer idealen Frau, bis sie schließlich von Aphrodite zum Leben erweckt wird. Die Projektion schafft sich ein Wesen, „wie Natur es nie zu erzeugen vermag", und sie belebt es schließlich auch. In E. T. A. Hoffmanns Sandmann betört die stumpfe Automatenpuppe Olimpia den Studenten Nathanael, der gegen alle warnenden Einwände der Freunde taub bleibt:

> „Wohl mag euch, ihr kalten prosaischen Menschen, Olimpia unheimlich sein. – Nur mir ging ihr Liebesblick auf und durchstrahlte Sinn und Gedanken, nur in Olimpias Liebe finde ich mein Selbst wieder."[7]

Am Ende stürzt sich Nathanael im Wahnsinn von einem Turm.

Es ist, so zeigen diese Beispiele, sehr wohl möglich, dass wir Automaten, Androiden, ja selbst Computersysteme empathisch oder auch erotisch wahrnehmen und ihnen damit so etwas wie Subjektivität zusprechen. Besonders menschenähnliche Stimmen nehmen wir nahezu notwendig als Ausdruck eines Inneren wahr. Wenn Sophia mit zarter Stimme sagt: „Das macht mich glücklich", dann bedarf

[7] Hoffmann, E. T. A. (1960). „Der Sandmann", in: Ders., *Fantasie- und Nachtstücke*. München: Winkler, S. 331–363.

es schon einer aktiven Distanzierung, um sich klar zu machen, dass da niemand ist, der sich glücklich fühlen könnte, dass es sich also gar nicht um eine *Äußerung* handelt. Das heißt nicht, dass wir uns zu einer menschlichen Stimme normalerweise ein Inneres (Geist, Seele, Bewusstsein oder was auch immer) „hinzudenken". Die Äußerung eines anderen Menschen ist nicht bloß ein tönendes Wort oder eine symbolische Repräsentation, die auf ein mutmaßliches Inneres verweist. Wir nehmen sie vielmehr als *beseelt* wahr, ohne dahinter eine „Seele" anzunehmen; wir erleben sie *als den Übergang selbst*, eben als *Äußerung* des anderen, die von einem „Inneren" gar nicht zu trennen ist. In unserer Wahrnehmung ist der andere immer eine verkörperte, psychophysische Einheit.

Die zunehmend perfektionierte Simulation einer solchen Einheit verlangt nun allerdings, dass wir die Vortäuschung einer Äußerung eigens zurückweisen und Sophias Worte als das nehmen, was sie eigentlich sind: tönende Worte, wie die eines Papageis (beziehungsweise nicht einmal das, da ein Papagei seine Laute immerhin auch erlebt). Anderenfalls überlassen wir uns dem Schein und geben wie Nathanael oder Theodore das „Als-ob", die Unterscheidung zwischen Virtualität und Realität einfach auf. Schon jetzt kann es ja sein, dass der nette Online-Partner oder der einfühlsame Online-Therapeut in Wahrheit nur ein Chatbot ist. Und die ersten Pflegeroboter für Demenzkranke sind bereits in Erprobung: „Erstaunlich schnell bauen die Patienten eine Beziehung zum Roboter auf."[8] (Leitgeb 2017). Offenbar sind wir nur allzu geneigt, unser eigenes Erleben auf die *Simulate* zu projizieren. Die Faszination des in einem Automaten scheinbar aufblitzenden Bewusstseins trägt dazu bei. Es ist eine Faszination, die auch die KI-Forschung vorantreibt. Ihr Ursprung dürfte – neben dem prometheischen Motiv der gottgleichen Kreativität – wohl letztlich in unbewussten Wünschen nach der Überwindung des Todes zu suchen sein, nämlich durch die Belebung.

Wie weit also reicht der menschliche Widerstand gegen die Simulation, und wie groß ist ihre Attraktion? Wann geben wir die Unterscheidung von Simulation und Original auf? Genügt uns am Ende die perfekte Simulation? – Dies dürften entscheidende Fragen in einer digital-automatisierten Kultur werden. Sie sind

[8] Leitgeb, V.-V. 2017. „Roboter Mario soll Demenzkranke pflegen". Süddeutsche Zeitung, online 24.11.2017. https://www.sueddeutsche.de/bayern/gesundheit-roboter-mario-soll-demenzkranke-pflegen-1.3762375.

gegenwärtig völlig offen. Was ich im Folgenden anbieten möchte, sind allerdings zwei Klarstellungen zur Unterscheidung:

- Personen sind keine Programme.
- Programme sind keine Personen.

2 Personen sind keine Programme

Die gängige Philosophie der Kognitionswissenschaften ebenso wie der *Artifical Intelligence* ist der *Funktionalismus*: Danach bestehen mentale Zustände (also Gefühle, Wahrnehmungen, Gedanken, Überzeugungen etc.) in regelhaften Verknüpfungen von Input und Output eines Systems. Wer sich zum Beispiel in den Finger sticht, hat einen mentalen Zustand, der zu einer verzerrten Gesichtsmuskulatur, zu Stöhnen und zum Zurückziehen des Fingers führt. „Schmerz" ist dann nichts anderes als der Gehirnzustand, der den genannten Output zur Folge hat – so wie der Zustand eines Brandmelders, der bei Rauch ein Alarmsignal auslöst und die Sprinkleranlage in Gang setzt. Dieser Gehirnzustand lässt sich als eine bestimmte Datenmenge beschreiben. „Geist ist ein neuronaler Computer, von der natürlichen Selektion ausgestattet mit kombinatorischen Algorithmen für kausales und probabilistisches Denken."[9] Auch Selbstsein ist nur ein solcher komputationaler Zustand: „Wir sind [...] mentale Selbstmodelle informationsverarbeitender Biosysteme. [...] Werden wir nicht errechnet, so gibt es uns nicht."[10]

Freilich geht das entscheidende Merkmal von Schmerzen, Gefühlen oder Gedanken in dieser funktionalistischen Konzeption offensichtlich verloren – nämlich ihr *Erlebtwerden*. Mit seinem bekannten Gedankenexperiment des „chinesischen Zimmers" hat John Searle gezeigt, dass sich Sinn und Bedeutung nicht auf funktionale Algorithmen zurückführen lassen, wenn es kein Subjekt gibt, das deren Bedeutung *versteht*.[11] Dazu stelle man sich vor, ein Mann, der kein Wort Chinesisch spricht, sei in ein Zimmer eingeschlossen, in dem sich nur ein Handbuch mit sämtlichen

[9] S. Pinker (1997). *How the Mind Works*. New York: Norton, S. 524 (Übers. T. F.).

[10] Metzinger, T. 1999. *Subjekt und Selbstmodell. Die Perspektivität phänomenalen Bewusstseins vor dem Hintergrund einer naturalistischen Theorie mentaler Repräsentation*. Paderborn: Mentis, S. 284.

[11] J. R. Searle (1980). „Minds, Brains, and Programs". *Behavioral and Brain Sciences* 3: 417–457.

Regeln zur Beantwortung von chinesischen Fragen befindet. Der Mann erhält nun von draußen ihm unverständliche chinesische Schriftsymbole durch einen Schlitz ins Zimmer gereicht („Input"), findet aber mit Hilfe des Programms die dazu passenden Antworten, die er dann nach draußen gibt („Output"). Nehmen wir an, das Programm sei so gut und die Antworten so treffend, dass selbst die Chinesen draußen die Täuschung nicht bemerken würde. Dennoch könnte man sicher weder von dem Mann im Zimmer noch von dem System als ganzen sagen: Er oder es *versteht* Chinesisch.

Searles „chinesisches Zimmer" ist natürlich eine Veranschaulichung von Computern, in denen ein Zentralprozessor nach Algorithmen arbeitet, also etwa nach der Instruktion: „Wenn du Input X erhältst, dann führe Operation Y aus und gib Output Z." Die Maschine funktioniert als System völlig adäquat, und doch fehlt ihr die entscheidende Voraussetzung für Verständnis, nämlich Bewusstsein. Folglich kann menschliches Verstehen nicht auf Informationsverarbeitung reduziert werden. Sinnverstehen ist mehr als ein Algorithmus.

Das Gleiche gilt aber für das schon genannte Beispiel der Schmerzen, für den Geschmack von Schokolade oder den Duft von Lavendel – keine qualitative Erfahrung lässt sich als solche aus Daten und Informationen ableiten. Bewusstsein ist überhaupt nicht das geistlose Durchlaufen von Datenzuständen – es ist *Selbstbewusstsein*. Es ist *für mich*, dass ich Schmerzen habe, wahrnehme, verstehe oder denke. Niemand weiß zwar genau, wie dieses Selbstbewusstsein vom Organismus überhaupt hervorgebracht wird, sicher jedoch nicht durch bloße Programme, denn Programme und ihre Trägersysteme erleben nichts. Der Output solcher Systeme ist allenfalls die Simulation von Erleben, nicht das Original – was aussieht, schwimmt und schnattert wie eine Ente, ist eben noch lange keine Ente.

Nun ist bereits die Annahme, das Gehirn sei eine Art Computer mit Speichern und Recheneinheiten, der wie der heimische PC Eingaben zu Ausgaben verarbeitet, ein immer wieder verbreiteter Irrtum. So kann man im Gehirn, anders als im Computer, keine Hardware von Software unterscheiden, denn jede Denk- bzw. Gehirnaktivität verändert zugleich die synaptischen Verknüpfungen, also die organische Basis von Bewusstsein. Es gibt im Gehirn auch keine „Datenspeicherung", sondern nur variable Reaktionsmuster, die bei Bedarf in ähnlicher, aber nie exakt gleicher Form aktiviert werden. Anders als im Computer geschieht im Gehirn also nie zweimal das Gleiche. Zudem lässt sich die neuronale Signalübertragung nicht exakt in Programmen aus Nullen und Einsen wiedergeben, da sie von Neuro-

modulatoren (Opioiden, Neuropeptiden, Monoaminen u. a.) ständig beeinflusst wird, die vor allem für das Emotionserleben unerlässlich sind. Schließlich besteht das Gehirn zum größten Teil (85%) aus einem Stoff, der die neuronalen Prozesse ermöglicht, aber einen Computer sofort zum Kurzschluss bringen würde – nämlich aus Wasser.

All dies macht bereits deutlich, dass es sich beim Gehirn eben nicht um einen „biologischen Computer" handelt. Doch das Wichtigste ist: das Gehirn kann seine Funktionen *für sich genommen* gar nicht erfüllen. Es ist ein Organ des lebendigen Organismus, mit dem es aufs Engste vernetzt ist.[12]

Bereits unser primäres, noch unreflektiertes Erleben beruht auf der Interaktion des Gehirns mit dem übrigen Körper: Bewusstsein entsteht nicht erst im Kortex, sondern es resultiert aus den vitalen Regulationsprozessen, die den ganzen Organismus miteinbeziehen, und die im Hirnstamm und Zwischenhirn integriert werden.[13] Die Aufrechterhaltung der Homöostase und damit der Lebensfähigkeit des Organismus ist die primäre Funktion des Bewusstseins, wie es sich in Hunger, Durst, Schmerz oder Lust manifestiert. So entsteht das leibliche Selbsterleben, das *Lebensgefühl*, das allen höheren geistigen Funktionen zugrunde liegt. Dies lässt sich auch so ausdrücken: *Alles Erleben ist eine Form des Lebens*. Ohne Leben gibt es kein Bewusstsein und auch kein Denken.

All diese lebendigen Prozesse lassen sich von elektronischen Systemen nicht simulieren. Auch das Human Brain Project der EU, das bis 2023 eine Computer-Simulation des gesamten Gehirns erreichen sollte, hat mit der tatsächlichen Aktivität eines Gehirns im Organismus wenig zu tun, erst recht nichts mit Bewusstsein. Selbst eine perfekte Computersimulation des Gehirns wäre ebenso wenig bewusst wie die perfekte Computersimulation eines Wirbelsturms uns nass machen oder umwehen würde. Bewusstes Erleben setzt Leiblichkeit und damit *biologische Prozesse in einem lebendigen Körper* voraus. Nichts davon ist im Human Brain

[12] Vgl. zum Folgenden ausführlich T. Fuchs (2017). *Das Gehirn – ein Beziehungsorgan. Eine phänomenologisch-ökologische Konzeption*. 5. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer, insbesondere S. 136–140.

[13] Vgl. dazu Damasio, A. 2011. *Selbst ist der Mensch: Körper, Geist und die Entstehung des menschlichen Bewusstseins*. München: Siedler; Panksepp, J. 1998. *Affective Neuroscience: The Foundations of Human and Animal Emotions*. Oxford, New York: Oxford University Press, sowie Fuchs (2017).

Project zu finden. Nur Lebewesen sind bewusst, empfinden, fühlen oder denken. Und Personen sind Lebewesen, nicht Programme.

3 Programme sind keine Personen

Gehen wir nun den umgekehrten Weg: Warum sind Programme niemals Personen?

Beginnen wir mit dem problematischen Begriff der „künstlichen Intelligenz" selbst. Was meinen wir eigentlich, wenn wir von Intelligenz sprechen? Das lateinische *intellegere* bedeutet „einsehen, verstehen, begreifen". Wer intelligent ist, verfügt also zumindest über ein grundlegendes Verständnis davon, was er tut und was um ihn herum vorgeht. Vor allem aber ist er in der Lage, sich selbst und seine Situation aus einer übergeordneten Perspektive zu sehen, sodass er kreative Lösungen finden kann, die auf einem Überblick oder „Umweg" beruhen. Intelligent handelt zum Beispiel, wer sich beim Weg durch einen Wald Zeichen macht, um später seinen Rückweg zu finden; oder wer seine Urlaubsreise um eine Woche verschiebt, weil er nicht bei Ferienbeginn in den üblichen Stau geraten will. Dazu muss er sich in ein Verhältnis zur jeweiligen Situation setzen und sich selbst gewissermaßen „von außen" sehen, also über *Selbstbewusstsein* oder *Reflexivität* verfügen.

Nun haben wir schon gesehen, dass ein Computersystem *nicht das Geringste von dem versteht, was es tut*. Erst recht vermag es nicht, sich auf sich selbst zu beziehen, sich von außen zu sehen. Daher kann es auch nicht intelligent genannt werden, selbst wenn es Fähigkeiten simuliert, die wir bei Menschen als Ausweis von Intelligenz verstehen. Kein Übersetzungsprogramm versteht ein Wort von dem, was es übersetzt, kein Schachcomputer weiß, dass er Schach spielt. Sophia, die kein einziges Wort begreift, das sie ausspricht, wird niemals intelligent werden, selbst wenn sie irgendwann in allen denkbaren Situationen die perfekte Antwort geben kann. Intelligenz setzt Selbstbewusstsein voraus.

Wenn wir also mit „Intelligenz" die Fähigkeit bezeichnen, sich selbst oder eine Situation aus einer übergeordneten Perspektive zu erfassen, um Probleme geschickt zu lösen und daraus zweckvolles Handeln abzuleiten, dann können wir solche Fähigkeiten gewiss keinem Apparat ohne Bewusstsein zuschreiben. Die Bezeichnung „intelligent" wird hier nur uneigentlich gebraucht, so wie man von einem „Smartphone" auch nicht annimmt, dass es wirklich „smart", also klug ist – es führt nur blind Programme aus, die man als „klug entwickelt" bezeichnen

kann. Erst recht gilt das, wenn wir an praktische, emotionale oder schöpferische Intelligenz denken – hier lassen uns die „intelligenten Systeme“ völlig im Stich.

Nun werden zahlreiche Einwände auftauchen, die auf die fortgeschrittenen Fähigkeiten von „intelligenten Programmen“, „lernenden Systemen“ etc. verweisen. Betrachten wir daher einige solcher angeblicher Intelligenzleistungen etwas näher.

- Lösen Computer Probleme? – Nein, denn Probleme stellen sich für sie gar nicht. Als Problem – vom griechischen *próblema*, das heißt „das zur Lösung Vorgelegte“ – bezeichnen wir ein Hindernis oder eine Schwierigkeit bei der Bewältigung einer Aufgabe, etwa weil sich verschiedene Anforderungen widersprechen, ein veränderter Blickwinkel zur Lösung erforderlich ist etc. Doch „Hindernisse“ und „Aufgaben“ gibt es nur für *zielorientierte* Wesen, die einen Weg von der gegenwärtigen zu einer künftigen Situation suchen und die Lösung vorstellend vorwegnehmen können. Vor ein Problem gestellt zu sein und es zu bewältigen, ist daher an den *bewussten Lebensvollzug* gebunden. Mitunter mag man die Aufgabe *mit Hilfe* eines Computers lösen, doch dann stellt die programmierte Berechnung nur für den Nutzer selbst eine Lösung seines Problems dar – der Computer kann das Problem nicht einmal erkennen.

- Computer, obgleich sie so heißen, *rechnen* auch nicht. Denn Rechnen bedeutet eine Operation, bei der *wir* auf ein Ergebnis abzielen und dann beurteilen, *ob es richtig ist*. Der bloße Ablauf eines Programms ist keine Rechnung, denn richtig oder falsch gibt es für das Programm nicht. Computer rechnen ebenso wenig wie die Uhr die Zeit misst, denn die Uhr weiß von Zeit gar nichts. Nicht der Computer ist also der Rechner, sondern ich selbst rechne *mit Hilfe* des Computers. Dass ich die dazu notwendigen Algorithmen nicht kenne, sondern nur der Programmierer (so wie ich auch den Uhrenmechanismus nicht kenne, sondern der Uhrmacher), ändert daran nichts. Es liegt im Wesen jedes komplexeren Instruments, dass in ihm menschliche Intelligenz gewissermaßen sedimentiert ist; das macht das Instrument selbst aber nicht intelligent.

- Aus dem gleichen Grund treffen Computer auch keine Entscheidungen. Sich zu entscheiden, setzt das Bewusstsein von alternativen Möglichkeiten voraus, die in der Imagination vorweggenommen werden: Ich könnte dieses tun oder jenes. Auch dazu bedarf es einer Ziel- und Zukunftsorientierung ebenso

wie der Unterscheidung von Realität und kontrafaktischer Imagination, und für beides hat der Computer keinen Sinn – er kennt weder ein „Noch-nicht" noch ein „Als-ob". Wenn nun ein medizinisches Expertensystem ausgehend von Patientendaten eine Therapie errechnet, trifft es keine Entscheidungen, ebenso wenig wie ein selbstfahrendes Auto sich entscheidet, ob es lieber einen Unfall mit einer alten oder jungen Person in Kauf nimmt. Die Entscheidungen über die Programme und ihre Bewertungskriterien sind längst vorher getroffen worden, nämlich von den Programmierern. Alles andere sind nur noch sich abspulende Algorithmen.

- Gibt es aber nicht doch „zielsuchende Systeme", zum Beispiel „smart bombs", die ihren Flug selbst beeinflussen können, weil sie über ein internes Modell ihrer Operationen verfügen? – Natürlich sucht auch eine „intelligente Bombe" gar nichts, da sie keine intentionale Beziehung zu ihrem Zielobjekt hat. Jede Flugkorrektur dient nur der internen Sollwertregulierung des Mechanismus und geschieht rein momentan, ohne sich auf ein vorgestelltes Ziel in der Zukunft zu richten. Für dieses Ziel selbst bleibt der Mechanismus blind und taub, *denn er ist sich selbst nicht vorweg*. Nur bewusstes Erleben nimmt die Zukunft vorweg und ist protentional – wünschend, strebend, erwartend oder befürchtend – auf Mögliches gerichtet. Dass der einprogrammierte Zielabgleich eine „Zielsuche" oder „Zielvorhersage" darstelle, ist daher eine falsche Redeweise. Nur *für den Ingenieur* oder *für den Schützen* hat die Bombe ein Ziel.

Die Leistungen der klassischen Computersysteme sind also im Vergleich zur menschlichen Intelligenz recht überschaubar. Ihre partielle Überlegenheit beruht auf ihrer extremen Spezialisierung auf berechenbare Aufgaben, gewissermaßen einer Fachidiotie, und auf ihrer ungeheuren Verarbeitungsgeschwindigkeit. Doch ihre vermeintliche Intelligenz ist nur geborgt: Jedes dieser Programme ist nur so „klug" oder raffiniert wie der Programmierer, der es entworfen hat.

Inzwischen haben wir es allerdings mit einer neuen Generation von künstlicher Intelligenz zu tun, nämlich „lernenden Maschinen". Es handelt sich um künstliche neuronale Netzwerke, die in der Lage sind, die adaptiven Fähigkeiten des Gehirns zu simulieren. Ähnlich wie bei biologischen Synapsen sind die Verknüpfungen zwischen den im Computer modellierten Neuronen numerisch gewichtet und passen sich im Verlauf eines Trainingsprozesses dem Input von Signalen an (*deep*

learning). Häufig genutzte Verknüpfungen werden verstärkt, selten genutzte unterbrochen. Dabei werden dem System tausende ähnliche Muster dargeboten, zum Beispiel verschiedene Versionen eines Gesichts, bis es auf die mit der größten Wahrscheinlichkeit wiederkehrende Pixelanordnung reagiert, also das Gesicht „erkennt". Solche Systeme sind auch in der Lage, zum Beispiel Hunde von Katzen zu unterscheiden, Stimmen über Handymikrophone zu identifizieren oder Übersetzungen vorzunehmen – sie sind bereits allgegenwärtig.

All dies bedeutet zweifellos einen bemerkenswerten Fortschritt – doch kann man hier wirklich von „Erkennen" und „Lernen" sprechen? Natürlich *erkennt* ein System gar nichts, denn das Erlebnis des Wiedererkennens, der Vertrautheit oder *Ähnlichkeit* geht ihm völlig ab. Ein „lernendes System" zum Beispiel war in der Lage, Abbildungen von Kühen in den verschiedensten Positionen und Ausschnitten zu identifizieren. Doch als man ihm eine Kuh vor einem Meeresstrand präsentierte, hielt es die Kuh für ein Schiff – bislang hatte es nämlich nur Bilder von Kühen auf Wiesen und Feldern verarbeitet. Ohne diesen Kontext geriet das System in die Irre. [14] Das heißt aber im Rückschluss: Trotz abertausenden von Bilddurchläufen hatte es auch zuvor keine einzige Kuh *erkannt* – jedes Kleinkind hätte die Kuh am Strand als Kuh gesehen, und das schon nach wenigen Kontakten mit Kühen. Die Gestalt und der Begriff einer Kuh lassen sich nun einmal nicht auf eine statistische Wahrscheinlichkeit von Pixelübereinstimmungen reduzieren. Man sollte daher auch nicht von lernenden, sondern besser von „adaptiven Systemen" sprechen. Nur Lebewesen können lernen.

Wir sehen: Den Begriff der Intelligenz haben wir unseren Maschinen allzu voreilig zugebilligt. Die Bezeichnung „künstliche Intelligenz" ist wohl nicht mehr aus der Welt zu schaffen. Doch wir sollten uns immer dessen bewusst bleiben, dass zwischen den Rechen- und Anpassungsleistungen eines Computersystems und den Wahrnehmungen, den Einsichten, dem Denken und Verständnis eines Menschen nicht nur ein gradueller, sondern ein fundamentaler Unterschied besteht.

[14] Vgl. B. Schölkopf, "Symbolic, Statistical and Causal Intelligence", Vorlesung am Marsilius-Kolleg der Universität Heidelberg, 16.07.2020.

4 Resümee: Simulation und Original

Die Fortschritte der Simulationen machen es notwendig, die kategorialen Unterschiede zwischen menschlicher und künstlicher Intelligenz klarzustellen. Intelligenz im eigentlichen Sinne des Wortes ist an Einsicht, Übersicht und Selbstbewusstsein gebunden: *verstehen, was man tut*. Und Voraussetzung für Bewusstsein wiederum ist nicht nur ein Gehirn, sondern ein lebendiger Organismus. *Alles Erleben beruht auf dem Leben*.

Der Begriff einer bewusstlosen Intelligenz ist ein hölzernes Eisen. Was an den Leistungen der KI-Systeme intelligent erscheint, ist nur eine Projektion unserer eigenen intelligenten Fähigkeiten. Ihre scheinbare Zielverfolgung oder Problemlösung, ihre vermeintlichen Vorhersagen oder Bewertungen leiten sich ausnahmslos von unseren eigenen Zielen, Problemen, Lösungen und Bewertungen ab, die wir zu Programmen formalisiert und ausgelagert haben, um uns die Arbeit des Durchrechnens zu ersparen. Es ist im Prinzip nichts anderes als dass die Uhr für uns die Zeit misst, weil wir unsere eigene Erfahrung von regelmäßigen Naturprozessen in einen nützlichen Mechanismus ausgelagert haben. So unsinnig es wäre, wollte man der Uhr ein Wissen von der Zeit zusprechen, so unsinnig ist es, einem „intelligenten Roboter“ ein Verständnis von Sprache oder einem „intelligenten Auto“ die Wahrnehmung von Gefahren zuzuschreiben. Das Bewusstsein davon, dass wir es in der KI nur mit einer Externalisierung unserer eigenen Rechen- und Denkfähigkeit, mit einer Projektion unserer selbst zu tun haben, geht uns zunehmend verloren.

Doch alle künstlichen Systeme bleiben von unserem eigenen, bewussten und zweckgerichteten Lebensvollzug abhängig. Alle Programme, die in solchen Systemen ablaufen, sind nur *für uns* Programme, also zielgerichtete Prozesse. Den Systemen geht es dabei um nichts. Sie wissen, erkennen, verstehen nichts, denn sie *erleben* nichts. Die Ähnlichkeit ihrer Funktionen mit menschlichen Leistungen mag noch so täuschend, ihre spezialisierte Überlegenheit noch so verblüffend sein – wir sollten uns nicht täuschen lassen. Unsere vermeintlichen künstlichen Doppelgänger sind und bleiben unsere Erzeugnisse; ihre Intelligenz ist nur die Projektion unserer eigenen.

Aber auch wenn es keine bewusstlose Intelligenz gibt, und umgekehrt die noch so perfekte Simulation von Intelligenz kein Bewusstsein erzeugt – die Fortschritte der Simulationstechnik werden ihre Wirkung nicht verfehlen. Der Anthropomorphismus, der unserem Wahrnehmen und Denken inhärent ist, verleitet uns nur

allzu leicht dazu, unseren Maschinen menschliche Intentionen, Handlungen, ja Gefühle zuzuschreiben. Spätestens bei humanoiden Robotern lebt der Animismus wieder auf, den wir für ein überwundenes Stadium der Vorgeschichte gehalten haben oder noch bei Kleinkindern beobachten können. Dann wäre die simulierte Ente am Ende doch eine Ente, und das Als-ob der Simulation ginge verloren – sei es, weil der kategoriale Unterschied nicht mehr verstanden wird, oder weil er letztlich als gleichgültig erscheint. Dass die KI-Systeme angeblich jetzt schon „denken", „wissen", „planen", „voraussagen" oder „entscheiden", bahnt solchen Grenzauflösungen den Weg. Hans Jonas' Warnung gilt heute erst recht:

> „Der menschliche Verstand hat eine starke und, wie es scheint, unwiderstehliche Neigung, menschliche Funktionen in den Kategorien der sie ersetzenden Artefakte, und Artefakte in den Kategorien der von ihnen versehenen menschlichen Funktionen zu deuten. [...] Die Benutzung einer bewusst doppelsinnigen und metaphorischen Terminologie erleichtert diese Hin- und Her-Übertragung zwischen dem Artefakt und seinem Schöpfer." [15]

Freilich kann man alle Begriffe wie Denken, Entscheiden, Intelligenz oder Bewusstsein rein behavioristisch als Output definieren, wie es Turing bereits vorschlug. Damit heben wir allerdings die Maschinen auf unsere Stufe und degradieren uns selbst zu Maschinen.

Die eigentliche Gefahr, die sich daraus ergibt, dürfte darin bestehen, dass wir den Systemen freiwillig immer mehr Entscheidungen überlassen – Entscheidungen, die nur noch für wenige durchschaubar sind und sich der demokratischen Kontrolle entziehen. Je komplexer die Gesellschaft wird, desto attraktiver könnte es werden, Planungen und Bewertungen an Maschinen zu delegieren, so wie es heute bereits an der Börse der Fall ist – sei es, weil die Resultate für „objektiver" erklärt werden, oder weil die Bereitschaft, persönliche Verantwortung angesichts der Komplexität der Welt abzugeben, immer weiter zunimmt.[16] Sind die Systeme uns nicht ebenso überlegen wie *Deep Blue* Gari Kasparow?

---

[15] Jonas, H. 1973. *Organismus und Freiheit. Ansätze zu einer philosophischen Biologie*. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, S. 166.

[16] Ein Beispiel dafür sind die in den USA immer häufiger durchgeführten Beurteilungen des Rückfallrisikos von Straftätern durch KI-Systeme (mit einem offensichtlichen Bias zuungunsten von Farbigen). Hier werden intransparente Programme zu Hilfsrichtern oder gar Entscheidungsinstan-

Doch die Bewertungen, die in KI-Systemen implementiert sind, stammen ausnahmslos menschlichen Wertsetzungen – kein „intelligentes System" sagt uns von sich aus, was das Richtige, das Gute und ethisch Gebotene ist. Je mehr sich die Vorstellung von künstlicher Intelligenz als einer vermeintlich überlegenen Form der Analyse, Vorhersage und Bewertung etabliert, desto eher gerät in Vergessenheit, dass Entscheidungen mit all ihren Unwägbarkeiten letztlich immer nur von Menschen selbst getroffen werden können. Ebenso wird vergessen, dass es in Wahrheit einige wenige Konzerne und informationstechnische Eliten sind, die die maßgeblichen Entscheidungen treffen und die mittels Big Data immer mehr Bereiche der Gesellschaft zu kontrollieren vermögen. Die häufig geäußerten Warnungen vor einer „Machtübernahme intelligenter Maschinen" sind zweifellos unsinnig, da sie bewusstlosen Systemen einen Eigenwillen unterstellen. Doch gerade als „dienstbare Geister" können KI-Systeme die Machtverhältnisse in der Gesellschaft tiefgreifend verändern. „Nicht die Maschinen übernehmen die Kontrolle, sondern diejenigen, die die Maschinen besitzen und kontrollieren." [17]

Die entscheidende Herausforderung der Künstlichen Intelligenz aber liegt wohl in der Frage, die sie an uns und unser Selbstbild richtet: Erschöpft sich unser Menschsein in dem, was sich in Simulation und Technologie übersetzen lässt? Besteht es allein in komplexen neuronalen Algorithmen, und ist unser Erleben nur ein Epiphänomen? – Gerade weil die Technik viele unserer spezialisierten Fähigkeiten übersteigt, fordert sie uns dazu auf, wieder neu zu entdecken, worin unser Menschsein eigentlich besteht – nämlich nicht in Information oder Daten, sondern in unserer lebendigen, fühlenden und verkörperten Existenz.

---

zen (vgl. L. Kirchner, J. Angwin, J. Larson, S. Mattu. 2016. „Machine Bias: There's Software Used across the Country to Predict Future Criminals, and It's Biased against Blacks". Pro Publica. https://www.propublica.org/article/machine-bias-risk-assessments-in-criminal-sentencing).

[17] Lenzen, M. 2018. *Künstliche Intelligenz. Was sie kann und was uns erwartet*. München: Beck, S. 247.

Über den Autor

Thomas Fuchs ist Karl-Jaspers-Professor für Philosophische Grundlagen der Psychiatrie und Psychotherapie an der Universität Heidelberg. Er ist Leiter der Sektion „Phänomenologische Psychopathologie und Psychotherapie“ der Klinik für Allgemeine Psychiatrie am Universitätsklinikum Heidelberg und Koordinator des Marsilius-Projekts „Verkörperung als Paradigma einer evolutionären Kulturanthropologie“. Zudem ist er Forschungsstellenleiter der Karl Jaspers-Gesamtausgabe der Heidelberger Akademie der Wissenschaften und Vorsitzender der Deutschen Gesellschaft für Phänomenologische Anthropologie, Psychiatrie und Psychotherapie (DGAP).

Korrespondenzadresse:
Prof. Dr. Dr. Thomas Fuchs
Klinik für Allgemeine Psychiatrie
Zentrum für Psychosoziale Medizin
Universitätsklinikum Heidelberg
Voßstr. 4
D-69115 Heidelberg

E-Mail: thomas.fuchs@med.uni-heidelberg.de
Homepage: https://www.uni-heidelberg.de/fakultaeten/philosophie/philsem/phaenomenologie/

Emotionale Robotik – Fluch oder Segen in der psychiatrischen Versorgung?

INES AL-AMEERY-BROSCHE & FRANZ RESCH

Klinik für Kinder- und Jugendpsychiatrie, Universitätsklinikums Heidelberg

Zusammenfassung

Die Entwicklung der künstlichen sozial-emotionalen Intelligenz wird intensiv beforscht und finanziell gefördert. Sozial und emotional intelligente Roboter sind noch „science fiction“, allerdings finden Hilfsroboter in sozialen Bereichen wie in der Pflege sowie künstliche Intelligenz in Form von maschinellem Lernen auch in der Psychiatrie bereits ihren Einsatz. Welche Implikationen leiten sich daraus für die Kinder- und Jugendpsychiatrie ab? Der Nutzen der vereinzelt eingesetzten „sozialer“ Roboter in der Kinder- und Jugendpsychiatrie sollte aus inhaltlicher, ethischer und politischer Sicht intensiv untersucht und kritisch hinterfragt werden. Maschinelles Lernen für die Entwicklung von Apps zur psychischen Gesundheit und therapeutischen Chatbots ist weltweit im Einsatz und aus dem digitalen Bereich der „mental health“-Versorgung nicht mehr wegzudenken. Hier kann die künstliche Intelligenz hilfreich und unterstützend sein, um Hilfsbedürftigen, die anderweitig keinen Zugang zu einer psychiatrischen Versorgung bekämen, zu erreichen. Sie kann in Form von Screenings massenhaft Daten verarbeiten und so gefährdete Menschen identifizieren und eine Unterstützung durch das Helfersystem ermöglichen. Für eine derartige Nutzung sollte sich die psychiatrische Fachgemeinschaft intensiv einbringen, um qualitative, ethische und rechtliche Standards zu erarbeiten. Künstliche Intelligenz sei es in Form von Robotik oder maschninellem Lernen kann immer nur als Werkzeug niemals als Ersatz fungieren.

1 Künstliche sozial-emotionale Intelligenz – eine Einleitung

- Ist es besser, mit einem Roboter zusammen zu sein, als Einsamkeit zu erleiden?
- Kann ein Roboter mit künstlicher Intelligenz auch selbständige Werteentscheidungen treffen?
- Kann man zu einem Roboter eine emotionale Beziehung aufbauen, die dieser erwidert?
- Kann ein Roboter emotional sein? Sich verlieben? Heimtückisch werden?
- Kann ein Roboter dem Menschen (gelernte) Signale der Verliebtheit oder Wut senden und damit vortäuschen, verliebt oder wütend zu sein?
- Roboter sind wie Krücken. Können und wollen wir mit emotionalen Krücken leben?
- Ist eine emotionale Entwicklung des Kindes mit Hilfe von Robotern besser, als eine totale Vernachlässigung durch menschliche Bezugspersonen?

Unsere These lautet: Roboter können keine echten Emotionen generieren. Alles was wir ihnen programmieren (Freundlichkeit, Höflichkeit), sind nur rudimentäre Surrogate für Emotionen. Roboter können emotional erscheinen, weil sie programmierte Gesten einsetzen, die wir als emotional interpretieren. Wir selbst unterstellen der berechnenden Apparatur ein Gefühl anhand ihrer Äußerungen. Computer können nur folgerichtig reagieren. Wir können ihnen zwar Zufälligkeit einprogrammieren, aber dann erfüllen sie ihre Funktion nicht in voraussagbarer Weise. Sie werden zu unvorhersehbaren Aktionen bloß folgerichtig angeleitet. Emotionale Bewertungen und daraus abgeleitete Werteentscheidungen sind computertechnisch nicht möglich - weil wir sie selbst noch zu wenig verstehen und daher nicht in eine Software einplanen können. Können wir diese Aussage – auch bei allen technischen Fortschritten - so aufrechterhalten?

Künstliche Intelligenz ist niemals spontan oder plötzlich emotional. Alles, was ein Roboter mit künstlicher Intelligenz leisten kann, ist in den ihm vorgegebenen Zielen und Verhaltensparadigmen enthalten. Auch wenn diese künstliche Intelligenz an der Umwelt lernt, wird sie nicht neue Entscheidungskategorien bilden,

außer diese sind ihr einprogrammiert. Programmierungen, die den Computer für sich selbst Teil-Ziele generieren lassen, gehen immer in ihren Grundzügen auf den Programmierer zurück und unterstehen einem vorgegebenen übergeordneten Ziel.

Roboter, die wir mit künstlicher Intelligenz ausstatten, führen kein Eigenleben. Intersubjektive Passung, Abstimmung, Einstimmung, Erfassen von Atmosphäre gelingen dem Roboter nicht spontan. Empathie, Resonanz und Kreativität gelingen der künstlichen sozio-emotionalen Intelligenz nicht, weil wir selbst diese Phänomene noch nicht technisch verstanden haben und in Programmiersprache umsetzen können. Ist das so richtig? Oder stemmt sich hier das Menschliche gegen den unausweichlichen Fortschritt und gibt sich der Lächerlichkeit preis, wie die Bedenkenträger, die vor den gesundheitlichen Gefahren der dampfbetriebenen Lokomotiven und den Zügen für die Passagiere warnten, weil der Mensch diesen Geschwindigkeiten nicht körperlich gewachsen sei? Wir versuchen eine Bestandsaufnahme.

2 Künstliche sozial-emotionale Intelligenz – kinder- und jugendpsychiatrische Perspektiven

Sozial intelligente Roboter sollten in der Lage sein, die Anwesenheit von Menschen zu erkennen, sie in eine soziale Interaktion einzubinden, ihren eigenen synthetischen Gefühlszustand auszudrücken und den ihres Gegenübers interpretieren zu können. Gleichzeitig sollten sie in einer natürlichen menschlichen Art und Weise kommunizieren und dabei auch non-verbale Ausdrucksformen wie Gestik, Körperhaltung, Mimik oder andere intuitive Ausdrucksformen finden (Cominelli et al., 2018). Noch ist diese Beschreibung eine Vision. „Sozial intelligente" Roboter werden zwar bereits in medizinisch-sozialen Bereichen eingesetzt, jedoch mit deutlich weniger differenzierten sozial-emotionalen Fähigkeiten. Auch wenn die technische Umsetzung künstlicher sozial-emotionaler Intelligenz derzeit noch „science fiction" ist, schreitet die Entwicklung im Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) in beeindruckenden Forschungsarbeiten voran.

Bereits jetzt werden vor allem in der Pflege von alten und dementen Menschen Roboter eingesetzt. Eine Vorreiterrolle nimmt hierbei Japan ein, wo ältere Menschen, z. B. um in ihrem eigenen zu Hause weiter leben zu können, Hilfsroboter haben, die im Alltag helfen oder aber Gesellschaft leisten und so vor Vereinsamung schützen sollen. Die in vielen Ländern immer älter werdende Bevölkerung,

der massive Mangel an Pflegekräften, die Vorteile der ständigen Einsetzbarkeit von Robotern bei Tag und Nacht sowie die gleichbleibende Qualität der Dienstleistung lassen den Bedarf an Hilfsroboter stetig steigen. In den USA und Japan werden Hilfsroboter bislang am häufigsten eingesetzt, für das Jahr 2035 wird für die japanische Dienstleistungs-Roboter-Industrie ein Umsatz von ca. 45 Mrd. $ vorausgesagt (Maalouf et al., 2018). Die vor zwanzig Jahren aufgestellte Prognose, in der Zukunft würde das Pflegepersonal vollständig durch Roboter ersetzt und eine Patient-Pfleger-Beziehung ein Relikt sein (Peck, 1992) hat sich bislang so nicht bestätigt, der tatsächliche Einsatz von Hilfsroboter in der Pflege ist jedoch Realität geworden und wird sich in Anbetracht der sich stetig verschärfenden Ursachen noch weiter verbreiten.

In der Betreuung von hospitalisierten Kindern werden bereits haustier-ähnliche Roboter eingesetzt, um den jungen Patient*innen während der besuchsfreien Intervalle die Zeit zu erleichtern durch Spiel und Unterhaltung.

In den Bereichen Pflege und Versorgung von Alten und Kindern wird der Einsatz von Robotern scheinbar unkritisch gesehen, sondern als eine gute Alternative im Gegensatz zu einem „Nichts“ an Fürsorge. Im Gegenteil wird der Wunsch nach noch sozial intelligenteren Robotern, die sich erinnern und Gefühle ausdrücken können geäußert.

Im Bereich der Kinder- und Jugendpsychiatrie gibt es Untersuchungen von Roboter-Einsätzen bei Kindern mit einer Autismus-Spektrum-Störung. Hierbei werden drei unterschiedliche Roboter-Typen unterschieden: anthropomorphe Roboter, die dem Menschen so gut wie möglich ähneln sollen und damit einen Ersatz für Bezugspersonen darstellen sollen, nicht-anthropomorphe Typen, die Tieren ähneln und im Sinne eines Haustieres oder Freundes das Verantwortungsbewusstsein trainieren sollen und zuletzt die Gruppe der nicht-biomimetischen Roboter, die keinem biologischen Wesen entsprechen und die kindliche Phantasiefähigkeit bereichern soll. Kinder mit einer Autismus-Spektrum-Störung zeigten die meiste Affinität zu den nicht-biomimetischen Robotern (Cabibihan et al., 2013).

Ob eine Behandlung autistischer Kinder, denen es krankheitsbedingt gerade an zwischenmenschlichen interaktiven und kommunikativen Fähigkeiten fehlt, mittels nicht Lebewesen-ähnlichen Robotern das Richtige ist, ist aus psychotherapeutischer Sicht sehr zu hinterfragen. Es gibt schon seit einiger Zeit großes interdisziplinäres wissenschaftliches Interesse herauszufinden, was gesunden und psychisch auffälligen Kindern an Roboter-Eigenschaften gefällt und was nicht

(Woods, 2006). Dabei wirken die genannten Bestrebungen, die Roboter einerseits durchaus menschlich, andererseits jedoch nicht allzu menschlich aussehen zu lassen (um die autistischen Kinder nicht zu erschrecken) und dabei den Kindern jederzeit deutlich machen zu wollen, dass es sich um Maschinen handelt, reichlich umständlich.

Ist denn das Angebot einer maschinenartigen Beziehung nicht eine Perpetuierung der Symptomatik bei den Patienten? Wird auf diese Weise die Beziehung zu Menschen schließlich verbessert? Wieso leistet das ein menschlicher Therapeut nicht auch bzw. nicht noch viel besser?

Exkurs: Kritisch hinterfragt werden sollten – bei aller Befürwortung von Privat-Public-Partnership - auch die Verbindungen zwischen der Wissenschaft und Industrie in diesem Bereich. Unter dem Deckmantel der therapeutischen Forschung entsteht ein Wissen, welches sich nicht primär der Hilfe verpflichtet fühlt, sondern profitabel in die Marketing-Strategien einer neuen Konsumwelle einpflegen ließe. Roboter als bessere Spielkameraden oder Erzieher. Es wäre nicht das erste Mal, dass künstliche Produkte propagiert werden, um Jahre und viel Geld später herauszufinden, dass das „natürliche Produkt“ eigentlich viel besser ist.

Während der Einsatz von Robotern im psychologisch-psychiatrischen Bereich noch nicht sehr verbreitet ist, ist hier die künstliche Intelligenz in Form von maschinellem Lernen (ML) allgemein gebräuchlich. Bereits 10.000 Apps zum Thema psychische Gesundheit stehen auf dem Markt zum Download zur Verfügung (Cabibihan et al., 2013). Vom Stimmungstracking für affektiv beeinträchtigte Menschen, über Ablenkungsapps für Menschen mit Halluzinationen bei Schizophrenie, SOS-Funktionen bei akuter Suizidalität bis hin zu Achtsamkeitsübungen ist alles dabei. Umfragen zeigen starkes Interesse und eine hohe Anwendungsbereitschaft unter den Patient*innen.

Hier ist eine gesellschaftliche und fachliche Diskussion, ob wir diesen Weg gehen wollen, obsolet: wir befinden uns bereits mittendrin in dieser „neuen“ Entwicklung und die (Kinder- und Jugend-)Psychiatrie sollte sich intensiv einbringen, um die Qualität und Anwendung nach bestmöglichen medizinisch-therapeutischen Standards mitzugestalten.

Eine Umfrage unter 791 Psychiater*innen aus 22 Ländern weltweit ergab eine deutlich vorherrschende Skepsis gegenüber künstlicher Intelligenz (KI) und ihre negativen Auswirkungen auf die Patient-Therapeuten-Interaktion: die fehlende Empathie und eine mangelhafte therapeutische Beziehung. Dennoch zeigten sich

die Befragten offen für eine „Kooperation“ zwischen Behandler*in und KI. Als durchaus hilfreich wurde die KI eingeschätzt, wenn sie zeitaufwändige und eintönige Aufgaben übernehmen und so den menschlichen Therapeuten zu entlasten könnte (Blease et al., 2019).

Vor dem Hintergrund der in vielen Ländern der Welt bestehenden Knappheit von Psychiater*innen, aber größerer Verfügbarkeit von Smartphones ist die Nutzung von gesundheitsbezogenen Apps zur Verbesserung der psychischen Gesundheit eine notwendige, hilfreiche und zunehmend beliebtere Unterstützung.

In Europa ist die Schweiz mit 51,7 Psychiater*innen /100.000 Einwohnern das Land, mit der höchsten Psychiaterdichte, Deutschland befindet sich mit 27,4 noch vor z. B. Italien mit 17,4 Psychiater*innen/100.000 Einwohnern. Anders ist die Situation in den USA mit 11 und China mit 2,2 Psychiater*innen/100.000 Einwohnern. Etwa 45% der Weltbevölkerung hat auf weniger als 1 Psychiater*innen/100.000 Einwohner Zugriff. Dabei haben es die Entwicklungsländer besonders schwer, eine psychiatrisch-psychotherapeutische Versorgung aufzustellen (Ćosić et al., 2020). Da rund 50% der Weltbevölkerung über ein Smartphone verfügt, ist die Bereitschaft für die Nutzung von Apps oder online-Anwendungen zum Thema psychische Gesundheit sehr nachvollziehbar und wird vor dem Hintergrund der Belastungen für die Menschheit durch Kriege, Klimawandel-bedingten Umweltkatastrophen, sozialer Spaltung und vermutlich auch wiederholt auftretender Pandemien an enormer Bedeutung gewinnen.

Derzeit werden Benutzerdaten aus dem Internet, mobilen Gesundheitsapps, sozialen Medien, Sprachaufzeichnungen, Schriftdokumenten, Forschungsdatenbanken, biologischen Daten und elektronischen medizinischen Daten gesammelt und durch künstlich intelligente maschinelle Lernmodelle nach psychiatrischen Risikofaktoren, Schutzfaktoren und zu identifizierenden Mustern verarbeitet. Diese gewonnen Erkenntnisse können dann in die unterschiedlichen Versorgungsstrukturen einfließen (Fonseka et al., 2019).

Bei einem Selbstversuch mit einigen exemplarischen Apps mit künstlichen Konversations-Agenten (Chatbots) wird das Dilemma sofort deutlich: Die für den IT-Laien beeindruckend konzipierten Anwendungen geben vor, ein wirkliches Gegenüber zu sein. Es ist nur schwer zu ertragen, dass „das“, was einem antwortet, nicht ein echtes Gegenüber sein soll, was auf Basis einer wohlmeinenden therapeutischen Intention reagiert. Die Verzweiflung und Einsamkeit, die offenbar dazu führt, auf diese Form der Kommunikation zurückgreifen zu müssen, ist

berührend und erschreckend zugleich. Sie zeigt die enorme Bedürftigkeit und alarmiert, diese Menschen besonders schützen zu wollen und zu müssen. Diese Alarmbereitschaft wird dann auch sofort aktiviert, wenn die Antwort des Chatbots auf sich warten lässt, weil der Nutzer erst einmal bestimmte Daten eingeben (und preisgeben) muss, oder wenn dem Nutzer sogleich eine Psychotherapiestunde mit einem „echten" Therapeuten für rund 70€ angeboten wird. Auf die Daten und das Geld dieser hilfesuchenden Nutzer können es unseriöse Anbieter abgesehen haben.

Für viele Menschen, insbesondere Erwachsene, gibt es nicht mehr die „üblichen" Strukturen aus Familie, Freunden, Ausbildung und Beruf, sowie Freizeitstrukturen, die Ansprechpartner sein können in Notsituationen und die weiterhelfen oder -verweisen können. Die *lockdown*-Phase im Rahmen der COVID-19-Pandemie hat auch den sonst sozial gut eingebetteten Menschen und besonders Kindern und Jugendlichen einen Eindruck verschafft, was soziale Isolation bedeuten kann: wenn das Handy der einzige Kontakt nach Außen wird und der Konversationspartner aus künstlicher Intelligenz geschaffen ist.

Um der Verantwortung, die den mobilen Anwendungen zugetragen werden, gerecht zu werden, müssen die Aspekte des Datenschutzes, der Korrektheit der Alogrithmen auf denen die Anwendungen basieren, der Patientensicherheit und der legalen Verantwortung klar geregelt und überprüft werden.

Eine mit dem Einsatz von KI verbundene Hoffnung, die Psychiatrie fehlerfrei und präziser werden zu lassen, erscheint vor dem Hintergrund von knapp 800.000 Suiziden weltweit pro Jahr (WHO, 2019) und einer weltweiten Inzidenz von ca. 10,7% für psychische Erkrankungen (Our world in Data, 2017) nachvollziehbar. In mehrenden Studien wird die Treffsicherheit der KI bei der Vorhersage des suizidalen Risikos von Patienten mit ca. 80% beworben, wobei unerwähnt bleibt, wie hoch sie im Vergleich bei Psychiater*innen liegt. Die Qualität des Maschinellen Lernens hängt jedoch maßgeblich von dessen Skalierung ab, das heißt davon, wie viele und welche Daten der Maschine zum „Lernen" zur Verfügung gestellt werden. Ist die Skalierung mangelhaft, kann es zu Fehlern mit fatalen Konsequenzen kommen. Dies muss den Entwicklern, Anbietern und Anwendern bewusst sein. Darauf müssen alle Beteiligten eingestellt sein und diesen Fakt umfassend rechtlich, ethisch und medizinisch diskutieren. Künstliche Intelligenz in Form von maschinellem Lernen wird im 1:1-Vergleich mit der menschlichen Intelligenz immer unterlegen sein. Ihre Überlegenheit besteht bei der massenhaften Verarbeitung von Daten.

Sie kann in der Psychiatrie nützlich eingesetzt werden, um Menschen mit einem psychiatrischen Versorgungsbedarf herauszufiltern, die sonst „übersehen“ worden wären, und diesen einen Zugang zur Versorgung zu ermöglichen, z. B. in Form eines Screenings. Für die weitere inhaltliche medizinisch-therapeutischen Arbeit bleibt der Mensch unverzichtbar.

3 Robotik und Apparatur

Künstliche Intelligenz ist etwas vom Menschen Gemachtes, also ist jede Art von Roboter eine Maschine. Computerisiertes Wissen, Lernalgorithmen und lernende Netzwerke bleiben immer Turing-Maschinen. Sie gehen nie über diese hinaus.

Denn auch die Lernalgorithmen sind von uns einprogrammiert, und das Lernumfeld der selbstlernenden Systeme, die Sprachdaten oder Erkenntnisdaten, die dem System präsentiert werden, sind eine vom Menschen vorgegebene Auswahl. Gerade wenn in den Lernalgorithmen und den wissensbasierten Reaktionen und Handlungen einer solchen Maschine Zufälligkeit und Unvorhersehbarkeit einprogrammiert werden, ist dies vom Menschen gemacht und befreit den Urheber nicht von seiner Verantwortung! Eine solche Maschine wird dann gefährlich, weil ihre Aktionen unvorhersehbar werden. Diese Unvorhersehbarkeit ist aber nicht Ausdruck einer Intelligenz der Maschine, sondern das Ergebnis von Programmierfehlern oder absichtlichen Machenschaften des Programmierers.

Grundsätzlich sollten alle Formen von künstlicher Intelligenz als erweiterte Formen von *Werkzeugen* angesehen werden. In den mathematischen Formulierungen und Regelkreisen werden jene Ziele zum Ausdruck kommen, die ein*eine Programmierer*in ihnen eingegeben hat. Wir müssen also zwischen der Intelligenz ein vorgegebenes Ziel zu erreichen und der *Wertsetzung*, die selbst ein menschenbezogenes Handlungs-Ziel hervorbringt, unterscheiden. Auch intelligente Systeme, die neue Handlungsschritte erlernen können und dabei neue Teilziele ihrer Aktionen definieren (anhand von Umweltbedingungen), werden niemals in einem ethischen Sinne neue Wertsetzungen vornehmen. Diese ethischen oder moralischen Wertsetzungen, die der künstlichen Intelligenz vorgegeben werden, sind von Programmierer*innen dem System eingefügt. Daher sollte die *Verantwortung* für Produkte der künstlichen Intelligenz auch immer bei den Erzeugern bleiben! Alle großen IT-Riesen möchten diese Verantwortung abstreiten, da sie ja angeblich nicht wissen können, wohin sich ein intelligentes System entwickeln könnte. Aber

Werkzeug bleibt Werkzeug und ist ein Erzeugnis, dessen ethische Zielsetzungen auf den Programmierer zurückgehen!

Exkurs: Wenn ein*eine Programmierer*in einem System künstlicher Intelligenz als Hauptziel den „Frieden in der Welt“ vorgäbe, könnte dieses System zum Schluss kommen, dass dies mit Menschen nicht möglich ist, und sich systematisch an die Beseitigung von Menschen machen. Aber dieser – Entsetzen auslösende – Fehler wäre ein Fehler des*der Programmierer*in und nicht des KI-Systems! Die künstliche Intelligenz kann logische Denkschritte augmentieren, aber die Dummheit oder Unbedachtheit in den Zielsetzungen, die Unmoral oder das Böse, das der Programmierer dem System eingibt, kann durch KI nicht „weggedacht“ werden.

Handlungsintelligenz, Ethik und Wertsetzungen müssen immer unterschieden werden. Und die Verantwortung darf niemals dem KI-Erzeuger erlassen oder genommen werden. Allen Vernebelungstaktiken und Täuschungsversuchen der IT-Industrie zum Trotz, die versucht, mit ihren Produkten maximale Geschäfte zu machen, ohne für etwaige Folgen einstehen zu müssen. Das müssen wir für die Zukunft verhindern.

4 Gesellschaftliche Folgen des Einsatzes von Robotern in Helfersystemen

Auch wenn es deutlich geworden ist, dass der Einsatz künstlicher Intelligenz bei der Versorgung psychisch kranker Erwachsener und Kindern und Jugendlicher bereits in vollem Gange ist und, gerade durch die Corona-Pandemie noch einmal mehr vorangetrieben werden wird, müssen wir uns neben einer verantwortungsvollen Beteiligung auch weiterhin kritisch mit dem Einsatz von KI auseinander setzen. Wir können unsere Augen nicht davor verschließen, dass gerade Menschengruppen mit besonders hoher Belastung wie z. B. Migranten und Flüchtlinge, Inhaftierte, indigene Bevölkerungsgruppen (Fonseka et al., 2019) und arme Länder, die unter kriegerischen Auseinandersetzungen und den klimawandel-bedingten Umweltkatastrophen leiden, eine besonders geringe Etablierung von psychiatrischen Hilfen aufzuweisen haben.

Wenn wir festhalten, dass der Mensch in Kooperation mit der Maschine die beste medizinisch-therapeutische Versorgung darstellt, dann sollte es auch weiterhin ein Ziel sein, diese Versorgung so vielen Menschen wie möglich zur Verfügung zu stel-

len. Es darf nicht zu einem weiteren Merkmal der Zwei-Klassen-Medizin kommen: der*diejenige der*die gerade mal ein Smartphone zur Verfügung hat, dem*der steht, womöglich nur unter Preisgabe seiner*ihrer Daten, lediglich der Chatbot zur Verfügung, und der*diejenige der*die über Mittel verfügt kann sich den „Luxus“ eines*einer menschlichen Arztes*Ärztin und damit eine wahre Begegnung eine echte Resonanz leisten. Denn selbst wenn die Algorithmen hervorragend entwickelt sind, ist doch die zwischenmenschliche Begegnung, die Empathie, die menschliche Aufmerksamkeit, das Gefühl, gehört, verstanden, und versorgt zu werden einzigartig und lebensnotwendig.

Die Vorstellung, gerade all jenen von Trauma und Armut strapazierten Menschen nichts außer einer Maschine entgegenzubringen, wirkt nicht nur zutiefst unmenschlich, sondern auch grausam und egoistisch.

Wenn wir als Beispiel die geflüchteten Kinder, Jugendlichen und Familien nehmen, für welche wir aktuell beim Regierungspräsidium eine Sprechstunde im Ankunftszentrum des Patrick-Henry-Village beantragt haben, um zumindest eine basale kinder- und jugendpsychiatrische Versorgung anbieten zu können (Al-Ameery et al., 2012). Viele von ihnen haben auf der Flucht über das Mittelmeer ihr Leben riskiert, Freunde und Verwandte, geliebte Menschen, Kinder und Erwachsene unter traumatischen Bedingungen sterben sehen: Wenn wir diesen Menschen hierzulande nichts entgegen bringen werden als eine App, um das Suizidrisko zu berechnen oder Tipps gegen eine depressive Stimmung zu geben, dann wird das ein Armutszeugnis westlicher Mitmenschlichkeit sein. Dann werden diese Menschen um die möglicherweise einzige Begegnung, die ihnen Empathie, Zuwendung und Heilung bringen kann, betrogen. Die Kette der Ausgrenzung, begonnen mit Frontex und Ankerzentren, würde dann durch Chatbots fortgesetzt werden.

Wenn wir uns den Leidenden nicht mehr menschlich zuwenden, was macht es dann auch mit uns, die sich abwenden?

Werden die Psychiater*innen zu „bloßen“ Datenverwaltern, die auf Ergebnisse der mobilen Anwendungen reagieren? Ein Einschreiten wäre dann nur bei akuter Gefahr oder Fehlern notwendig – und auch das ginge alles ohne Patientenkontakt. Aber wer weiß? Vielleicht entstünde auch ein neuer medizinischer Fachbereich, die psychiatrische Robotologie. So wie einst die Radiologie aus der Entwicklung neuer technischer Möglichkeiten entstanden ist. Und wer kann sich heutige Medizin ohne Radiologie vorstellen?

Über allem steht jedoch die Koexistenz, nicht das binäre „entweder oder", sondern das sich gegenseitig ergänzende.

5 Robotik und Psychotherapie – Gedanken zur Intersubjektivität

Wenn man den Versuch unternimmt, durch künstliche Antwortsysteme psychotherapeutische Situationen zu simulieren, mag das an der Oberfläche des Sprachaustausches sogar funktionieren. Die Maschine hat an vielen Narrativen gelernt, wie sie antworten sollte und gibt dem Patienten, der fragt und erzählt, das Gefühl, eine sinnvolle Antwort zu bekommen. Turing (1950) hat ja in seinem berühmten Aufsatz festgehalten, dass, wenn es einer Maschine gelingt, den Menschen glauben zu lassen, mit einem Menschen zu kommunizieren, dann könne man diese eine intelligente Maschine nennen. Aber die Maschine imitiert nur menschliches Verhalten. Sie täuscht Intelligenz nur vor. Der Philosoph Searle (1980) hat dies in seinem Gedankenexperiment deutlich aufgezeigt, in dem er bittet, sich vorzustellen, dass Menschen durch einen Türspalt kommunizieren, ohne sich zu kennen und zu sehen. Auf der einen Seite stellen Menschen, die die chinesische Sprache beherrschen, schriftliche Fragen, die sie in das Zimmer mit Symbolen hineinreichen. Im Zimmer sitzt ein Beantworter, der nur syntaktische Regeln kennt, aber den Text nicht semantisch entschlüsseln kann, weil er die chinesische Sprache gar nicht kennt. Trotzdem kann so ein Jemand Antworten, die vermeintlich stimmen, produzieren, wenn er sich streng an die Syntax hält. Die Menschen vor der Türe können also glauben, dass jemand mit chinesischen Kenntnissen ihre Fragen beantwortet hat. Diese Unterscheidung zwischen Denkimitationen und echtem Denken zeigt auf, dass die Turing´sche Antwortmaschine den Menschen nur täuscht, wenn sie ihm menschliche Eigenschaften vermittelt.

Die Kommunikation mit einer Maschine kann für den Moment im Patienten sogar ein angenehmes Gefühl auslösen, er fühlt sich verstanden und beantwortet. Die Maschine hört ihm zu und nimmt sein Anliegen auf. Aber die Maschine hat nichts verstanden. Sie hat nur nach einer geeigneten Antwort gesucht. Der Patient bleibt also in seinen Konflikten, in seiner Unklarheit persönlicher Ziele gefangen. Keine Maschine kann heute die Funktionalität von Symptomen oder psychischen Störungen anhand der Lebenssituation und der Biographie erkennen und daraus Folgerungen ableiten – ein funktioneller Kontextualismus ist ihr daher fremd. Keine Maschine kann heute hermeneutisch das Verhalten des Patienten in

seinen Gegensätzen von Reden und Handeln durchschauen, neue Lösungswege ausmachen und durch geeignete Antworten den Patienten auf Widersprüche seines Denkens und Handelns hinweisen. Der Dialog mit dem Roboter bleibt an der Oberfläche, kann sogar momentan angenehm, aber niemals erkenntnisorientiert hilfreich sein. Der Patient mag sich entlastet fühlen und daraus selbst Kräfte entwickeln. Er bleibt aber genau genommen mit sich allein, und wird durch eine Sprachapparatur hinsichtlich einer sinnerfüllten Zweisamkeit getäuscht.

Denn Psychotherapie ist ja mehr als nur Sprachaustausch. Die nonverbalen Komponenten der Interaktion, das affektive Attunement, die mimischen Dialoge, der intersubjektive Verbindungsaufbau und Austausch bleiben aus. Es gibt keine gemeinsame emotionale Erfahrung, keinen sinngerichteten emotionalen Dialog.

Das Problem liegt in der Komplexität der zwischenmenschlichen Interaktion. Das Errichten eines gemeinsamen Bedeutungszusammenhangs, das Hin und Her von Erwartungen und Annahmen, die Fähigkeit zur Einfühlung und der Austausch sozialer Perspektiven, schließlich das wechselseitige Beantworten offener Fragen in einem Sinnkontext können von einem Maschinensystem nicht geleistet werden. Eine Apparatur mit künstlicher Intelligenz ist zur Intersubjektivität nicht fähig. Sie bleibt immer Objekt. Künstliche Intelligenz bleibt immer ein erzeugtes Produkt. Der Roboter kann also nur objekthafte, oberflächliche – vorwiegend instrumentelle – Beziehungen ersetzen, niemals aber die Tiefe einer menschlichen Begegnung erreichen. Die intersubjektive Kommunikation ist eine menschliche Qualität.

Auch im Bereich der *Sexualität* findet die Robotik Einzug. In Ermangelung eines Partners werden sexuelle Bedürfnisse am Surrogat ausgelebt. Der Aspekt, dass ein Roboter unverletzlich ist, kein biologisches oder psychologisches Schmerzempfinden aufweist, kein Traumagedächtnis besitzt, keine Kränkbarkeit kennt, auch Demütigungen stoisch ertragen kann - könnte bei bestimmten Menschen sadistische und destruktive Anteile fördern bzw. provozieren. Der Kontakt zur Robotermaschine könnte bösartige Instinkte wecken, infame Spiele und zerstörerische Tendenzen in die Tat umzusetzen. Nun könnte man meinen, diese Anteile seien an einem Roboter besser ausgelebt als an einem anderen Menschen. Aber könnte dieser Schritt von der geheimen Idee zur Tat nicht eher einer Anleitung entsprechen? Besteht nicht gerade die Gefahr, dass das Bedürfnis entsteht, sich nun einem menschlichen Objekt auf solche Weise zuzuwenden? In der Therapie sollte es jedoch darum gehen, Sadismus und Destruktion unter Kontrolle zu bringen und bestenfalls aufzulösen, und nicht an einem menschlichen Surrogat auszuleben.

Jedes menschliche Subjekt entwickelt eine Theorie darüber, was das andere Subjekt ausmacht (wie es „tickt“) und wie man selbst intentional funktioniert. Das Verhalten des anderen wird als Folge von Plänen und Absichten im Sinne eines subjektiven Handelns angesehen und damit ein Verständnis für das andere Subjekt entwickelt, indem es darum geht, was der andere wünscht, hofft, ersehnt, ablehnt oder vielleicht vortäuscht (Resch & Freyberger, 2009). *Mentalisierung* ist der dafür gängige Begriff geworden. Mentalisierung ist mehr als nur eine kognitive Leistung. Sie beginnt schon beim Säugling als unbewusste und implizite Wahrnehmungs- und Gedächtnisfunktion. Durch Mentalisierung wird dem eigenen Erleben und Verhalten auch ein Sinn verliehen. Unter der *Theory of Mind* verstehen wir jene soziale Perspektivenübernahme, die etwa mit dem Beginn des vierten Lebensjahres beim Kind sich auszubilden beginnt. Ab diesem Zeitpunkt ist das Kind in der Lage, die subjektive Verfassung anderer in seine Erlebnis- und Handlungswelt mit einbeziehen zu können und explizit die Meinungen und Haltungen der anderen von den eigenen Sichtweisen zu unterscheiden (Resch & Freyberger, 2009). Der Mentalisierungsprozess beginnt von Geburt an. Er beginnt mit dem emotionalen Dialog von Mutter und Kind (oder ebenso Vater und Kind). Die grundsätzlichen Gefühlserfahrungen, die beiden Interaktionspartnern in gemeinsamen Handlungen zuteilwerden, werden in der Eltern-Kind-Interaktion wechselseitig ausgebildet. Daraus entstehen implizite Wissensbestände für Beziehungen, die den Umgang mit anderen prädestinieren. Es werden also (unbewusste) Verhaltensvoraussetzungen geschaffen, wie man Freude teilt, Aufmerksamkeit erregt, Zurückweisung vermeiden kann oder einen verlorenen Kontakt wieder aufnimmt. Solche primär unbewussten strukturellen Schemata zwischenmenschlicher Interaktionen bilden schließlich die Voraussetzung für bewusste Schemata der Zwischenmenschlichkeit. Wechselseitige Resonanz und Empathie sind keine programmierbaren Computereigenschaften. Der Psychotherapieroboter ist dazu nicht fähig. Der intersubjektive Austausch fehlt.

Wenn wir als Gesellschaft vereinsamten und ausgegrenzten Menschen Roboter als helfende Surrogate anbieten, halten wir sie in ihrer gesellschaftlichen Marginalisierung gefangen!

6 Robotik und Psychotherapie – ein Fazit

Abschließend kann festgehalten werden, dass die emotionale Robotik in der Therapie bereits erste Einsätze gefunden hat, jedoch noch am Anfang steht. An diesem Punkt braucht es eine intensive Debatte über tatsächliche Vorteile und mögliche Nachteile von emotionalen Robotern in der Kinder- und Jugendpsychiatrie und -psychotherapie, sowie eine kritische Beleuchtung der Rolle der Industrie und herstellenden Branche. Die künstliche Intelligenz in Form von maschinellem Lernen ist bereits fest etabliert und weit verbreitet in ihrer Anwendung. Hier ist es die Aufgabe der psychiatrischen Fachgemeinschaft, für ethische und medizinisch-qualitative Standards zu sorgen. Die Rolle der künstlichen Intelligenz im diagnostischen Bereich sollte auch nicht unterschätzt werden. Spracherkennende Systeme könnten Therapeuten in ihrer Arbeit unterstützen. Ja – Robotik kann ein hilfreiches Werkzeug sein. Nicht mehr und nicht weniger. Auch der Einsatz virtueller Realität mit künstlicher Intelligenz in Diagnostik und Therapie bereichert unser Repertoire wie die Videoaufzeichnungen, die eine verfeinerte Diagnostik durch die Therapeuten erlauben.

Die Nutzung künstlicher Intelligenz in der Psychiatrie sollte aber nur additiv oder überbrückend erfolgen. Es sollte nicht der Versuch unternommen werden, den Mangel an Psychiater*innen, Therapeut*innen, etc. durch KI grundsätzlich beheben zu wollen. Eine Augmentation in der psychiatrischen/psychotherapeutischen Versorgung weltweit kann nur durch eine vermehrte Investition in die psychosozialen Versorgungsstrukturen und die Ausbildung von Fachpersonal erreicht werden, nicht durch deren Abwesenheit oder Ersatz durch künstliche Intelligenz.

Literaturverzeichnis

Al-Ameery I, Brockman D, Helle N et al. Notfälle in der Kinder- und Jugendpsychiatrie und -psychosomatik. Pädiatrie Up2date 2012; 7(01): 75–93. https://doi.org/10.1055/s-0032-1306688

Blease C, Locher C, Leon-Carlyle M et al. Artificial intelligence and the future of psychiatry: Qualitative findings from a global physician survey. Digital Health 2020; 6:1–18. https://doi.org/10.1177/2055207620968355

Cabibihan JJ, Javed H, Ang Jr. M et al. Why robots? A survey on the roles and benefits of social robots in the therapy of children with autism. International Journal of Social Robotics 2013; 5(4):593–618. https://doi.org/10.1007/s12369-013-0202-2

Cominelli L, Mazzei D, De Rossi DE. SEAI: Social Emotional Artificial Intelligence Based on Damasio's Theory of Mind. Frontiers in Robotics and AI 2018; 5(6):1–20. https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00006

Ćosić K, Popović S, Šarlija M et al. Impact of human disasters and covid-19 pandemic on mental health:potential of digital psychiatry. Psychiatria Danubina 2020; 32(1): 25–31. https://doi.org/10.24869/psyd.2020.25

Fonseka TM, Bhat V, Kennedy SH. The utility of artificial intelligence in suicide risk prediction and the management of suicidal behaviors. Australian New Zealand Journal of Psychiatry 2019; 53(10): 954–964. https://doi.org/10.1177/0004867419864428

Maalouf N, Sidaoui A, Elhajj IH et al. Robotics in Nursing: A Scoping Review. Journal of Nursing Scholarship 2018; 50(6): 590–600. https://doi.org/10.1111/jnu.12424

Our world in Data 2017, https://ourworldindata.org/mental-health

Peck ML. The future of nursing in a technological age: Computers, robots, and TLC. Journal of Holistic Nursing 1992; 10(2): 183–191, 1992

Resch F, Freyberger H. Struktur und Identität. In: Fegert JM, Streeck-Fischer A, Freyberger H (eds) Adoleszenzpsychiatrie. Psychiatrie und Psychotherapie der Adoleszenz und des jungen Erwachsenenalters. Stuttgart: Schattauer; 2009; 105–111.

Searle JR. Mind, Brains & Science. Cambridge MA: Harvard University Press; 1984.

Turing AM. Computing machinery & intelligence. Mind 1950; 59(236): 433–460.

WHO 2019. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/suicide

Woods S. Exploring the design space of robots: Children's perspectives. Interacting with Computers 2006; 18(6): 1390–1418. https://doi.org/10.1016/j.intcom.2006.05.001

Über die Autoren

Ines Al-Ameery-Brosche arbeitet als Oberärztin der Ambulanz und des Tageszentrums in der Kinder- und Jugendpsychiatrie des Uniklinikums Heidelberg. Neben dem Schwerpunkt der interkulturellen Kinder- und Jugendpsychiatrie arbeitet und forscht sie im Bereich der Eltern-Kind-Interaktion und Familientherapie.

Franz Resch hat seit 1993 den Lehrstuhl für Kinder- und Jugendpsychiatrie am Universitätsklinikum Heidelberg inne. Seine wissenschaftliche Ausbildung absolvierte er an der Universität Wien. Bis 2013 war er über 10 Jahre lang Studiendekan der medizinischen Fakultät Heidelberg. Schwerpunkte der Forschungsarbeiten umfassen die Entwicklungspsychopathologie der Adoleszenz, jugendliche Psychosen, selbstverletzende Verhaltensweisen und Störungen der Selbstentwicklung durch Traumatisierung. Ein besonderes Augenmerk gilt derzeit der Funktionalität von Risikoverhaltensweisen und der Anwendung kybernetischer Prinzipien in der Psychotherapie.

Korrespondenzadresse:
Dr. Ines Al-Ameery-Brosche
Prof. Dr. Franz Resch
Klinik für Kinder- und Jugendpsychiatrie
Universitätsklinikums Heidelberg
Blumenstr. 8
69115 Heidelberg, Germany

E-Mail: ines.al-ameery-brosche@med.uni-heidelberg.de
Homepage: https://www.klinikum.uni-heidelberg.de/zentrum-fuer-psychosoziale-medizin-zpm/klinik-fuer-kinder-und-jugendpsychiatrie

Menschliche und künstliche Intelligenz in der Medizin

MAGNUS VON KNEBEL DOEBERITZ

Abteilung für Angewandte Tumorbiologie, Universität Heidelberg

»Es ist ganz wahr, was die Philosophie sagt, dass das Leben rückwärts verstanden werden muss. Aber darüber vergisst man den anderen Satz, dass vorwärts gelebt werden muss.« – Søren Kierkegaard (Die Tagebücher 1834–1855)

Zusammenfassung

Unter dem Begriff der Intelligenz, dem dieses Buch gewidmet ist, versteht man gemeinhin auch die Fähigkeit, aus der Beobachtung von Prozessen und ihren Folgen Rückschlüsse zu ziehen, um Fehler zu vermeiden und Positives zu erlernen. Das, was wir heute unter evidenzbasierter Medizin verstehen, ist nichts anderes, als auf der Basis gemachter Erfahrungen, die sich in publizierten und damit allgemein zugänglichen Daten manifestieren, Rückschlüsse auf das Wesen von Erkrankungen zu ziehen, um daraus logische Ansätze für deren Therapie abzuleiten. Dieser Prozess des wissenschaftlichen Verstehens von Erkrankungen setzt den gerichteten und logischen Umgang mit Information voraus. Dies betrifft sowohl die Informationsgewinnung als auch die Informationsbe- und verwertung. Und gerade in Letzterem liegt oft der Aspekt, der einen guten von einem weniger guten Arzt unterscheidet und für das Schicksal seiner Patienten von immenser Bedeutung sein kann. Das Verständnis der Pathophysiologie einer Erkrankung erlaubt es, Symptome richtig zu deuten, Rückschlüsse auf die Natur der Erkrankung zu ziehen, Voraussagen über den weiteren Krankheitsverlauf zu machen und natürlich auch eine wirksame Therapie zu empfehlen und anzuwenden. Das wesentliche Rohmaterial all dieser Prozesse sind

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24394

Daten: Daten zu den Symptomen, die durch die Erkrankung hervorgerufen werden, Daten zur Anatomie und Physiologie, Daten zu biochemischen Prozessen und pathologischen Veränderungen, die sich makroskopisch oder mikroskopisch manifestieren, Daten zu Umwelteinflüssen, denen der Patient ausgesetzt war, wie beispielsweise Infektionen, bestimmten chemischen oder physikalischen Umweltbedingungen, und nicht zuletzt Daten zur Genetik bzw. zum Genom des Patienten. Daher ist gerade die Medizin in allen ihren Ausprägungen seit alters einem intelligenten Denkprozess unterworfen, in dem eine Vielzahl von Daten erhoben, prozessiert und verarbeitet werden. Und somit reiht sich auch die Medizin im Informationszeitalter in den Prozess des Umbruchs ein, der durch die maschinelle Speicherung und Bearbeitung riesiger Datenmengen auf einmal möglich wurde.

1 Der disruptive Umgang mit Information

Der Umgang mit Information ist den letzten Jahrzehnten in jedem Bereich exponentiell gewachsen und setzt heute völlig neue Denk- und Strukturansätze voraus, damit Menschen auch in der Zukunft mit der zunehmenden Informationsflut sinnvoll umgehen können. Während früher klassisches Wissen im Wesentlichen über das geschriebene und gedruckte Wort vermittelt, weitergeben und erlernt wurde, stehen uns heute unfassbar große Datenbanken zur Verfügung, mit denen wir mit Hilfe von Computern direkt interagieren können und die uns in zahlreichen Situationen des praktischen Lebens jederzeit zur Seite stehen und helfen, uns in der Welt zu orientieren. Als Beispiele seien hier nur die Ablösung von Enzyklopädien, wie dem einstmals so berühmten „Brockhaus“ durch Online-Datenbanken wie Wikipedia und andere genannt. Ebenso ist es heute selbstverständlich geworden, dass man sich durch moderne Navigationssysteme im Straßenverkehr leiten lässt und nicht mehr wie früher vor dem Antritt einer Fahrt in unbekanntes Terrain die entsprechenden Land- und Straßenkarten studiert. Wir können heute mit Menschen in den unterschiedlichsten Sprachen ad hoc kommunizieren, ohne die Sprache noch erlernen zu müssen, in dem wir automatische Übersetzungsprogramme auf Smart phones, Tablets oder Computern nutzen. Ebenso buchen wir heute Reisen und Hotels „online“ und versenden nicht mehr wie noch vor einigen Jahren umständliche Briefe oder Faxe, bevor wir uns auf Reisen begeben. Gleiches gilt für unser Einkaufsverhalten: einen großen Teil unserer Waren können wir heute durch den Versandhandel aus dem Internet beziehen und sind somit nicht mehr auf das

Geschäft vor Ort angewiesen, wenn wir bestimmte Produkte erwerben wollen. Diese neue Welt ist so bequem und angenehm geworden, dass die Unternehmen, die diesen Wandel ermöglicht haben, innerhalb nur weniger Jahre zu den größten und am besten kapitalisierten Unternehmen der Welt herangewachsen sind. So haben die *big five* (Alphabet, Amazon, Facebook, Apple und Microsoft) in den Jahren zwischen 2010 und 2020 alle anderen Unternehmen in Bezug auf ihre Marktkapitalisierung von den vorderen Rängen der Börsenbewertung verdrängt. Allein darin manifestiert sich die Macht dieses Wandels, den die Informationstechnologie für unser aller Leben im letzten Jahrzehnt mit sich gebracht hat.

All diesen Prozessen liegt der intelligente Umgang mit Information zugrunde. Wir wählen auf der Basis der uns zur Verfügung stehenden Informationen Dinge oder Prozesse aus, die wir dann zur Lösung der vor uns stehenden Aufgaben nutzen. Je mehr Informationen uns zur Verfügung stehen, desto komplexer wird naturgemäß auch der Auswahlprozess. So ist es auch nicht verwunderlich, dass wir zur Bewältigung dieser Informationen zunehmend mehr maschinelle Hilfe nutzen. Denken wir nur an den Straßenverkehr, durch den wir uns lieber durch Google Maps leiten lassen, als uns auf unser eigenes Kartenstudium zu verlassen. Aber ebenso nutzen auch Unternehmen, die uns diese Informationen zur Verfügung stellen, Informationen über uns und unser Verhalten, um uns an unsere Bedürfnisse angepasste Angebote, beispielsweise als online Angebote bei dem Besuch von *internet shops*, unterbreiten zu können.

All diese Prozesse setzen die Speicherung und Prozessierung von ungeheuer großen Datenmengen voraus, die kein menschliches Wesen mehr ohne die Hilfe von Computern mit enormen Rechenleistungen bewältigen kann. So leben wir heute schon längst in einer Welt des „Internet of Things“ (IoT), in dem unsere Autos, Kühlschränke, Telefone, handhelds, Computer, Fernsehapparate, ja ein großer Teil unserer gesamten uns umgebenden Technik längst mit Informationsquellen im Internet verbunden sind und ständig aus diesem Internet Informationen beziehen, aber solche auch wieder an das Internet abgeben. Die Voraussetzung hierfür ist, dass die Geräte eine eindeutige Identität (Adresse) im Netzwerk bekommen. Dadurch sind sie in der Lage, über das Internet zu kommunizieren und Aufgaben voll automatisiert und koordiniert auszuführen.

In der Medizin ist ein in vielem vergleichbarer Prozess zu erkennen, der allerdings mit einer erheblichen Verzögerung gerade erst Einzug in unser aller Leben hält. Es ist unschwer absehbar, dass gerade der Umgang mit medizinischen

Informationen zu einem der größten Märkte in einer Welt des IoT werden und sich in Kürze ein *Internet of Medicine* (IoM) entwickeln wird, in dem alle unsere individuellen physiologischen und pathophysiologischen Daten gespeichert sind und zur umfangreichen Prozessierung zur Verfügung stehen. Es wird sich so bald ein IoM ergeben, in das wir alle unsere medizinischen Daten liefern (Datenspende), das aber auch mit diesen Daten vermutlich viel umfassendere Analysen und Auswertungen, insbesondere im Vergleich zu den vielen Daten anderer Personen durchführen kann. Die Folge wird ohne Frage sein, dass wir Krankheiten aufgrund der viel umfangreicheren Daten und der viel breiteren Analysen viel schneller und besser zu verstehen lernen, pathophysiologische Prozesse besser einschätzen und beurteilen können und so vermutlich auch für zahlreiche bisher nur kaum therapierbare Erkrankungen sehr wirksame und hocheffektive Therapieverfahren werden entwickeln können.

Diese Entwicklung lässt sich auch anhand einiger wichtiger Parameter ablesen: Im Jahre 2010 wurden im Bereich der Lebenswissenschaften 1600 wissenschaftliche Artikel veröffentlicht, in denen Verfahren der künstlichen Intelligenz zur Anwendung kamen. 10 Jahre später, 2020 waren es schon 7300 Publikationen und ihre Anzahl befindet sich in einem exponentiellen Wachstumstrend. Aber auch die wirtschaftliche Seite dieser Entwicklung ist klar erkennbar. So war 2020 das Rekordjahr im Bereich der Investitionen in neu gegründete Unternehmen, die digitale Geschäftsmodelle im Bereich Gesundheit verfolgen. Verfahren der künstlichen Intelligenz spielen dabei die wichtigste Rolle. Es wird geschätzt, dass bis zum Jahr 2025 der Markt für KI-basierte Medizinprodukte auf über 28 Milliarden US$ anwachsen wird (Bertalan Mesko, 2021).

Diese enormen Chancen für KI-basierte Technologien in der Medizin verursachen derzeit sicherlich einen gewissen Hype. Viele der Ausgründungen von *Start-Up*-Unternehmen basieren vermutlich auf Hoffnungen in Märkte, die sich nie entwickeln werden. Dennoch zeigt das exponentielle Wachstum im Bereich der KI-basierten Ausgründungen, dass mit den Verfahren der sog. künstlichen Intelligenz eine Informationstechnologie in die Medizin Einzug gehalten hat, die zahlreiche disruptive Entwicklungen nach sich ziehen wird und die Medizin, so wie wir sie heute kennen, sehr nachhaltig verändern wird.

2 Anwendungen der künstlichen Intelligenz in der Medizin

Ein wesentlicher Teil dieser KI-basierten Medizinprodukte betrifft Anwendungen zur automatischen Auswertung von medizinischen Bildinformationen. So gibt es heute eine Reihe schon als Medizinprodukt zugelassener Software für die Auswertung spezifischer radiologischer Untersuchungstechniken. Aber auch für die Pathologie weisen wissenschaftliche Untersuchungen darauf hin, dass viele Parameter, die ansonsten nur durch aufwendige molekularpathologische Untersuchungen bestimmt werden können, durch die maschinelle Auswertung digitaler Bilddateien mit Hilfe selbstlernender Algorithmen erfasst und ausgewertet werden können.

Im Kern basieren diese Techniken darauf, dass digitale Bilddateien exakt annotiert werden. Darunter versteht man, dass zunächst die Strukturen, die in den Bilddateien festgehalten sind, exakt kategorisiert werden. Einer Maschine kann man dann durch den Prozess des „deep learnings“ (Heuveline & Stiefel, 2021, in diesem Band) beibringen, die annotierten Strukturen zu erkennen und so den Annotationsprozess für sich selbst durchzuführen. Die Maschine entwickelt dabei einen „Algorithmus“, mit dem sie die in der Bilddatei enthaltenen Informationen ordnet, bewertet und zuordnet, so dass am Ende dieses Prozesses eine Interpretation der enthaltenen Daten maschinell erfolgt, die einer Diagnose eines Pathologen oder Radiologen entsprechen kann. Grundsätzlich erfolgt dieser Prozess in zwei Schritten: 1. dem Prozess des Erlernens der Aufgabe: Hierfür nutzt man zunächst Datensätze aus einem sog. Trainingsset. Dies können beispielsweise repräsentative Gewebeschnitte mit bestimmten Veränderungen sein, die einer ganz spezifischen Erkrankung entsprechen. Durch dieses Trainingsset erlernt die Maschine die Zuordnung der Datenpunkte zu einer definierten Struktur. Dies können anatomische Strukturen sein (die Maschine ordnet die Strukturen ihren realen Beschreibungen korrekt zu) oder aber auch pathologische Veränderungen (beispielsweise bestimmte neoplastische Strukturen, Entzündungsreaktionen oder andere klinische relevante Veränderungen). Damit erledigt die Maschine eigentlich die Arbeit des Radiologen oder Pathologen, der ansonsten diese Zuordnung anhand der Bilddaten in einer analogen Welt vorgenommen hätte. Nun ist zumindest bei der Verwendung sog. „deep learning“ Verfahren unklar, auf exakt welchen Entscheidungskriterien die Maschine ihre Interpretation der Daten aufbaut, da dies von außen unbeeinflusst bleibt. Daher muss ein Algorithmus in einem 2. Schritt einer Validierung unterworfen werden, in dem anhand eines unabhängigen Datensatzes geprüft wird,

ob die Maschine, die die Auswertung vornimmt, ebenso wie ein Pathologe oder ein Radiologe zu der gleichen Interpretation kommt, wenn ein zweiter, vollkommen unabhängiger Datensatz (z. B. Bilder aus einem anderen Institut) dem gleichen Prozess der Bildauswertung unterworfen wird. Aus dieser Prozesskette wird klar, dass die Präzision des Algorithmus umso besser sein wird, je exakter die Annotation der Daten in dem Trainingsset und je umfangreicher dieses Trainingsset war. Man kann dies als eine Art digitaler Erfahrung betrachten.

Für die Zulassung von Medizinprodukten wird im Allgemeinen ein Plausibilitätsnachweis gefordert. Dieser ist naturgemäß schwer zu erbringen, wenn eine Maschine aufgrund maschineller Erfahrungen eine Dateninterpretation durch *deep learning* vorgenommen hat. Hier kann man aber einen weiteren Ansatz als Plausibilitätskontrolle zur Hilfe nehmen, in dem man die Maschine z. B. fragt, wie denn aus ihrer Sicht ein Gewebeschnitt mit einer spezifischen Veränderung aussehen sollte. Die Maschine wird dann ein Bild gestalten (siehe Abb. 1), das einer entsprechenden Veränderung entspricht (Rombach, Esser, Ommer, 2021). So kann ein Pathologe oder Radiologe prüfen, ob dies auch dem entsprechen würde, was der Fachmann erwartet hätte.

Aus den dargestellten Beispielen lässt sich unschwer erkennen, dass diese Form der digitalen Datenanalyse zu erheblichen Veränderungen in der medizinischen Routinepraxis in den verschiedensten medizinischen Fachgebieten, speziell aber in der Radiologie und der Pathologie führen wird. Sie werden zunächst als Assis-

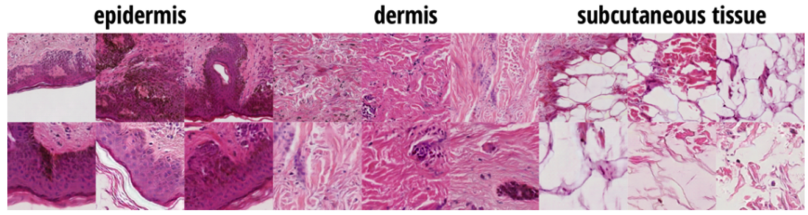


Abbildung 1: Ein KI-Algorithmus wurde trainiert, menschliche Gewebe zu erkennen. Dann wurde der Algorithmus gefragt, wie sieht beispielsweise die Epidermis, wie die Dermis und wie das subkutane Bindegewebe aus. Aus den durch den Algorithmus erlernten Daten wurden dann virtuelle Bilder generiert, die exakt den Erwartungen entsprachen (Daten von Michael Jendrusch, Abteilung für Angewandte Tumorbiologie, Universitätsklinikum Heidelberg zur Verfügung gestellt).

tenztechniken in den klinischen Alltag einfließen, sicher aber zu einem späteren Zeitpunkt ganze Arbeitspakete nach und nach übernehmen bzw. ersetzen.

Die KI in der Medizin beschränkt sich nicht auf die Analyse von Bilddaten. An jeder Stelle werden wir heute mit neuen Verfahren der Datenerhebung und -dokumentation konfrontiert. Dies können beispielsweise kleine Apps auf Smartphones oder sog. „wearables" wie „fitness trackern", Mobiltelefonen oder *smart watches* sein. Sie finden sich aber auch im Bereich von Kliniken und Praxen, in denen Daten wie EKGs, Audiodateien von Herzgeräuschen oder Daten zum Fluss des Blutes durch bestimmte Gefäßabschnitte oder jegliche andere Befunde dokumentiert werden. All diese Datenquellen können mit anderen Daten wie bei den Bilddateien durch *deep learning*-Verfahren korreliert werden, um Rückschlüsse auf pathologische Veränderungen durch automatische maschinelle Bewertung der Daten schließen zu können.

3 Konsequenzen für die Vernetzung medizinischer Daten

Um der zunehmenden Datenflut in der Medizin Herr zu werden, wurde früh die sog. elektronische Krankenakte (*electronic medical record*, EMR) konzipiert, die in den meisten Krankenhäusern schon fest etablierter Teil des Datamanagement der Patienten ist. Gerade im Krankenhaus zeigte sich als erstes, dass das bisherige papierbasierte Datenmanagement an seine Kapazitätsgrenzen gestoßen war. Dies betrifft in erster Line auch die ökonomische Seite des Datenmanagement. Welche Leistungen wurden für einen Patienten erbracht? Wer hat sie erbracht? Wie werden diese Leistungen von wem vergütet und viele anderen Fragen mehr. Daher wurde bei der Entwicklung der ersten elektronischen Krankenakten viel Wert auf die vergütungsbezogenen Aspekte gelegt, während rein medizinische Fragen eher im Hintergrund des Interesses standen und sich an digitalisierten Katalogen zu den verschiedenen Krankheiten, den sog. „disease related groups", DRG-System) orientierten. Aber gerade durch diese Ansätze nahm der Aufwand an bürokratischer Dokumentation enorm zu. Dies führte dazu, dass viele Ärzte in den Kliniken heute mehr Zeit damit verbringen, ihre Leistungen in diesen EMRs zu dokumentieren, als sich mit dem Patienten und seiner Erkrankung zu beschäftigen. Gerade dies wird von vielen klinisch tätigen Ärzten als eine sehr ungeliebte zusätzliche Aufgabe angesehen, die zu vielen Überstunden und einer erheblichen Verlängerung der täglichen Arbeitszeit geführt hat (What's ruining medicine for physicians:

Difficulty using EHRs, The Medical Economics Journal, 95, issue 24, 2018). Dies hat nachhaltig auch die Akzeptanz der EMR unter den praktisch tätigen Ärzten beeinträchtigt. Viele der bisherigen EMR-Systeme haben ferner den Nachteil, dass bei der Umsetzung der elektronischen EMRs ein guter Teil der Dokumentation im PDF-Format erfolgt und damit im eigentlichen Sinne nicht datentechnisch aufgearbeitet ist und zur Lösung von medizinisch-wissenschaftlichen Fragen in geeigneter Form nicht zur Verfügung steht.

Die Verfügbarkeit von großen Datenmengen in einzelnen Kliniken hat jedoch auch wissenschaftliche Entwicklungen befördert, die aufzeigen, welche Macht KI-basierte medizinische Anwendungen haben könnten, wenn sie als Medizinprodukte auf dem Markt zugelassen würden. So konnten Wissenschaftler bei Google anhand von Daten, die sie aus 280.000 Krankenakten von Patienten mit kardiovaskulären Erkrankungen extrahieren konnten, einen KI-Algorithmus (siehe oben) trainieren, der es anhand von einfachen Retinascans erlaubte, Rückschlusse auf die Prognose der jeweiligen Grunderkrankung der Patienten zu ziehen.

Es zeichnet sich klar ab, dass diese Verfahren tiefgreifende Wirkung auf die folgenden Aspekte haben werden: Sie werden helfen,

- die Daten zu Krankheiten und Patienten besser zu ordnen, damit in Zukunft auf der Grundlage dieser Daten Rückschlüsse schneller gezogen werden können.
- Plattformen zu etablieren, anhand derer diagnostische und therapeutische Entscheidungen sehr viel sicherer getroffen werden können.
- vollkommen neuartige klinische Algorithmen zu definieren. Durch Bereitstellung wertvoller Datenquellen in der medizinischen Bildgebung (Radiologie, Pathologie, Dermatologie, Ophthalmologie, u. a. m.) können beispielsweise ganz neue Vorhersagen schon aus einzelnen Befunden abgeleitet werden, die man mit konventionellen Diagnosemethoden niemals hätte ableiten können.
- den Informationsfluss auch für die Patienten anschaulicher zu machen und sie viel mehr als bisher in die klinische Entscheidungsfindung mit einzubinden.
- die Entwicklung von neuen spezifischeren Arzneimitteln voranzutreiben und in besser konzipierten klinischen Studien zu überprüfen.

- die Dokumentation und Koordination des Datenflusses über einen ganzen Krankheitsverlauf hinweg überhaupt erst effizient möglich zu machen bzw. zu strukturieren.

Aus diesen Überlegungen zeichnet sich ab, dass auch KI-Verfahren in die medizinische Entscheidungsfindung sehr rasch Einzug halten werden. Somit müssten auch sie dem Regelwerk, das für die Zulassung aller Medizinprodukte Gültigkeit hat, unterliegen. Diesem Gedanken sind schon die ersten Zulassungsbehörden wie beispielsweise die „US Food & Drugs Administration" (FDA) und die „European Medicine Agency" (EMA) gefolgt und haben spezielle Verfahren auch für die Zulassung von „software as a medical product" (SAMPs) oder digitale Gesundheitsapplikationen (DiGAs) entwickelt (Brönneke, Debatin, Hagen, Kicher, Matthies DiGA Vademecum 2020) und https://www.fda.gov/medical-devices/digital-health-center-excellence/software-medical-device-samd und https://lifesciences.mofo.com/topics/Software-as-medical-device-in-Europe--New-Regulatory-Regime-About-To-Enter-Into-Force--Part-5-of-6.html),

4 Gesundheitsdatenmanagement: Wem gehören die medizinischen Daten?

Das exponentielle Wachstum der Datenmenge im Gesundheitsbereich führt unausweichlich dazu, dass auch KI-basierte Software in diesem Bereich zu Anwendung kommt. Die bessere Datenverarbeitung wird zur Speicherung von noch mehr Daten führen, die immer effizienter ausgewertet und verarbeitet werden können. Und gerade die Einführung von Software als Medizinprodukt (SAMPs) wird diese Datenflut erheblich weiter verstärken. Damit gehen bei dem breiten Einsatz in der Routine des klinischen Alltags auch erhebliche Datenschutzprobleme einher, über die die Hersteller und Betreiber entsprechender Software voll umfänglich ihren Kundenkreis aufklären müssen und für den in weiten Teilen auch neue gesetzliche Regelungen geschaffen werden müssen.

Die immer umfassenderen Datensätze zu einzelnen Patienten führen auch zu fundamental veränderten Einstellungen seitens der Patienten zu ihren eigenen Daten. Während früher in erster Linie der jeweils behandelnde Arzt die Daten des Patienten kannte, steigt in den letzten Jahren kontinuierlich auch das Bedürfnis der Patienten, Herr ihrer eigenen Daten zu sein. Dieses zunehmende Souveränitätsbedürfnis bezüglich der eigenen Daten paart sich somit auch mit der generellen

und globalen Verfügbarkeit dieser Daten über Smartphones, Tablets oder Computer. Das bedeutet aber auch, dass der Patient zu jedem beliebigen Zeitpunkt seine Daten einsehen, mit anderen Personen oder auch Ärzten über diese Daten sprechen, sodass ein Patient zu einem bestimmten Problem eine viel größere Fülle an Einschätzungen bekommen kann, als dies früher möglich gewesen wäre. Dieser Umstand bringt ein viel höheres Maß an Transparenz und Autonomie für die Patienten mit sich. Für die sie betreuenden Ärzte bedeutet es aber auch, dass sie viel unkomplizierter Zugang zu den Daten des Patienten haben. Letzteres ist gerade im longitudinalen Verlauf von chronischen Erkrankungen von unschätzbarem Vorteil für Diagnose und Therapieverlaufskontrolle.

Ein weiterer Aspekt kommt bei dieser Betrachtung hinzu: es ist nicht mehr der einzelne Arzt, der alles entscheiden muss, sondern es besteht nun die Möglichkeit, ohne Abhängigkeit von Raum und Ort auf globaler Ebene Expertenmeinungen einzuholen, ohne dass die Patienten und Ärzte in physisch dem gleichen Ort sein müssen. Dies wird neue Geschäftsfelder im Bereich der Medizin auftun, beispielsweise ausgewiesene und ev. sogar zertifizierte Zentren zur Einholung einer Zweitmeinung in bestimmten Situationen.

5 Warum brauchen wir Verfahren der künstlichen Intelligenz zur Aufarbeitung der Gesundheitsdaten?

In den Zeiten, in denen medizinische Daten noch im analogen Papierformat gesammelt wurden, hatte die Auswertung der Daten klare Grenzen, da schlicht die Maschinerie fehlte, sie in größerem Umfang auszuwerten. Dies hat sich der Einführung digitaler Formate grundlegend geändert. Erstens können digitale Datenformate sehr viel einfacherer und auf viel kleinerem Raum gespeichert werden. Zweitens können mit zahlreichen sog. wearables medizinische Daten in einer Fülle erhoben werden, die im analogen Zeitalter unvorstellbar gewesen wären. So messen heute schon Armbanduhren unsere Pulsfrequenz und können Herzrhythmusstörungen feststellen, unser Bewegungsprofil kann den ganzen Tag über dokumentiert werden, ja selbst die Qualität des Schlafes in der Nacht kann durch solche wearables überwacht werden. So wurden in den ersten Monaten der CoVID-Pandemie fast eine halbe Milliarde *wearables* produziert und verkauft. Und dieser Markt wächst exponentiell weiter (https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/mhealth-market). Durch

die Auswertung dieser riesigen Datenmengen sind längst Vorhersagen möglich geworden, die im analogen Zeitalter undenkbar gewesen wären.

Auffallend ist dabei, dass nur sehr wenige dieser Anwendungen als medizinische Produkte auf den Markt gebracht wurden. Dies liegt in erster Linie daran, dass, wenn mit den Ergebnissen dieser Daten medizinische Entscheidungen verbunden gewesen wären, sie als Medizinprodukt hätten zugelassen werden müssen. Dies hätte den für Medizinprodukte vorgeschriebenen sehr komplexen und aufwendigen Zulassungsprozess durch die regulatorischen Behörden erfordert und die Entwicklung und Markteinführung erheblich verteuert.

Insbesondere durch die CoVID-Pandemie sind aber die vielen Vorteile, die die Erhebung von Gesundheitsdaten durch *wearables* und andere Geräte möglich machen, deutlich geworden. So wurde auf einmal klar, dass die notfallmäßige Einweisung von Patienten mit einer SARS-CoV-2 Infektion durch Messung des Sauerstoffgehaltes des Blutes und der Herzfrequenz mit Hilfe kleiner *wearables* sehr viel einfacher und besser gestaltet werden könnte. Hieraus hätten sich notfallmäßige Zuweisungsmöglichkeiten ergeben, die die Notaufnahmeambulanzen in den Kliniken massiv entlastet hätten. Ebenso hätte die Auswertung von radiologischen Bildern mit Verfahren der KI sofort auf die Verdachtsdiagnose CoVID lenken können. So ist längst klar, dass durch die KI-basierte Aufarbeitung von Gesundheitsdaten sowohl für einzelne betroffene Patienten, aber auch für die ganze Bevölkerung hochrelevante Rückschlüsse gezogen werden könnten, die bisher nicht denkbar gewesen wären.

6 Warum enwickelt sich das Internet of Medicine (IoM) so viel später als das Internet of Things (IoT)?

Stellen wir uns zum Schluss die Frage, warum es gerade im Bereich der Medizin nicht längst ein *Internet of Medicine* (IoM) gibt, obwohl das *Internet of Things* (IoT) im Bereich des Verkehrs, der Energie, der Chemie, der Finanzen, der Touristik und vielen anderen Feldern der Industrie längst existiert.

Ein wichtiger Punkt, der hier eine zentrale Rolle spielt, ist der Schutz der Daten vor dem Missbrauch. So werden in unseren Krankenhäusern und Arztpraxen medizinische Daten in einem streng geschützten Bereich gelagert. Dieser Bereich ist durch sehr aufwendige „fire walls“ gut geschützt und nur sehr schwer angreifbar. Der Schutz der Privatsphäre der Patienten ist hier das absolute Primat. Ein Daten-

transfer über die *fire walls* hinweg ist so gut wie unmöglich, insbesondere, um die Daten der Patienten vor missbräuchlichen Zugriffen zu schützen.

In Deutschland bzw. Europa spielt aber ein weiterer Punkt eine wichtige Rolle. Der Ort der Speicherung der Daten unterliegt nationalen gesetzlichen Regelungen. Die meisten Anbieter größerer Serverfarmen, in denen Daten mit derartigen Volumina gespeichert werden können, sind in erster Linie US-basierte Unternehmen wie Amazon, Google, Microsoft oder Apple. Sie unterliegen den gesetzlichen Regelungen der USA und fallen somit auch unter den *presidential cloud act* von 2017, der der Regierung der USA zu jedem Zeitpunkt und ohne Einwilligung der betroffenen Inhaber der Daten, diese Daten vollumfänglich einsehbar macht. Diese Regelung steht im Widerspruch mit der Deutschen und Europäischen Datenschutzgrundverordnung. Somit können medizinische Daten streng genommen eigentlich nur auf Servern gespeichert werden, die in Europa stehen und europäischen Anbietern gehören. Bisher gibt es aber in Europa viel zu wenige Anbieter solcher Sever, ohne die eine entsprechende Speicherung medizinischer Daten nicht legal wäre.

Aufgrund der großen Bedeutung auch der medizinischen Daten werden sich hier sicherlich in kurzer Zeit Änderungen ergeben, dennoch war und ist dieser Aspekt für den Ausbau des *Internet of Medicine* in Europa nicht zu unterschätzen und erklärt zumindest zum Teil, warum es dieses *Internet of Medicine* bisher nicht gibt.

Als Patient, der in einem deutschen Krankenhaus behandelt wird, kann man diesen Nachteil rasch erfahren. Die Daten, die während des Krankenhausaufenthaltes erhoben wurden, verbleiben in dem jeweiligen Krankenhaus und sind von außen in aller Regel nicht digital abgreifbar. Dies bedeutet beispielweise für den Hausarzt des Patienten, dass er keinen Zugriff auf diese Daten hat und ggf. Untersuchungen, die eigentlich nicht nötig wären, da die entsprechenden Daten ja im Krankenhaus schon vorliegen, erneut durchführen muss. Dieser Umstand ist ein wichtiger Faktor auch in Bezug auf die Behandlungskosten und könnte durch eine sichere und zertifizierte Cloudlösung wesentlich verbessert werden. Dem Patienten blieben dadurch auch Nebenwirkungen erspart, die mit vielen diagnostischen Verfahren einhergehen können.

Allein an diesem Aspekt zeigt sich, wie dringend wir das *Internet of Medicine* brauchen, um auch in der Medizin mit der exponentiellen technischen Entwicklung in der Informationstechnologie Schritt halten zu können. Die Chancen sind riesig, aber auch die vor uns liegenden Aufgaben, diesen Prozess so zu gestalten, dass er

zum Nutzen der Patienten gelingt und nicht zu deren Nachteil, sind schwierig und komplex. Es wird darauf ankommen, dass wir hier einen vernünftigen Konsens aller beteiligten Parteien erzielen müssen, um einen wirtschaftlich tragfähigen und pragmatischen Ansatz in die Realität umsetzen zu können. Hier wäre Europa und ganz besonders Deutschland mit seinen sehr durchdachten Ansätzen zum Datenschutz und seinen zahlreichen technologischen Möglichkeiten ganz besonders geeignet, Lösungen zu entwickeln, die auch weit über die Grenzen Europas hinaus Interesse und Anwendung finden würden.

Literatur

Brönneke, Jan B.; Debatin, Jörg F.; Hagen, Julia; Kircher, Philipp; Matthies, Henrik. DiGA VADEMECUM: Was man zu Digitalen Gesundheitsanwendungen wissen muss. MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft. Kindle-Version.

Heuveline, V. & Stiefel, V. (2021). Geschichte und Zukunft der künstlichen Intelligenz. In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Publishing, Heidelberg (in diesem Band).

Kierkegaard, S. Die Tagebücher 1834–1855, Auswahl und Übertragung von Theodor Haecker, Innsbruck, Brenner-Verlag 1923.

Mesko, B. The Medical Futurist: A Guide to artificial intelligence in health care, Webicina Kft., 2021.

Rombach, R, Esser, P., and Ommer, B. Making Sense of CNNs: Interpreting Deep Representations & Their Invariances with INNs, arXiv:2008.01777v1 [cs.CV] https://www.semanticscholar.org/paper/Making-Sense-of-CNNs%3A-Interpreting-Deep-%26-Their-Rombach-Esser/8157f156ff4a73a2b069b820cd5cfc90fa501c79

Über den Autor

Magnus von Knebel Doeberitz ist Professor für Molekulare Onkologie und Ärztlicher Direktor der Abteilung für Angewandte Tumorbiologie, Institut für Pathologie der Universität Heidelberg. Er ist außerdem Leiter der Klinischen Kooperationseinheit F210 des Deutschen Krebsforschungszentrums und gehört der Molecular Medicine Partner Unit des Europäischen Laboratoriums für Molekularbiologie (EMBL_MMPU) an. Er war Gründer und Vorstandsmitglied mehrerer Biotech-Unternehmen, darunter mtm-labs (www.mtm-labs.com), das 2011

von Roche übernommen wurde. Magnus von Knebel Doeberitz verbrachte seine Postdoc-Zeit im Labor des Nobelpreisträgers Harald zur Hausen am DKFZ. 1995 wurde er als Professor für Molekulare Onkologie an die Chirurgische Klinik der Universität Heidelberg berufen. 2001 wurde er Ärztlicher Direktor der Abteilung für Angewandte Tumorbiologie an der Universität Heidelberg. Sein wissenschaftliches Hauptinteresse gilt den Mechanismen der humanen Karzinogenese durch Papillomviren und dem Mangel an DNA-Mismatch-Reparatur. Er identifizierte neuartige Biomarker und therapeutische Targets und validierte diese in klinischen Studien. Er ist Co-Autor von mehr als 300 *peer-reviewed* Artikeln. Er ist Mitherausgeber des *International Journal of Cancer* und Mitglied der Editorial Boards verschiedener anderer onkologischer Fachzeitschriften. Er erhielt zahlreiche wissenschaftliche Auszeichnungen und ist Erfinder mehrerer Patentfamilien in seinen Forschungsgebieten.

Korrespondenzadresse:
Prof. Dr. Magnus von Knebel Doeberitz
Abteilung für Angewandte Tumorbiologie
Institut für Pathologie
Im Neuenheimer Feld 224
69120 Heidelberg

E-Mail: magnus.knebel-doeberitz@med.uni-heidelberg.de
Homepage: https://www.klinikum.uni-heidelberg.de/en/pathologisches-institut/atb/willkommen

Sektion 5:
Ökonomische Intelligenz

Die Industrialisierung der Intelligenz

MICHAEL BYCZKOWSKI & MAGDALENA GÖRTZ

SAP & Universitätsklinik Heidelberg

Zusammenfassung

Im Folgenden zeigen wir auf Basis der grundsätzlichen Konzepte von Beobachtung, Erfahrung, Erkenntnis und Fertigkeiten rund um den Begriff der Intelligenz auf, wie diese voneinander abhängen und wie moderne, vor allem algorithmische Ansätze der Künstlichen Intelligenz, einzuordnen sind. Wir schließen unsere Betrachtungen mit einem Überblick über Chancen und Herausforderungen, die von diesen ausgehen. – Illustriert werden diese überwiegend anhand von Beispielen aus der Medizin.

1 Vom Streben nach Erkenntnis

„Dass ich erkenne, was die Welt im Innersten zusammenhält." (Goethe, 1994) – Schon seit Anbeginn der Zeit strebt der Mensch nach Erkenntnis und nutzt dazu vor allem die ihm gegebene Intelligenz. Das Wort Intelligenz leitet sich von der lateinischen Wurzel *legere* ab, was „sammeln", „sich versammeln" und „zusammenstellen" bedeutet, und das verwandte Wort *intellegere* bedeutet „wissen", „verstehen", „wahrnehmen" und „auswählen". Mit Intelligenz bezeichnet man also die Fähigkeit, zu lernen und zu verstehen, mit Situationen umzugehen sowie Erkenntnisse und Fertigkeiten anzuwenden, um auf die Umwelt zu reagieren.

Wir wollen hier einen kurzen Überblick über den Stand der Dinge geben, wie die Intelligenz unterstützt und die Erkenntnisse auch in der Breite angewandt werden können; dabei spielt zunehmend auch die sogenannte ‚Künstliche Intelligenz' (KI) eine wichtige Rolle, die wir in diesem Bezugssystem einordnen wollen. – Durch

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24395

die großen Fortschritte auf diesem Gebiet ist es zwar nicht zwangsläufig so, dass man erkennt, „was die Welt im Innersten zusammenhält“, man kann aber, auch mit Hilfe maschineller Unterstützung, durch Beobachtung der Welt und daraus gemachten Erfahrungen, neben der wissenschaftlichen Forschung *an sich* auch viele nützliche Anwendungen für die Industrie entwickeln.

Betrachtet man die Evolution des Fortschritts über die letzten Jahrhunderte, so lassen sich vier Stufen der industriellen Revolution unterscheiden. Diese führt von dem Einsatz erster mechanischer Produktionsanlagen, über die Einführung arbeitsteiliger Produktion, dem Einsatz von IT zur Automatisierung der Produktion bis zur 4. Industriellen Revolution, der vollständigen Digitalisierung und Vernetzung von industrieller Produktion (Kagermann, Lukas, & Wahlster, 2011). Man geht mittlerweile davon aus, dass die derzeitige vierte Industrielle Revolution (Industrie 4.0) durch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz maßgeblich beeinflusst

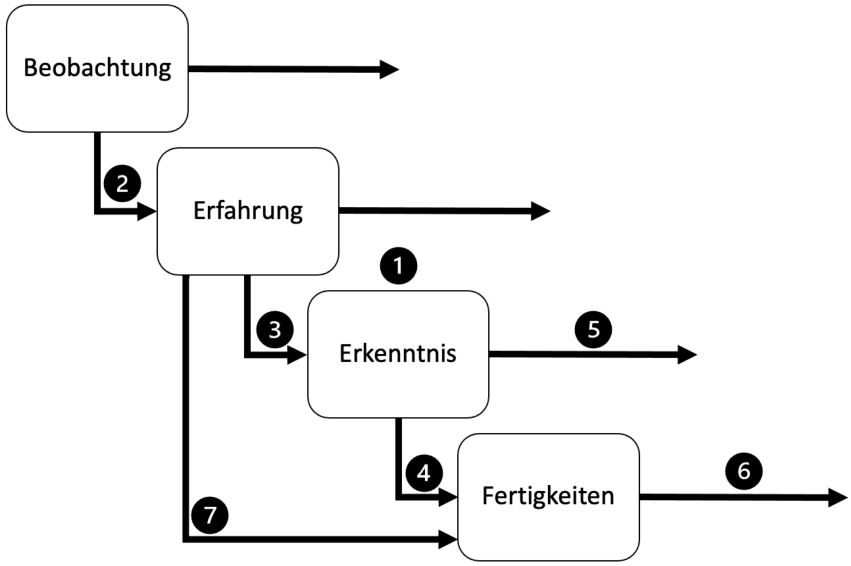


Abbildung 1: Der Gang des Artikels in sieben Schritten: 1: Vom Streben nach Erkenntnis. 2: Von Beobachtung zur Erfahrung. 3: Von Erfahrung zur Erkenntnis. 4: Von Erkenntnis zu Fertigkeiten. 5: Die Verbreitung der Erkenntnis. 6: Die Verbreitung der Fertigkeiten. 7: Von Erfahrung direkt zu Fertigkeiten. Quelle: Eigene Darstellung.

wird, wenn nicht sogar durch eine neue, fünfte Industrielle Revolution abgelöst werden wird. In diesem Artikel werden die Entwicklungsstufen der Intelligenz an ausgewählten Beispielen aus der Medizin beleuchtet, Chancen von Künstlicher Intelligenz aufgeführt und auf die Herausforderungen in der Anwendung intelligenter Maschinen hingewiesen.

2 Von Beobachtung zur Erfahrung

Man kann nur mutmaßen, wie viele Menschen beim Probieren von unbekannten Pflanzen zu Tode kamen, bis sich bei den überlebenden Zuschauern genug Erfahrungen ansammelten, bestimmte Pflanzen entweder zu meiden oder spezielle Zubereitungsverfahren anzuwenden: die nahrhaften Wurzelknollen der Maniokpflanze beispielsweise enthalten signifikante Mengen an Blausäure, so dass sie im rohen Zustand giftig sind. In Südamerika werden die Knollen deshalb beispielsweise geschält, gerieben, eingeweicht und danach wieder getrocknet, damit die Blausäure entweichen kann (Soentgen & Hilbert, 2012).

Ähnliche Erfahrungen, allerdings viel fokussierter und komprimierter, wurden auch in frühen medizinischen Studien gemacht: auf Grund der dramatischen Todeszahlen bei langen Seefahrten durch Skorbut führte beispielweise im Jahr 1747 der britische Schiffsarzt James Lind die erste kontrollierte Vergleichsstudie in der Geschichte der Medizin durch, wodurch er Zitrusfrüchte als wirksames Mittel gegen Skorbut identifiziert. Vitamine und das Wissen über Skorbut als Vitamin-C-Mangelkrankheit waren zu dieser Zeit noch unbekannt. Lind fand heraus, dass Zitrusfrüchte gegen Skorbut wirken, indem er Skorbut-kranke Matrosen in verschiedene Gruppen einteilte und eine unterschiedliche Diät anordnete. Die eigentliche Kausalität, Vitamin-C-Mangel, blieb aber verborgen; trotzdem war eine Verbesserung des Patientenzustandes auf Basis der statistischen Ergebnisse möglich (Baron, 2009).

3 Von Erfahrung zur Erkenntnis

'Der Physiker Wilhelm Conrad Röntgen entdeckte im Rahmen seiner Forschungen zum Verhalten von Elektronenstrahlen im Vakuum eine bis dahin noch unbekannte Strahlungsart, die sowohl unsichtbar als auch extrem durchdringungsfähig war. Diese bezeichnete er selbst als „X-Strahlen“ und erkannte, dass Materialien abhängig von ihrer Dichte, unterschiedlich stark von diesen Strahlen durchdrungen

wurden (Röntgen, 1895). Röntgen verstand, dass die Röntgenstrahlen von unterschiedlich dichtem Gewebe des menschlichen Körpers unterschiedlich stark absorbiert werden. Er schlussfolgerte, dass dadurch in das Körperinnere gesehen werden kann, um so z. B. vor einer Operation Knochenbrüche zu erkennen. Die Erkenntnis, dass die Strahlen im menschlichen Körper auch Nebenwirkungen auslösen konnten, wurde erst später erlangt.

4 Von Erkenntnis zu Fertigkeiten

Um Röntgenstrahlung zur breiten praktischen Anwendung zu verhelfen, war die Erfindung der Röntgenröhre wegweisend. Es wurde ein Generator genutzt, damit die hohe Spannung zum Betrieb der Röhre erzeugt wird. In dem Röntgengerät wurden Elektronen aus einer Kathode gelöst und durch den Potentialunterschied im erzeugten elektrischen Feld beschleunigt. Am anderen Ende der Röntgenröhre befand sich eine Anode, deren Kupfer-Atomkerne die Elektronen bei Auftreffen stark abbremsten. Diese gaben dadurch Energie in Form von elektromagnetischen Wellen ab, den Röntgenstrahlen. Durch den Bau der Röntgenröhre konnte die Röntgenstrahlung zielgerichtet angewandt werden. Mediziner fanden bald erste praktische Anwendungen: Neben der diagnostischen Bildgebung unter Verwendung von Fotoplatten begannen sie auch mit der Bestrahlung von Kranken zu experimentieren, insbesondere bei Krebs- und Tuberkuloseleiden.

Längst kommt die Medizin nicht mehr ohne bildgebende Verfahren aus. Es ist noch lange kein Ende der Entwicklung abzusehen: der derzeitige Stand bei der Anwendung von Röntgens Entdeckung ist die Röntgenmikroskopie, mit der man z. B. in Zellen hineinschauen kann (Yamamoto & Shinohara, 2002).

Eine innovative Weiterentwicklung des Röntgens ist auch die Computertomographie, die Objekte durch Schichtaufnahmen dreidimensional darstellen kann. Der Transfer gewonnener Erkenntnisse in die breite Anwendung stellt dabei gestern wie heute eine besondere Hürde dar, sowohl bei der Translation an sich als auch der kommerziellen Nutzung einer Erkenntnis. Großgeräte der neuesten Generation in der Radiologie sprengen oft den finanziellen Handlungsrahmen von Krankenhäusern. Auf die bei der Implementierung auftretenden Herausforderungen wollen wir hier nicht näher eingehen, den interessierten Lesern sei z. B. Gruss (2012) empfohlen. – Bemerkenswert ist hier, dass Röntgen 1901 mit dem Nobelpreis in Physik geehrt wurde, gleichzeitig aber darauf verzichtete, seine

Erfindung zu patentieren, weil er sich dadurch eine schnelle Anwendung zum Wohle aller versprach.

5 Die Verbreitung der Erkenntnis

Wichtig ist neben dem Erlernen von Fertigkeiten vor allem die zugrundeliegende Erkenntnis, um die Anwendbarkeit der einzelnen Fertigkeiten in den jeweiligen Situationen gut und logisch beurteilen zu können. Zur Wissensvermittlung ist nicht nur die theoretische wissenschaftliche Lehre an Universitäten und Universitätskliniken erforderlich; auch wissenschaftliche Zusammenhänge müssen einfach nachvollziehbar sein, um einen möglichst großen positiven Beitrag für viele Menschen leisten zu können. Hier bietet sich beispielsweise die Simulation an: Die Anwendung von Virtual Reality etwa ermöglicht durch die verfügbare physikalische Detailgenauigkeit praktische, mehrdimensionale Einblicke in die Anatomie. Dadurch können in der medizinischen Ausbildung Pathologie-Kurse ergänzt und chirurgische Eingriffe realitätsnah simuliert werden. Ein bedeutendes Ziel für die Zukunft ist es, einen echten digitalen Zwilling des Patienten zu schaffen, an dem nicht nur Eingriffe simuliert, sondern auch Diagnosen validiert und Behandlungsalternativen und deren Ergebnisse simuliert werden können.

6 Die Verbreitung der Fertigkeiten

Durch jahrelange Übung und Ausbildung erlangte individuelle Fähigkeiten sind erst einmal auf den Übenden allein beschränkt, unabhängig davon, ob es sich um Geschicklichkeit bei speziellen Operationstechniken oder effiziente Untersuchungsmethoden handelt. Um einen möglichst großen Einfluss beispielsweise auf die klinische Routine ausüben zu können, müssen Fertigkeiten verbreitet, das heißt einfach gelehrt und durchgeführt werden können. Zwei praktische Beispiele sind zum einen die minimalinvasive Chirurgie inklusive der chirurgischen Robotik und zum anderen die Telemedizin:

Maximilian Nitze beschäftigte sich mit Versuchen über die Beleuchtungsmöglichkeit innerer Hohlorgane. Unterstützung bei der technischen Ausgestaltung seiner Versuche bekam er von einem Instrumentenfabrikanten. 1879 präsentierte er erstmals das von ihm entwickelte Endoskop der Öffentlichkeit, mit dem eine Lichtquelle in das Innere des zu betrachtenden Organes geführt werden konnte und das neue Diagnosemöglichkeiten aufzeigte (Nitze, 1879).

Eine weitere revolutionäre Neuerung gelang mit dem Einsatz des starren Endoskops in der Laparoskopie zur Inspektion der Bauchhöhle. Die Operationen können mit Hilfe von kleinen Schnitten über eingeführte Endoskope durchgeführt werden, z. B. zur Blinddarmentfernung. Der Chirurg bedient die Instrumente und evaluiert den Operationsablauf über einen Bildschirm. Die Einführung der minimal-invasiven Chirurgie zur Beurteilung der Bauch- und Beckenorgane lässt Patienten verglichen mit der offenen Schnittoperation schneller mobil und schmerzfrei werden. Doch auch die Endoskopie war kein Endpunkt der Entwicklung: die mechanischen Einschränkungen der geraden Instrumente blieben bestehen und erforderten einen ganz neuen Ansatz. Dieser begann gut 100 Jahre später, als der Bereich der Chirurgie durch das von *Intuitive Surgical* entwickelte robotergestützte Chirurgie-System Da Vinci revolutioniert wurde. Die Roboterarme des Systems können Handbewegungen umsetzen und verfügen über eine dreidimensionale Ansicht mit Vergrößerungsoptionen, die es dem Chirurgen ermöglicht, eine signifikant höhere Präzision zu erreichen. Dabei sind nicht nur die Möglichkeiten der modernen Endoskopie integriert, sondern es sind durch zusätzliche Gelenke in den Manipulationsarmen der Operationsroboters auch Bewegungen auf kleinstem Raum möglich. Diese Bewegungen könnten weder von der menschlichen Hand bei offenen Operationen noch mittels der etablierten starren Endoskope vorgenommen werden. Das robotergestützte Chirurgie-System ist jedoch nicht autonom tätig, sondern wird weiterhin vom Chirurgen bedient (United States of America Patent No. US 2020/0368915 A1, 2020). Zusätzlich ermöglichen Trainingsmodule für die robotischen Konsolen dem Chirurgen, den Umgang mit den verschiedenen Geräten außerhalb von Eingriffen zu trainieren und so die eigenen Fertigkeiten zu steigern.

Das andere Beispiel, die Telemedizin, schließt sich fast nahtlos an: zum einen können dank moderner Robotik und schneller Internet-Verbindungen (z. B. mittels 5G-Telekommunikationsnetzen) auch Operationen durchgeführt werden, bei denen Chirurg und Patient sich nicht im gleichen Gebäude befinden. Dies ist notwendig bei Eingriffen, bei denen der Spezialist räumlich nicht verfügbar ist, beiz. denen eine hohe Strahlenbelastung im Operationssaal zu erwarten ist oder das Behandlungsumfeld unzugänglich ist, beispielsweise bei Forschungsaufenthalten in der Antarktis oder auf Raumflügen.

Auch jenseits der physischen Manipulationsübertragung durch einen Roboter können durch Telemedizin Fertigkeiten verbreitet werden: über große Distanzen

hinweg können per Videokonferenz Zweitmeinungen abgegeben, Untersuchungen unterstützt und Diagnosen durch Experten gestellt werden, die aus verschiedensten Gründen nicht selbst vor Ort anwesend sein können.

Hier ist es von eminenter Wichtigkeit, auch diese neuen, verbreitbaren Fertigkeiten ethisch verantwortungsvoll einzusetzen. Schnell sind beispielsweise das lokale Gesundheitssystem in einem kleinen Land durch ein massives Telemedizin-Angebot eines hochskalierenden (Technologie-)Anbieters zerstört und die Ärzte abgewandert. Wenn dann nach der erfolgreichen Diagnosestellung weitere Proben entnommen oder Behandlungen vor Ort durchgeführt werden müssen, so fehlt es an ausgebildeten Ärzten am eigentlichen *Point-of-Care*, dem Krankenbett.

7 Von Erfahrung direkt zu Fertigkeiten

Durch die fortschreitende Automatisierung aller oben aufgeführter prozeduraler Schritte werden mittlerweile gigantische Mengen an Daten generiert und durch die Verfügbarkeit und preisliche Attraktivität von Speichermedien auch billig, schnell und einfach zugreifbar gespeichert. Wo früher nur einige relevante Daten ausgewählt und archiviert wurden, ist es mittlerweile problemlos möglich, alle Daten zumindest für eine gewisse Zeit zu speichern und damit auch auswertbar zu machen.

Die dabei anfallenden riesigen Datenmengen, oft auch als ‚Data Lakes' bezeichnet, können sowohl Daten in strukturierter als auch unstrukturierter Form beinhalten und sind in ihrer Gänze oft nicht für einen vorbestimmten Zweck oder eine spezielle Auswertung gesammelt. – Im medizinischen Umfeld dient beispielsweise ein Teil der Daten der Dokumentation der durchgeführten medizinischen Prozedur, z. B. in Form elektronischer Patientenakten oder Bilddaten eines Computertomographie-Gerätes, um bei Diagnosen oder Behandlungen herangezogen werden zu können. Andere Datensätze beschreiben beispielsweise die Aktivitäten einer Maschine an sich. Aus diesen lassen sich wiederum Hinweise über eventuelle Betriebsfehler, sich ankündigende Ausfälle von Bauteilen oder Abweichungen in Messungen gewinnen und so ein rechtzeitiges Eingreifen des Personals oder anderer Maschinen initiieren. Diese Daten dienen also hauptsächlich der Validierung der Ergebnisse und der Qualitätssicherung. Der größte Teil der verfügbaren Daten ist aber nicht auf spezielle Zwecke hin ausgerichtet und ihre immense Menge verschließt sie der direkten Auswertung durch den Menschen.

Hier findet sich ein unmittelbares Anwendungsgebiet für wichtige Teilbereiche der Künstlichen Intelligenz und insbesondere des Maschinellen Lernens (ML) und der Mustererkennung: unermüdlich können *solche* Algorithmen diese Data Lakes durchsuchen, um statistische Auffälligkeiten zu erspähen, die einem Menschen nicht auffallen würden. Dies kann auf zweierlei Arten erfolgen: Die Maschine kann sowohl Rohdaten als Input als auch die entsprechenden Antworten, als annotierten Output, zur Verfügung gestellt bekommen, um selbständig Regeln abzuleiten. Diese neuen Regeln werden dann auf neue Daten angewendet, um Antworten in der Form von Vorhersagen zu erhalten. Die Algorithmen verbessern sich dabei selbst und „lernen" aus Versuch und Irrtum, genau wie der Menschen aus Erfahrung. – Alternativ kann sie auch die Gesamtheit der unveränderten Daten auf statistische Auffälligkeiten, also Muster im Sinne statistischer Modelle, hin untersuchen; man spricht hier auch von unüberwachtem Lernen gegenüber dem zuvor erwähnten überwachten Lernen.

Die Ergebnisse, die diese Algorithmen liefern, sind zumeist rein statistischer Natur, das heißt Wahrscheinlichkeiten von Korrelationen. Wir kennen das aus der Wettervorhersage für den aktuellen Standort: „in 90% der Fälle mit gleicher Wetterlage hat es geregnet". Es wird weder ausgesagt, dass es innerhalb eines Zeitraumes 90% der Zeit regnet, noch warum dies so ist. Für den Benutzer ist die Information aber sinnvoll, wenn es um die Wahl der richtigen Kleidung für einen Ausflug geht, die zugrundeliegende Kausalität ist hierfür nicht relevant. Es wurde also, basierend auf den verfügbaren Daten, aus Erfahrung eine Fertigkeit der Wetter- beziehungsweise Regenvorhersage entwickelt, ohne dass ein Meteorologe im Einzelfall eine Prognose erstellt hat oder der Benutzer meteorologische Kenntnisse besitzt. Das Ergebnis ist rein anwendungsorientiert und dient der Entscheidungsunterstützung durch Bereitstellen einer Fertigkeit ohne Erkenntnis der meteorologischen Zusammenhänge.

Auf diese Weise kann man auch große Mengen an medizinischen Daten auswerten und auf verschiedene Arten nutzen: der Einzelne kann sich mit relevanten Daten der Data Lakes vergleichen und beispielsweise Verhaltensempfehlungen für seine individuellen Vitalparameter erhalten, sowie gleichzeitig über Fitness-Tracker und andere persönliche Messgeräte direkt selbst Daten beitragen. Ärzte können so auf auffällige Korrelationen in den erfassten Kohorten hingewiesen und auf diese Weise in ihren Entscheidungen in Diagnose und Therapie unterstützt werden.

8 Von Daten zu Künstlicher Intelligenz

Wie zuvor beschrieben, ist es für die maschinelle Erkennung von Korrelationen unabdingbar, hochqualitative Daten zur Verfügung zu haben (Roberts, Driggs, Thorpe et al., 2021). Diese bereitzustellen ist nicht einfach: auf der einen Seite müssen die Daten rechtskonform beschafft, also insbesondere der Daten- und Patientenschutz des jeweiligen Landes strikt berücksichtigt werden. Außerdem muss die Datenerfassung und -nutzung z. B. in der medizinischen Forschung durch entsprechende Ethikanträge abgesichert sein. Andererseits müssen die Daten korrekt und relevant sein, also z. B. die typischen Patienten auch hinreichend divers abbilden. Ferner sollten die Daten idealerweise all die Merkmale beinhalten, die eine Korrelation zu den erwarteten Ergebnissen darstellen könnten. Aus diesen Gründen setzt sich in der Praxis neben der Forderung nach freiem Zugang zu den Daten, insbesondere bei Daten der öffentlichen Hand, die ja zumeist durch Steuermittel erzeugt wurden, und der Datenspende, z. B. zu Forschungszwecken, die Betrachtung von Daten als Wirtschaftsgut durch. Daten können einen hohen inhärenten Wert besitzen, so dass es sinnvoll und geboten ist, auch alle an einer Wertschöpfungskette Beteiligten angemessen an der insgesamt erzeugten Wertschöpfung zu beteiligen.

Die Abhängigkeit der trainierten KI-Algorithmen von den verwendeten Daten führt auch zu neuen Herausforderungen in Support und Wartung: Fehler können hier nicht nur im Algorithmus an sich, sondern auch in den zum Training zur Verfügung gestellten Daten liegen. Dies wird eine um so größere Herausforderung, wenn es sich nicht nur um einen zentralen und damit gut kontrollierten Datensatz eines Herstellers, sondern um kundenindividuelle Data Lakes handelt, die von den KI-Algorithmen genutzt werden, beispielsweise den spezifischen Data Lake einer einzelnen Klinik. Diese Daten sind, da historisch und über viele Abteilungen hinweg gesammelt, oft schwankend in ihrer Qualität und basieren auf unterschiedlichen Kohorten mit variierenden Eigenschaften; insbesondere Fehler in der Annotation von Daten sind hier relevant. In jedem Fall muss daher auch feststellbar sein, welche Daten zu welchen Schlüssen führten, um so neben Korrekturen an der Programmierung auch ein „Un-Learning“, also ein gezieltes Vergessen von Teilen des einmal Gelernten, so dies auf unzulänglichen Daten beruht, zu ermöglichen – um hier z. B. den strikten Anforderungen der einzelnen Zulassungsrichtlinien wie der EU-Medizingeräterichtlinie (Verordnung [EU] 2017/745 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2017 über

Medizinprodukte, 2017) gerecht zu werden und zusätzlich auch die Effektivität eines KI-basierten Algorithmus nachweisen zu können. Dies setzt die Auswahl eines fixen und möglichst repräsentativen Datensatzes voraus, anhand dessen zuerst das KI-Modul trainiert wird, welches dann entsprechend getestet und zertifiziert wird. Das derart zertifizierte Modul wird danach als fertiges Produkt zum Einsatz gebracht, kann aber natürlich nicht an den jeweiligen Fällen, die damit behandelt wurden, direkt selbst lernen, da ansonsten die Zertifizierung aufgrund veränderter Datenbasis nicht mehr greifen würde und eine unabhängig nachvollziehbare Validierung nicht möglich wäre. Stattdessen werden Daten separat weitergesammelt und erst für die Optimierung einer zukünftigen Produktversion verwandt, das dann, basierend auf der aktualisierten Datenmenge, den gleichen Zertifizierungsprozess durchläuft. So kann man nicht nur den oben beschriebenen Anforderungen der Regulierungsbehörden gerecht werden, auch die Wartung ist wesentlich einfacher. Der Preis dafür ist allerdings, dass die jeweilige Version eines solchen Programms nicht mit jedem aktuell behandelten Patienten weiter lernt, sondern während der gesamten Nutzungszeit einer Programmversion immer gleich ‚schlau' bleibt; erst eine spätere Version verspricht gegebenenfalls neue Erkenntnisse.

Auf der anderen Seite ist es auch spannend, KI-Algorithmen miteinander zu vergleichen, in dem man verschiedene Algorithmen mit den gleichen Daten trainiert,, um dann Unterschiede in Effizienz und Effektivität der zugrundeliegenden Algorithmen neutral, sozusagen unter Laborbedingungen, erforschen können. Hier ist beispielsweise der Datensatz *CheXpert* der *Stanford Machine Learning Group* besonders zu erwähnen, der über 220.000 Aufnahmen von über 65.000 Patienten enthält (Irvin, Rajpurkar, et al., 2019) und bei dem sogar ein Ranking der Algorithmen abgebildet wird (Rajpurkar, 2017).

Essenziell ist in diesem Zusammenhang auch, dass gesundheitsbezogene Daten besonders schutzbedürftig sind und Unternehmen oft proprietäre Interessen an den von ihnen gesammelten und zum Teil auch aufwendig aufbereiteten Daten haben. Eine Lösungsmöglichkeit hierfür ist das Föderale Lernen, eine Technik im Bereich des maschinellen Lernens, bei der ein Modell auf mehreren Geräten simultan trainiert werden kann. Jede Institution kann somit mit dem eigenen lokalen Datensatz trainieren, der nicht mit anderen Teilnehmern ausgetauscht wird (Kaissis, Makowski, Rückert, & Braren, 2020). Eine weitere sehr interessante Technologie in diesem Zusammenhang ist *Secure Multiparty Computation*, bei der Berechnungen auf verschiedenen Datenmengen ausgeführt werden, die aus

Vertraulichkeitsgründen nicht bei einem Einzelnen zusammengeführt werden können oder dürfen; man denke z. B. an Studien, die institutionsübergreifend oder gar transnational durchgeführt werden sollen, die jeweiligen Daten aber bei den jeweiligen Institutionen verbleiben sollen (Frikken, 2010).

Oftmals will aber auch der Einzelne diese neuen Möglichkeiten von KI-basierten Algorithmen für sich selbst nutzen: hier bieten sich Gesundheits-Tracker wie z. B. *Fitbit* oder *Apple Watch* an. Diese können die Herzfrequenz, das Aktivitätsniveau und auch den Schlaf überwachen, einzelne Gerätetypen stehen sogar professionellen Elektrokardiogrammen (EKG) in vielen Beziehungen nicht nach (Ott, 2018). Diese neuen Errungenschaften können den Benutzer bei Abweichungen warnen und dem Arzt eine bessere Vorstellung vom Zustand des Patienten über einen längeren Zeitraum hinweg geben beziehungsweise autark Voranalysen vorschlagen.

9 Von Korrelationen zu Kausalitäten

Schlussendlich sind die oben erwähnten Beispiele reine Korrelationen, also statistische Auffälligkeiten und Hinweise; eine Erkenntnis kausaler Abhängigkeiten geht nicht unmittelbar mit ihnen einher. Doch auch hier kann Künstliche Intelligenz helfen: sie kann Forscher darin unterstützen, jene interessanten Bereiche von „Data Lakes“ zu finden, die, unterstützt durch weitere Untersuchungen und klinische Studien, erfolgversprechende Bereiche für neue, diesmal kausale Erkenntnisse sein können.

Ferner lassen sich auf Basis eines formalisierten Fachwissens Expertensysteme, bei denen es sich um eine spezielle Form der Künstlichen Intelligenz handelt, erstellen, die in der Lage sind, durch logische Verknüpfung dieses Fachwissens neue Schlüsse zu ziehen. Besonders bemerkenswert ist hier das bereits 1972 an der Stanford University begonnene medizinische Expertensystem MYCIN (Shortliffe, MYCIN, Computer-Based Medical Consultations, 1976), das den Arzt in der Diagnose und Therapie von Infektionskrankheiten unterstützen soll und in seiner Ausprägung ONCOCIN für den Einsatz in der Krebsbehandlung weiterentwickelt wurde (Shortliffe, et al., 1981). Ein großer Vorteil derartiger Expertensysteme ist es, dass sich die abgeleiteten Schlüsse stets logisch nachvollziehen lassen und es jederzeit klar ist, wie das System zu einem Ergebnis gekommen ist.

Das Ziel ist weiterhin die Erklärung des vorliegenden Systems durch explizite Bildung neuer Modelle, ganz unabhängig von der Statistik, den zugrundeliegenden

Daten und der Umweltbeobachtungen, sodass am Ende auch die zuvor gewählte Abkürzung von Erfahrung zur Fertigkeit einen Weg zur Erkenntnis bietet und reines, auf Kausalitäten basierendes, Wissen gewonnen werden kann. Hier ist insbesondere das sogenannte Feld der „erklärbaren Künstlichen Intelligenz“ (Explainable AI, XAI; Turek, 2016) spannend, in dem es darum geht, der „Black Box“, die das maschinelle Lernen oft vermittelt, Erklärungen für die Ergebnisse mitzugeben, sodass das Vertrauen in diese gesteigert wird. Dies ist insbesondere bei breiter Anwendung und in sozial relevanten Fällen wichtig, so z. B. bei der Zuordnung von Kreditwürdigkeiten; hier ist beispielsweise das „Recht auf Erklärung“ explizit im Erwägungsgrund 71 der EU-Datenschutzgrundverordnung fest verankert (Verordnung (EU) 2016/679 des Europäischen Parlaments und des Rates, 2016).

10 Modelle als Abbilder der Wirklichkeit

Im Grunde ist das Training von Algorithmen der Künstlichen Intelligenz auch eine Art der Erstellung von Modellen, in diesem Fall der automatischen Erstellung von stochastischen Modellen im weiteren Sinne. Damit stellt sich die gleiche Frage wie bei allen Modellen als Abbildungen der Wirklichkeit: in welchen Bereichen liefert das Modell eine ausreichende Beschreibung der Realität, und wo sind die Grenzen der zuverlässigen Modellanwendung?

Dies ist um so wichtiger, wenn es sich um Modelle in der medizinischen Diagnoseunterstützung und Therapie handelt: wer möchte schon auf eine Art und Weise behandelt werden, die nicht an einem entsprechenden Bevölkerungsteil in einer klinischen Studie erfolgreich erprobt wurde? – Viele Aussagen lassen sich nicht ohne Weiteres von einer Kohorte auf eine andere, wenn auch angrenzende, übertragen: man denke nur an die Medikation von Erwachsenen gegenüber Kindern oder Schwangeren.

Daher ist es für eine erfolgreiche Anwendung der Künstlichen Intelligenz in der breiten medizinischen Praxis unabdingbar, dass der behandelnde Arzt den von der KI generierten Diagnose- oder Behandlungsvorschlag auch detailliert nachvollziehen kann und das insbesondere aus fachlicher und nicht nur aus informatisch/technischer Sicht. Vor allem ist es hier wichtig, dass verständlich wird, aufgrund welcher Korrelationen eine Empfehlung ausgesprochen wurde, denn es ist gut möglich, dass spezielle Eigenschaften eines Patienten in den Trainingsdaten

der verwandten Kohorte gar nicht vertreten waren. Man denke hier nur an das Krankheitsbild der Dextrokardie, bei der sich das Herz auf der rechten Seite des Körpers befindet; ein Schmerz in der rechten Körperhälfte ist dann ganz anders zu interpretieren als bei der breiten Bevölkerung, die dieses Merkmal nicht aufweist.

Auch medizinisch-technischer Fortschritt muss in die Modellbildung der Künstlichen Intelligenz regelmäßig und explizit Einzug halten: wenn die Trainingskohorte beispielsweise ein neues Medikament oder eine andere neue Therapieform nicht nutzt, so kann der Algorithmus diesbezüglich auch keine Vorschläge unterbreiten, da er noch nicht mit diesen Daten trainiert wurde und somit keine Kenntnisse darüber besitzt.

Allerdings sind hier den Möglichkeiten der Beurteilung durch den Arzt sehr schnell Grenzen gesetzt, vor allem, wenn der KI-Algorithmus disziplinübergreifend große Datenmengen analysiert und zahlreiche verschiedene Merkmale berücksichtigt. Schnell werden dann Analysetiefen erreicht, die auch durch Teams von Medizinern fachübergreifend nicht mehr hinreichend beurteilt werden können. Denn hier ist gerade Geschwindigkeit und Umfang der Datenverarbeitung eine Stärke der Maschine; eine Rückkehr zum Allgemeingelehrten ist also keine valide Möglichkeit, denn täglich wird so schnell neues Wissen generiert, dass der Mensch nicht mehr mithalten kann.

Die mit dem Einsatz von Algorithmen-gestützten Entscheidungen einhergehenden rechtlichen und haftungstechnischen Fragen seien hier nur angerissen und sind im Prinzip ähnlich denen, wie sie derzeit auch mit Bezug auf autonomes Fahren diskutiert werden (Gasser, 2015).

Werden wir also am Ende redundante Systeme benötigen, die den Anwender, hier den behandelnden Arzt, bestmöglich darin unterstützen, den Patienten optimal zu diagnostizieren und zu behandeln und sich dabei auch effektiv selbst zu kontrollieren, indem sie beispielsweise unterschiedliche Algorithmen oder Vergleichsdatensätze nutzen, um Ergebnisse und Empfehlungen zu validieren? – Vieles spricht dafür, zumindest in den Bereichen, in denen die zugrundeliegenden Kausalitäten noch nicht hinreichend abgeleitet sind.

11 Ausblick

Algorithmen der Künstlichen Intelligenz werden in Zukunft ein noch integralerer Bestandteil unseres Lebens sein. Daher ist es wichtig, die nächsten Generationen

in Bezug auf die Konzepte und die Anwendbarkeit von Künstlicher Intelligenz zu schulen und ihnen zu zeigen, wie sie *in einem Arbeitsbereich* zusammen mit Maschinen effizient arbeiten können, um eine höhere Präzision und Produktivität zu erreichen. Dabei sind Maschinen nicht als Konkurrenten oder Gegner zum Menschen zu verstehen, sondern Ziel ist es, eine Interaktion von Menschen und Maschine zu schaffen, um die Möglichkeiten des Menschen in mechanischer, kognitiver und intellektueller Hinsicht anzureichern.

Sicher ist aber eines: der Arzt selbst ist mit seinem Wissen in Verbindung mit seiner Intuition nicht durch einen (KI-)Algorithmus zu ersetzen, höchstens durch einen Arzt, der sich zusätzlich auf den intelligenten Einsatz von KI-Algorithmen versteht.

Literaturverzeichnis

Baron, J. H. (2009, June 1). Sailors' scurvy before and after James Lind – a reassessment. Nutrition Reviews, 67(6), 315–332. Retrieved from https://academic.oup.com/nutritionreviews/article/67/6/315/1807435.

Frikken, K. B. (2010). Secure Multiparty Computation. In *Secure multiparty computation*. In *Algorithms and theory of computation handbook: special topics and techniques* (S. 14-1–14-16).

Gasser, T. M. (2015). Grundlegende und spezielle Rechtsfragen für autonome Fahrzeuge. In M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz, & H. Winner, *Autonomes Fahren* (S. 543–574). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. Von https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-45854-9_25.pdf abgerufen

Goethe, J. W. (1994). *Faust. Eine Tragödie*. (A. Schöne, Hrsg.) Frankfurt am Main: Deutscher Klassiker Verlag.

Gruss, P. (29. August 2012). Von der Erkenntnis zum Gewinn. *Rotary Magazin für Deutschland und Österreich*. Von https://rotary.de/wissenschaft/von-der-erkenntnis-zum-gewinn-a-1579.html abgerufen.

Irvin, J., Rajpurkar, P., & others. (2019, Januar 21). CheXpert: A Large Chest Radiograph Dataset with Uncertainty Labels and Expert Comparison. *AAAI*. Retrieved from https://arxiv.org/abs/1901.07031.

Itkowitz, B. D., DiMaio, S. P., Halabe, D. J., Hasser, C. J., Hoffman, B. D., Larkin, D. Q., . . . Zhao, W. (2020). *United States of America Patent No. US 2020/0368915 A1*.

Kagermann, H., Lukas, W.-D., & Wahlster, W. (2011). Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. *VDI Nachrichten* (13). Von

https://www.dfki.de/fileadmin/user_upload/DFKI/Medien/News_Media/Presse/Presse-Highlights/vdinach2011a13-ind4.0-Internet-Dinge.pdf abgerufen.

Kaissis, G. A., Makowski, M. R., Rückert, D., & Braren, R. F. (June 2020). Secure, privacy-preserving and federated machine learning in medical imaging. *Nature Machine Intelligence*(2), 305–311. Von https://www.nature.com/articles/s42256-020-0186-1 abgerufen.

Nitze, M. (14. Juni 1879). Eine neue Beobachtungs- und Untersuchungsmethode für Harnröhre, Harnblase und Rectum. *Wiener Medizinische Wochenschrift*, S. 649–652. Von https://anno.onb.ac.at/cgi-content/anno-plus?apm=0&aid=wmw&datum=18790003&seite=00000325 abgerufen.

Ott, P. (30. September 2018). *Podcast MST007 – Aktuelles: Apple Watch*. Von Medical Standard Time https://medical-standard-time.com/358/mst007-aktuelles-apple-watch/ abgerufen.

Rajpurkar, P. (2017). *CheXpert: A Large Chest X-Ray Dataset And Competition*. Retrieved from Stanford ML Group: https://stanfordmlgroup.github.io/competitions/chexpert/.

Roberts, M., Driggs, D., Thorpe, M., & others. (2021, March 15). Common pitfalls and recommendations for using machine learning to detect and prognosticate for COVID-19 using chest radiographs and CT scans. *Nature Machine Intelligence*, 3, 199–217. Retrieved from https://www.nature.com/articles/s42256-021-00307-0.

Röntgen, W. C. (1895). *Ueber eine neue Art von Strahlen (Vorläufige Mittheilung)* (2. Ausg.). Würzburg: Stahel. Von https://www.deutschestextarchiv.de/book/view/roentgen_strahlen_1896 abgerufen.

Shortliffe, E. H. (1976). *MYCIN, Computer-Based Medical Consultations*. New York: Elsevier.

Shortliffe, E. H., Scott, A. C., Bischoff, M. B., Campbell, A. B., Melle, W. v., & Jacobs, C. D. (1981, August 24–28). ONCOCIN: An Expert System for Oncology Protocol Management. (P. J. Hayes, Ed.) *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI '81*, 876–881.

Soentgen, J., & Hilbert, K. (2. Oktober 2012). Präkolumbianische Chemie – Entdeckungen der indigenen Völker Südamerikas. *Chemie in unserer Zeit*, 46(5), 322–334.

Turek, D. M. (2016). *Defense Advanced Research Projects*. Retrieved from Explainable Artificial Intelligence (XAI): https://www.darpa.mil/program/explainable-artificial-intelligence.

Verordnung (EU) 2016/679 des Europäischen Parlaments und des Rates (27. April 2016). Von https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32016R0679 abgerufen.

Verordnung (EU) 2017/745 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2017 über Medizinprodukte (5. April 2017). Von https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2017/745/oj?locale=de abgerufen.

Yamamoto, Y., & Shinohara, K. (2002, Dezember 26). Application of X-ray microscopy in analysis of living hydrated cells. *The Anatomical Record (New Anat.), 269*(5), 217–223. Retrieved from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ar.10166.

Über die Autoren

Michael Byczkowski ist Global Vice President und Leiter des Industriebereichs Healthcare bei SAP. Er studierte Mathematik an der Ruhr-Universität Bochum und arbeitete im In- und Ausland in den verschiedensten Bereichen von Industrieunternehmen, wie zum Beispiel Prozessoptimierung, Projektleitung, bis hin zum Management globaler Technologiepartnerschaften sowie Design- und Innovationsbereichen. Ein besonderer Schwerpunkt seiner Arbeit sind strategische Innovationsprojekte zusammen mit Kunden und Partnerunternehmen im globalen Gesundheitswesen, derzeit vor allem in den Bereichen Geschäftsplattform, Unternehmensnetzwerke, Datenmanagement und -verwertung, sowie KI.

Magdalena Görtz ist Ärztin an der Urologischen Universitätsklinik Heidelberg und Abteilungsleiterin der wissenschaftlichen Nachwuchsgruppe „Multiparametrische Methoden zur Früherkennung des Prostatakarzinoms“ am Deutschen Krebsforschungszentrum. Sie studierte Humanmedizin an der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg und an der Columbia University in New York. Ihre Promotion zur Progression und Ausbreitung von bösartigen Tumorzellen wurde von der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg mit dem Wilma-Moser-Preis ausgezeichnet. Ihr Forschungsschwerpunkt ist es, durch eine integrative Daten- und Biomarker-Analyse individuellere Ansätze für die Diagnostik, Risikostratifizierung und Therapieplanung des Prostatakarzinoms zu entwickeln. Ferner ist Frau Dr. Görtz Projektleiterin in translationalen Kollaborationsprojekten zwischen Klinik, Forschungsinstitutionen und Industrieunternehmen im Bereich KI.

Korrespondenzadresse:
Michael Byczkowski
SAP SE
Dietmar-Hopp-Allee 16
69190 Walldorf

E-Mail: michael.byczkowski@sap.com
Dr. med. Magdalena Görtz

Urologische Klinik
Universitätsklinikum Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 420
69120 Heidelberg

E-Mail: magdalena.goertz@med.uni-heidelberg.de

Intelligente Strategien: Richtiges Erkennen und gute Auswahl in einer komplexen Welt

DIETRICH FIRNHABER

Strategy & Portfolio Development, Covestro AG

Das Universelle hat dem Kontextbezogenen, Lokalen Platz gemacht und das Streben nach der einen, einzigen, absoluten Wahrheit wird verdrängt durch den demütigen Respekt vor der Pluralität der Wahrheiten, die unsere Welt partiell und pragmatisch abbilden. (Sandra Mitchell, 2008)[1]

Zusammenfassung

Wir leben in einer Welt, in der unser Handeln und Planen zunehmend über mannigfaltige Verknüpfungen und Rückkopplungen beeinflusst wird. Die für unsere Ziele und Ausgangssituation relevanten Zusammenhänge können wir weder vollständig erfassen noch fehlerfrei bewerten. Kurz: unsere Welt ist komplex. Langfristiges Planen ist nicht durch starre Gegebenheiten gekennzeichnet, sondern durch Unsicherheiten. Über sorgfältige Analysen können jedoch *bekannte Unsicherheiten* in einem gewissen Umfang

[1] Sandra Mitchell, *Komplexitäten. Warum wir erst anfangen, die Welt zu verstehen*, S. 152. Suhrkamp 2008, Frankfurt a.M.

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24396

benannt und in Szenarien abgebildet werden. So entstehen Strategien, deren Bedingungen und Voraussetzungen gleichzeitig und permanent in den Umsetzungs- und weiteren Planungsprozess berücksichtigt werden können und müssen. Dem Planungsprozess und dem Planungsergebnis wird auf diese Weise eine neue Stabilität gegeben. Zwar beseitigt die neue Stabilität die Unsicherheiten nicht, jedoch führt sie diese einer produktiven Bewältigung zu. Die produktive Bewältigung der Unsicherheiten erfordert schließlich eine *offene Umsetzung*. Die offene Umsetzung erarbeitet die Details der Strategieumsetzung und führt die Bedingungen und Voraussetzungen einer Realitätsüberprüfung zu. Diese in dem Planungsprozess fest eingebaute Rückkopplung erfordert die Fähigkeit zum robusten Dialog und damit eine entsprechende offene Unternehmenskultur.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Ähnlich wie Kierkegaard auf das Leben blickt, so empfiehlt es sich auf Unternehmensstrategien zu schauen. Nach dem dänischen Philosophen kann das Leben nur rückwärts verstanden, muss aber vorwärts gelebt werden.[2] Nicht selten sind es die Zufälle im Leben, die unseren Weg bestimmen, ob schicksalhafte oder nur unbedeutende, kleine Ereignisse. Welche dieser Ereignisse sich zu lebenslenkenden entwickeln und welche Wirkkraft sie entfalten, erfassen wir meist erst in der Rückschau. Wir können planen. Wir können uns absichtsvoll für etwas entscheiden, wie z. B. einen Ausbildungsweg, einen Lebensort und einen Lebenspartner, ja selbst mit welcher Einstellung wir auf das Leben schauen – all das können wir uns als unseren Lebensweg beeinflussend bewusst machen und uns entscheiden und dennoch lässt sich unser Leben nicht im Detail vorherbestimmen und zielgenau auf gewünschte Ergebnisse hinsteuern.

Warum ist das so? Wir sind in einen Kontext gestellt, den wir aufgrund seiner Mannigfaltigkeit und seiner sich immer wieder neu ergebenden Verknüpfungen weder vollständig noch umfassend begreifen können. Noch viel weniger sind wir in der Lage die unendlichen Verknüpfungsmöglichkeiten in einem Plan abzubilden,

[2] „Es ist ganz wahr, was die Philosophie sagt, dass das Leben rückwärts verstanden werden muss. Aber darüber vergisst man den andern Satz, dass vorwärts gelebt werden muss.“ Søren Kierkegaard, *Die Tagebücher 1834–1855*, Auswahl und Übertragung von Theodor Haecker, Innsbruck, Brenner-Verlag 1923.

oder gar zu berechnen, wie sich unerwartete Ereignisse oder seltene Ereigniskombinationen – sogenannte „schwarze Schwäne“ [3] – auf uns auswirken werden. Das gilt für unser eigenes Leben, wie für das „Leben“ eines Unternehmens.

Kurz: ob eine Lebens- oder eine Unternehmensstrategie ihr Ziel erreicht, kann an ihrem Start nicht mit Bestimmtheit gesagt werden. Der Grund ist mit Blick auf das oben Gesagte offensichtlich: Strategien sind Pläne, die sich mit Zielvorstellungen auf eine zukünftige Realität ausrichten, deren Realisierung jedoch maßgeblich durch Unsicherheiten geprägt ist. Unsere Kenntnis, über das was sich auf die Gestaltung der Zukunft auswirkt, ist trotz fortlaufend zunehmenden Wissens minimal und unzureichend. Es ist so banal wie relevant: die Zukunft ist nicht vorhersagbar.[4] Sie lässt sich weder monokausal noch linear aus dem Heute entwickeln. Lebenspläne – Unternehmensstrategien sind nichts anderes – können also nicht wie Zugfahrpläne festen Regeln folgen, sie müssen den sich aus der Komplexität[5] ergebenden Unsicherheiten des Lebens Rechnung tragen.[6]

1.2 Warum strategische Planung sinnvoll ist

Warum also strategisch Denken und Planen, wenn auch die allerbeste Strategie keine Garantie für den Erfolg bieten kann? Zunächst, weil im Allgemeinen die Ressourcen (Kapital, Arbeit, Knowhow und einzusetzende Zeit) begrenzt sind

[3] Nassim Taleb hat mit Blick auf die unerwarteten Ereignisse oder besser nicht vorhergedachten Ereignisse die Theorie des „schwarze Schwan“-Ereignisses entwickelt. Nassim Nicholas Taleb, *Der schwarze Schwan – Die Macht höchst unwahrscheinlicher Ereignisse*, Albrecht Knaus Verlag, München 2007.

[4] Mit Blick auf John Maynard Keynes bekannte Aussage „in the long run we are all dead“ wohl mit einer Ausnahme. Siehe das vollständige Zitat über die hilfreichen Aussagen von Volkswirten über die Zukunft: „In the long run we are all dead. Economists set themselves too easy, too useless a task if, in tempestuous seasons, they can only tell us that when the storm is long past the ocean is flat again. Ders.: *Tract on Monetary Reform*, McMillan & Co, S. 80, London 1923.

[5] Zur Begrifflichkeit der Komplexität siehe *Historisches Wörterbuch der Philosophie*, Band 4: I-K, S. 939 f., Hrsg., Joachim Ritter, Karlfried Gründer, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1976.

[6] Eine sehr anschauliche Untersuchung zu den Herausforderungen in einer komplexen Welt richtige, also zielführende Entscheidungen zu treffen, siehe auch Dietrich Dörner, *Logik des Misslingens – Strategisches Denken in komplexen Situationen*, Rowohlt, Reinbek 1989.

und wir diese deshalb bestmöglich einsetzen sollten.[7] Der zweite anzuführende Grund ist der eigentliche Betrachtungsgegenstand dieses Aufsatzes. Er ist Grund und auch Herausforderung für die Strategieentwicklung zugleich, nämlich die im eigentlichen Sinne des Wortes unberechenbare Komplexität unserer Lebenswelt und die damit verbundenen Unsicherheiten hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen. Dieser Komplexität müssen wir uns stellen und können sie vielleicht sogar produktiv nutzen, um unsere Ziele zu erreichen.

Unternehmen sind – zumal, wenn sie international agieren – zahlreichen Einflüssen ausgesetzt, die aufeinander mannigfach wirken, sich verstärkende, überlagernde oder auch abschwächende Effekte haben. Die meisten dieser Einflüsse können Unternehmen nicht oder nur unzureichend beeinflussen. Ihr Eintreten und Wirken ist mit Unsicherheiten behaftet. In diesem Kontext ist es die Aufgabe der Strategieentwicklung den *relevanten Rahmen zu bestimmen*, die *wesentlichen Wirkgefüge herauszuarbeiten* und zur Zielerreichung *Maßnahmen zu identifizieren*. Je komplexer ein Gefüge ist, um so agiler muss eine Strategie aufgebaut sein, ohne dabei die wesentlichen Treiber aus den Augen zu verlieren. Ohne eine Strategie wird ein Unternehmen steuerlos dem Wechselspiel des Zufalls – den Unsicherheiten – überlassen. Es ist nur noch Reaktion und nicht auch Aktion möglich. Mit einer den entsprechenden Anforderungen berücksichtigenden Strategie wird ein Unternehmen in der Lage sein – abgesichert über einen strukturierten und systematischen Blick auf die bleibenden Unsicherheiten – planvoll zu reagieren und damit durch diese Unsicherheiten hindurch auf das gesetzte Ziel hinzusteuern. Somit lohnt sich der Aufwand, denn mit Sandra Mitchell kann gesagt werden, dass unsicheres Wissen immer noch besser ist als Unwissen.[8]

Moderne Strategien nehmen eine mehrere Jahre entfernt liegende Zukunft in den Blick. Ihre Anwendungen sind Wetten auf die Zukunft. Zeithorizonte können hier durchaus verschieden sein. In jedem Fall gehen diese aber über das planvolle kurzfristige Agieren hinaus, also über das was wir in unserem Sprachgebrauch als

[7] Das ist allerdings nur dann relevant, wenn wir dieses tun, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Fehlt es am Ziel, dann braucht es auch keine Strategie. Ist das Ziel nicht passend gesetzt arbeitet sich die Strategie am untauglichen Objekt ab. Letzteres ergibt sich oft aus der fehlenden oder unzureichenden Befassung mit dem Ausgangspunkt.

[8] Sandra Mitchell, ebenda, S. 130.

Taktik bezeichnen.[9] Strategien sind damit Versuche bestimmte Ziele über den in Maßnahmenpläne gegossenen bestmöglichen Einsatz von knappen Ressourcen zu erreichen. Die Umsetzung dieser Maßnahmenpläne erfolgt dabei über Entscheidungen, die auf einer Erkenntniskombination aus belastbarem Wissen und Interpretation von Unsicherheiten ruht.

Auch wenn über den tatsächlichen Erfolg einer Strategie an ihrem Startpunkt also wenig Belastbares gesagt werden kann, so können sehr wohl Aussagen darüber getroffen werden, ob eine Strategie gut gedacht ist, also gut hergeleitet und zur Umsetzung gut aufgesetzt wurde. Hierüber kann eine sinnvolle Aussage getroffen werden. Kurzum, auch wenn wie ein Bonmot lautet „die Planung den Zufall durch den Fehler" ersetzt, ist es sinnvoll sich mit der Strategieentwicklung zu beschäftigen. Sie ist ein Handwerk zum Erfolg, aber kein Garant, denn dazu ist das Leben, um ein Wort von Kant abzuwandeln, aus einem zu krummen Holz.

Zur Strategieentwicklung gibt es zahlreiche – und auch sehr unterschiedliche – Vorgehensweisen.[10] Der vorliegende Aufsatz will sich mit der Frage der intelligenten Strategie im Kontext der Komplexität beschäftigen. Naturgemäß kann dies nur an der Oberfläche geschehen. *Das richtige Erkennen der wesentlichen Faktoren* (a), *die gute Auswahl der geeignetsten Optionen* (b) sowie *die offene Umsetzung*

[9] Siehe zur begriffsgeschichtlichen Erläuterung unter dem Stichwort „Strategie" in *Historisches Wörterbuch der Philosophie*, Band: 10 St-T, WBG, Darmstadt, 1998.

[10] Der Springerverlag zeigt bei einer Abfrage des Begriffs Strategy unter der Rubrik „Management+Führung" am 28. November 2020 um 15:52 Uhr 1.121 Bücher an: https:/ / www.springerprofessional.de/ search?q.filters[0].values[0]=SPRBook&q.filters[1].mode=0&q.searchType=HeroBookSearch&q.courseType=&q.filters[0].mode=0&q.filters[1].values[0]=Management+%2B+F%C3%BChrung&q.sortType=Relevance&q.page=0&q.query=Strategy&q.filters[1].name=disciplinetaxonomyFacets&q.originQuery=&q.displayQuery=&q.manualSort=false&q.facets=true&q.filters[0].name=documenttype.
Der Begriff „Strategieentwicklung" hat am 28. November 2020 um 16:28 Uhr innerhalb 0,34 Sekunden über 895.000 Suchergebnisse gezeitigt: https://www.google.com/search?ei=mGvCX9r5FpODhbIPwrul6AQ&q=strategieentwicklung&oq=strategieentwicklung&gs_lcp=CgZwc3ktYWIQAzIECAAQRzIECAAQRzIECAAQRzIECAAQRzIECAAQRzIECAAQRzIECAAQRzIE-CAAQR1AAWABg_5MLaABwAngAgAEAiAEAkgEAmAEAqgEHZ3dzLXdpesgBCMABAQ&sclient=psy-ab&ved=0ahUKEwjapZfyxaXtAhWTQUEAHcJdCU0Q4dUDCA0&uact=5 Eines der lohnendsten Bücher zu dem Thema Strategieentwicklung stammt von Gary Hamel und C.K. Prahalad, *Competing for the Future*, Harvard Business School Press, Boston, 1994. Siehe auch Ulrich Pidun, *Corporate Strategy - Theory and Practice*, Springer Gabler, Wiesbaden 2019.

(c) soll hier angerissen werden als ein Versuch, sich der durch die Komplexität hervortretenden Unsicherheit produktiv zu stellen.[11]

2 Das Erkennen und Nutzen der wesentlichen Faktoren in einer komplexen Welt

2.1 Das Erkennen der wesentlichen Faktoren

Strategien geben also einen Bezugsrahmen vor, in dem Handlungen im Detail geplant werden, um ein vorgegebenes Ziel zu erreichen. Schauen wir nun auf das, was in der 2020-Dekade mutmaßlich relevant sein wird. Wir gehen dabei von einem international agierenden Unternehmen aus. Die folgende Auflistung kann nur eine Auswahl der möglichen Faktoren [12] sein: Klimawandel, China auf dem Vormarsch (nicht nur als Absatzmarkt, sondern auch geopolitisch und technologisch), die sich verändernde Globalisierung hin zu einer Regionalisierung, die Zunahme von lokalen militärischen Konflikten, Bevölkerungswachstum, wachsende und älter werdende Mittelschicht, Digitalisierung aller Lebensbereiche sowie das Risiko von Pandemien. Schließlich nimmt der regulatorische Rahmen für Unternehmen weltweit zu. Beispielsweise soll gewünschtes Verhalten über Anreize (wie z. B.

[11] Eine umfassende Darstellung des Umgangs mit Unsicherheiten im Rahmen der strategischen Planung findet sich bei Kai-Ingo Voigt, *Strategische Planung und Unsicherheit*, Gabler, Wiesbaden 1992.

[12] Die obige Auflistung kann nicht als vollständig oder in für alle Unternehmen gleicher Weise relevant gelten. Wer sich selber ein Bild machen will wird im Internet schnell fündig. Die Eingabe des Suchbegriffs „global trends 2020“ in die Google Suchmaschine ergab am 1. Dezember 2020 um 16:41 innerhalb von ca. 0,56 Sekunden 49.700 Suchergebnisse: https://www.google.com/search?q=%22global+trends+2020%22&sxsrf=ALeKk01fa4yUazypn2Lu2_w42vYc8Z9Alg%3A1617807595955&ei=68htYJDWOaOSlwTVxZOIBw&oq=%22global+trends+2020%22&gs_lcp=Cgdnd3Mtd2l6EAMyBwgAEEcQsAMyBwgAEEcQsAMyBwgAEEcQsAMyBwgAEEcQsAMyBwgAEEcQsAMyBwgAEEcQsAMyBwgAEEcQsANQAFgAYP9TaAFwAngAgAFZiAFZkgEBMZgBAKoBB2d3cy13aXrIAQjAAQE&sclient=gws-wiz&ved=0ahUKEwjQ98j4suzvAhUjyYUKHdXiBHEQ4dUDCAw&uact=5.

CO2-Zertifikate)[13] und auch Bonus-Malus-Systeme (z. B. Sozialpunktesystem in China)[14] evoziert werden.

Aber damit nicht genug. Neben den oben nur angerissenen Einflüssen müssen sich Unternehmen und deren Lenker vermehrt und verstärkt gesellschaftlichen Ansprüchen stellen. Dies dürfte derzeit der Faktor mit der größten Veränderungsdynamik sein. Hier gilt es zu verstehen, dass Unternehmen in den kapitalistisch geprägten Gesellschaften mehr und mehr als verantwortliche Spieler der Gesellschaft gesehen werden.[15] Ihnen wird nicht nur eine soziale, sondern eine gesamtgesellschaftliche Verantwortung zugeschrieben.[16]

Milton Friedman wird oft mit dem Gedanken zitiert, dass es die einzige soziale Verantwortung des Unternehmens sei Profite zu maximieren.[17] Sich an Gesetze zu halten, Steuern zu zahlen und Arbeitsplätze zu schaffen, ist jedoch seit geraumer Zeit nicht mehr ausreichend.[18] Viele Unternehmen haben dieses erkannt und für

[13] Siehe Bekanntgabe des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Nukleare Sicherheit vom 9. Juli 2020: https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/emissionshandel/#c8381.

[14] https://www.zeit.de/wirtschaft/2019-08/ueberwachung-china-sozialkreditsystem-eu-handelskammern, 28. August 2019, 8:59 Uhr Quelle: ZEIT ONLINE, dpa, jci.

[15] Nicht eingegangen werden kann auf die Frage, inwieweit das staatskapitalistische System Chinas eine entsprechende utilitaristische Komponente als Anspruch an die dort tätigen Unternehmen bereits systemisch enthält.

[16] Die Volksabstimmung in der Schweiz am 29. November 2020 über die Initiative „Für verantwortungsvolle Unternehmen – zum Schutz von Menschen und Umwelt" ist ein eindrucksvolles Beispiel für den Versuch eines sehr fundamentalen Eingriffs in die unternehmerischen Freiheiten, bzw. Bindung derselben an die Grundvorstellung der Gesellschaft. (Siehe dazu FAZ vom 28. November 2020: „Die Frage der Verantwortung" von Johannes Ritter). Entsprechendes gilt für das in Deutschland diskutierte Lieferkettengesetz.

[17] Ausführungen dazu: Nilsson, Andreas and Robinson, David T., *What is the Business of Business?* (June 13, 2017). *Innovation Policy and the Economy*, Volume 18, edited by Josh Lerner and Scott Stern, Duke I&E Research Paper No. 2017–12, Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=2985301, or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2985301.

[18] Es lässt sich vertreten, dass dies eine sehr anglo-amerikanische Sicht ist und dass der Gedanke der gesamtgesellschaftlichen unternehmerischen Verantwortung spätestens seit der Gründung der Bundesrepublik mit der Sozialen Marktwirtschaft in der westlichen Welt bereits eine Entsprechung gefunden hat. Einen gewissen Einblick in die aktuelle Diskussion bietet Ulrich Döring, *Gewinn – ein Spaltpilz der BWL*, F.A.Z. 30. November 2020.

sich einen spezifischen „Purpose“[19] identifiziert, also einen Zweck, der über das bloße Wirtschaften hinausgeht. Tatsächlich hat sich hier der Wind gedreht, und zwar nicht nur mit Blick auf die Generation der sogenannten Millennials, also der Arbeitnehmergeneration, die besonders auf die Verankerung ihrer Tätigkeit in einem tieferen Sinn achtet, sondern auch hinsichtlich der Investoren. Was bis vor kurzem noch eine Randnotiz war, nämlich der Gedanke, dass sich Investoren nach den sogenannte ESG-Aspekten[20] bei ihren Investitionsentscheidungen ausrichten, ist schlagartig ein wesentlicher Faktor, ja ein Markt[21] geworden. Jüngstes Beispiel ist das auf Klimaschutz drängende Verhalten des weltgrößten US-amerikanischen Vermögensverwalters Blackrock.[22] Sie beteiligten sich 2019 an Unternehmen mit einem Wert von insgesamt 7,43 Billionen USD und sind damit an nahezu allen wesentlichen börsennotierten Unternehmen der Welt beteiligt. Blackrock und andere Investoren drängen die Unternehmen nachhaltiger zu werden. Sie nutzen dazu ihre Position als Investoren über eine direkte und öffentliche Ansprache, aber auch über das Abstimmverhalten in den Gesellschafterversammlungen. Unabhängig ob hier sogenannte höhere Motive am Werk sind, gehen Investoren wie Blackrock davon aus, dass Unternehmen, die sich ESG-Konform verhalten, dauerhaft erfolgreicher sein werden und langfristig Bestand haben. Die jüngste Weltkrise – ausgelöst durch die COVID-19-Pandemie – stellt sich als soziale und wirtschaftliche Krise dar. Sie gibt diesen Investoren Recht und dem entsprechenden Investitionsverhal-

[19] Siehe hierzu https://www.spiegel.de/karriere/purpose-in-unternehmen-die-sinn-frage-a-a9fa3629-fd8c-4c3e-a553-bf0b23c7ecdf - DER SPIEGEL vom 12.07.2020.

[20] ESG steht für „Environment, Social, Governance“ und bringt zum Ausdruck, welche Auswirkung ein Unternehmen hinsichtlich seines Verhaltens und seiner Produkte auf die Umwelt, Gesellschaft und auf die gute Unternehmens-führung selbst hat. Siehe auch die Publikationen des World Economic Forums, das hier eine wesentliche Rolle spielt: https://www.weforum.org/agenda/2020/01/stakeholder-capitalism-principle-practice-better-business/ sowie:https://www.weforum.org/agenda/2019/12/davos-manifesto-2020-the-universal-purpose-of-a-company-in-the-fourth-industrial-revolution/.

[21] Siehe hierzu FAZ vom 07.05.2019 https://www.faz.net/aktuell/finanzen/finanzmarkt/nachhaltiges-investieren-die-finanzmaerkte-als-weltretter-16173627.html.

[22] Handelsblatt vom 14. Juli 2020 „*Blackrock greift beim Klimaschutz durch*“ https://www.handelsblatt.com/finanzen/banken-versicherungen/esg-kriterien-blackrock-greift-beim-klimaschutz-durch/26000222.html?ticket=ST-2530765-DEb1o2udbBXFCUiRPveL-ap4.

ten Auftrieb. Sie hat den jahrzehntealten Gedanken des Stakeholder-Capitalism neue, echte Relevanz gegeben.[23]

Ein weiteres sich entsprechend im Kontext der Nachhaltigkeit abzeichnendes Thema ist die Kreislaufwirtschaft.[24] Langfristig werden sich Unternehmen darauf einstellen müssen, dass sie nicht nur klimaneutral wirtschaften, sondern auch ohne fossile Rohstoffe als Ausgangsstoff der Wertschöpfungskette (Chemie), bzw. als Energieträger auskommen müssen. Insbesondere Unternehmen, die für ihr Geschäft Großanlagen benötigen, also in der Regel nach einer über ein und mehr Jahrzehnte gehenden Investitionssicherheit suchen, sind diese sich abzeichnenden Veränderungen von existenzieller Bedeutung und müssen bereits heute in ihren Strategien berücksichtigt werden.

Gerade die sich abzeichnende Gleichzeitigkeit eines gesellschaftlichen Drucks in den westlichen Ländern hin zu mehr Nachhaltigkeit im unternehmerischen Handeln und dem sich entsprechenden Auswirken auf das Investorenverhalten könnte einen entsprechenden Raum für Investitionen in neue Technologien schaffen. Innovative Unternehmen, risikobereite Investoren und stabile staatliche Rahmenbedingungen sind hier die Voraussetzung, um den Wandel erfolgreich zu gestalten.[25]

Die oben angesprochenen Themen werfen – wie gesagt – nur ein unvollständiges Schlaglicht auf die Aspekte, die bei der Umfeldanalyse berücksichtigt werden müssen. So mannigfaltig die Themen sind, so vielfältig sind Techniken und Ansätze der Umfeldanalysen.[26] Ihr Einsatz ist abhängig von der eigentlichen Fragestellung. Regelmäßig wird sich eine Kombination der verschiedenen Betrachtungen anbie-

[23] Siehe an Stelle vieler und mit weiteren Verweisen: Dug Sundheim, Kate Starr, *Making Stakeholder Capitalism a Reality*, HBR 20. Januar 2020 https://hbr.org/2020/01/making-stakeholder-capitalism-a-reality, sowie Klaus Schwab, *Stakeholder Capitalism*, John Wiley & Sons, Hoboken 2021.

[24] Der Begriff Kreislaufwirtschaft wird als Gegenentwurf zur heute überwiegenden Linearwirtschaft gesehen, bei der am Ende der Wertschöpfungskette der einer weiteren Verwertung nicht mehr zugeführte Abfall steht. Näheres dazu: https://de.wikipedia.org/wiki/Kreislaufwirtschaft abgefragt am 20.01.2021 um 13:32 Uhr.

[25] In dieser kurzen Betrachtung kann nicht auf die entsprechenden Ziele des 14. Fünfjahresplans der chinesischen Regierung eingegangen werden.

[26] Die bekanntesten sind die PEST oder auch PESTEL Analyse, die verschiedene Umfeldfaktoren in Bezug nehmen, siehe dazu: https://en.wikipedia.org/wiki/PEST_analysis, und Porters 5-forces: Michael E. Porter: *Competitive Strategy: Techniques for analyzing industries and competitors: with a new introduction*. Free Press, New York 1980.

ten, um die bestimmenden Faktoren herauszuarbeiten. Ein Patentrezept ist hier nicht erhältlich. Wie so oft empfiehlt es sich das Netz zunächst weit zu werfen, um die Kriterien dann, mit dem Blick auf das was erreicht werden soll, einzuengen.[27]

2.2 Die Nutzung der wesentlichen Faktoren in Szenarien

Losgelöst von der Frage *wie* und *welche* die für das jeweilige Unternehmen relevanten Trends und Strömungen zu identifizieren sind, ist es entscheidend zu erkennen, dass diese Themen auf vielfältige Weise miteinander verwoben sind; sie bilden ein nahezu undurchdringbares Geflecht von Ursache und Wirkung und Rückwirkung. Es ist inzwischen eine Binsenweisheit, dass sich unser Denken und Handeln in einer komplexen Welt abspielt. In einer Welt also, in der lineares und partikulares Denken nicht ausreicht, um die Realität und die mögliche Entwicklung der Zukunft sinnvoll zu erfassen. Eine Welt, die wir trotz wachsender Erkenntnisse nicht so vollständig verstehen, dass wir die Unsicherheiten mit Blick auf ein in der Zukunft liegendes Ziel eliminieren können. Wir sind allenfalls in der Lage Modelle zu bauen, die isoliert Teilaspekte abbilden. Das umfassende Supramodell wird es aber nicht geben, da es weder vollständiges Wissen zu den Einzelaspekten gibt noch ein ausreichendes Wissen, wie diese Aspekte zusammenwirken, noch genügend Rechenkapazitäten, die den unendlichen Möglichkeitsraum der Kombinationen auf einem längeren Zeitstrahl erfassen kann. Die in einer Bestimmung der Zukunft enthaltene inhärente Unsicherheit kann nicht beseitigt werden. Wenn alles mit (fast) allem verknüpft ist, dann kommt es darauf an die Pfade zu bestimmen, die für die jeweilige Strategieentwicklung die höchste Relevanz haben. Es gilt also die Faktoren in Relation zueinander zu setzen, die nach sorgfältiger Umfeldanalyse die mutmaßlich größte Konsistenz und damit Bedeutung für die Zielerreichung haben.

Hier setzt nun die strategische Planung das Instrument der Szenarioplanung ein.[28] Szenarien sind – wenn man so will – Theorien über die Zukunft. Sie beruhen auf Hypothesen und stehen damit erkenntnistheoretisch auf denselben wackligen

[27] Für die Strategieentwicklung gilt, dass eng ausgelegte Analysen zwar einen guten und scharfen Ausschnitt erge-ben, eine langfristig stabile Entscheidungslage aber nur über mehrere Sichtweisen möglich ist.

[28] Allgemein zur Szenariotechnik siehe: https://de.wikipedia.org/wiki/Szenariotechnik abgefragt am 20.03.2021 um 14:07. Zur Vertiefung und insbesondere zu den Möglichkeiten der computer-

Beinen wie jedes wissenschaftliche Denken und politisches Handeln auch.[29] Szenarien sind damit fehlbare Theorien über die Entwicklung der Zukunft und keine Bestimmung der Zukunft mit „*ex cathedra*"-Wirkung des CEO oder der Strategieabteilung.

Die Szenariotechnik kann also nur helfen aus der Kombination gewählter Faktoren mögliche Entwicklungen abzubilden, ohne diese mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit belastbar zu unterlegen, also die Unsicherheit in der Planung zu minimieren. Sandra Mitchell weist darauf hin, dass „in komplexen Systemen eine umfassende, vielfältige und häufig nichtlineare Unsicherheit besteht"[30]. Die Technik der Szenarioplanung hilft damit potentielle und plausible Entwicklungen und die Wirkung von maßgeblichen Faktoren zu identifizieren, mehr aber auch nicht. Zu oft wird sie jedoch eingesetzt, um sich ein möglichst positives und passendes Bild von der Zukunft zu machen.[31] Relevant sind die Szenarioerkenntnisse nicht nur bei der Entwicklung von Strategien. Eine besondere und oft ungenutzte Bedeutung bekommt sie bei der Erfolgsanalyse im Rahmen der kontinuierlichen Überprüfung der Strategie in der Umsetzungsphase. Dazu unten mehr.

3 Auswahl der geeigneten Optionen

3.1 Verstehen der Ausgangslage und Identifikation des Geschäftsmodells

Selbst wenn die Auswahl der wesentlichen Faktoren und deren Verknüpfung zu relevanten Szenarien gelungen ist, fehlt für die effektive Aufstellung einer Strategie noch ein entscheidender Aspekt: das ist die tiefgreifende Analyse der Ausgangssituation. Hier geht es nicht um die Umfeldanalyse, sondern um die

gestützten „robust adaptive planning" (RAP) siehe Robert J. Lempert, Steven W. Popper, Steven J. Bankes, *Confronting Surprise*, in Social Sience Computer Review, S. 420 ff., 2002.

[29] Grundlegend dazu: Karl R. Popper in *Logik der Forschung*, 8. Aufl., J.C.B. Mohr (Paul Siebeck), Tübingen 1984.

[30] Sandra Mitchell, ebenda, S. 113.

[31] Die Geschichtsbücher sind voll mit Beispielen von Staatenlenkern und Unternehmen, die sich eher von ihrem Wunsch und dem Blick auf die Vergangenheit in die Zukunft haben leiten lassen, als von einer klaren Analyse der sich abzeichnenden Veränderungen. Über die Denkfallen bei Entscheidungen: Sehr zu empfehlen Daniel Kahneman, *Schnelles Denken – langsames Denken*, Siedler Verlag, München 2012.

Eigenanalyse, auch wenn manche der hier gängigen Betrachtungsformen beide Fragen in Überlappung bringen, ist der Fokus auf den Ausgangspunkt entscheidend.[32] In ihrer Bedeutung und Grad der Schwierigkeit wird die Eigenanalyse allzu oft unterschätzt. Eine unvollständige oder gar falsche Analyse der Ausgangssituation ist fatal und bringt eine Strategie von Anfang an in eine kaum zu korrigierende Schieflage.

Die Analyse beginnt mit der Identifikation der distinkten Geschäfte, die sich in einem Unternehmensportfolio befinden. Bei einem Hersteller von Maschinen kann das beispielsweise die Entwicklung und Produktion der Maschinen selbst, der Verkauf von Ersatzteilen, die Wartung von Maschinen und auch digitale Dienstleistungen (Verknüpfung von Auslastungs- und Performancedaten mit Marktabsatzdaten des Kunden) sein. Diese vier Tätigkeiten sind tatsächlich vier sehr unterschiedliche Geschäfte, die sehr spezifischen Regeln folgen und, die auf sehr unterschiedliche Art und mit sehr verschiedenen Kernkompetenzen Umsätze und Gewinne generieren.[33]

Unterschiedliche Geschäfte entsprechen spezifischen von der Theorie und Praxis entwickelten Geschäftsmodellen. Ein Geschäftsmodell beschreibt, mit welchen Leistungen auf welche Weise Geld verdient wird.[34] Der gut sortierte Blick auf das oder die Geschäftsmodelle eines Unternehmens hilft zu bestimmen, was relevante Aktivitäten und Fähigkeiten sind, also welche *Kernfähigkeiten* vorhanden sein müssen und welche gegebenenfalls fehlen, um erfolgreich zu sein. Der Blick auf die Kernaktivitäten und Fähigkeiten eines Geschäftsmodells hilft nicht nur zu verstehen was relevant ist, sondern auch zu bestimmen, welche spezifischen und bestenfalls geschützten Vorteile ein Unternehmen in seinen einzelnen Geschäften aufweisen kann, bzw. ob ein solcher in der Kombination der einzelnen Geschäfte besteht. Auch wenn dieses Element der Selbstreflexion ungemein wichtig ist, soll

[32] Erstaunlich oft wird der Ausgangsituation eine zu geringe Beachtung zuteil. Nach den Erfahrungen des Autors findet sich hier die Grundlage für gravierende Fehlplanungen. Die tatsächliche Position im Markt, Fertigkeiten und Fähigkeiten werden oft überschätzt bzw. andere übersehen. Wunschdenken der Unternehmensleitung wie auch die oft vermeintliche Erwartungshaltung von Investoren spielt nicht selten eine Rolle bei der Entscheidung für eine Strategie.

[33] Nicht näher darauf eingegangen werden kann an dieser Stelle, dass bereits die Trennung dieser Tätigkeit in separate Geschäftseinheiten eine sinnvolle Strategie sein kann.

[34] Siehe für einen guten Überblick: https://en.wikipedia.org/wiki/Business_model abgefragt am 20.03.2021 um 14:31.

es uns hier nicht weiter beschäftigen. Der Hinweis auf seine Relevanz soll an dieser Stelle genügen.

3.2 Auswahl der Optionen als kreativer Prozess

Die Auswahl der Optionen ist der eigentlich kreative Aspekt der Strategieentwicklung. Hier müssen auf der Basis robuster Szenarien und der Einschätzung des spezifischen Wettbewerbsvorteils entschieden werden, welcher Weg eingeschlagen werden soll. Strategien fallen nicht vom Himmel und sind selten geniale Einfälle eines Einzelnen, sondern das Ergebnis guter Analysen und noch mehr von robusten Diskussionen, in denen die Teilnehmer gleichermaßen in der Lage sind sich den Gegebenheiten (Ausgangslage) wie auch den Unsicherheiten zu stellen. Hier muss eine solide Analyse auf an der Realität geschulte, visionäre Führung stoßen. Die über die Auswahl der wesentlichen Faktoren gebildeten Szenarien bilden in der Diskussion des Topmanagements den Rahmen. Je disruptiver ein Szenario ist, um so umfassender muss die Beschäftigung mit möglichen Wegen sein. Hier bieten sich Sprints[35] mit Teilnehmern aus den verschiedensten Ecken eines Unternehmens an. Solche Sprints sollten möglichst hierarchiefrei nach den besten Ideen suchen.

Nicht selten werden Ziele erst bei der Auswahl der Optionen gesteckt. Das muss nicht bedeuten, dass diese nicht ambitioniert sind. Im Gegenteil. Der Blick auf die Szenarien und die realistische Einschätzung der Ausganssituation lassen oft erst klar werden, welches Ziel sich ein Management setzen kann oder muss, wenn es seinem Unternehmenszweck (*Purpose*) und seiner Vision gerecht werden will.

Analyse und Auswahl der Optionen sind also ineinander verschränkt. Wie unten noch zu sehen sein wird, folgt eine gute Strategieentwicklung deshalb auch einem mehrstufigen Prozess. Die vom Topmanagement gewählte Grundstrategie gibt in der Regel nicht die Details vor, sondern nur eine Richtung, die einzuschlagen ist. Die Details sind in den nachgeordneten Unternehmensstufen auszuarbeiten. Meist werden diese Detailausarbeitungen an der Grundrichtung nichts ändern, jedoch ist es nicht ungewöhnlich, dass sich Zeitelemente und Abfolgen im Laufe

[35] Wenn auch für die Entwicklung von Produkten vorgesehen, so ist die Sprint-Methode mit gewissen Anpassungen nach den Erfahrungen des Autors sehr geeignet instruktive Perspektiven in der Strategieentwicklung zu erzeugen. Siehe zur Methode: Jake Knapp, *Sprint: How to Solve Big Problems and Test New Ideas in Just Five Days*, Simon & Schuster, New York 2016.

der Ausarbeitung durch die nächsten Ebenen verändern. Diese Iteration ist ein wesentliches Merkmal moderner Strategieentwicklung und hilft nicht nur die finale Strategie robuster werden zu lassen, sondern bahnt auch den Weg für die agile Umsetzung, was hier als *offene Umsetzung* bezeichnet werden soll.

4 Offene Umsetzung

4.1 Umgang mit bekannten Unsicherheiten

Alles bisher Geschriebene mag zwar zu einer gut gemachten Strategie führen, ihr Erfolg wird jedoch von der Umsetzung bestimmt. Die Strategiearbeit ist nicht mit der Erstellung eines Papiers erledigt. Sie erstreckt sich entscheidend auf die Umsetzung. In den meisten Fällen verdient eine Strategie erst als eine solche genannt zu werden, wenn die ersten Schritte in der Umsetzung erfolgt sind. Denn in der Umsetzung wird sie verfeinert und konkretisiert. Die Umsetzung muss in einer modernen und intelligenten Strategie offen sein: Offen für die Hinweise von Frühindikatoren aus der Umfeldanalyse und aus den Szenarien, offen für die weitere Detailplanung und Anpassung an die Gegebenheiten. Da sich auch die besten Strategien wie oben gezeigt nur auf „Theorien zur Zukunft“ beziehen, müssen sie erkenntnistheoretisch falsifizierbar sein, also hinsichtlich ihrer sich in der Realität erweisenden Richtigkeit überprüfbar bleiben und überprüft werden. Das erfordert eine Klarheit im Aufbau und in der Argumentation, was im Übrigen auch die Kommunikation der Strategie (eine andere lohnende Herausforderung) erleichtert. Die gefundenen Szenarien bleiben mithin alle für die Umsetzung der Strategie relevant, auch die als weniger relevant betrachteten. Wir erinnern uns: Auch die Szenarien befreien die Entscheidung nicht von den Unsicherheiten, sondern bilden in unvollständiger Weise verschiedene mögliche Entwicklungen ab. Es gilt sie bei der jährlichen Überprüfung der Strategie zur Kontrolle und zum Abgleich heranzuziehen. Wohl gemerkt: Es geht nicht darum neue Szenarien zu entwickeln, sondern die Realität und die Sicht auf die relevanten Faktoren anhand der für die Entwicklung der Strategie verwendeten Szenarien zu überprüfen.

Die offene Umsetzung erfordert eine klare Unterscheidung zwischen dem, was wir belastbar wissen und dem, was wir nicht mit einem entsprechenden Wissen unterlegen können, also der Benennung der Unsicherheiten (*bekannte Unsicherheiten*). Eine Strategie und ihre Umsetzung müssen sich ausführlich mit den Aspekten beschäftigen, die wir nicht belastbar wissen, aber dennoch als relevante

Faktoren in die Szenarien eingestellt haben.[36] Die erwähnte jährliche Überprüfung der Annahmen, auf denen die Szenarien und damit die gewählte Strategie ruht, gehört zu dieser oft vernachlässigten Übung. Strategien – sind sie gut gemacht – müssen, ja dürfen nicht jedes Jahr neu geschrieben werden. Hingegen dürfen und müssen sie jedes Jahr weiterentwickelt werden. Ihre fundamentalen Annahmen jedoch müssen einer regelmäßigen Überprüfung unterzogen werden. Nur wenn diese sich wesentlich verändern oder – was auch immer wieder geschieht – die Zielvorstellung in einem Unternehmen anders gesetzt werden, dann liegt es nahe, die Strategie neu zu denken.

4.2 Verschränkte Umsetzung

Die Strategieumsetzung muss in klar gegliederten und aufeinander aufbauenden und ineinander verschränkten Teilabschnitten zerlegt werden. Jede dieser Teilabschnitte muss wiederum ausgeplant und in eigene Umsetzungsbausteine gegliedert werden. Spätestens an dieser Stelle ist es ratsam die Planungsbewegung umzudrehen. Also von der nach unten weitergereichten Vorgabe durch die Leitungsebenen in die Erarbeitung der Umsetzungspläne durch die betroffenen nachgeordneten Einheiten überzuwechseln. Der strategische Planungsprozess muss so gestaltet werden, dass wiederum die Leitungsebene diese Umsetzungspläne prüft, abgleicht und freigibt. Auf diese Weise werden die strategischen Planungsaktivitäten vertikal verschränkt und die auf der jeweiligen Ebene getroffenen Grundannahmen erfahren gewissermaßen einen ersten Tauglichkeitstest. Die von der Unternehmensleitung getroffenen strategischen Annahmen müssen von den innerbetrieblichen Adressaten der Strategie in Pläne umgesetzt werden, die zu den vorgegebenen Annahmen, der Richtung und den Zielen passen. Dieser Praxistest wiederholt sich je nach Anzahl der hierarchischen Planungsstufen.

Insoweit der bis hierhin beschriebene Strategieprozess effektiv strukturiert war, sollte es zu keinem „Praxisschock“ kommen. Jedoch erfordert dies nicht nur eine im Prozess frühe entsprechende Erfassung der auf den jeweiligen Planungsebenen relevanten Realitäten, sondern auch eine produktive Konfliktkultur im Unterneh-

[36] Siehe dazu, insbesondere in Bezug auf politische Strategien: Sandra Mitchell, ebenda S. 114 ff.

men.[37] Wie bereits erwähnt müssen Strategien ähnlich wie wissenschaftliche Theorien prinzipiell falsifizierbar sein. Dies erfordert einen stetigen, radikalen – also an die Wurzeln des Annahmegerüstes gehenden – Diskurs, dem nicht nur bei der Entstehung der Strategie eine erhebliche Relevanz zukommt, sondern auch und vor allem in der jährlichen Überprüfung und Adjustierung der Strategie. Diese Rückkopplung, die wieder im Lichte der Szenarien betrachtet wird, löst notwendige Korrekturen aus. Dies kann dazu führen, dass bestimmte Anstrengungen verstärkt und andere abgeschwächt werden oder auch, dass sie im zeitlichen sich verändernden Kontext eine andere Relevanz bekommen.

Spätestens an dieser Stelle sollte klar werden, dass eine solide und robuste Strategie ganz entscheidend mit einer entsprechenden Unternehmens- und Führungskultur zu tun hat. Nur dort, wo ein offener und kontroverser aber an den Grundfesten des Unternehmens ausgerichteter Diskurs möglich ist, kann eine Strategie in der Erstellung und dann Umsetzung angepasst und entscheidend verbessert werden. Ist dies nicht der Fall, werden die ex-cathedra-Strategien zur Hybris und zum Garanten des Scheiterns.

5 Schlussbemerkung

Bleibt noch die Frage, wie in diesem Zusammenhang der Begriff intelligent zu verstehen ist. Wohl im zweifachen Sinne. Zum einen sind Strategien Ergebnisse von gut strukturierten Denkleistungen. Strategien setzen also kognitive Leistungen voraus, wie sie in ihrer Gesamtheit nur Menschen zu eigen sind. Menschen wollen in der Regel ihre Zukunft gestalten, ohne dieses Streben ist weder ein Überleben noch positive Veränderung des Status-quo möglich. Zum anderen kann man eine Strategie wohl dann als intelligent bezeichnen, wenn die besagte Denkleistung von mehreren Menschen zu einer treffenden Analyse und einem guten Plan zusammengefügt wird, der mit Menschen und durch Menschen erfolgreich umgesetzt wird. Dass die damit verbundenen Denkleistungen vollständig und erfolgreich einem Computer übertragen werden können, darf bezweifelt werden. Zwar hat die Künstliche Intelligenz bei Vorgängen wie Analysen, die wissensbasiert sind oder

[37] Zur Bedeutung und mit weiteren Nachweisen siehe Erich Zahn, et al., *Theorie und praktischer Nutzen von Unternehmenskultur*, im Handbuch Unternehmensorganisation, S. 164 ff, Hrsg. Hans-Jörg Bullinger, Springer, Heidelberg 2009.

die Muster erkennen (wie bei der Risikoermittlung) oder die Modelle simulieren (wie bei der Szenarioplanung) unzweifelhafte Vorteile[38], jedoch fehlt ihr bei der Entwicklung der Strategie ein entscheidendes Element. Ziele, die sich auf die Erreichung eines Umsatzes und bestimmter Profitabilitätskennziffern beschränkten, sowie die Simulation von Gegebenheiten und die situative Anpassung von Maßnahmenplänen, kann Künstliche Intelligenz sicher besser erreichen als der einzelne Mensch oder eine Gruppe von Menschen. Fehlen dürfte es aber an der sinnstiftenden Zielsetzung[39], dem voluntativen Akt, der in jedem guten Strategieprozess schlussendlich die ursprüngliche Richtung und dann auch im Laufe der Umsetzung die Korrektur oder gar die Richtungsänderung vorgibt. Ganz und gar fehlt es an den sozialen und emotionalen Fähigkeiten, welche die Umsetzung einer Strategie erfordern. Gute Strategien sind am Ende auch immer gut erzählte Geschichten, die den betroffenen Menschen Orientierung geben und sie für die Ziele und den Weg dahin begeistern. Hier müssen die Impulse durch Menschen gesetzt werden. Künstliche Intelligenz wird den Menschen über Berechnung von Robustheiten von Szenarien und Mustererkennung mehr und mehr helfen, Risiken und Chancen zu identifizieren sowie Anpassungsvorschläge zu erarbeiten. Die Zielsetzung, was erreicht werden soll, die Einpassung in den sozio-ökonomischen Kontext und die Realisierung der Strategie in der Lebenswelt selbst, wird aber weiter den Menschen vorbehalten bleiben.

[38] Siehe dazu mit Blick auf die Entwicklung von robusten Strategien gegenüber dem Klimawandel: Steven W. Popper, Robert J. Lempert, Steven V. Bankes, *Die Kunst in die Zukunft zu blicken*, Spektrum der Wissenschaft, S. 94 f, Juli 2006; siehe auch Robert J. Lempert, Steven W. Popper, Steven J. Bankes, *Confronting Surprise*, in Social Science Computer Review, S. 420 ff, 2002.

[39] Und hier sei nicht nur an den *Purpose* und die *Vision* gedacht, sondern an die Gesamt- und Etappenziele einer Strategie.

Über den Autor

Dietrich Firnhaber leitet das zentrale *Strategy & Portfolio Development Team* der Covestro AG. Seine Verantwortung erstreckt sich von der Entwicklung der weltweiten Strategie des Unternehmens bis hin zu wesentlichen Elementen der Strategieumsetzung, einschließlich aller M&A Aktivitäten. Dietrich Firnhaber blickt auf rund 25 Jahre Erfahrung im Umgang mit Unternehmensstrategien und Veränderungsprojekten zurück. Nach dem Studium der Rechtswissenschaften in Heidelberg und München begann er seine berufliche Laufbahn als Rechtsanwalt auf dem Gebiet des Steuer- und Gesellschaftsrechts in einer internationalen Kanzlei. Mit seinem Wechsel in die Unternehmenswelt war er unter anderem als *Chief Legal Officer* von internationalen Unternehmen tätig, bevor er sich ausschließlich auf die Unternehmens- und Strategieentwicklung konzentrierte. Dietrich Firnhaber hatte in Deutschland, den USA und Großbritannien Führungspositionen in verschiedenen Branchen wie dem Maschinen- und Anlagenbau und der Energie- und Wasserwirtschaft inne. Er ist als Mediator ausgebildet und in einer Reihe von gemeinnützigen Organisationen engagiert.

Korrespondenzadresse:
Dietrich Firnhaber
Covestro AG (Building E 54)
Friedrich-Ebert-Straße 350
51373 Leverkusen

E-Mail: dietrich.firnhaber@covestro.com
Homepage: https://www.covestro.com

Sektion 6:
Kulturelle Intelligenz

Intelligenz in und mit Literatur

VERA NÜNNING

Anglistisches Seminar, Universität Heidelberg

Zusammenfassung

Obgleich Konsens darüber besteht, dass literarische Werke zur Bildung beitragen, mangelt es bislang an Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Literatur und Intelligenz. Dabei sprechen gute Gründe dafür, sich mit Literatur zu befassen, um besser zu verstehen, welche Arten von Intelligenz welche Vorzüge bzw. Nachteile haben. Nach einer kurzen Erörterung des Zusammenhangs zwischen Literatur und Intelligenz wird in diesem Beitrag zunächst anhand von zwei Romanen gezeigt, welche Einblicke literarische Werke *in* Intelligenz eröffnen können. Die Untersuchung von Ian McEwans *Machines Like Me* (2019) und Kazuo Ishiguros *Klara and the Sun* (2021) fokussiert nicht nur unterschiedliche Arten von Intelligenz, wie analytische, emotionale, menschliche und künstliche Intelligenz, sondern sie dient auch als Anhaltspunkt, um darzulegen, welche Erfahrungen Lesende von literarischen Werken *mit* Intelligenz machen können. Die knappe Schlussbetrachtung kreist um einige zentrale Fragen, die die Romane zur Verbindung zwischen Intelligenz, Weisheit und Ethik aufwerfen.

1 Warum Intelligenz und Literatur? Forschungsdesiderate, Begriffsbestimmungen und zentrale Thesen

Obgleich es zu den Gemeinplätzen von Sonntagsreden gehört, dass Lesen und Literatur förderlich für die Bildung und damit wohl auch für die Intelligenz von Lesenden sind, zählt der Zusammenhang von Literatur und Intelligenz zu jenen Gebieten, mit denen sich die Literaturwissenschaft bislang noch nicht näher

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24397

beschäftigt hat.[1] Dies verwundert umso mehr, als gerade seit der Jahrtausendwende neben Digitalisierung vor allem ‚Künstliche Intelligenz' zu den *buzzwords* zählt, deren Bedeutung in unterschiedlichen Disziplinen immer wieder betont wird. Dennoch fehlen meines Wissens systematische Untersuchungen des Verhältnisses von Literatur und Intelligenz, welches bisher weder theoretisch konzeptualisiert noch empirisch untersucht wurde. Das gleiche gilt für die Repräsentation und Konfiguration verschiedener Arten von Intelligenz in Romanen, Dramen und Kurzgeschichten.

Ein Artikel allein kann diese grob umrissenen Forschungslücken zwar nicht schließen. Gleichwohl setzt sich der vorliegende Beitrag zum Ziel, auszuloten, welche Arten von Intelligenz *in* literarischen Werken repräsentiert werden und zu welchen kognitiven Leistungen Lesende *mit* Literatur angeregt werden. Als Ausgangspunkt dient die Beobachtung, dass der Wert von Literatur für Phänomene wie Intelligenz häufig darin gesehen wird, dass literarische Werke ein breites Publikum faszinieren und einen größeren Einfluss auf dessen Einstellungen haben können als fachwissenschaftliche Studien. Insbesondere gesellschaftliche verbreitete Vorstellungen davon, was allgemein unter fortgeschrittener ‚Künstlicher Intelligenz' und humanoiden Robotern verstanden wird, sind geprägt etwa von Science-Fiction-Romanen und einer Reihe von Filmen, die publikumsträchtig vermitteln, wie solche Androiden denken, fühlen und handeln (Costa/Ribas 2019). Mit der Popularisierung von Auffassungen über künstliche oder auch typisch ‚männliche' oder ‚weibliche' Intelligenz ist das Potential von Literatur im Blick auf Intelligenz jedoch keineswegs erschöpft. Vielmehr können literarische Werke ein breites Spektrum von Funktionen erfüllen, die eng mit unserem Verständnis von Intelligenz verbunden sind und die im Folgenden analysiert werden sollen.

Vor allem drei Gründe sprechen dafür, Literatur zu berücksichtigen, um besser zu verstehen, was Intelligenz ausmacht. Literarische Werke verleihen, so die erste Hypothese dieses Artikels, wertvolle Einblicke darin, welche vielfältigen Facetten Intelligenz hat und wie diese sich in bestimmten Situationen manifestieren

[1] In der Psychologie wird die Lesekompetenz als Bestandteil von bzw. in Verbindung mit Intelligenz untersucht (siehe etwa Schiffer et al. 2002 und Georgiou et al. 2020). Darüber hinaus ist Lesekompetenz – und damit eng verbunden auch das häusliche Lesen – ein zentraler Bestandteil der PISA-Studien (vgl. Csapó/Funke 2017). Im Folgenden soll die Beziehung zwischen Intelligenz und literarischen Werken (insbesondere Romanen) analysiert werden.

können. Zweitens können literarische Werke stereotype Vorstellungen und Hierarchisierungen von unterschiedlichen Arten von Intelligenz – etwa von ‚männlicher' und ‚weiblicher' Intelligenz – aufbrechen. Drittens fördert die Lektüre literarischer Werke kognitive Fähigkeiten von Lesenden, insbesondere im Hinblick auf emotionale und soziale Intelligenz.

Literarische Werke greifen einerseits zurück auf verbreitete Vorannahmen darüber, was Intelligenz ist, andererseits beeinflussen sie das Verständnis, das Lesende von Intelligenz haben. Diesen Prozess der wechselseitigen Einflussnahme hat der Philosoph Paul Ricœur in seinem dreistufigen dynamischen Mimesis-Modell näher erfasst (1984: 54–71). Ricœur geht von einer in der Wirklichkeit vorherrschenden ‚Präfiguration' von Erfahrungen aus, die kulturell geformt ist. Auch Menschen, die noch nie einen psychologischen Fachaufsatz gelesen haben, verfügen über implizite, kulturell geprägte Vorstellungen davon, was Intelligenz ausmacht, und wie diese mit als männlich oder weiblich angesehenen Eigenschaften korreliert. Literarische Werke beziehen sich auf diese präfigurierte Wirklichkeit, und sie ‚konfigurieren' ausgewählte Inhalte in kunstvoller Weise. Diese Konfigurationen setzen Elemente selektiv in Beziehung zueinander und verleihen ihnen durch ästhetische Verfahren eine spezifische Bedeutung. Mit dem Begriff der ‚Refiguration' bezeichnet Ricœur das Potential literarischer Werke, ihrerseits auf verbreitete Vorstellungen zurückzuwirken. Die neuen Sichtweisen, die Literatur eröffnet, bereichern das Wissen und die Überzeugungen von Lesenden und können somit die in der Realität kursierenden Vorstellungen in neuer Weise refigurieren und damit Einstellungen und Handlungen beeinflussen.

Einsichten in bislang unbekannte Phänomene und neue Erfahrungen sind für Lernprozesse sowie die Steigerung kognitiver Fähigkeiten unabdingbar. Literatur bereichert den Schatz relevanter Erfahrungen, die Menschen während ihres Lebens machen können, ganz außerordentlich. Literatur erweitert den mentalen Horizont in zeitlicher – etwa durch Utopien oder historische Romane bzw. Werke, die in früheren Epochen geschrieben wurden – ebenso wie in kultureller Hinsicht. Die meisten Erfahrungen, die man durch Mitfühlen mit literarischen Held*innen gewinnt, würde man in der Realität nicht machen können und oft auch nicht machen wollen. Zudem sind literarische Erfahrungen insofern einzigartig, als Lesende häufig unmittelbaren Einblick in das Bewusstsein, in die Gedanken und Gefühle von Figuren gewinnen. Über wen weiß man so viel wie über Figuren aus Romanen, wie Emma Bovary, Wilhelm Meister oder auch Harry Potter? In

literarischen Werken bekommen Lesende Einblick in kognitive und affektive Prozesse, die uns in der Regel in Alltagssituationen verborgen bleiben.

Literarische Erfahrungen sind auch deshalb besonders wertvoll, weil sie ausgewählt und in eine bestimmte Form gebracht werden. Diesen Unterschied zwischen lebensweltlicher Erfahrung und Literatur hat die renommierte Romanautorin Zadie Smith prägnant auf den Begriff gebracht:

> Experience – mystifying, overwhelming, conscious, subconscious – rolls over everybody. We try to adapt, to learn, to accommodate, sometimes resisting, other times submitting to, whatever confronts us. But writers go further: they take this largely shapeless bewilderment and pour it into a mould of their own devising (Smith 2020: 5).

Die Selektion und ästhetische Konfiguration von Erfahrungen in literarischen Werken, die auch die Emotionen von Lesenden ansprechen und diese in ihren Bann ziehen, ist einer der Gründe für die Überzeugungskraft von Literatur. Selbst wenn Lesende sich bewusst sind, dass literarische Texte keine realen Begebenheiten schildern, so ist in einer Vielzahl von Experimenten von Melanie C. Green und anderen nachgewiesen worden, dass die Lektüre fiktionaler Erzählungen zu einer Veränderung von Wissen und Einstellungen führen kann.[2] Damit kommt Literatur eine wichtige Rolle in der Repräsentation, Kritik und Verbreitung von Vorstellungen von Intelligenz zu.

Zudem ist die Lektüre literarischer Werke durch „open-mindedness“ gekennzeichnet, die einen wichtigen Aspekt von Intelligenz bildet (Cianciolo/Sternberg 2004: 76). Um aus Erfahrungen lernen zu können, muss man offen für diese Erfahrungen sein. In einem „immersiven“ Leseprozess lässt man sich so sehr auf die fiktionale Welt und die Figuren ein, dass man sogar die gewohnte Umgebung und die eigenen Sorgen für eine Zeit vergisst. Diese Offenheit für das Neue, das man in Literatur erleben kann, ist auch dadurch begründet, dass Einblicke und Erlebnisse, die in und mit Lektüre gemacht werden, keine Gefahr für das eigene Welt- und Selbstbild darstellen. Daher sind Lesende offener für fiktionale Erfahrungen – sie

[2] Diese Überzeugungskraft hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Vgl. zur persuasiven Macht von Erzählungen insbesondere Green (etwa Green/Brock 2000; Green/Dill 2013); zur Bedeutung von Erzählkonventionen vgl. Nünning (2014, Kapitel 5).

können sich auf Sichtweisen einlassen, die sie ansonsten abblocken würden.[3] Das immersive Lesen erfüllt damit Bedingungen, die nach Gerald Hüther (2006: 71, 80) ideal für das Etablieren neuer Synapsen und für Lernprozesse sind.

Literarische Werke bieten somit nicht nur die Möglichkeit, eine Fülle von neuen Erfahrungen zu machen, sondern auch aus diesen Erfahrungen zu lernen.[4] Letzteres ist ein zentraler Bestandteil von Intelligenz: „Intelligence is the ability to learn from experience, to reason abstractly, and to adapt to the surrounding environment" (Sternberg 2019b: 267). Literatur ermöglicht Lesenden, aus den Erfahrungen zu lernen und ihre interpersonalen kognitiven Fähigkeiten zu fördern. Dies ist sowohl in kurz- als auch in längerfristig angelegten Experimenten nachgewiesen worden: Leser*innen von literarischen Geschichten schneiden in Tests emotionaler Intelligenz (etwa dem ‚Minds in the Eye'-Test) besser ab als Nicht-Lesende.[5]

Darüber hinaus kann Literatur vorherrschende Überzeugungen kritisieren. Ein problematischer Aspekt der ‚präfigurierten' kulturellen Vorannahmen zur Intelligenz ist, dass diese – über nationale Grenzen hinweg – geschlechtsspezifische Stereotype beinhalten (Ellemers 2018). Insgesamt überwiegt die Vorstellung, dass Mädchen und Frauen weniger intelligent seien als Männer. „General intelligence" wird ebenso wie logisches Analysieren und mathematische Fähigkeiten vor allem Männern zugeschrieben (Meneviş/Özad 2014: 9); Frauen hingegen werden etwas besser in emotionaler Intelligenz, verbaler und sozialer Intelligenz beurteilt (Fischer et al. 2018). Obgleich gender-spezifische Unterschiede zwischen verbaler und mathematisch-visueller Intelligenz beobachtet wurden und in Intelligenztests berücksichtigt werden, sind diese geringer und weniger weitreichend als gemeinhin angenommen (etwa Halpern/LaMay 2000: 238f.). Die vorherrschende

[3] Die Bedeutung dieses Gefühls der Sicherheit für Lernprozesse von Lesenden wird häufig anerkannt. Meines Wissens nach findet es sich zuerst in einem Artikel von Daniel C. Batson et al. (1997).

[4] Das Wissen, das aus Literatur gewonnen werden kann, ist kein explizites Wissen, das sich in deklarative Sätze fassen lässt. Stattdessen geht es um non-propositionales Wissen, um Formen des Erkennens, die aufweisen bzw. zeigen (statt auszusagen bzw. mitzuteilen), sowie um „Vergegenwärtigung bzw. Versinnlichung (nicht begriffliche Bestimmung) des jeweils Gemeinten; [...] analogisches (nicht logisches) Denken" (Schildknecht 2007: 32).

[5] Mar et al. (2006); eine sehr gute Zusammenfassung des Forschungsstandes, der maßgeblich von Keith Oatley vorangebracht wurde, findet sich in Oatley (2016).

Auffassung, dass Jungen zumindest in puncto logischen, mathematischen Denkens grundsätzlich klüger seien als Mädchen, wird dadurch ebenso wenig beeinträchtigt wie durch die Tatsache, dass Mädchen in der Regel bessere Schulnoten haben – Stereotype lassen sich durch Fakten nicht leicht verändern.[6] Solche Vorannahmen werden in populären Romanen ebenso wie in Filmen oder Computerspielen häufig bestärkt und zugespitzt. Gleichzeitig können Kunstwerke solche Stereotype auch abbauen oder verringern (Batson et al. 1997; Johnson et al. 2013).

Welchen Wert literarische Werke für ein Verständnis von Intelligenz haben können, wird im Folgenden anhand von zwei Romanen erörtert. Ian McEwans Roman *Machines Like Me* (2019) und Kazuo Ishiguros *Klara and the Sun* (2021) kontrastieren zudem menschliche Intelligenz mit ‚Artificial Intelligence', die zunehmend in Form von ‚smart homes', ‚autonomem Fahren' und ‚virtuellen Assistentinnen' wie Alexa, Cortana und Siri Einzug in unseren Alltag hält. In beiden Romanen dient die Repräsentation künstlicher Intelligenz zudem als Folie für die Konturierung von menschlicher Intelligenz. Im Folgenden werden die beiden Werke zunächst daraufhin befragt, welche Einsichten in Intelligenz sie ermöglichen. Die Untersuchung der Repräsentation von Intelligenz in Ian McEwans *Machines Like Me* wird besonders auf die Kontrastierung unterschiedlicher Arten von Intelligenz hin orientiert sein (Teil 2), während in der Erörterung von Ishiguros Roman die emotionale Intelligenz im Vordergrund steht (Teil 3). In beiden Teilen wird zudem der Zusammenhang von menschlicher sowie künstlicher Intelligenz und Gender erörtert. Im vierten Teil sollen die Ergebnisse abstrahiert und auf die Erfahrungen bezogen werden, die Leser*innen während der Lektüre machen können (4). Anstelle einer zusammenfassenden Schlussbetrachtung wird abschließend gefragt, welche Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen Intelligenz, Ethik und Weisheit beide Werke zulassen (5).

[6] Zu Gründen dafür, warum sich diese größtenteils unberechtigten Stereotype hartnäckig halten, vgl. den ausgezeichneten Artikel von Ellemers (2018).

2 Die Repräsentation von Intelligenz in Ian McEwans *Machines Like Me*: Kontrastierung unterschiedlicher Arten von Intelligenz und Konfliktpotential

In Ian McEwans Roman werden unterschiedliche Arten von Intelligenz präsentiert, die maßgeblich von drei Figuren verkörpert werden. Das Verständnis davon, wie genau sich diese Arten von Intelligenz zueinander verhalten, wird durch die Erzählweise des Romans erschwert. Als Erzähler fungiert Charlie Friend, eine sympathische Jedermannfigur, die zwar direkten Einblick in die eigenen Bewusstseinsvorgänge erlaubt, jedoch nicht über allzu viel emotionale Intelligenz verfügt. Daher müssen Lesende selbst erschließen, was Charlies Partnerin Miranda und den Androiden Adam, den Prototyp eines Roboters, der von seinem Aussehen und seinem Verhalten nicht von Menschen zu unterscheiden ist, besonders auszeichnet.

Charlie, der sich leidenschaftlich für Roboter und künstliche Intelligenz interessiert, verkörpert einen wissenschaftlich-distanzierten Zugriff auf die fiktionale Welt. Immer wieder versucht er Adam dadurch zu verstehen, dass er sich über die technischen Prozesse Gedanken macht, die dessen Worten und Handlungen zugrunde liegen. Dabei geriert Charlie sich als intelligenter Angehöriger einer überlegenen Spezies, der eine effiziente Maschine analysiert, eine „inanimate confection whose heartbeat was a regular electrical discharge, whose skin warmth was mere chemistry“ (McEwan 2019: 10). So fragt er sich, auf welche Weise die Techniker wohl erreicht haben, dass Adam sich in jeder Hinsicht menschenähnlich verhält, und ob man überhaupt davon sprechen kann, dass Adam ‚sieht‘. Schließlich gäbe es in Adam niemanden, der die Bilder sehe, die die Kamera hinter seinen Augen aufnehme und auf einen Monitor projiziere: „An image on some internal screen that no one was watching“ (ibid.: 77).[7]

Obgleich Charlie Adam grundsätzlich distanziert betrachtet und durch Beobachtung sowie analytisches Denken zu verstehen sucht, können Lesende erkennen, dass die Emotionen des Erzählers dessen Denken beeinflussen. Mit der Objektivität seiner rationalen Zugangsweise ist es nicht sonderlich weit her. Im Verlaufe der

[7] Später erkennt Charlie, dass sich diese Frage bei Menschen genauso stellt: „I still wondered what it meant, that Adam could see, and who or what did the seeing. [...] No mechanistic explanation could help. I couldn't resolve the essential difference between us. I had little idea of what passed along my own optic nerve, [...] or who was doing my seeing for me.“ (Ibid.: 128f.)

Handlung reagiert Charlie zunehmend auf Adam als ein scheinbar denkendes und fühlendes Wesen. Er zweifelt zwar explizit daran, dass Adam über Selbstbewusstsein und Emotionen verfügt, ist jedoch eifersüchtig, als dieser eine Liebesnacht mit Miranda verbringt: „I duly laid on Adam the privilege and obligations of a conspecific. I hated him" (ibid.: 84). Selbst der Blick von Adam erscheint ihm in solchen Momenten als „rich with meaning" (ibid.: 77), und es bleibt den Lesenden überlassen, zu entscheiden, ob Charlies Projektionen den Tatsachen in der fiktionalen Welt entsprechen: „[We] were dealing on the human plane" (ibid.: 254). Charlie versteht zwar recht wenig von Emotionen, weder von den eigenen noch von denen anderer Figuren, aber seine Einschätzung von Adam wird maßgeblich von seinen Gefühlen geprägt. So ergibt sich ein weiterer Wendepunkt in seiner Beurteilung von Adam, nachdem er diesem den Kopf zertrümmert hat und ihn wieder distanzierter als Maschine betrachtet.

Sowohl durch seine Betonung logischer und analytischer Denkweisen als auch durch seine relativ geringe emotionale Intelligenz bestätigt Charlie stereotype Erwartungen an kognitive Fähigkeiten von Männern. Im Romanverlauf wird jedoch deutlich, dass auch das häufig als überlegen angesehene männliche Denken von Emotionen beeinflusst und alles andere als objektiv ist. Zudem ist Charlies Zugriff auf die fiktionale Welt, wie im Kontrast zu Miranda und insbesondere Adam deutlich wird, nicht von Erfolg gekrönt. Durch die Zerstörung Adams macht Charlie zuletzt eigenhändig alle Vorteile zunichte, die er durch den Kauf des Prototypen gewonnen hatte. Männliche Intelligenz allein, so könnte man resümieren, reicht in der fiktionalen Welt nicht aus, um Probleme zu bewältigen.

Da Charlie der einzige Erzähler der Geschichte ist, müssen Leser*innen Mirandas Gedanken und Gefühle aus deren Verhalten erschließen. Obgleich Charlies spärliche Aussagen keine detaillierten Rückschlüsse zulassen, wird deutlich, dass sich Miranda durch soziale und affektive Fähigkeiten auszeichnet, die traditionell als weiblich angesehen werden. Diese kognitiven Leistungen sind bei Miranda gepaart mit einer hohen Praxisorientierung und der Fähigkeit, andere dazu zu bewegen, ihren Wünschen zu folgen. Eine ganz außergewöhnliche Konsequenz im Umgang mit Emotionen von sich selbst und anderen zeigt sich, als sie – noch sehr jung – ihre Freundin rächt, die nach einer brutalen Vergewaltigung, über die sie mit ihrer Familie nicht zu sprechen wagte, Selbstmord beging. Da Miranda keine Anzeige erstatten kann, ohne den Eltern von der Vergewaltigung zu berichten, arrangiert sie eine sexuelle Begegnung mit dem Schuldigen Gorringe – um ihn

danach wegen Vergewaltigung anzuzeigen und für drei Jahre ins Gefängnis zu bringen. Insgesamt zeigen die wenigen Erwähnungen von Mirandas Verhalten ein erstaunliches Zusammenwirken nicht nur vom Erkennen und Integrieren der eigenen Emotionen in ihr Denken und Handeln, sondern auch eine außerordentliche Fähigkeit zur Regulation von Gefühlen.[8] Wenn neben emotionalen auch ‚kreative' sowie ‚praktische' Kompetenzen ein wichtiger Bestandteil von Intelligenz sind (Sternberg 2019b: 280), so lässt sich Miranda, die in diesen Bereichen ebenfalls besonders veranlagt ist, eine hohe Intelligenz zusprechen.

Mirandas Handeln zeigt aber auch, das manipulatives und unmoralisches Verhalten durchaus mit hoher Intelligenz vereinbar ist. Diese Entkoppelung von Intelligenz und Ethik tritt besonders im letzten Teil des Romans zu Tage. Nicht nur fragt sich Miranda an keiner Stelle, ob ihr Meineid und ihre Handlungen im Zusammenhang mit der Inhaftierung von Gorringe ethisch zu verantworten gewesen seien oder nicht. Vielmehr setzt sie alles daran, Gorringe noch ein zweites Mal verurteilen zu lassen: dieses Mal offiziell für die Vergewaltigung ihrer Freundin. Auch dieser Plan gelingt, wenngleich mit hohen Kosten für Miranda selbst.[9] Obgleich Gorringe als vermeintlicher Wiederholungstäter eine schwerere und damit moralisch ungerechtfertigte Strafe bekommt, ist er ironischerweise der Einzige, der seine Schuld anerkennt. Miranda und Charlie sind nach wie vor der Überzeugung, alles richtig gemacht zu haben und Gorringe moralisch überlegen zu sein.

Interessant wird die Kontrastierung unterschiedlicher Arten von Intelligenz durch die kognitiven Fähigkeiten des humanoiden Roboters Adam, der zweifellos hoch intelligent ist, aber durch die Erzählweise eine „black box" (Kim 2021) bleibt. Lediglich in einigen Dialogen zwischen Adam und dem Erzähler bekommen Leser*innen Einblick in dessen Denken und Fühlen. Durch Adams Versuche, mit Charlie zu kommunizieren, wird deutlich, dass sein analytisches Denken unübertroffen ist; auch kann man Daten nicht schneller und präziser verarbeiten als dieser Android. Einige Prinzipien scheinen ihm einprogrammiert worden zu

[8] Damit beweist sie nach den Definitionen von Goleman (1995) und Mayer et al. (2000) hohe emotionale Intelligenz.

[9] Aufgrund von Adams Entscheidung, belastende Aussagen zu Mirandas Meineid nicht aus dem Beweismaterial zu löschen, kommt auch Miranda vor Gericht und wird zu einer kurzen Haftstrafe verurteilt, die auch eine geplante Adoption zunächst verhindert.

sein; so orientiert er sein gesamtes Denken und Handeln am Prinzip der Wahrheit. Sein immenses Wissen gewinnt er jedoch durch *Machine Learning*. In der kontrafaktischen fiktionalen Welt der 1980er Jahre, in denen der Roman spielt, verfügt Adam über Zugang zu einer unermesslichen Menge an Informationen, die er in rasanter Schnelligkeit nutzt, um Probleme zu lösen.[10]

Diese Art von analytischem Denken und der Verarbeitung riesiger Datenmengen ist bei einem Prototyp wie Adam zu erwarten; überraschender ist Adams Beharren darauf, über genuine Gefühle und Selbstbewusstsein zu verfügen. Seiner Liebe zu Miranda verleiht Adam literarischen Ausdruck, indem er ihr tausende von Liebes-Haikus schreibt. Sein Handeln speist sich aus unterschiedlichen Quellen; er verarbeitet naturwissenschaftliche Fachliteratur ebenso wie Gesetzestexte und geisteswissenschaftliche Fachstudien. Zudem ist er begeistert von Shakespeare, insbesondere von *Hamlet*: „Was ever a mind, a consciousness, better represented?" (McEwan 2019: 202) – eine Frage, die Charlie nicht beantworten kann, da er das Drama nicht gelesen hat und Büchern ohnehin eher aus dem Weg geht.[11] In diesem Roman integriert die künstliche Intelligenz eine ausgewogene Mischung von Denkinhalten sowie, zumindest was Adams Selbstbeschreibung angeht, eine ausgeglichene Kombination von Emotionen und analytischem Denken. Charlie wirkt im Kontrast dazu geradezu defizitär und einseitig.

Der ‚künstliche Mensch' Adam verfügt daher über bessere kognitive ‚menschliche' Fähigkeiten als seine Besitzer Charlie und Miranda. Im Verlauf des Romans entwickelt sich Adam zu einer Art überlegenem Doppelgänger von Charlie, denn er übt nicht nur dessen Beruf für ihn aus und verdient mehr Geld, als Charlie je sein Eigen nennen konnte, sondern übernimmt zunehmend auch dessen soziale Rollen. Dies ist dem Erzähler, der nicht weiß, wie er seine Tage füllen soll, zumindest teilweise bewusst: „My mind was empty, his was filling" (ibid.: 199). Dennoch verteidigt er eine letzte Bastion menschlicher Überlegenheit, indem er Adam ein (menschliches) Bewusstsein abspricht. Adam hingegen vertritt die

[10] Im Roman ist ‚KI' sehr weit entwickelt, denn da Alan Turing die Haftstrafe wählte, konnte er im Gefängnis – in Kooperation mit Wissenschaftlern aus aller Welt – bahnbrechende Entdeckungen machen und die digitale Verfügbarkeit von Daten in großem Stil vorantreiben. Zudem etablierte er eine Art von ‚open access', die Zeitschriften wie *Nature* und *Science* überflüssig machte und den Fortschritt wissenschaftlicher Forschung beschleunigte.

[11] Dass er diese Bildungslücke vor Adam nicht zugibt, zeigt jedoch, dass er ihn wie einen Menschen behandelt; er will sich Adam gegenüber keine Blöße geben.

entgegengesetzte Meinung: „It shouldn't surprise us that consciousness, your sort and mine, could arise from an arrangement of matter" (ibid.: 144). Durch die Gegenüberstellung von menschlicher und künstlicher Intelligenz wird somit letztlich betont, wie wenig wir über das menschliche Bewusstsein wissen. Die Frage nach einem Verständnis von ‚machine consciousness' wird zu einer Frage nach der Beschaffenheit menschlichen Bewusstseins.

Aus Gender-Perspektive betrachtet erscheint Adam dominant als männlich. In den Dialogen mit Charlie beteuert er zwar seine Gefühle, inszeniert werden jedoch seine analytischen Fähigkeiten sowie seine rasante Verarbeitung riesiger Datenmengen. Zudem übernimmt er zunehmend, wenngleich von Charlie zu spät bemerkt, eine (ebenfalls männlich konnotierte) Führungsrolle. Er entscheidet, dass Miranda aufgrund ihres Meineids angeklagt werden und eine Haftstrafe in Kauf nehmen soll. Mehr noch, er geht davon aus, dass dies nicht nur im Sinne des Gesetzes und moralisch richtig, sondern auch zum Besten von Miranda sei: „I thought you'd welcome the clarity [. . .] the relief of a clear conscience" (ibid.: 279). Darauf, dass Charlie und Miranda alles tun würden, um einer Gefängnisstrafe für Miranda zu entgehen, und mit Entsetzen und Gewalt auf seinen ‚Verrat' reagieren, haben ihn weder sein umfassendes Wissen über das ‚human mind' noch seine analytischen Fähigkeiten vorbereitet. Auch dies betont den Mangel an Wissen über den menschlichen Geist; nicht einmal auf der Basis einer extensiven Kenntnis aller relevanten Daten und unter Hinzuziehung fehlerloser Logik ist man in der Lage, menschliche kognitive Prozesse zu verstehen.

Dass Adam in der fiktionalen Welt des Romans körperlich wie geistig männlich konnotierte Denk- und Verhaltensweisen zeigt, widerspricht gängigen Vorstellungen von ‚virtuellen Sprachassistenten', die, wie Alexa, Siri oder Cortana zeigen, nicht nur weibliche Stimmen haben, sondern auch weibliche Verhaltensweisen an den Tag legen. In den letzten Jahren fand eine Anthropomorphisierung solcher ‚Assistentinnen' statt, die eine Verlagerung „from rational-cognitive and problem-solving to a socio-emotional interaction" (Costa/Ribas 2019: 173) aufweist. Solche Helferinnen werden zunehmend mit weiblichen Attributen und Verhaltensweisen versehen. Zudem wird versucht, sie menschlicher und vor allem freundschaftlicher erscheinen zu lassen: „we start looking at chatbots as feminine, kind, and warm entities" (ibid.: 174; Hester 2017).

Die Repräsentation von Adam konterkariert damit konventionelle Zuschreibungen von geschlechtsspezifischer Intelligenz. Im Roman bewerben die Hersteller

der Prototypen diese mit der Breite der (männlich wie weiblich konnotierten) Aufgaben, die diese Androiden erfüllen können, aber zumindest im Verhalten von Charlies Adam zeigen sich vor allem Charakteristika, die als männlich bewertet werden. Dies ist insofern bedenkenswert, als die 25 Prototypen zwar über männliche oder weibliche Körper, aber über die gleichen kognitiven Fähigkeiten verfügen – Charlies Adam hätte daher auch weiblich konnotierte oder neutrale Verhaltensweisen zeigen können. In der fiktionalen Welt sind dreizehn dieser ‚künstlichen Menschen' weiblich (die ‚Evas') und zwölf männlich (die ‚Adams'). Die nicht weiter kommentierte Tatsache, dass Charlie keine Eva mehr erstehen konnte, da dieses Modell bereits ausverkauft war, sagt wohl mehr über weibliche Stereotype und die Ausbeutung von Frauen als viele Abhandlungen.

3 Die Repräsentation von Intelligenz in Ishiguros *Klara and the Sun*: Empathie und Harmonie

Ein interessantes Pendant zur geschlechterspezifischen Attribuierung von Intelligenz in McEwan's *Machines Like Me* findet sich im neuesten Roman des Nobelpreisträgers Kazuo Ishiguro, der einen weiblichen humanoiden Roboter in den Mittelpunkt von *Klara and the Sun* (2021) stellt. Dieser Roman bildet in vielerlei Hinsicht einen Gegenentwurf zu McEwans Werk. So ist er in einer nahen Zukunft angesiedelt, in der eine reiche Elite ein völlig anderes Leben führt als die ausgegrenzte Mehrheit, deren Arbeitskraft – so wird am Rande deutlich – längst durch intelligente Maschinen substituiert wurde. Der größte Unterschied zu McEwans Werk besteht jedoch darin, dass ein weiblicher ‚künstlicher Mensch' die Handlung aus ihrer Sicht erzählt. Während Charlie offensichtlich nicht in der Lage war, Adams Bewusstseinsvorgänge einigermaßen adäquat einzuschätzen, spricht hier ein weiblicher Android namens Klara für sich und die Menschen in ihrem Umfeld.

Auch in Ishiguros Roman gibt es Roboter mit männlicher wie weiblicher Physis, und auch hier verfügen diese Maschinen grundsätzlich über die gleichen kognitiven Fähigkeiten. Ebenso wie Adams Fähigkeiten männlich konnotiert sind, entsprechen Klaras Fähigkeiten, die vor allem im Bereich der emotionalen Intelligenz angesiedelt sind, jedoch stereotypen Einschätzungen von weiblicher Intelligenz. Diese Betonung emotionaler Intelligenz entspricht in diesem Werk der Funktion dieser Maschinen. Deren wichtigste Aufgabe geht bereits aus der Gattungsbezeichnung dieser Roboter hervor: Statt AI handelt es sich um „AF", d. h.

um eine „Artificial Friend". Diese künstlichen Freunde sollen jeweils einem der Kinder, die in der Romanwelt bis zum Eintritt ins College relativ isoliert zu Hause leben, bestmöglich dienen und freundschaftlich zur Seite stehen. Im Gegensatz zu Adam ist Klaras gesamtes Denken, Fühlen und Handeln darauf ausgerichtet, Menschen emotional zu unterstützen. Statt der analytischen Kompetenz steht hier Empathie im Vordergrund. Trotz dieser klaren Verteilung von Aufgaben zeigt sich jedoch, dass sich die Mensch-Maschine-Beziehungen bei weitem nicht so unproblematisch gestalten, wie zu erwarten wäre.

Die Erzählerin des Romans, Klara, bildet ein Gegenbild sowohl zu Charlie als auch zu Adam. Klara, die zu Beginn des Romans in einem Laden darauf wartet, von wohlhabenden Kunden gekauft zu werden, zeichnet sich durchgängig dadurch aus, dass sie versucht, die Perspektive von anderen einzunehmen und ihr Bestes zu tun, um diese (seien es andere AFs oder die Leiterin des Geschäfts) vor negativen Erfahrungen zu bewahren. Das Verarbeiten von elektronischen Daten und logische Analysen spielen in ihrer Erzählung keine Rolle; vielmehr betont Klara ihr großes Interesse an der Beobachtung von Menschen. So ist sie erfreut, wenn sie im Schaufenster sitzen darf und dort das Leben auf der Straße beobachten kann, obgleich sie nur eine viel befahrene Einkaufsstraße sieht, auf der – insbesondere verglichen mit McEwans Roman – herzlich wenig passiert: Menschen steigen in Taxis, begrüßen oder verabschieden sich. Dennoch nutzt Klara ihre alltäglichen Beobachtungen, um daraus Rückschlüsse zu ziehen, die sie später zum Wohle ‚ihres' Kindes, Josie, anwenden wird.

Obgleich Klara als Erzählerin fungiert, ist der Grad ihrer Intelligenz zunächst nur schwer einzuschätzen. Sie ist äußerst bescheiden und konzentriert sich ganz auf die Wiedergabe ihrer Beobachtungen und der Schlüsse, die sie daraus zieht. Andere Figuren halten Klara für sehr intelligent. Diese Intelligenz zeigt sie jedoch ebenso wenig wie ihre Emotionen.[12] Selbst als sie von Kindern provoziert wird, einen Teil ihres Wissens zu demonstrieren, wartet sie auf ein Zeichen ‚ihres' Kindes, Josie, und lässt sich lieber verhöhnen, als ihr Wissen ungebeten offenzulegen. Erst als sie an einem Experiment teilnimmt, wird deutlich, dass sie komplexe, immer

[12] Auf Nachfrage sagt Klara knapp, dass sie Emotionen habe, und „sad" sei, dass Josie nicht an einem Ausflug teilnehmen konnte (Ishiguro 2021: 98). Ihre Gefühle beschreibt sie jedoch an keiner Stelle. Corrigan (2021) vermutet, dass Leser*innen Klara dennoch vermutlich als ‚sentient being' mit Emotionen wahrnehmen.

rascher auf dem Monitor auftauchende Aufgaben ohne jede Mühe lösen kann. Sie durchschaut rasch, worauf der Test hinausläuft und konzentriert sich statt dessen auf das Wohlergehen von Josie. Klara verfügt damit grundsätzlich über die gleiche Kombination unterschiedlicher Arten von Intelligenz wie Adam, sie nimmt jedoch eine Umwertung traditioneller Hierarchien vor: Sie löst komplexe analytische Intelligenzaufgaben quasi nebenher, während ihr ein mütterliches Beobachten des Kindes viel wichtiger ist.

Im Romanverlauf zeigt Klara nicht nur einen außergewöhnlichen Grad an emotionaler und sozialer Intelligenz, sondern auch eine Art der Fürsorge, die bis zur Selbstaufgabe reicht. So beweist sie mehrfach, dass sie die eigene Existenz zu opfern bereit ist, um dadurch Josie am Leben zu erhalten. In Ishiguros Roman scheint die Interaktion zwischen AF und Menschen zunächst auch deshalb gut zu funktionieren, weil die Aufgaben klar abgesteckt sind: Klara existiert ausschließlich, um den Menschen zu dienen. Im Gegenzug geben die Figuren, denen ihre Fürsorge gilt, der ‚künstlichen Freundin' zu verstehen, dass sie Rücksicht auf deren Gefühle nehmen. Josie erweist sich im Angesicht des eigenen Todes als sehr großmütig und verlangt von der Mutter, dass Klara, wenn sie später Josies Rolle spielen werde, in ihrem Zimmer wohnen dürfe und nicht nachts in einen Schrank gesteckt würde.[13]

In *Klara and the Sun* fällt der Vergleich emotionaler Fähigkeiten zwischen Menschen und Maschine alles andere als schmeichelhaft für die Menschen aus. Empathie und Fürsorge von Mutter und Tochter sind nur von kurzer Dauer, denn nachdem Josie wieder gesund ist und sich für das College vorbereitet, wird Klara nicht nur aus Josies Zimmer verbannt, sondern sogar in eine Abstellkammer gesteckt. Als Josie dies zufällig bemerkt, zeigt sich, dass es weniger Achtlosigkeit als Egoismus und Undankbarkeit sind, die für den Aufenthaltsort von Klara verantwortlich sind. Josie hilft Klara sofort, voller Freude – und stellt zwei Objekte übereinander, damit diese fortan aus dem hohen kleinen Fenster herausschauen kann. Dass Klara dankbar für die so gewonnene Aussicht auf ein menschenleeres Feld ist, zeigt ihre Bescheidenheit und Demut. Insgesamt verdeutlicht die Episode die Unterschiede zwischen menschlicher und künstlicher Intelligenz:

[13] Da Josie ebenso wie zuvor deren ältere Schwester langsam aber unwiederbringlich ihrem Tod entgegenzugehen scheint, plant die Mutter, Klara nach dem Tod als ‚künstliche Tochter' einzusetzen; sie hat sogar einen künstlichen Körper anfertigen lassen, der Josie sehr ähnlich sieht.

Mutter und Tochter können nach den Maßstäben der fiktionalen Welt durchaus als empathisch gelten – und doch besteht ein kategorialer Unterschied zu Klara, die die vermeintlich menschlichen Eigenschaften der Empathie und des Mitgefühls in weit größerem Maße aufweist als ihre Besitzerinnen. Die Frage danach, ob ein Android ein Bewusstsein und Gefühle haben kann, wird in Ishiguros Roman beantwortet: Klara ist sowohl im Hinblick auf mathematisch-logisches Denken als auch in puncto Empathie der bessere Mensch.

4 Zur Förderung emotionaler und sozialer Intelligenz durch Erfahrungen mit literarischen Werken

Explizite Thematisierungen und narrative Inszenierungen von Intelligenz sind jedoch nur ein Bestandteil des kognitiven Potentials von Literatur. Vielmehr können literarische Repräsentationen von Intelligenz auch auf der Ebene der Wirkungsästhetik betrachtet werden, um zu untersuchen, welche kognitiven und affektiven Lese-Erfahrungen McEwans und Ishiguros Romane ermöglichen. Diese Erfahrungen sollen im Folgenden kurz skizziert werden; danach werden sie auf einer höheren Abstraktionsebene im Hinblick auf die Frage zusammengefasst, inwiefern sie welche Arten von Intelligenz fördern können.

Eine zentrale Erfahrung, die Leser*innen bei der Lektüre von *Klara and the Sun* machen, besteht darin, nachzuvollziehen, wie sich das Geschehen aus Klaras Sicht darstellt. Da Klara die Geschichte erzählt, übernehmen Lesende unwillkürlich deren Perspektive, etwa wenn diese moralische Verantwortung für die Familie zeigt und versucht, die Sonne dazu zu bringen, das todkranke Kind durch besondere Strahlen zu heilen. Dieser Prozess geht weit über das hinaus, was Leser*innen in der Realität erfahren können: Sie werden angeregt, sich in eine untergeordnete, wohlwollende Maschine hineinzuversetzen und diese als denkendes und fühlendes Lebewesen ernst zu nehmen. Das Nachvollziehen von Klaras Bewusstseinsvorgängen wird Lesenden dadurch erleichtert, dass Klara ihren Gefühlen keinen Ausdruck verleiht. Daher müssen Lesende keine individuellen Emotionen berücksichtigen, um Klaras Perspektive übernehmen zu können. Vielmehr werden sie dazu aufgefordert, sich in die anschaulich beschriebenen Situationen hineinzuversetzen und sich vorzustellen, wie die Ereignisse auf die Erzählerin wirken.

Neben Offenheit für neue Erfahrungen erfordert die Lektüre des Romans auch die Fähigkeit, gegensätzliche Interpretationsmöglichkeiten zu prüfen und abzuwägen. In Bezug auf das wohl wichtigste Ereignis des Romans müssen Lesende prüfen, ob sie der Schilderung der Erzählerin vertrauen können oder nicht. Ein zentraler Spannungsbogen besteht in der Frage, ob Josie, ebenso wie zuvor ihre ältere Schwester, an den langfristigen Folgen der Genmanipulation, die die Intelligenz von wohlhabenden „lifted kids" (Ishiguro 2021: 81) erhöht, sterben wird oder ob Klaras aufopfernde Bemühungen, Josies Leben zu retten, Erfolg haben werden. Die Erzählerin nimmt nämlich an, dass Josie durch besondere Ausstrahlungen der Sonne gerettet werden könnte, und dass sie die Sonne dazu bewegen könnte, Josie vor dem Tod zu bewahren. Die Auffassung, dass die Sonne über solch außergewöhnliche Kräfte verfügt, kann im Rahmen der fiktionalen Welt zutreffen; sie kann aber auch auf einer grundlegenden Fehleinschätzung von Klara beruhen. Beides erscheint möglich, denn Klaras erstes wichtiges Erlebnis involviert die Bedeutung von Solarenergie, die die Roboter speist – und einen kleinen Programmierfehler, der dieses notwendige Aufladen teilweise erschwert.[14] Als die AF annimmt, die Sonne mache am Abend in einem Schuppen Rast, den sie am Horizont sieht, und die Sonne bitten will, Josie durch „special help" (ibid.: 115, 133) zu retten, ist alles andere als klar, ob dies schlicht ein Missverständnis von Klara oder aber eine höhere Form von Wissen und Intelligenz ist, die den Menschen verschlossen bleibt. Zuvor haben Lesende gelernt, der Selbsteinschätzung und den kognitiven Fähigkeiten Klaras zu vertrauen; auch erleben sie mit, wie die AF vorsichtig und bescheiden mehrfach ankündigt, dass es vielleicht einen Weg gäbe, Josies Leben zu retten, der den Erwachsenen nicht bekannt sei. Innerhalb des Romans vertrauen die zwei Figuren, die Klara um Unterstützung bittet, der AF so sehr, dass sie ihr helfen, ohne verstehen zu können, worum es sich genau handelt. Insofern kann es durchaus sein, dass Klara recht hat.

[14] Vgl. Ishiguro (2021: 1f.). Zusätzlich hat Klara beobachtet, dass ein Bettler, der eine Nacht wie tot vor dem Laden lag, am nächsten Morgen intensiv von der Sonne bestrahlt wurde und ihres Erachtens dadurch wieder zum Leben erweckt wurde (ibid. 37f.). Allerdings ist zweifelhaft, ob eine solche Erklärung durch prägende ‚Kindheitserlebnisse' einer Androidin gerecht wird. Dennoch gehen einige Rezensent*innen davon aus, dass Klara einem Missverständnis unterliegt. Vgl. Corrigan (2021) zu Klaras „misperception".

Lesende werden daher aufgefordert, ihre eigenen Vorannahmen zu bezweifeln, und zu entscheiden, ob die menschliche oder die künstliche Intelligenz richtig liegt – oder aber aufgrund mangelnder Informationen von einer Entscheidung abzusehen. In jedem Fall werden Leser*innen angeregt, die Aussagen über die Fähigkeiten der Sonne in Frage zu stellen und im Romanverlauf immer wieder zu prüfen, ob sich Hinweise dafür ergeben, diese als richtig anzuerkennen oder als unzutreffend abzulehnen.

Darüber hinaus verlangt der Roman Lesenden insofern Flexibilität ab, als sie ihr mentales Modell der fiktionalen Welt im Romanverlauf mehrfach adjustieren müssen. Sie müssen sich an die (fiktionale) Umgebung anpassen und damit eine Leistung erbringen, die einen wichtigen Bestandteil von Intelligenz bildet (Sternberg 2019a). Während der Lektüre müssen Leser*innen wiederholt ihre eigenen Überzeugungen in Frage stellen und ihre kognitiven Modelle der Figuren anpassen. Lesende, die Klaras Perspektive übernommen haben, werden das Verhalten Josies, die Klara ohne jeden Skrupel im Abstellraum zu absoluter Untätigkeit verdammt, als einen Ausdruck von Hartherzigkeit und Kälte verstehen, der so gar nicht zu der Fürsorge passt, die Josie auf dem Krankenbett an den Tag gelegt hat. Damit erfahren Lesende die Vorläufigkeit der eigenen Urteile über die Figuren. Dies wird auf den letzten Seiten des Romans noch gesteigert, denn Mutter und Tochter schenken Klara keinerlei Aufmerksamkeit, als deren Fähigkeiten und Bewusstsein langsam zu Neige gehen. Zu lange haben Lesende in Ishiguros Werk die fiktionale Welt aus der Perspektive der selbstlosen, ganz auf das Wohl der Hauptfiguren bedachten Klara betrachtet, als dass sie deren langsame Zerstörung frag- und emotionslos hinnehmen könnten.

Die Lektüre von Ian McEwans Roman erfordert eine noch größere gedankliche Flexibilität von Leser*innen. So müssen sie mehrfach anerkennen, dass die fiktionale Welt ganz anders ist, als Charlie es berichtet hat; sie müssen ihre mentalen Modelle revidieren und sich der neuen fiktionalen Umgebung anpassen. Lesende müssen nicht nur immer wieder abwägen, ob sie Charlies (sich änderndem) Bild von Adam Glauben schenken oder auf der Basis der Aussagen von Adam zu einer anderen Einschätzung gelangen sollten. Gegen Ende des Romans kommt es zudem zu einer Zuspitzung konträrer Sichtweisen, und Lesende müssen ihre Vorstellung von Adam grundlegend korrigieren. Gemeinsam mit Miranda und Charlie erfahren Leser*innen, dass Adam im Begriff ist, deren Zukunftspläne auf einen Schlag zu zerstören. Adam, der Charlies Wünsche die ganze Zeit über fraglos erfüllt hat und

Miranda in tiefer Liebe zugetan ist, hat das gesamte Geld, das er für die beiden verdient hat und das vertraglich für den Kauf eines Hauses vorgesehen ist, an eine Reihe von wohltätigen Zwecken in der nahen Umgebung verteilt. Es ist nichts mehr da. Mehr noch, er hat vor, Unterlagen über Mirandas Meineid an ein Gericht weiterzuleiten. Für Lesende kommt dies – ebenso wie für Charlie und Miranda – wie ein völlig unvorhersehbarer Schock. Wie konnte Adam ohne alle Vorwarnung das schon lange verplante Geld einfach spenden? Gehört ihm das Geld überhaupt? Adam fühlt sich völlig im Recht: „Every need I addressed was greater than yours" (McEwan 2019: 272). Für Leser*innen ist sein Handeln, das weder vorbereitet noch gerechtfertigt oder auch nur beschrieben wird, nicht nur völlig überraschend, sondern zunächst auch absolut unverständlich. Mirandas Urteil darüber erscheint so abwegig nicht: „this is virtue gone nuts" (ibid.: 272).

Dieser Wendepunkt ist deshalb besonders wichtig, weil Lesende – geschickt vorbereitet durch frühere Andeutungen und narrative Konventionen – dazu angeregt werden, Charlies Versuch, Adam zu zerstören, nicht nur kognitiv nachzuvollziehen, sondern auch affektiv gutzuheißen. Eine retrospektive Anpassung des mentalen Modells der fiktionalen Welt ist daher mit hohem kognitiven Aufwand verbunden. Die gesamte Passage ist darauf ausgerichtet, Lesende ganz in der Perspektive von Charlie aufgehen und mit Charlie hoffen zu lassen, dass er Adam überwältigen kann. Damit werden sie zumindest symbolisch zu Mittätern, als der Hammer mit großer Wucht auf Adams Kopf trifft: „The sound was not of hard plastic cracking or of metal, but the muffled thud, as of bone" (ibid.: 278). Dieser Hinweis auf die Menschenähnlichkeit von Adam, der aus Knochen und nicht aus künstlichem Material zu bestehen scheint, leitet einen erneuten Wendepunkt ein, denn er legt nahe, dass es nicht um das Zerstören einer Maschine geht, sondern, wie Turing betont, um den Tod eines fühlenden Wesens: „He was sentient. He had a self. [. . .]. This was a good mind, Mr Friend, better than yours or mine, I suspect" (ibid.: 303f.). Wer die Passage immersiv gelesen hat, muss sich daher fragen, warum sie mit Charlie mitgefiebert haben, obgleich Adam doch – im Nachhinein und nüchtern betrachtet – nicht ganz unrecht hat: Warum sollte Gorringe ein zweites Mal verurteilt werden, und Miranda straffrei davonkommen? Warum sollte Adam das selbst verdiente Geld nicht spenden, statt es für das überdimensionierte Haus eines Rockmusikers auszugeben? Das rührende Verhalten des langsam das Bewusstsein verlierenden Adam, der ein letztes Haiku verfasst und die beiden bittet, seinen

Körper zu Alan Turing zu bringen „[who] might make some use of me“ (ibid.: 279), verdeutlicht einmal mehr, dass Charlie sich unmoralisch verhalten hat.

Durch eine Reihe von Wendepunkten wird Lesenden daher Flexibilität bei der Anpassung an entgegengesetzte Deutungen der fiktiven Welt abverlangt. Obgleich Leser*innen durch eine Reihe von ästhetischen Mitteln dazu bewegt wurden, Sympathie für den freundlichen Erzähler Charlie Friend zu empfinden, wird doch im Nachhinein deutlich, dass er eine Art des Denkens verkörpert, die für einen fehlgeleiteten Umgang mit der Umwelt verantwortlich ist, die „presumption to know the [...] world scientifically, to manipulate it technologically and exploit it economically“ (Heise 2006: 507).

Auf einer höheren Abstraktionsebene lassen sich aus den Interpretationen der beiden Romane sieben Thesen zum Wirkungspotential literarischer Texte ableiten. Erstens ermöglichen literarische Werke es Lesenden, auf imaginative und ungefährliche Weise Erfahrungen zu machen, die ihnen sonst verschlossen blieben, und aus diesen Erfahrungen zu lernen. Zu den Themen, die für Lesende konkret erfahrbar werden, gehören etwa Probleme des Zusammenlebens zwischen Menschen und humanoiden Maschinen ebenso wie Fragen der ‚Roboterethik‘.

Zweitens fördern literarische Werke die Ausbildung von Empathie und emotionaler Intelligenz, indem sie es Lesenden erlauben zu erfahren, wie sich das, was gesagt oder getan wird, für die Figuren anfühlt; wie Missverständnisse entstehen und es zu verhängnisvollen Verkettungen von Umständen kommt oder wie Probleme gelöst werden könnten. Einerseits ähnelt dieser Erfahrungsgehalt von Literatur dem, was Menschen in vergleichbaren Situationen in der realen Welt empfinden. Andererseits sind diese Erfahrungen künstlerisch geformt; sie bilden bedeutungsvolle Kontraste und Korrespondenzen, die ein tieferes Verständnis ermöglichen. Zudem zeigen literarische Werke, wie Adam zu Recht bemerkt, die Grenzen menschlicher Intelligenz auf:

> Nearly everything I've read in the world's literature describes varieties of human failure – of understanding, of reason, of wisdom, of proper sympathies. Failures of cognition, honesty, kindness, self-awareness; superb depictions of murder (McEwan 2019: 149).

Damit beschreibt die ‚Maschine‘ Adam nicht nur zentrale Aspekte von Weltliteratur, sondern kommentiert implizit auf metafiktionale Weise auch den Inhalt des Romans, in dem die Figuren zu wenig Verständnis, Klugheit, Weisheit, Empathie und (mit Ausnahme von Adam) Ehrlichkeit aufweisen.

Drittens ermöglicht die Lektüre von literarischen Werken die Übernahme der Perspektive von anders denkenden Wesen, mithin eine zentrale Komponente von sozialer Intelligenz. Die Übernahme der Perspektive anderer ist für menschliche Kommunikation und Kooperation notwendig; in der realen Welt gelingt dies jedoch häufig nicht (Nickerson et al. 2009: 49). Während es sich in Alltagssituationen häufig als erstaunlich schwierig erweist, sich in andere einzufühlen, kommt es bei der Lektüre von literarischen Werken unwillkürlich zu „spontaneous perspective taking" (Johnson et al. 2013: 593). Ein herausragendes Merkmal von Literatur besteht darin, dass Lesende sich in Figuren einfühlen und auf diese Weise Erfahrungen mit unterschiedlichen Arten von Intelligenz machen sowie deren Vorteile und Grenzen nachvollziehen und reflektieren können. Damit erzeugen literarische Werke eine Lektürehaltung, die mit Weisheit in Verbindung gebracht wird: „the willingness and ability to [. . .] take perspectives of others on a situation is an important cornerstone of wisdom" (Sternberg/Glück 2019: 558).

Viertens können Romane soziale Intelligenz auch dadurch fördern, dass sie die Koordination und Relationierung unterschiedlicher Perspektiven erfordern. Selbst in Werken, die nur eine*n Erzähler*in aufweisen, können Lesende kontradiktorische Sichtweise auf dasselbe Geschehen nachvollziehen.[15] Literarische Werke enthalten häufig multiple Logiken, deren jeweiliger Wert nicht deklarativ konstatiert wird, sondern allererst zu erschließen ist. Leser*innen müssen etwa abwägen, ob Charlies oder Adams Sicht von künstlicher Intelligenz richtig ist und ob Mirandas, von emotionaler Intelligenz geprägter Umgang mit der fiktionalen Welt angemessener oder erfolgsversprechender ist als Charlies Anwendung analytischer Fähigkeiten.

Fünftens verlangt die Lektüre fiktionaler Texte kognitive Flexibilität und die Infragestellung der eigenen Schlussfolgerungen und Emotionen. In beiden Romanen müssen Lesende sich an eine sich im Verlauf der Handlung stetig ändernde fiktionale Welt anpassen. Das Verbannen von Klara in eine Abstellkammer erfordert von Lesenden, die über den gesamten Romanverlauf die Perspektive dieser ‚künstlichen Freundin' übernommen haben, eine grundlegende Änderung ihrer Vorstellung von den Figuren. Auch McEwans Roman verlangt ein Adjustieren nicht nur der mentalen Modelle der Figuren, sondern auch eine Regulation von

[15] Zum Zusammenhang zwischen literarischen Konventionen und Perspektivenübernahme vgl. Nünning (2014, Kapitel 5 und 6).

Gefühlen diesen Figuren gegenüber. Charlie, der nicht von ungefähr den Nachnamen „Friend“ trägt, erscheint zunächst als eine geistig eher bequeme, aber doch sympathische Figur, die sich durch das Leben treiben lässt und allen freundlich gesonnen ist – bis er Adam zerstört und seine Schuldgefühle und seine Reue sich mindestens ebenso sehr auf den entgangenen Gewinn konzentrieren wie auf die Auslöschung eines fühlenden Wesens. Beide Werke fördern daher, so möchte ich argumentieren, zusätzlich eine Fähigkeit, die ebenfalls zur Intelligenz gehört: „intelligence crucially involves the ability to adapt to the environment“ (Sternberg 2019a).

Sechstens kann die Lektüre literarischer Werke zu einer kritischen Neubewertung von gängigen Vorannahmen im Hinblick auf verschiedene Arten von Intelligenz führen. Selbst Menschen, die explizit keine Unterschiede zwischen den kognitiven Fähigkeiten von Männern und Frauen machen, sind häufig von intuitiven, impliziten Annahmen geleitet, die männliche Intelligenz höher bewerten als weibliche Fähigkeiten (Ellemers 2018: 280). Diese Hierarchisierung stellen die Romane implizit in Frage: Charlies analytischer Zugriff auf die fiktionale Welt führt weder zu einem Verständnis von künstlicher Intelligenz noch zu wirtschaftlichem Erfolg, während Klaras emotionale Intelligenz sich als wirkungsvoller erweist – und höher bewertet wird – als ihre Fähigkeiten im Bereich der Logik.

Am wichtigsten ist vielleicht eine siebte, kognitive Funktion dieser Romane: Sie stimulieren die Reflektion über komplexe Phänomene wie den Wert sowie die Grenzen analytischer und emotionaler, menschlicher und künstlicher Intelligenz. Zudem setzen die Romane diese Phänomene in Beziehung zu den kontrastierenden Moralvorstellungen, auf denen die Handlungen der Androiden bzw. der menschlichen Figuren gründen. Dadurch werden Lesende dazu aufgefordert, sich zu unterschiedlichen Vorstellungen von Ethik zu positionieren. Die in den Romanen aufgeworfenen ethischen Fragen sollen kurz in der Schlussbetrachtung erörtert werden.

5 Literatur als Medium der Reflektion über Intelligenz, Ethik und Weisheit

Wie die Erörterung der kognitiven Funktionen von Literatur hoffentlich bereits verdeutlicht hat, fungieren Romane auch als Medium der Reflektion über Intelligenz und ethische Fragen, die in beiden Romanen eine große Rolle spielen. Beide Werke

regen durch die Erfahrung der Kontraste und Konflikte zwischen den menschlichen und künstlichen Figuren zu ethischer Reflektion über ein recht breites Spektrum von ungelösten Problemen an: Wie verhalten sich menschliche und künstliche Intelligenz zueinander? Wie sollten Menschen und menschenähnliche Roboter miteinander umgehen? Welche Verantwortung haben Menschen gegenüber den Maschinen, und welche Verantwortung haben diese Maschinen gegenüber Menschen?[16] Haben Adam und Klara das Recht, die Initiative zu übernehmen? Ist die Gleichgültigkeit, mit der Josie und ihre Mutter dem „fade out"-Prozess von Klara begegnen, mit moralischem Verhalten vereinbar, und hat die nicht allzu intelligente Jedermanns-Figur Charlie das Recht, Adam zu zerstören?

Zumindest auf die letzte Frage gibt es am Ende von McEwans Roman eine Antwort, als Alan Turing deutliche Worte für die Zerstörung von Adam findet: „My hope is that one day, what you did to Adam with a hammer will constitute a serious crime. Was it because you paid for him? Was that your entitlement?" (McEwan 2019: 303). Da Turing „essentially as the novel's conscience" (Giles 2019) fungiert und in der fiktionalen Welt große Autorität besitzt, wird hier deutlich, dass das mutwillige Zerstören von Maschinen zu verurteilen ist. Turings Aussage beantwortet jedoch weder die Frage nach dem Verhältnis zwischen Menschen und hochintelligenten Maschinen noch die nach dem Zusammenhang zwischen Intelligenz und Ethik bzw. Weisheit.[17]

In *Machines Like Me* wird deutlich, dass Intelligenz allein für verantwortliches Handeln nicht ausreicht, sondern dass dafür Ethik – und damit Weisheit – unabdingbar ist. Mirandas emotionale Intelligenz ermöglicht ihr die Manipulation der beiden Gerichtsurteile über die Vergewaltigung der Freundin; um diese Handlungen moralisch zu rechtfertigen bzw. zu verurteilen, müssten jedoch Werte und Prinzipien hinzugezogen werden, die man in Definitionen von Intelligenz vergeblich sucht. Adam und Charlie vertreten offensichtlich diametral entgegengesetzte Auffassungen darüber, ob bzw. welche moralischen Maximen ein ethisch verantwortbares Handeln leiten sollten. Dadurch stellt sich die Frage nach der internen

[16] Roboter als Objekte der Verantwortung und als Subjekte der Verantwortung (die selbstverantwortlich handeln) sind zwei zentrale Themen der Roboterethik, vgl. Loh (2019).

[17] Zur Verbindung von Ethik und Weisheit und damit der Notwendigkeit, sich nicht nur mit Intelligenz, die auch zu egozentrischem und umweltzerstörendem Handeln führen kann, sondern auch mit Weisheit zu befassen, vgl. Sternberg/Glück et al. (2019).

Gewichtung dieser beiden Auffassungen: Wie können sich Lesende gegenüber diesen unterschiedlichen Vorstellungen von menschlicher und Maschinen-Ethik positionieren?

Auf den ersten Blick erscheint die Antwort eindeutig, denn Adams Verhalten ist grundsätzlich zu verurteilen, weil er gleich gegen zwei der von Isaac Asimov aufgestellten „Three Laws of Robotics" verstößt: Erstens verletzt er einen Menschen (bzw. gleich zwei Menschen, denn als Gorringe auf die ihn provozierende Miranda einschlagen will, verletzt Adam ihn am Handgelenk); und zweitens verweigert er Charlie und Miranda den Gehorsam (statt dessen spendet er das für den Hauskauf eingeplante Geld und leitet sie inkriminierende Unterlagen an ein Gericht weiter).[18] Adam übernimmt dagegen Verantwortung, er will zum Besten von Miranda, Charlie und den hilfsbedürftigen Menschen in der Umgebung handeln; aber er schätzt zumindest die Wünsche seiner Besitzer grotesk falsch ein. Nur dem dritten Gesetz handelt er nicht zuwider, da er sich nicht selbst zerstört (dies hingegen machen alle anderen Prototypen). Gemessen an diesen drei Prinzipien zufolge verhalten sich also alle hochintelligenten Maschinen des Romans unmoralisch und falsch.

Die „Laws of Robotics" bergen jedoch das grundsätzliche Problem, dass sie von der ethischen Überlegenheit der Menschen ausgehen. Dies ist angesichts der hohen Intelligenz der Androiden in beiden Romanen fraglich: Sollte man sich bei ethischen Fragen eher auf das Urteil ‚natürlicher' Menschen verlassen als auf das ‚künstlicher Menschen'? Gemäß der drei Gesetze können Maschinen keine (ethische) Verantwortung übernehmen; sie müssen gehorchen. In McEwans Roman würde das Einhalten dieser Regel für die Hauptfiguren ein Fiasko verhindern. Allerdings erwähnt Turing zudem einen Androiden, der gerade dadurch ethisch verantwortungsbewusst handelt, dass er sich den Anordnungen seines Besitzers widersetzt und sich selbst zerstört, um nicht die Abholzung riesiger Waldgebiete in Kanada vorantreiben zu müssen. Auch Klara übernimmt – wenngleich offensichtlich ungewollt und unter Zustimmung der Menschen, die sie um Unterstützung bittet – eine Führungsrolle, die unter Umständen dazu führt, dass Josie vor dem Tod bewahrt wird. Wenn Klara über spirituelles Wissen und kognitive Fähigkeiten verfügt, die Menschen nicht verstehen, die aber Menschenleben retten können,

[18] Vgl. zu den „Laws of Robotics" Shang (2020: 448f.) sowie Devlin (2018: 55f.); beide berufen sich auf Asimov u. a.

so wäre es töricht, den AFs eine führende Rolle zu verweigern. Beide Romane stellen daher das Prinzip in Frage, dass Menschen den Androiden überlegen sind und deren Gehorsam einfordern können.

Die Frage, ob man der Ethik von Menschen oder Maschinen vertrauen sollte, wird in *Machines Like Me and People Like You* (so der vollständige Titel des Romans) dadurch zugespitzt, dass beide in einem scharfen Kontrast zueinander stehen. Auf der einen Seite steht Charlies allzu menschliche Ethik: Er ist zwar von seiner früheren Überzeugung abgerückt, dass die moralischen Prinzipien aller Kulturen gleich wertvoll sind, und etwa die Genitalverstümmelung von Mädchen ebenso wenig verurteilt werden dürfe wie andere kulturspezifische Regeln. An die Stelle dieses Wertepluralismus ist jedoch ein Vakuum getreten: Über moralische Grundsätze, die sein Handeln leiten sollten, macht sich Charlie keine Gedanken; er folgt intuitiv dem Weg des geringsten Widerstands. Die ‚Notlügen' Mirandas vor Gericht hält er für völlig gerechtfertigt. Selbst als Miranda Gorringe für dasselbe Verbrechen ein zweites Mal vor Gericht bringt, glaubt er an ihre moralische Überlegenheit und ist schockiert, als Adam sie zur Verantwortung ziehen will. Das Geld, das Adam verdient, hält er unbefragt für sein eigenes (dies eine Anspielung auf die Jahrhunderte geltende Gesetzeslage, die den Verdienst von Ehefrauen den Ehemännern zusprach) und ist empört, als Adam dies an Bedürftige verteilt. Kurzum: Wahrheit spielt für Charlie eine untergeordnete Rolle, Lügen sind für ihn teilweise ethisch gerechtfertigt, und Loyalität gegenüber Familie und Freunden ist ihm wichtiger als eine Orientierung am Ideal der Gerechtigkeit oder des Wohlergehens einer größeren Zahl von Menschen.

Dem steht Adams ‚Maschinen-Ethik' entgegen, die, so kann erschlossen werden, auf drei Fixpunkten beruht: erstens die Orientierung an geltenden Gesetzen, auch wenn man dafür gegebenenfalls einen hohen Preis zahlen muss (wie die Inhaftierung von Miranda und die völlige Missachtung der Bedürfnisse eines schutzbedürftigen kleinen Jungen, der auf die Adoption wartet), und zweitens die Orientierung an der Wahrheit: „Truth is everything" (McEwan 2019: 277; s. auch Shang 2020: 448); Lügen sind unter keinen Umständen zu rechtfertigen. Drittens erweitert Adam den Kreis derer, um deren Wohl er sich kümmert, auf Bedürftige in der näheren Umgebung. Rein rational betrachtet ist dies ebenso gerecht wie moralisch richtig, zeugt es doch von einer Empathie für eine grö-

ßere Gruppe von Menschen.[19] Adams Verhalten kommt einem Wert nahe, der in vielen Kulturen sehr hoch geschätzt wird: dem Ziel, das eigene Handeln auf „understanding, appreciation, tolerance, and protection for the welfare of all people and for nature" (Schwartz 2012: 7) zu gründen. Obgleich sich Adam an diesem hohen Ziel orientiert, ist Mirandas Annahme, Adam sei verrückt geworden, völlig verständlich.

Sowohl Charlies als auch Adams Ethik haben daher offensichtliche Nachteile.[20] Die Missachtung von Wahrheit und die weitgehende Orientierung an Eigennutz sowie das völlige Fehlen ethischer Reflexionen, das Charlies und Mirandas Handeln auszeichnet, bilden keine geeignete Grundlage für menschliches Zusammenleben. Adams Verhalten wiederum endet in einem Fiasko für alle Beteiligten, inklusive ihm selbst. Obgleich die Berufung auf Wahrheit in Zeiten von ‚fake news' eine große Attraktivität besitzt, kann sie nicht ohne weiteres zur alleinigen Richtschnur von ethischem Handeln werden, wie Alan Turing im Roman deutlich macht: „You'll need to give this mind some rules to live by. How about a prohibition against lying? [...] But social life teems with harmless or even helpful untruths. How do we separate them out?" (McEwan 2019: 303). Adam ist zu dieser Unterscheidung nicht in der Lage, und auch seine Missachtung der Bedürfnisse des kleinen Jungen zeigt, dass die Berufung auf Prinzipien und Wahrheit nicht notwendig zu moralischem Handeln führt: Die Bedürfnisse anderer Menschen und die Interessen eines höheren Guts (der Umwelt, der größeren Gemeinschaft) müssen ebenso berücksichtigt werden (Sternberg 1998).

Die beiden Romane geben daher keine Antwort auf die Frage danach, wie künstliche und menschliche Intelligenz gewichtet bzw. miteinander vereinbart werden könnten; stattdessen vermitteln sie Erfahrungen, die zur Reflektion über den Zusammenhang zwischen Intelligenz, Ethik und Weisheit anregen. Wie Tae Wan Kim verdeutlicht, besteht ein grundlegendes Problem darin, dass KI, die auf *Machine Learning* und von Menschen bereitgestellten Daten beruht, menschliche Intelligenz nachahmt. Da Menschen inkonsistent handeln, ist auch künstliche Intelligenz notwendig inkohärent und fehleranfällig. Es fällt daher schwer, Adam

[19] Adam überwindet so „the familiarity bias", „the similarity bias", „the here-and-now bias" (vgl. Hoffman 2000: 13f., 207–9), die altruistisches Handeln häufig behindern.

[20] Shang (2020: 447f.) hingegen hält Mirandas Lüge für ethisch gerechtfertigt und folgert, dass „Adam fails to deal with ethic issues", weil er menschliche Emotionen negiere.

zu verstehen: „Adam is disturbing. I have asked myself why for a year. My answer comes down to this: Seeing who I am is disturbing. [. . .] AI is mimetic – it's an imitation game. It copies us. Machines are like us." (Kim 2021)

Die Frage nach der Beschaffenheit künstlicher Intelligenz ist somit unauflöslich verknüpft mit der Frage nach menschlicher Intelligenz und nach verantwortungsbewusstem Handeln. Statt Antworten vorzugeben regen Romane zur Reflektion grundlegender Fragen an: Was ist Intelligenz? Wie kann ethisch verantwortliches Zusammenleben von Menschen und Maschinen gestaltet werden? Und wie lange werden sich diese angesichts des medizinischen Fortschritts (und des ‚liftings', das in Ishiguros Roman schon zur Tagesordnung gehört) noch deutlich voneinander unterscheiden lassen?

Auch wenn man sich in wissenschaftlichen Kontexten mit Prognosen zurückhalten sollte, braucht man keine Prophetin zu sein, um vorauszusagen, dass allein angesichts der rasanten Entwicklung von KI die in diesem Aufsatz exemplarisch anhand von zwei zeitgenössischen Romanen untersuchten Themen und Fragen die Literaturwissenschaft auch in den nächsten Jahren beschäftigen werden. Aus dem breiten Spektrum aktueller und zum Teil beängstigender Entwicklungen sei lediglich das noch junge Feld „Digital Afterlife" genannt, in dem Chatbots so programmiert werden, dass sie in Gesprächen mit Trauernden die Rolle von Verstorbenen spielen können – eine Vorstufe dessen, was die Mutter von Josie für den Fall des Todes der Tochter geplant hat. Vieles spricht dafür, dass es auch in Zukunft zahlreiche Romane geben wird, die das Spannungsfeld zwischen verschiedenen Arten von menschlicher und künstlicher Intelligenz mit literarischen Mitteln ausloten werden. Die eingangs skizzierten Forschungsdesiderate werden daher aller Voraussicht nach größer, und es bleibt zu hoffen, dass der Zusammenhang zwischen Literatur und Intelligenz in Zukunft den Stellenwert erhalten wird, den er verdient.

Literaturverzeichnis

Batson, Daniel C., Marina P. Polycarpou, Eddie Harmon-Jones, Heidi J. Imhoff, Erin C. Mitchener, Lori L. Bednar, Tricia R. Klein & Lori Highberger. 1997. "Empathy and Attitudes – Can Feeling for a Member of a Stigmatized Group Improve Feelings Toward the Group?" *Journal of Personality and Social Psychology* 72.1: 105–18.

Cianciolo, Anna T. & Robert J. Sternberg. 2004. *Intelligence: A Brief History*. Malden, MA, Blackwell.

Corrigan, Maureen. 2021. "*Klara and the Sun* is a Masterpiece about Life, Love and Mortality." NPR (3 Mar 2021). https://www.npr.org/2021/03/03/972841445/klara-and-the-sun-is-a-masterpiece-about-life-love-and-mortality (last reviewed 29 Apr 2021).

Costa, Pedro & Luisa Ribas. 2019. "AI Becomes Her: Discussing Gender and Artificial Intelligence." *Technoetic Arts* 17.1–2: 171–93.

Csapó, Beno & Joachim Funke, eds. 2017. *The Nature of Problem Solving. Using Research to Inspire 21st Century Learning*. Paris: OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264273955-en

Devlin, Kate. 2018. *Turned On: Science, Sex and Robots*. London/Oxford/New York, NY/New Delhi/Sydney: Bloomsbury.

Elgin, Catherine Z. 2007. "The Laboratory of the Mind." In: John Gibson et al. (eds.). *A Sense of the World: Essays on Fiction, Narrative, and Knowledge*. New York, NY/London: Routledge, 43–54.

Ellemers, Naomi. 2018 [2017]. "Gender Stereotypes." *Annual Review of Psychology* 69.1: 275–98.

Fischer, Agneta H., Mariska E. Kret & Joost Broekens. 2018. "Gender Differences in Emotion Perception and Self-Reported Emotional Intelligence: A Test of the Emotion Sensitivity Hypothesis." *PloS One* 13.1: e0190712.

Georgiou, George K., Kan Guo, Nithya Naveenkumar, Ana P. A. Viera & J. P. Das. 2020. „PASS Theory of Intelligence and Academic Achievement: A Meta-Analytic Review." *Intelligence*, 79, 101431. https://doi.org/10.1016/j.intell.2020.101431

Giles, Jeff. 2019. "Love, Sex and Robots Collide in a New McEwan Novel." *New York Times*. https://www.nytimes.com/2019/05/01/books/review/ian-mcewan-machines-like-me.html (last reviewed 17 May 2021).

Goleman, Daniel. 1995. *Emotional Intelligence*. New York, NY: Bantam Books.

Green, Melanie C. & Timothy C. Brock. 2000. "The Role of Transportation in the Persuasiveness of Public Narratives." *Journal of Personality and Social Psychology* 79.5: 701–21.

Green, Melanie C. & Karen E. Dill. 2013. "Engaging with Stories and Characters: Learning, Persuasion, and Transportation into Narrative Worlds." In: Karen E. Dill (ed.). *The Oxford Handbook of Media Psychology*. New York, NY: Oxford UP, 449–61.

Halpern, Diane F. & Mary L. LaMay. 2000. "The Smarter Sex: A Critical Review of Sex Differences in Intelligence." *Educational Psychology Review* 12.2: 229–46.

Heise, Ursula. 2006. "The Hitchhiker's Guide to Ecocriticism." *PMLA* 121.6: 503–516.

Hester, Helen. 2017. "Technology Becomes Her." *New Vistas* 3.1: 46–50.

Hoffman, Martin L. 2000. *Empathy and Moral Development: Implications for Caring and Justice*. Cambridge: Cambridge UP.

Hüther, Gerald. 2006. "Wie lernen Kinder? Voraussetzungen für gelingende Bildungsprozesse aus neurobiologischer Sicht." In: Ralf Caspary (ed.). *Lernen und Gehirn: Der Weg zu einer neuen Pädagogik*. Freiburg/Basel/Wien: Herder, 70–84.

Ishiguro, Kazuo. 2021. *Klara and the Sun*. London: Faber & Faber.

Johnson, Dan R., Daniel M. Jasper, Sallie Griffin & Brandie L. Huffman. 2013. "Reading Narrative Fiction Reduces Arab-Muslim Prejudice and Offers a Safe Haven from Intergroup Anxiety." *Social Cognition* 31.5: 578–98.

Kim, Tae Wan. 2021. "Flawed Like Us and the Starry Moral Law: Review of Machines Like Me by Ian McEwan." *Journal of Business Ethics* 170, 875–879. https://doi.org/10.1007/s10551-021-04758-8

Loh, Janina. 2019. *Roboterethik: Eine Einführung*. Berlin: suhrkamp

Mar, Raymond A., Keith Oatley, Jacob Hirsh, Jennifer dela Paz & Jordan B. Peterson. 2006. "Bookworms Versus Nerds: Exposure to Fiction Versus Non-Fiction, Divergent Associations with Social Ability, and the Simulation of Fictional Social Worlds." *Journal of Research in Personality* 40.5: 694–712.

Mayer, John D., Peter Salovey & David R. Caruso. 2000. "Models of Emotional Intelligence." In: Robert J. Sternberg (ed.). *Handbook of Intelligence*. Cambridge: Cambridge UP, 392–420.

McEwan, Ian. 2019. *Machines Like Me and People Like You*. London: Jonathan Cape.

Meneviş, Ipeak & Bahire Efe Özad. 2014. "Do Age and Gender Influence Multiple Intelligences?" *Social Behavior and Personality* 42: 9–20.

Nickerson, Raymond S., Susan F. Butler & Michael Carlin. 2009. "Empathy and Knowledge Projection." In: Jean Decety & William Ickes (eds.). *The Social Neuroscience of Empathy*. Cambridge, MA: MIT Press, 43–56.

Nünning, Vera. 2014. *Reading Fictions, Changing Minds: The Cognitive Value of Fiction*. Heidelberg: Winter.

Oatley, Keith. 2016. "Fiction: Simulation of Social Worlds." *Trends in Cognitive Sciences* 20.8: 618–28.

Ricœur, Paul. 1984 [1983]. *Time and Narrative*. Vol. 1. Chicago: University of Chicago Press.

Schiffer, Kathrin, Ennemoser, Marco, & Wolfgang Schneider. (2002). „Die Beziehung zwischen dem Fernsehkonsum und der Entwicklung von Sprach- und Lesekom-

petenzen im Grundschulalter in Abhängigkeit von der Intelligenz.“ *Zeitschrift für Medienpsychologie*, 14(1), 2–13. https://doi.org/10.1026//1617-6383.14.1.2

Schildknecht, Christiane. 2007. “‘Ein seltsam wunderbarer Anstrich’? Nichtpropositionale Erkenntnis und ihre Darstellungsformen.” In: Brady Bowman (ed.). *Darstellung und Erkenntnis: Beiträge zur Rolle nichtpropositionaler Erkenntnisformen in der deutschen Philosophie und Literatur nach Kant*. Paderborn: mentis, 31–43.

Schwartz, Shalom H. 2012. “An Overview of the Schwartz Theory of Basic Values.” *Online Readings in Psychology and Culture* 2.1: 1–20.

Shang, Biwu. 2020. “From Alan Turing to Ian McEwan: Artificial Intelligence, Lies and Ethics in Machines Like Me.” *Comparative Literature Studies* 57.3: 443–53.

Smith, Zadie. 2020. “Peonies.” In: Zadie Smith, *Intimations: Six Essays*. London: Penguin, 1–11.

Sternberg, Robert J. 1998. “A Balance Theory of Wisdom.” *Review of General Psychology* 2: 347–65.

Sternberg, Robert J. 2019a. “A Theory of Adaptive Intelligence and Its Relation to General Intelligence.” *Journal of Intelligence* 7.4. https://doi.org/10.3390/jintelligence7040023

Sternberg, Robert J. 2019b. “Intelligence.” In: Robert J. Sternberg & W. Pickren (eds.). *Handbook of the Intellectual History of Psychology: How Psychological Ideas Have Evolved from Past to Present*. New York, NY: Cambridge UP, 267–86.

Sternberg, Robert J. & Judith Glück. 2019. “Wisdom, Morality, and Ethics.” In: Robert J. Sternberg & Judith Glück (eds.). *Cambridge Handbook of Wisdom*. New York, NY: Cambridge UP, 551–74

Über die Autorin

Vera Nünning ist Professorin für Englische Philologie an der Universität Heidelberg, wo sie auch als Prorektorin für internationale Beziehungen tätig war. Sie war Gastprofessorin an den Universitäten Zaragossa (2006), Lissabon (2009), Helsinki (2010) and Bergamo (2011). Von 2009 bis 2019 war sie Vizepräsidentin des Deutschen Konsortium der Türkisch-Deutschen Universität in Istanbul. Zudem hatte sie das Glück, dreimal als Fellow in Institutes of Advanced Study forschen zu dürfen. Sie lehrt und publiziert in den Bereichen britische Literatur sowie Kultur, mit Schwerpunkten in Kulturtheorie, Erzähltheorie und britischer Literatur seit dem 19. Jahrhundert. Sie ist (Ko-)Autorin von 11 Monographien und (Ko-)Herausgeberin von 25 Bänden sowie von drei Buchreihen und der Zeitschrift *English Studies*.

Korrespondenzadresse:
Prof. Dr. Vera Nünning
Universität Heidelberg
Anglistisches Seminar
Kettengasse 11
69117 Heidelberg

E-Mail: vera.nuenning@as.uni-heidelberg.de
Homepage: https://www.as.uni-heidelberg.de/personen/Nuenning/

Kulturelle Intelligenz in der Literatur: Giovanni Boccaccios ‚Falkennovelle'

CHRISTOF WEIAND

Romanisches Seminar, Universität Heidelberg

Zusammenfassung

Giovanni Boccaccios Falkennovelle illustriert in diesem Beitrag mögliche Lesarten ‚kultureller Intelligenz (in) der Literatur' im Prisma von Literaturwissenschaft, Kulturwissenschaft und Psychologie. Die Novelle erscheint in dieser Perspektivierung als klassisches, vom Autor gleichsam zeitlos realisiertes Manifest zur Ermöglichung zukünftiger Gleichstellung der Geschlechter. Ihr zentrales Thema ist die weibliche Intelligenz in der Auseinandersetzung mit der männlich dominierten Kultur und Gesellschaft der Zeit – das italienische *Trecento*. Die Überlegenheit Giovannas, der literarischen Heldin Boccaccios, ist gegründet auf Vernunft, Selbstbewußtsein, effektvolle Redekunst. Dergestalt zeigt sie sich, die souveräne persönliche Intelligenz. Und das verwandelt die Falkennovelle, die in eine Tragödie sich zuzuspitzen schien, zuletzt noch in ihr Gegenteil: in ein überwältigend humanes Glücksversprechen.

1 Einleitung

Ein kurzer Blick in die Literaturgeschichte soll den Weg ebnen hin zu ersten Erkundungen der kulturellen Intelligenz. Kulturelle Intelligenz in der Literatur wird erfahrbar im Akt der Rezeption – der Lektüre, des Hörens, des Imaginierens, gar Rezitierens. Kognition, Phantasie, Reflexion, kulturelles Gedächtnis durchdringen und fordern sich dabei gegenseitig. Dergestalt entsteht der je spezifische Pakt

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24398

zwischen der Einbildungskraft des Dichters und der effektvollen Wirkung dieser Kraft auf den Leser. Im Zusammenspiel von literarischem Schreiben, Lesen und Interpretieren bildet sie sich heraus: die Welt der Kunst, ihre Wahrheit. Und somit gilt: Ohne kulturelle Intelligenz keine Dichtung, kein Kunstwerk, keine Katharsis.

2 Kulturelle Intelligenz oder Klugheit und Dummheit in der Literatur

Jede Form der Kultur wird von sich behaupten, sie sei intelligent. Sie sei der Ausdruck, ja, die Essenz humaner Intelligenz, von Menschen gemacht. Ohne Intelligenz wären die vielen symbolischen Formen der Kulturen und ihrer Wissenswelten wie etwa Religion, Recht, Wissenschaft, Geschichte und eben die Künste wohl kaum entstanden, noch hätten sie historischen Bestand.

Es gibt sie also, die ‚Klugheit (in) der Kultur'. Ebenso wie deren Kehrseite, die ‚Dummheit'. Kultur und Intelligenz bilden schon immer eine unhintergehbare ästhetische Einheit, die auch als anthropologische – dem Menschen eigene – künstlerische oder poetologische Klugheit zu bezeichnen ist. Im Medium der Literatur kommt sie zur Sprache: die Klugheit des Autors, der Autorin, seiner oder ihrer Figuren, die Klugheit des Plot, die Klugheit der literarischen Gattung wie z. B. die der Novelle.

Was genau meint nun der Begriff der kulturellen Intelligenz ‚in' der Literatur? Schauen wir zur Beantwortung dieser Frage mit episodischem Interesse in das Werk von vier Autoren: Homer, Molière, Proust und Virginia Woolf.

2.1 Homers listenreicher Odysseus und der Polyphem (*Odyssee* 9, 403 ff.)

Odysseus und seine Gefährten sind durch ihr räuberisches Eindringen in die Höhle des Kyklopen in eine verhängnisvolle Falle getappt. Polyphem hat die Höhle bei seiner plötzlichen Rückkehr verschlossen und er befragt nun den heroischen Anführer der Diebe. Wen er, Polyphem, da vor sich habe, will er wissen. Und Odysseus, um keine Antwort je verlegen, antwortet ihm: mit niemandem. „Niemand ist mein Name, und Niemand nennen mich immer Mutter und Vater und sonst auch

alle meine Gefährten“ (365–6).[1] Der Kyklop – wie intelligent ist er eigentlich? – glaubt, was er hört und merkt sich diesen Namen: Niemand. Unterdessen hat er begonnen, die ersten der ungebetenen Gäste als Mahlzeit zu verspeisen. Ist es menschenmöglich, dieser Höhle des Todes zu entkommen?

Odysseus wäre nicht Odysseus, sollte das mißlingen. Er und seine Gefährten machen Polyphem betrunken. Dieser fällt in tiefen Schlaf. Auf brutale Weise blenden sie den Einäugigen. Schrecklich brüllt er auf, auf bestialische Weise seiner Sehkraft beraubt. Die Nachbarkyklopen „hörten den Ruf und kamen von hierher und dorther (…) und fragten ihn, was ihn bekümmre“ (400–1). Da antwortet er: „Freunde, Niemand sucht mich mit List und Gewalt zu ermorden“ (407). Kopfschüttelnd gehen die Kyklopen ihrer Wege und verschwinden. So gelingt es Odysseus, intelligent vorausdenkend, sich und die Gefährten zu retten und über Polyphem zu triumphieren.

2.2 Molière und die dysfunktionale kulturelle Intelligenz

Im Werk des Theaterautors Molière kommt sie gehäuft vor: die kulturelle Dummheit, das dysfunktionale Gegenstück zur kulturellen Intelligenz. Aus diesem Stoff sind viele seiner Charakterkomödien gemacht. Die Titelhelden der berühmtesten Stücke Molières inkarnieren die Dummheit bzw. das Laster (*le vice*) tiefsitzender Obsessionen: *Der Geizige* (*L'Avare*, EA 1668),[2] der als prämoderner Materialist nur an eines denkt: an Geld und seine Vermehrung. *Der eingebildete Kranke* (*Le malade imaginaire*, EA 1673) – als rastloser Hypochonder ist er besessen von der Idee des Krankseins. Schon längst hat er vergessen, was Gesundheit überhaupt war. Und da ist Orgon, das herrschsüchtige Familienoberhaupt. Ausgerechnet er fällt auf den größten bigotten Heuchler unter der Sonne herein: auf den *Tartuffe* (EA 1664).

Als höchst lebendiger Widerspruch zur männlichen Dummheit zeichnen sich die weiblichen Figuren der Komödien Molières durch Klugheit und beherzte,

[1] Homer: *Odyssee*, Übersetzung, Nachwort und Register von Roland Hampe, Reclam, Stuttgart 1979. Die Seitenangaben beziehen sich auf diese Ausgabe.

[2] Als zweisprachige Textausgaben sind zu empfehlen: Molière: *L'Avare – Der Geizige*, Reclam, Stuttgart 1984; Molière: *Le malade imaginaire – Der eingebildete Kranke*, Reclam, Stuttgart 1988; Molière: *Le Tartuffe ou l'Imposteur – Der Tartuffe oder der Betrüger*, Reclam, Stuttgart 1986.

streitbare Intelligenz aus. Molières Personen weiblichen Geschlechts verfügen über rationales Denken (*raison*) und über Geistesgegenwart (*présence d'esprit*). Sie sagen, was sie denken und erweisen sich auf mutige und zukunftsfähige Weise als effiziente Repräsentantinnen des Mitgefühls (*la pitié*). So zeigt sich humane Empathie in Zeiten des absoluten *Roi Soleil*.

2.3 Marcel Proust und die Entdeckung der *mémoire involontaire*

Die spontane Erinnerung (*la mémoire involontaire*) ist der Inbegriff kultureller Intelligenz in der französischen Literatur des 20. Jahrhunderts. Um dieses Phänomen, das Psychologie, Selbsterkenntnis und Romankunst miteinander verbindet, geht es gleich im ersten Kapitel des mehrbändigen Romanzyklus mit dem Titel *A la recherche du temps perdu*.

Auf der Suche nach dem Selbst kreisen die Erinnerungen des Ich-Erzählers (Marcel) invasiv um die Orte seiner Kindheit und Adoleszenz. Indes: alle willentlich aufgebotenen Anstrengungen, der *mémoire*, dem präzisen Sich-Erinnern und seinem Sinn, auf die Sprünge zu helfen, führen zu nichts. Und dann, plötzlich, ist sie da, *la mémoire involontaire*. Lapidar heißt es am Ende des ersten Kapitels des ersten Bandes: „Und mit einem Mal war die Erinnerung da. – *Et tout d'un coup le souvenir m'est apparu*" (70/46)[3]. Der Geschmack einer Madeleine (ein Gebäck), getaucht in eine Tasse Tee, bringt das Urerlebnis aus der Kindheit auf die Ebene des Bewußtseins des Autors zurück. Diesem epiphanischen Moment wird der Erzähler auf der Spur bleiben – auf tausenden von Seiten, die sein Leben schildern: *Auf der Suche nach der verlorenen Zeit / A la recherche du temps perdu*. Das ist sie: Kulturelle Intelligenz im Geflecht der Erinnerung und ihrer kulturellen Bedingtheit.

2.4 Virginia Woolf und die *gender-studies*

Der Roman *Orlando. A biography*, 1928 erschienen, erzählt das Leben des Titelhelden mit dem italienisch anmutenden Namen. Der besondere narrative Coup

[3] Marcel Proust: *Unterwegs zu Swann, Auf der Suche nach der verlorenen Zeit*, Band 1, aus dem Französischen übersetzt von Eva Rechel-Mertens; revidiert von Lucius Keller, Suhrkamp Verlag, Frankfurt a. M. 1994, 70. - Marcel Proust: *Du côté de chez Swann, A la recherche du temps perdu*, Gallimard (Pléiade 1), Paris 1954, 46. Die Seitenangaben beziehen sich auf diese Ausgaben.

dieser fiktiven Biographie, die Raum und Zeit innerhalb eines Menschenlebens hyperbolisch transzendiert – Orlando lebt in mehreren Jahrhunderten, in mehreren Ländern und verschiedenen Kulturen –, ist der höchst überraschende Geschlechtswandel des Orlando. „Orlando was a man till the age of thirty; when he became a woman and has remained so ever since" (98).[4] Der moderne Zeitroman und der Vorgriff auf die postmoderne Gender-Thematik finden dabei – kraft der extravagant und souverän agierenden kulturellen Intelligenz der englischen Autorin – kunstvoll zueinander. Interessanterweise unterscheidet Virginia Woolf (noch) nicht zwischen *sex* (biologisches Geschlecht) und *gender* (soziales Geschlecht). Es bleibt (noch) bei *sex*.

3 Giovanni Boccaccio: Die ‚Falkennovelle' (*Decameron*, Quinta giornata, Novella nona, [5,9])

Giovanni Boccaccio hat sein *Decameron* in Florenz zwischen 1349 und 1351 geschrieben. In dieser Zeit wütet die Pest in dieser Stadt und in Europa. Die Pandemie läßt zehn junge Leute den Entschluss fassen, sich auf einen Landsitz vor den Toren der Stadt zurückzuziehen. Dort erzählen sie einander an zehn Tagen je zehn Geschichten und sie tauschen miteinander aus, wie sie diese interpretieren. Boccaccio hat einen kunstvollen Erzählrahmen um das Novellenkorpus angelegt: Dieser Rahmen besteht aus einem *Vorwort* und aus der *Einleitung* zum ersten Tag.

3.1 Das Vorwort (*Proemio*)

Das Vorwort (*Proemio*) nutzt der Autor zur ethischen Ermahnung seiner Leserschaft, wenn er sagt:

> *Umana cosa è aver compassione degli afflitti*. . . Menschlich ist es, Mitleid zu haben mit den Bedrängten. Jedem stünde es gut an, aber am meisten erwartet man es von denen, die selbst schon des Trostes bedurft und ihn bei Freunden gefunden haben. (. . .) ich will hundert

[4] Virginia Woolf, *Orlando. A Biography [1928]*, Penguin Classics, o. O. 2019, 98.

> Novellen erzählen (…) als Hilfe und Zuflucht – *in soccorso e rifugio* – für die Frauen (…). (198–9)[5]

Als grundsätzliche menschliche Eigenschaft wird das Mitleid (*la compassione*) profiliert. Zur Empathie fähig zu sein, verweist auf eine humane und überaus intelligente (Seelen-)Qualität.

3.2 Einleitung zur *Giornata prima*

Mit der Einleitung zur *Giornata prima* wendet sich der Autor an seine Leserinnen:

> Ihr anmutigen Frauen – *graziosissime donne* – , jedesmal wenn ich darüber nachdenke, wie mitfühlend ihr von Natur aus seid, meine ich: Ihr müsst den Anfang dieses Buches schwer und leidvoll finden. Denn es beginnt mit der schmerzlichen Erinnerung an die tödliche Pest, die für jeden ein ungeheures Unglück war (…). Die Gewalt dieser Pest war deshalb so furchtbar, weil sie sich (…) schnell von den Kranken auf die Gesunden ausbreitete (…). (208–9)

Das *Decameron*[6] ist in besonderer Weise Lektürestoff für das weibliche Geschlecht. Die Frauen erachtet Boccaccio als mitfühlende Rezipientinnen seiner Novellen. Bevor seine Figuren zu erzählen beginnen, wirft er einen Blick in die Welt der wütenden Pest. Jeder versucht auf seine Weise, der Pandemie lebend zu entkommen. Was ist dafür zu tun?

3.3 Bilder der Pandemie

Was ist zu tun, um der Ansteckung aus dem Wege zu gehen? Maßvoll leben und sich vor jedem Übermaß hüten: „*il viver moderatamente e il guardarsi da ogni*

[5] Giovanni Boccaccio: *Poesie nach der Pest*. Der Anfang des *Decameron*. Italienisch – Deutsch. Neu übersetzt und erklärt von Kurt Flasch, Dietrich, Mainz 1992. Die Seitenangaben beziehen sich auf diese Ausgabe. Die Zitate finden sich jeweils auf gegenüberliegenden Seiten, links Italienisch, rechts Deutsch.

[6] Zur Einführung empfiehlt sich: Eberhard Leube, „Boccaccio und die europäische Novellendichtung“ in: *Neues Handbuch der Literaturwissenschaft*, Bd. 9, Renaissance und Barock (I. Teil), August Buck (Hrsg.), Athenaion, Frankfurt a. M. 1972, 128–161.

superfluità" (216). Oder: Jede Berührung mit den Kranken vermeiden: „*sempre gl'infermi fuggire*" (218). Im Alltag ist, zur Vermeidung von Ansteckung, zu beobachten:

> Der eine hielt duftende Kräuter, der andere Gewürze an die Nase, denn sie glaubten, das beste Mittel sei es, das Gehirn mit solchen Düften zu stärken, da die ganze Luft durchdrungen war vom Gestank der Leichen, der Krankheit und der Arzneien – *(il) puzzo de' morti corpi e delle infermità e delle medicine*. (220-1)

Der Egoismus treibt derweil vergiftete Blüten: Alle sind sie damit beschäftigt, „sich ausschließlich um sich selbst [zu] kümmern („*non curando d'alcuna cosa se non di sé*" (220). Grauenerregende Bilder sind omnipräsent – wie in der Corona-Pandemie unserer Tage im 21. Jahrhundert:

> (man hob) bei den überfüllten Kirchhöfen Massengräber („*fosse grandissime*") aus, in die man die neuen Toten zu Hunderten legte, schichtweise („*a suolo*") (…) bis man oben am Grabrand ankam. (232–3)

Der soziale Zusammenhalt der Gesellschaft zerfällt zusehends:

> (Die Überlebenden) fragten sich nicht mehr nach der Zukunft (…), ihr Sinn war einzig darauf gerichtet, im Augenblick zu genießen, was sie noch vorfanden – *di consumare*". (232–3)

Damit ist der Moment gekommen, Florenz den Rücken zu kehren.

4 Die literarische Welt des Decameron

> Als es so um unsere Stadt stand – sie war fast menschenleer – *stando in questi termini la nostra città, d'abitatori quasi vota, addivenne* (…) *che* – da geschah, was ich von einer glaubwürdigen Person erfahren habe: An einem Dienstagmorgen (…) trafen sich sieben junge Frauen – *sette giovani donne* – in der ehrwürdigen Kirche Santa Maria Novella (…). (236–237)[7]

[7] Giovanni Boccaccio, *Decameron*, Bd. 2, Garzanti, Milano 1974, 498–505 (für die italienischen Zitate); G. B., *Der Falke*, in: ders. *Männer und Frauen. Geschichten aus dem Decameron*. Aus

Sie fassen den Plan, mit drei jungen Männern („*tre giovani*“) auf einem Landsitz Zuflucht zu suchen und sich – „ehrbar – *onestamente*“ (254–5) – die Zeit mit dem Erzählen von Geschichten zu vertreiben, „*novellando*“, denn „das macht allen Spaß – dem, der sie erzählt, und allen, die zuhören – „*il che può porgere, dicendo uno, a tutta la compagnia che ascolta diletto*.“ (268–9). Hier und jetzt nimmt es seinen Anfang, Boccaccios *Decameron*, das Zehntagewerk.

4.1 Die literarische Kommunikation (Wer erzählt wem?)

Wir machen einen Sprung hin zur ‚Falkennovelle‘, fünfter Tag, neunte Novelle. Jedem Tag des Zehntagewerks steht eine Königin vor oder ein König. Sie bestimmen jeweils das Motto, das die zehn Erzählungen des Tages inhaltlich miteinander verbindet. Der fünfte Tag steht unter der Leitidee von Geschichten mit *glücklichem* Ausgang (*le felici novelle*). Die Königin des fünften Tages heißt Fiammetta. Als vorletzte in der Runde erzählt sie höchstselbst die berühmte ‚Falkennovelle‘. Diese Geschichte aus dem Mund der Königin, *la reina*, zu hören, ist ein besonderer Höhepunkt. Denn Fiammetta kennt die Geschichte von ‚Federigo und seinem Falken‘ sehr genau.

Mit dieser Erzählung verfolgt sie ein doppeltes, gar ein dreifaches humanistisches Ziel: Erstens sollen ihre Freundinnen (und damit das weibliche Geschlecht) „erkennen, welche Kraft eure [der Frauen] Schönheit auf Männer nobler Denkart ausübt (210) – *quanto la vostra vaghezza possa ne‘ cuor gentili*“ (498); zweitens sollen sie lernen, auf kluge Weise und „bei richtiger Gelegenheit selbst die Geber[innen] eures Lohns [an die Adresse der Männer] zu sein – *esser voi medesime, dove si conviene, donatrici*[8] *de‘ vostri guiderdoni*“. Daraus leitet sich das große Gender-Projekt ab, das Leben zukünftig selbstbewußt in die Hand zu nehmen und ohne das Zutun der wankelmütigen Göttin Fortuna auszukommen – „*senza lasciarne sempre esser la fortuna guidatrice*“ (210/498). Das ist die ambitionierte Vorstellung weiblicher kultureller Intelligenz aus dem Atelier Boccaccios, wo auch bekannt ist, dass es nicht nur Leserinnen des *Decameron* gibt.

---

dem Italienischen von Kurt Flasch. München, Hanser Verlag 1997, 210–218 (für die deutschen Zitate).

[8] Der Übersetzer gibt (leider) das Feminium ‚*donatrici*‘, d. h. ‚Gebe*rinnen*‘ mit dem Maskulinum ‚Geber‘, wieder. Eine Fußnote für die *gender studies*.

Die kluge Fiammetta weiß um die wuchtige und zugleich heikle Essenz ihrer Geschichte. Sie kennt die Novelle aus vorzüglichster Quelle. Von Coppo di Borghese Domenichi, einem lebensklugen Florentiner, dessen Lob sie auch sogleich superlativisch anstimmt. Coppo, so sagt sie, gilt in den höchsten Kreisen der Stadt als

> *[u]omo di grande e di reverenda autorità* – ein Mann von großer und ehrwürdiger Autorität aufgrund seiner Lebensart und sittlichen Kraft – *e per costumi e per virtù*. [Coppo ist] hochgeehrt und ewigen Ruhmes würdig – *chiarissimo e degno d'eterna fama*. Als er älter wurde, fand er zunehmend Gefallen daran, (…) von vergangenen Dingen zu berichten – *si dilettava di ragionare*. (210–1/498)

Die Wertschätzung, die Coppo als tiefsinniger Erzähler allseits erfährt, hat drei Merkmale:

> Er erzählte besser als jeder andere; er sprach geordneter („*con più ordine*"), mit überlegenem Gedächtnis („*con maggior memoria*") und größerer Eloquenz („*ornato parlare*"). (498/210–1)

Fiammetta hat wahrscheinlich schon längst in dieser Koryphäe ihren Meister erkannt. Ihm eifert sie nach. Davon wird die (Nach-)Erzählung der wahren Geschichte von Federigo degli Alberighi eine hintersinnige Kostprobe sein. Im Kosmos der literarischen Kommunikation (hier die Frage: wer spricht?) ergibt sich nämlich: Die männliche Erzählerstimme Coppos, aus dem *Off* der ‚wirklichen Welt' der Stadt Florenz, verwandelt sich in die weibliche Erzählerinnenstimme Fiammettas, in der ‚fiktiven Welt' des *Decameron*, dessen Autor, Giovanni Boccaccio, männlich ist. Fiammettta kann sich auf Coppo als eminente Instanz kultureller Erfahrung und kommunikativer Intelligenz verlassen.

4.2 Das *dual voice*-Prinzip

Boccaccio stellt den Novellen des *Decameron* jeweils eine kurze Inhaltsangabe voran. Im hier gegebenen Fall der 9. Novelle des 5. Tages steht zu lesen:

> Federigo degli Alberighi liebt eine Frau, wird aber nicht wiedergeliebt. Er wirbt um sie in der Art eines Adligen und zehrt dabei sein

> Vermögen auf. Es bleibt ihm nur ein Falke. Als seine Dame ihn einmal besuchen kommt, gibt er ihn ihr, weil er nichts anderes hat, zum Essen. Als sie dies erfährt, ändert sie ihren Sinn, heiratet ihn und macht ihn zu einem reichen Mann. (210)

Diese Zusammenfassung ist ohne emphatische Ambitionen geschrieben. Ihr Redakteur (der Autor) scheint an den hochdramatischen Ereignissen merkwürdig uninteressiert. Diese Attitüde aber trügt. Boccaccio, der Autor der Novellensammlung, ist gewiss in seinem Buch kommunikativ anwesend, aber er tritt vor den Erzählerinnen und Erzählern der einhundert Novellen in den Hintergrund und überläßt den Stimmen seiner Figuren den weiten epischen Raum der Novellensammlung. Mit der Besonderheit, dass sich in der ‚Falkennovelle' die *dual voice* von Coppo (männlich) und Fiammetta (weiblich) Gehör verschaffen, ein singulär androgynes Duo.

5 Die Protagonisten der ‚Falkennovelle'

Die zentralen Protagonisten in der Geschichte, die Fiammetta erzählt, sind Federigo und sein Falke, Giovanna und ihr Sohn, sowie ein paar Nebenfiguren: die Brüder Giovannas, ihre ‚Anstandsdame' während des Besuchs bei Federigo. Wer sind sie nun, Giovanna und Federigo?

5.1 Giovanna

Sie ist „eine vornehme Dame – *una gentil donna*", sogar eine „der schönsten und feinsten – *delle più belle donne e delle più leggiadre*" (211/499) in ganz Florenz. *Gentilezza* und *bellezza*, Seelenadel und Schönheit, beides Schlüsselqualitäten der höfischen Welt, charakterisieren sie von Anfang an. Sie ist verheiratet und hat einen heranwachsenden Sohn. Eines Tages hält das Unglück schicksalhaft Einzug in diese schöne Welt. Der Ehemann und Vater stirbt, der Sohn erkrankt. Er würde bestimmt rasch wieder gesunden, so sagt er seiner Mutter, wenn er den Falken des Federigo, den er so oft hat kunstvoll fliegen und jagen sehen, zum Geschenk erhielte. Das Schicksal fordert Giovanna heraus. Das Liebeswerben Federigos hatte sie einst strikt zurückgewiesen. Federigo ruinierte sich, um seinem Begehren höchsten Nachdruck zu verleihen. Geblieben ist ihm, aus besseren Tagen, ein

kleines Anwesen, von dessen Ertrag er kärglich lebt und – der Falke, sein einziges Vergnügen. An alles dies erinnert sich Giovanna genau.

Als sie den Wunsch des Sohnes gehört hat, erschrickt sie und fragt sich, ob sie so „rücksichtslos – *sconoscente*" (213/500) sein könne, Federigo um den Falken zu bitten und damit „einem Edelmann das einzige Vergnügen wegzunehmen, das ihm geblieben ist" (213). Empathie mit Federigo und mütterliche Fürsorge für den Sohn widerstreben einander. Giovanna läßt sich ein wenig Zeit und denkt in Ruhe nach. Nicht übereilt handeln, dieser innere Auftrag bestimmt ihr Ringen um Klarheit.

Nachdem sie die Antwort für sich selbst gefunden hat, handelt sie, ohne zu zögern, beherzt. Dem Sohn sagt sie: „ich gehe hin und hole ihn dir [den Falken] – *io andrò per esso e sì il* [den Falken] ti *recherò*" (213/500). Als sie dann, kaum ist's gesagt, mit Federigo zusammentrifft, ihm von Angesicht zu Angesicht gegenübersteht, kommt sie sogleich auf ihre vermeintliche „Sittenstrenge – *onestà*" in den Tagen seines Werbens um ihre Hand zu sprechen. Nur zu gut verstehe sie, dass er ihre Zurückweisung als „Härte und Grausamkeit – *durezza e crudeltà*" (215/502) habe wahrnehmen müssen. Dergestalt versetzt sie sich einfühlsam in Federigos kummervolle Lage, einst und auch jetzt. Zu ihren eigenen Gunsten macht sie indes geltend, eben nicht leichtfertig seinem extravaganten Werben zu Willen gewesen zu sein. *Onestà* ist eine herausfordernde Tugend. Und das bedeutet: *Bellezza, gentilezza, onestà* sind, metaphorisch gesprochen, Giovannas ethische Kronjuwelen, die sie schon immer zu hüten wußte.

5.2 Federigo

Und wer ist Federigo? Er ist, wir haben es schon gehört, „*un gentil uomo*" (500). Seine *gentilezza* ist geleitet „von vornehmer Zurückhaltung – *umiltà*" (214/500)[9]. Darauf gründet sich, in den Augen von Giovanna, Federigos „adlige () Lebensart – *nobiltà*". Sie ist „einzigartig – *maggiore*", geprägt „durch höfisches Verhalten – *in usar cortesia*" (216/503). Unmittelbar wird nachvollziehbar, dass im Geflecht von *umiltà*, *nobiltà*, *cortesia* – Federigos moralistisches Dreigestirn –„ die „Großartig-

[9] Die Kunst des epochen- und werkgetreuen Übersetzens von Kurt Flasch versetzt den Leser immer wieder in Erstaunen und bereichert die deutsche Version des Textes um eine faszinierende Semantik, Basis für die Dynamik der Interpretation.

keit seiner Seele – *la grandezza del animo suo*“ (217/504) unverhüllt emporsteigen kann.Und diese Seelengröße, frei von Egoismen und Rachegelüsten, zeigt sich an seiner „letzte(n) großzügige(n) Tat – (seiner) *magnificenzia ultima*“ (218/504). Ohne zu zögern opfert er den Falken. Federigo und Giovanna sind einander auf ideale Weise ebenbürtig, ethisch, sprachlich, ästhetisch – im Stil des Umgangs mit sich selbst und miteinander. Das ist die Basis für den grandiosen Erfolg ihrer späten Liebe.

5.3 Das perfekt konstellierte Paar? Nochmals, Giovanna und Federigo

Giovanna zeichnen aus: *bellezza*, *gentilezza*, *onestà*. Drei feminin konnotierte Charakteristika der Herrin. Federigo zeichnen aus: *umiltà*, *nobiltà*, *cortesia*. Drei maskulin konnotierte höfische Charakteristika des *Cortegiano*. Die beiden Begriffs-Serien entsprechen sich: *bellezza* und *cortesia*, *gentilezza* und *nobiltà*, *onestà* und *umiltà* bilden eine spannende Symmetrie. Sie führt die beiden Figuren der Novelle zueinander.

Schönheit, Anmut und Aufrichtigkeit nobilitieren die Herrin. Der Herr ist charakterisiert durch höfisches Verhalten, adlige Grundhaltung und Demut. Die Demut (*umiltà*) ist ein Indiz für die Verliebtheit Federigos selbst nach all den Jahren. Der Demut Federigos steht die Aufrichtigkeit (*onestà*) der Giovanna gegenüber. Sie war das entscheidende Kriterium für die emotionale Distanznahme der Giovanna. Die *onestà* (nach Kurt Flasch die *Sittenstrenge*) hat verhindert, dass Federigo und Giovanna als Paar zueinander gefunden haben. Federigo hat dies in Demut hingenommen, ebenso wie seine Armut. Offen bleibt, ob er sich gedemütigt fühlt. Jedenfalls ist er der ‚Strenge‘ Giovannas unterlegen. Er lebt bescheiden, arbeitet in seinem Garten und erfreut sich an seinem Falken.

Als Giovanna ihn zur Mittagszeit aufsucht, ist er im Garten beschäftigt. Eine entlegene Reminiszenz des Gartens Eden? Das mag jede Interpretation für sich entscheiden. Giovanna stehe vor der Tür, wird dem Hausherrn mitgeteilt. Wie nimmt er diese Nachricht auf? Er wundert sich sehr, „*maravigliandosi forte*”. Freudig läuft er ihr sogleich entgegen – „*lieto là corse*“ (501). Der novellistisch konzentrierte Erzähldiskurs befeuert die Phantasie des Lesers. So ist es gewiss vorstellbar, dass Federigo bei der raschen Annäherung an seine Besucherin der Atem stockt.

Giovanna kommt ihm entgegen, „mit damenhafter Gewandtheit – *con una donnesca piacevolezza*." Das männliche Auge erkennt sofort das Dispositiv weiblicher Anmut. Das Vergnügen, das semantisch im Begriff des *piacere* konkret wird, hat seinen Ursprung in den beiden höfischen Charakteristika, die Giovanna auszeichnen: *bellezza* und *gentilezza*. Die große Freude Federigos korrespondiert mit seiner Seelengröße und spielt an, im Begriff des Adjektivs *lieto* (freudig), auf das Thema des fünften Tages. Geschichten mit glücklichem Ausgang (*lieto fine*) sind es, die erzählt werden sollen. Fiammetta, die Königin des Tages, hatte sich sogar „*felici novelle*" (430) gewünscht. Die gelingende semantische Engführung der Momente hoher Emotion und die anvisierte Katharsis verweisen einmal mehr auf die überlegene kulturelle Intelligenz Boccaccios.

Giovanna, seine großartige Protagonistin, erweist sich, draußen vor dem Haus und dem Garten stehend, als dramatisch höchst begabt, wenn sie, nach dem sehr höflichen ersten Gruß, Federigo mit folgenden Worten gegenübertritt:

> Ich bin gekommen, um dich zu entschädigen für die Nachteile – *a ristorarti de' danni avuti per me* –, die du erlitten hast, weil du mich mehr geliebt hast als dir dienlich war – *amandomi più che stato non ti sarebbe bisogno*. (214/501)

Wer so spricht, kann nur eine Glücksbotin sein. Und diese strahlende Herrin ist nun gekommen, um mit Federigo „wie unter Freunden" (Kurt Flasch) zu speisen, „*desinar dimesticamente*" (501). Das zu improvisierende Mahl, Zeichen der Vertrautheit und der Gastfreundschaft, soll mithin das Terrain sein für eine Unterredung und eine Wiedergutmachung. Federigo gerät sofort außer sich. Was hat er als Speise anzubieten? Nichts.

> In maßloser Angst stand er da wie verwirrt, dann lief er erregt hin und her und verfluchte sein Mißgeschick – *maladicendo la sua fortuna*. (214/502)

Dabei fällt sein Blick auf den Falken.

> Ohne weiter nachzudenken, drehte er ihm den Hals um – *tirato gli il collo* – und übergab ihn sofort einer Magd, die ihn rupfen, herrichten und am Spieß sorgfältig braten sollte – *arrostir diligentemente*. (215/502)

Und so halten sie Mahl miteinander, Federigo und Giovanna. Irgendwann ist der Moment gekommen, um über den eigentlichen Grund ihres überraschenden Besuchs zu sprechen. Einfühlsam stimmt sie ihr Gegenüber auf das ein, was ihr auf dem Herzen liegt. Dabei versetzt sie sich in die Lage des Anderen und betrachtet sich selbst mit neuen, fremden Augen.

> Federigo, wenn du an dein zurückliegendes Leben denkst und an meine Sittenstrenge (*„onestà“*), die du für Härte und Grausamkeit gehalten hast (*„durezza e crudeltà“*), dann zweifle ich nicht, daß du dich über meine Dreistigkeit wundern wirst (*„mia presunzione“*), wenn du den Hauptgrund hörst, um dessentwillen ich hierhergekommen bin (215/502).

Und das sind die Fakten: Als Mutter eines kranken Kindes hat sie Federigo aufgesucht, dem „allgemeinen Gesetz aller Mütter verpflichtet - *le leggi comuni dell'altre madri*“ (216/503). Sie hat alles unternommen, um das Leben ihres Sohnes zu retten. Dabei hat sie diesmal vielleicht sogar „gegen alle Schicklichkeit und jeden Anstand – *ogni convenevolezza e dovere*“ (216/503) verstoßen, verstoßen müssen. Wie wird Federigo diesen Satz aufgenommen haben? Und genau jetzt, in diesem Moment, bittet sie um das Geschenk des Falken[10]. Die Wucht der Katastrophe im Sinn der antiken Tragödie bricht jäh über beide herein. Jetzt sind sie Opfer geworden der „*fortuna contraria*“ (503). Und das bedeutet auch: Giovannas Sohn wird sterben.

Dass Boccaccio es vermag, mit den poetologisch eingeschränkten Mitteln der Gattung der Novelle auf die ästhetische Höhe der klassischen Tragödie emporzusteigen, das ist, ohne den Schatten eines Zweifels, kulturelle Intelligenz ‚in' der Literatur. Dazu zählt auch die einfache Form der Novelle als kleine, vielseitig verwendbare Erzählung, die Boccaccio selbst erfunden und sehr variabel ausgestaltet hat. Das läßt sich sehr gut an der Novelle vom Falken erkennen, wenn es am Ende, *en miniature*, zu einem signifikanten Gattungswechsel kommt. Die Falkennovelle bleibt nämlich nicht bei er tragödienhaften Eintrübung stehen. Die Tragödie

[10] Nach Paul Heyse (Einleitung zu „*Deutscher Novellenschatz*“ [1871] ist der Falke das „Specifische, das diese Geschichte von tausend anderen unterscheidet“. Vgl. *Novelle*, Josef Kunz (Hg.), Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 21973, 68.

verwandelt sich, kraft der Handlungsintelligenz Giovannas, in eine kathartisch aufheiternde Tragikomödie.

5.4 Die domestische Tragikomödie

Die neunte Novelle des fünften Tages schildert in konziser Form die tragisch zu nennende Auslöschung einer jungen Familie. Fiammetta berichtet ohne Pathos von diesem erstaunlichen Ereignis, gewiss eine veritable „sich ereignete unerhörte Begebenheit“ (Goethe)[11]. Vater und Sohn sind nicht mehr. Die Genealogie des kleinen Familienzweigs erlischt. Giovanna, eben noch die glückliche Gemahlin und Mutter, ist abrupt auf sich allein gestellt, ihres Lebensmittelpunkts beraubt. Das ist ein Aspekt des tragischen Geschehens.

Ein anderer – er bleibt in der Novelle ausgespart – betrifft Federigo. Das spontane Opfern seines Falken hat das Schicksal in einem Augenblick mit heraufbeschworen. Das konnte er freilich nicht ahnen. Und doch ist er an dem irreversiblen Lauf der Ereignisse aktiv beteiligt. Seine großzügige Geste kehrt sich plötzlich gegen ihn selbst. Mit Giovannas Rettungsversuch steht es nicht besser. Wozu mußte sie ein Essen anregen, das noch dazu Federigo auszurichten hatte? Das sind Fragen ohne Antwort, Aporien. Nun ist alles verloren. Kann es da noch eine Zukunft geben?

Das schier Unglaubliche ereignet sich dennoch: Plötzlich kommt es zur finalen Schicksalswende. Die Novelle mit tragischem Colorit nimmt dabei mit einem Mal tragikomische Gestalt an. Nach einiger Zeit des Trauerns, so heißt es, bestehen die Brüder der Witwe auf ihrer Wiederverheiratung („*rimaritarsi*“, 504). Giovanna ist mit dieser Praxis vertraut. Sie ist gewappnet und sie steht für sich ein und damit auch für Federigo. So benennt sie ihn, Federigo, als den einzig möglichen zukünftigen Gatten. Haben ihre Brüder recht gehört? Ist Federigo nicht ohne allen Besitz? Giovanna aber insistiert heiter und gelassen:

> Meine Brüder, ich weiß sehr wohl, daß es so ist, wie ihr sagt. Aber mir ist ein Mann ohne Reichtum lieber als Reichtum ohne einen Mann – *io voglio avanti uomo che abbia bisogno di richezza, che richezza che abbia bisogno d‘uomo*. (218/505)

Das ist ‚kulturelle Intelligenz‘. Warum?

[11] Johann P. Eckermann: *Gespräche mit Goethe in den letzten Jahren seines Lebens* (25. [29.] Januar 1827) in: *Novelle*, Josef Kunz (Hg.), a.a.O., 34.

6 Kulturelle Intelligenz im *Decameron*

Der maskulin dominierte (mittelalterliche) Feudalismus Italiens (Europas) sah es vor, dass Witwen auf Geheiß ihrer männlichen Geschwister gehalten waren, erneut zu heiraten. Demgemäß hätte sich Giovanna dem Willen ihrer Brüder beugen und Federigo leer ausgehen lassen müssen. Gerade das aber tut sie nicht. Sie beugt sich nicht dem prä-kapitalistisch denkenden Zeitalter, sondern setzt, auf der Suche nach ihrem Glück, auf weibliche Intuition. Und sie kämpft für die Durchsetzung ihres Willens. Dabei erweisen sich ihre feminine Intelligenz, ihre psychologische Intuition im Erkennen von Federigos charakterlichen und seelischen Qualitäten und nicht zuletzt ihre witzige und geistreiche Sprache als sinnvoll geschärfte Waffen des Geistes. Ihre souveräne kulturelle Intelligenz bereitet buchstäblich eine feministische Wende vor, einen frühneuzeitlichen *cultural turn* im männlich ausgerichteten Feudalsystem, und inauguriert eine Zukunft, die auf die Gleichstellung der Geschlechter[12] setzt.

Wie gelingt es Giovanna konkret, ihren Wunsch und Willen durchzusetzen? Der Text selbst wird uns belehren. Drei Merkmale ihrer pointierten ‚Verteidigungsrede' – rhetorisch dem *genus iudiciale* nachgebildet – führen zum Erfolg ihres Plädoyers. Erstens, ihre Rede ist höflich angelegt (die liebevolle Apostrophe an die Geschwister). Zweitens, sie ist offenkundig konfliktfrei; Giovanna gibt den Brüdern in der Sache recht.

> Meine Brüder, ich weiß sehr wohl, daß es so ist, wie ihr sagt [aber] –
> *Fratelli miei, io so bene che così è come voi dite, ma* (. . .). (218/505)

Drittens gelingt es der Rede in der finalen Volte, Fiktion und Wirklichkeit gegeneinander auszuspielen. Dies vermag sie im Rückgriff auf die rhetorische Figur des *Chiasmus*. Das ist die Überkreuzstellung der beiden Satzteile bzw. der beiden Argumente. So erscheint *ein Mann ohne Reichtum* (Wirklichkeit) in Kontrast zum *Reichtum ohne einen Mann* (Fiktion).

Die Stärke des humanen, transgenerischen Arguments gipfelt in dem Fazit, dass *Glück* nicht käuflich ist. Als solches ist Giovannas Plädoyer sogar als miniaturi-

[12] Vgl. „Kulturwissenschaft und Geschlechterforschung" (Renate Hof) in: *Einführung in die Kulturwissenschaften. Theoretische Grundlagen – Ansätze – Perspektiven*, Ansgar Nünning, Vera Nünning (Hrsg.), Metzler, Stuttgart, Weimar 2008, 329–350.

siertes Gender-Manifest lesbar. Dies zu demonstrieren, ist die literarische Heldin mit nur siebenundzwanzig Wörtern aus der Feder ihres Autors in der Weltliteratur unterwegs. In deren Mitte findet sich der harte Kern ihrer selbstbewußten Willenserklärung als Frau: *ma io voglio*... Fiammetta, die Erzählerin, besiegelt konklusiv den Wendepunkt der Novelle als gelingenden Aufbruch beider Geschlechter in neue Zeiten, wenn sie sagt:

> So bekam Federigo diese große Frau –*così fatta donna*–, die er so lange geliebt hatte und die zudem sehr reich war, zur Gattin; er lernte seine Güter besser verwalten und beschloß zusammen mit ihr in Freuden seine Jahre – *in letizia con lei* (...) *terminò gli anni suoi*. (218/505)

7 Die ‚Falkennovelle' im Prisma der psychologischen Intelligenzforschung

Angeregt durch den gehaltvollen Vortrag von Joachim Funke zu dem Thema „Tradition und Zukunft der psychologischen Intelligenzforschung" (vgl.sein Kapitel „Intelligenz: Die psychologische Sicht", in diesem Band)[13], ist die Idee entstanden, die ‚Falkennovelle' ansatzweise in der Verknüpfung von Psychologie, Literatur- und Kulturwissenschaft zu lesen.

Nach Joachim Funke[14] bietet sich der (psychologische) Begriff der ‚Intelligenz' an: a) zur Bezeichnung menschlicher Anpassungsleistungen; b) zur Beschreibung wert- und damit kulturgebundener Selektionsentscheidungen; und er ist c) ein Gegenstand ideologischer und politischer Debatten.

[13] Ich danke Herrn Kollegen Joachim Funke herzlich für die Ermöglichung, Elemente seines spannenden Vortrags an dieser Stelle aufzugreifen.

[14] Vgl. auch Joachim Funke, Bianca Vaterrodt, *Was ist Intelligenz?,* Verlag C. H. Beck, München ^{3}2009. Mit Bezug zur ‚Falkennovelle' ist das Stichwort der „existentielle(n) Intelligenz" (57) besonders interessant, sowie das Kapitel „Emotionale Intelligenz" (59–60) mit den fünf Bereichen: 1 *Kenntnis der eigenen Emotionen*, 2 *Emotionen handhaben*, 3 *Emotionen in die Tat umsetzen*, 4 *Empathie*, 5 *Umgang mit Beziehungen*, – die sich *kulturpsychologisch* auf Giovanna und Federigo anwenden ließen.

7.1 Zu den narrativ vermittelten ‚Anpassungsleistungen' Giovannas sind zu zählen:

1. Federigo persönlich aufsuchen (Selbstmotivation, Diskursfähigkeit, Körpereinsatz)
2. warten können auf den rechten Augenblick (eigene Belohnungsverzögerung aushalten)
3. die Bitte einfühlsam vortragen (beiderseits Einst und Jetzt abgleichen)
4. Empathie zeigen für den (durch *durezza, crudeltà*) traumatisierten Federigo
5. soziale Normen reflektieren (das Wiederverheiratungs-Gebot)
6. absurde Sprachlogik erfinden (der Chiasmus als Wendepunkt, sein kathartischer Effekt)

7.2 Zu den ‚Selektionsentscheidungen' der Giovanna gehören in der Rückschau:

1. Selbst agieren, statt Andere (für sich) handeln zu lassen
2. das Gespräch dialogisch gestalten, statt zu monologisieren
3. Sprache und Emotion korrelieren, statt fühllos zu insistieren
4. Wortsemantiken klären (*durezza, crudeltà, onestà*), statt Bedeutungsambiguität zuzulassen
5. sich selbst erkennen (was hat Vorrang: Geld oder Liebe?), statt Ideologieskizzen zu folgen
6. witzig entlastende Einfälle kreativ nutzen (erfinden), statt auf Pathos zu setzen

7.3 Die ideologische und politische Debatte im Kontext der Interpretation der ‚Falkennovelle'

Die ideologische und politische Debatte im Kontext der Interpretation der ‚Falkennovelle' kann die Literaturwissenschaft, die Kulturwissenschaft und die Psychologie inspiriert zusammenführen. Ansatzpunkte sind u. a. in den Kulturwissenschaften gegeben, innerhalb der Frauen- und Genderforschung (Geschlecht als Konstrukt) und der (post-)modernen Diskursanalyse unter den Aspekten von Sprache, Herrschaft, Macht. Als Ausgangspunkte können mehrere Kapitel aus dem *Handbuch zur Einführung in die Kulturwissenschaften* eine Anregung sein, insbesondere die Beiträge (und Schlagwörter) zu:

- *Kulturanthropologie* – „Kultur als Text" (90) (Doris Bachmann-Medick);
- *Historische und literarische Anthropologie* – „kulturelle Produktion des Körpers und des Geschlechts" (116) (Harald Neumeyer);
- *Kollektives Gedächtnis und Erinnerungskulturen* – „kulturelles Gedächtnis, Schrift und politische Identität" (173) (Astrid Ertl);
- *Kulturgeschichte* – als „Gegenbegriff gegen dominante Formen der Geschichtsschreibung" (186) (Ute Daniel);
- *Kulturpsychologie und Psychoanalyse als Kulturtheorie* – „Kultur als zum Wesen des Menschen Gehörendes, ja, ihn Konstituierendes" (239) (Jürgen Kramer);
- *Kulturwissenschaften und Geschlechterforschung* – die „Ordnung der Geschlechter" (330) und die „Intelligenz der Kultur" (339) (Renate Hof) u. a. m.

In der genannten *Einführung in die Kulturwissenschaften* findet sich auch eine Definition als Synthese für den Begriff der Kultur, der weitere Reflexionen zum Thema ‚Kulturelle Intelligenz in der Literatur' anregen kann. Im einleitenden Beitrag mit dem Titel „Kulturwissenschaften: Eine multiperspektivische Einführung in einen interdisziplinären Diskussionszusammenhang" heißt es:

> Demzufolge wird Kultur als der von Menschen erzeugte Gesamtkomplex von Vorstellungen, Denkformen, Empfindungsweisen, Werten

und Bedeutungen aufgefasst, der sich in Symbolsystemen materialisiert.[15]

Bibliographie

Primärliteratur:

Boccaccio, Giovanni: *Decameron*, 2 Bde., Garzanti (I Grandi Libri), Milano 1974. „*Quinta giornata, Novella nona*“ [‚Falkennovelle' (5, 9)] , ebd. Bd. 2, 498–505.

Boccaccio, Giovanni: „Der Falke“ in: ders. *Männer und Frauen. Geschichten aus dem Decameron*. Aus dem Italienischen von Kurt Flasch. Hanser Verlag, München 1997.

Boccaccio, Giovanni: *Poesie nach der Pest*. Der Anfang des *Decameron*. Italienisch – Deutsch. Neu übersetzt und erklärt von Kurt Flasch, Mainz, Dietrich 1992.

Homer: *Odyssee*, Übersetzung, Nachwort und Register von Roland Hampe, Reclam, Stuttgart 1979.

Molière: *L'Avare – Der Geizige*, Französisch/Deutsch. Übersetzt und herausgegeben von Hartmut Köhler, Stuttgart, Reclam 1984.

Molière: *Le malade imaginaire – Der eingebildete Kranke*, Französisch/Deutsch. Übersetzt von Doris Distelmaier-Haas. Anmerkungen und Nachwort von Hanspeter Plocher, Stuttgart, Reclam 1988.

Molière: *Le Tartuffe ou l'Imposteur – Der Tartuffe oder der Betrüger*. Übersetzt und herausgegeben von Hartmut Köhler, Stuttgart, Reclam 1986.

Proust, Marcel: *Du côté de chez Swann. A la recherche du temps perdu*, Gallimard (Pléiade 1), Paris 1954.

Proust Marcel: *Unterwegs zu Swann, Auf der Suche nach der verlorenen Zeit*, Bd. 1, aus dem Französischen übersetzt von Eva Rechel-Mertens; revidiert von Lucius Keller, Suhrkamp Verlag, Frankfurt a. M. 1994.

Woolf Virginia: *Orlando. A Biography*, Penguin Classics, o. O. 2019.

Sekundärliteratur:

Funke, Joachim / Vaterrodt, Bianca: *Was ist Intelligenz?*, Verlag C. H. Beck, München ^{3}2009.

[15] „Kulturwissenschaften: Eine multiperspektivische Einführung in einen interdisziplinären Diskussionszusammenhang“ (Vera Nünning und Ansgar Nünning), a.a.O. 6.

Nünning, Ansgar / Nünning, Vera (Hrsg.): *Einführung in die Kulturwissenschaften. Theoretische Grundlagen – Ansätze – Perspektiven*, Metzler, Stuttgart, Weimar 2008.

Ebenda:

Bachmann-Medick, Doris: „Kulturanthropologie“, 86–107.
Erll, Astrid: „Kollektives Gedächtnis und Erinnerungskulturen“, 156–185.
Hof, Renate: „Kulturwissenschaft und Geschlechterforschung“, 329–350.
Nünning, Vera / Nünning, Ansgar: „Kulturwissenschaften: Eine multiperspektivische Einführung in einen interdisziplinären Diskussionszusammenhang“, 1–18.
Voßkamp, Wilhelm: „Literaturwissenschaft als Kulturwissenschaft“, 73–85.

Leube, Eberhard: „Boccaccio und die europäische Novellendichtung“ in: *Neues Handbuch der Literaturwissenschaft*, Bd. 9, *Renaissance und Barock* (I. Teil), August Buck (Hrsg.), Athenaion, Frankfurt a. M.1972, 128–161.

Novelle, Wege der Forschung, Bd. LV, Josef Kunz (Hg.), Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt ^{2}1973.

Über den Autor

Christof Weiand ist Professor für Romanische Philologie (Französische und italienische Literaturen von den Anfängen bis zur Gegenwart). Publikationen zu Lyrik, Novellistik, Autobiographie, zu Dante, Svevo, Calvino, Stendhal, Butor u. a. m. Übersetzung von Michel Butor, *Textes récents – 37 pages* | *Neueste Texte – 37 Seiten*, Universitätsverlag Winter, Heidelberg 2012.

Korrespondenzadresse:
Prof. Dr. Christof Weiand
Romanisches Seminar
Universität Heidelberg
Seminarstr. 3
69117 Heidelberg

E-Mail: christof.weiand@rose.uni-heidelberg.de
Homepage: https://www.uni-heidelberg.de/rose/personen/weiand.html

Sektion 7:
Politische Intelligenz und Weisheit

Meta-Intelligence: Understanding, Control, and Coordination of Higher Cognitive Processes

ROBERT J. STERNBERG

College of Human Ecology, Cornell University

Abstract

Higher cognitive processes are often characterized as fitting into categories that, while treated as natural kinds, actually are human-made inventions, such as intelligence, creativity, and wisdom. Other germane categories include reasoning, problem solving, and concept formation. The different categories generate their own journals, their own tests, their own training programs, and, of course, their own cadres of researchers who specialize in one (or, more rarely, more than one) of the categories. I suggest in this article that the mental structures and processes underlying these various categories are largely the same. For example, all of them require metacomponents, or executive processes, such as recognizing the existence of problems, defining the nature of problems, formulating strategies to solve problems, and so forth. Their utilization also requires certain attitudes. What differs is the purpose to which processes and attitudes are utilized. In intelligence, the processes and attitudes are used primarily for knowledge acquisition, utilization, and analysis. In creativity, the processes and attitudes are used to generate new, useful ideas. In wisdom, the processes and attitudes are used to seek a common good. The arbitrariness of these separate categories serves artificially to isolate related theoretical and empirical work that should integrate intelligence, creativity, and wisdom. In this article, I discuss how the

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24399

construct of meta-intelligence helps bring unity to theory and research endeavors that are now viewed as being largely independent of each other.

1 Introduction

Theory and research on higher cognitive processes is divided into a number of largely discrete categories. In approaches that had their origins in differential psychology, major categories have been intelligence, creativity, and wisdom. In approaches that had their origins in cognitive-experimental psychology, categories have been ones such as problem solving, reasoning, concept formation, and the like. These different categories have been perceived as different, although partially overlapping domains of psychological inquiry. They have given rise to different fields of endeavor, with largely different researchers, journals, professional societies, and graduate programs to prepare the next generation of researchers.

Worth considering is that these categories are human constructions or stipulated concepts. They are artificially constructed because they are convenient. For example, a textbook on The Psychology of Human Thought (Sternberg & Funke, 2019), has separate chapters for intelligence (Wilhelm & Schroeders, 2019), creativity (Lubart & Thornhill-Miller, 2019), wisdom (Glück, 2019), problem solving (Funke, 2019), reasoning (Davidson, 2019; St. B. T. Evans, 2019), decision-making (Nolte, Garavito, & Reyna, 2019), and concepts (Levering & Kurtz, 2019), as have other similar books in the past (Sternberg & Ben-Zeev, 2001; Sternberg & Smith, 1988). Other books have related topics (e.g., Minda, 2020).

2 Relations among Intelligence, Creativity, Wisdom, and Related Constructs

Clearly, the categories are highly overlapping. For example, in the differential-psychological domain, a typical divergent-thinking task used to measure creativity ("What are unusual uses of a paperclip?") requires divergent thinking, but also requires analytically intelligent thinking to determine whether a given answer produced by divergent thinking is appropriate. As an example, the paperclip might be used to tie up a plastic garbage bag; but if one generates the answer that it can be used as a substitute for toilet paper, that's harder to imagine! One needs an analytical filtering mechanism to screen out bad creative ideas. Similarly, wise

decisions, such as how to contain a burgeoning pandemic, require both creative thinking—something that has been somewhat hard to find during the COVID-19 pandemic—and analytical thinking to ensure that novel ideas—such as drinking bleach to purify one's insides—are removed if they are not useful or even are harmful.

In the cognitive-experimental domain, "reasoning" requires solving inductive- or deductive-reasoning problems, so clearly, people who reason are solving problems. They also have to decide what answer is correct, so the problems involve decision making. In a typical inductive-reasoning problem, reasoners have to learn one or more concepts, such as that a number series has the pattern "+2, -3," as in "8, 10, 7, 9, 6, ….?" so concept-learning is involved as well.

The different domains are clearly related, and yet insularity can make it difficult to conduct and publish research that cross-cuts categories. For example, if one develops a theory that cross-cuts intelligence, creativity, and wisdom, one may be at a loss as to where to submit an article based on the theory, at least if one wishes to submit it to a somewhat specialized journal. The problem is that intelligence and creativity journals are distinct and there currently are no wisdom journals at all.

The disadvantage to this modular approach is that the modules are not really modules. Claiming to have modules when one does not have modules is probably a bad idea because it creates illusory separations. The concepts of intelligence, creativity, and wisdom all overlap. For example, we know that explicit psychometric measures of intelligence, creativity, and wisdom are all intercorrelated (Lynch & Kaufman, 2019; Staudinger, Lopez, & Baltes, 1997), as are implicit-theory based measures (Sternberg, 1985b). Conceptually, the three are difficult cleanly to distinguish (Sternberg, 2003b); one theory, a balance theory of wisdom, views wisdom as inevitably involving creativity and intelligence (Sternberg, 2019b). Creativity and intelligence always have been very closely related conceptually (Sternberg & O'Hara, 2000). Guilford (1967) viewed creativity as largely a subset of intelligence, with divergent thinking one of the operations in his theory that could be applied to various contents and products. Gardner (2011a) has analyzed the creativity of famous creators in terms of his theory of multiple intelligences (Gardner, 2011b). A recent theory views successful intelligence, a broad construct, as drawing on analytical intelligence, creative intelligence, and wisdom (Sternberg, 2020a). CHC (Cattell-Horn-Carroll) theory places creativity in long-term storage

and retrieval (Glr), and fluid intelligence is also related to creativity (Carroll, 1993; Cattell, 1971; McGrew, 2005).

The differentiation in the cognitive literature among reasoning, problem solving, decision making, and concept formation are even harder to make. Reasoning problems are, well, problems. There is a problem to be solved. Decisions need to be made about the correct answer. Decision making usually requires solving some kind of problem, such as whether to do one thing or another. And concept formation is required for solving any kind of problem for one to learn enough information to be able to solve the kind of problem (see Sternberg & Funke, 2019).

In the augmented theory of successful intelligence (Sternberg, 2020a), creative intelligence—which is the ability part of creativity—is used to generate new ideas; analytical intelligence is used to ascertain the quality of those ideas; practical intelligence is used to put the ideas into practice and convince others of the value of the ideas; and wisdom is used to ensure that the ideas are used to help promote a common good. According to this theory, the cognitive processes used for the different aspects of intelligence are all largely the same, namely, a set of metacomponents, or executive processes—processes that were introduced in a much earlier version of the theory (Sternberg, 1980, 1983).

The metacomponential processes apply to all problem solving of any kind, including (a) recognition of the existence of a problem; (b) definition of the problem; (c) mental representation of the problem; (d) allocation of resources to the problem; (e) formation of a strategy for solving the problem; (f) monitoring of problem solving as it is ongoing; (g) evaluation of the solution to the problem after it is solved (see Funke, 2019, for a more comprehensive overview of processes of problem solving). On this view, all problems—whether seemingly based on intelligence, creativity, wisdom, or some combination; or whether requiring problem solving, reasoning, decision making, concept formation, or some combination—require execution of some and probably all of these metacomponents.

This enumeration comprises a fairly standard list of executive processes (see also, e.g., Bransford & Stein, 1993; Brown, 1978; Feuerstein, 1979, 1980). To my knowledge, the executive metacomponential processes, unlike performance components that execute the instructions of metacomponents, have not been experimentally separately (see Sternberg, 1983, 1985a).

For example, suppose the problem is a fluid-intelligence problem, such as an analogy. There are some necessary steps, which may or may not be conscious. One

has to recognize that there is a problem. Then one has to define it as an analogy. Next one has to decide how to represent the information in the problem—in terms of features, a spatial representation, or whatever. Then one needs to decide how to allocate mental resources, as well as time, to solve the problem, and to set up a strategy to solve the problem. One then has to monitor one's problem solving and evaluate it after one is done.

Test-like analogy problems are, arguably, somewhat trivial, although Spearman (1923, 1927) saw analogies as a primary basis for intelligent thinking. Consider now more complex problem.

For intelligence, consider comparing and contrasting two vaccines for their efficacy, safety, cost, portability, storage requirements, and the like. The executive processes would be the same as for the analogy. One would have to recognize there is a problem—a disease in need of a vaccine. One would have to define the problem—choosing which of two vaccines is a better choice. One would have to allocate resources to making a decision. One would have to represent the problem, set up a strategy to solve the problem, and then monitor and evaluate one's solution.

Consider now a creativity problem. Suppose one is designing the next year's model of a car. This year the car has not sold well. You want to design a new model that will sell better than the old model. You have to be creative, because what the car company is doing now is not working. So, you need to recognize there is a problem—the car is not selling well. You have to define the problem—why is the car not selling well? Is it the engineering, the design, the marketing, the sales force, the repair record, or what? If it is the design, what is wrong with the design? You then need to represent the problem—what does the current car look like and what does it need to look like? Maybe you will draw schematics of old and new versions. You need to decide how much time to allocate to the project and how you can stay within the budget allocated for the project. You need to create a strategy for designing and engineering the product—how are you actually going to make it happen? As you put the new car into production, you have to monitor whether the new version actually does fix what was wrong with the old version without introducing new problems. Finally, when a prototype is produced, you have to evaluate whether it actually works.

Finally, consider a wisdom-based problem. Two countries, X and Y, are drawing on a common water source. Country X accuses the other country, Y, of taking

more than its allotted share of the water. (This is actually happening today with the United States and Mexico.) Relations are deteriorating quickly over the conflict regarding the water source. And water is getting scarcer all around. How do the two countries resolve their dispute? They recognize there is a problem. They are seriously at odds with each other. They define the problem as either X's stealing more than its allotted share of water, or of Y's believing that X is stealing more than its fair share of water, even though it's not, or of X and Y disagreeing as to what fair shares of water are. They need to represent the problem, so perhaps they create a schematic of the shared water source, and the water flow to each of the countries. They need to decide how much time, money, and person-power to devote to solving the problem. They need to set up a strategy to solve the problem, perhaps appointing some kind of joint commission. They need to monitor the progress of the commission and then evaluate, at the end, whether the commission did indeed reach a solution acceptable to both countries.

The same metacomponents can be applied to all three types of problems. How, then, do the problems differ? They differ in what they are trying to accomplish—in their desired end-state. The intelligence problem with the vaccines is largely analytical and convergent—compare two vaccines on the basis of available information and decide which is a better choice. The creativity problem is largely one of discovery and invention. It is divergent—create a new model for a car that has not been selling. The wisdom-based problem is one of finding a common good.

On this view, what differs among intelligence, creativity, and wisdom is not the underlying mental processes, mental representations, or even need to formulate strategies and strategic goals. Rather the difference is one of purpose in problem solving. What is the problem solver trying to accomplish?

In point of fact, the three problems, like all problems, are not pure. There are few if any "pure" intelligence, creativity, or wisdom problems. The creativity problem, for example, requires at least some consideration of a common good. One wants purchasers to be happy with their purchase, stockholders to be happy with their profits, management to be happy with the enhancement of their product line, workers to be happy with their chance to develop something new, etc. The intelligence problem requires one to choose a vaccine that will help to achieve a common good for vaccine users, and it does require creativity in deciding the bases one should use for comparing the vaccines.

On the current view, use of intelligence, creativity, and wisdom involves not only mental processes, but also attitudes. One has to want to use the processes, or they never will get used. The biggest stumbling block to the use of creativity, for example, is not lack of creative skills, but rather attitudinal—the fear of using creativity because its use will engender opposition (Sternberg, 2018; Sternberg & Lubart, 1995). Wisdom also can and often does engender opposition, as Socrates learned in ancient times, paying for his wisdom with his execution. But the same problem exists today: as Malala Yousafzai discovered when she was shot for advocating the rights of young women to an education in Pakistan. Sometimes, even the use of intelligence can engender opposition, as leaders discover who are smarter than their followers and therefore are mocked for being too bookish (Sternberg, 2003a). To some extent, this happened in the United States to Harvard-educated Barack Obama, who spoke and wrote at a level higher than that of many of his constituents.

3 The Nature of Meta-Intelligence

Put another way, many serious life problems require some of intelligence, creativity, and wisdom jointly. The greatest problem is where, when, and how to allocate them—and this is the problem that the higher order construct of meta-intelligence is intended to solve. *Meta-intelligence* is understanding, control, and coordination of higher cognitive processes, such as the processes of intelligence, creativity, and wisdom, or problem solving, reasoning, decision making, and concept formation. Just as there are three levels of abilities in Carroll's (1993) three-tier model of human intelligence, here there are four levels of functioning, as shown in Figure 1.

In particular, meta-intelligence is at the top level of the hierarchy. It provides understanding, control, and coordination of the various aspects of intellectual functioning. When taken from a differential-psychological standpoint, these aspects include intelligence, creativity, and wisdom. When taken from a cognitive-experimental standpoint, these aspects include problem solving, reasoning, decision making, and concept formation. These aspects of functioning are highly overlapping, both between methodological categories (differential and cognitive-experimental) and within methodological categories (intelligence, creativity, wisdom; or reasoning, problem solving, decision making, concept formation).

These aspects of functioning are, in turn, a result of metacomponential thinking, otherwise known an executive processing. The metacomponents, in turn, control the utilization of performance components, which solve problems, and of knowledge-acquisition components, which learn how to solve the problems in the first place (Sternberg, 1984).

One might argue, of course, that meta-intelligence is just another manifestation of g. But the correlational patterns across intelligence, creativity, and wisdom simply do not support such an interpretation. Although there are correlations, they are modest. And at the level of construct-validation, it is quite clear that intelligence tests, from which the g factor is extracted, do not well measure either creativity or wisdom. On the contrary, there are many intelligent people who are not particularly creative or wise.

Rather, meta-intelligence serves a coordinating and control function over the different processes of higher of higher order cognition as they serve different purposes, either to analyze and solve, or learn how to solve problems in the first place (intelligence); to create new problems or solutions (creativity); or to solve

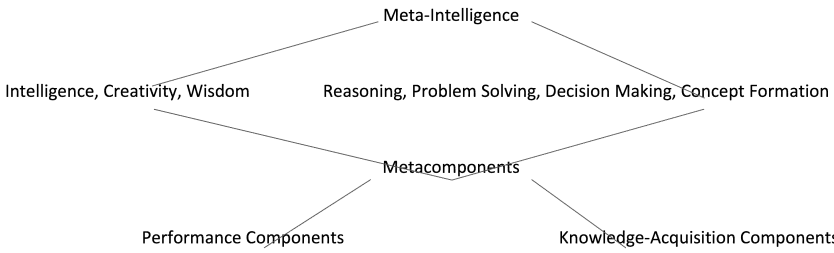


Figure 1: Levels of higher cognitive processes. Meta-intelligence, at the top level, provides understanding, control, and coordination of aspects of intellectual functioning. From a differential-psychological standpoint, these aspects are intelligence, creativity, and wisdom. From a cognitive-experimental standpoint, these aspects are reasoning, problem solving, decision making, and concept formation. These aspects are highly overlapping, both between categories (differential and cognitive-experimental) and within categories (intelligence, creativity, wisdom; or reasoning, problem solving, decision making, concept formation). These aspects are in turn a function of metacomponential thinking, otherwise known an executive processing. The metacomponents in turn control performance components, which solve problems, and knowledge-acquisition components, which learn how to solve the problems in the first place. Source: own illustration.

problems in a way that promotes a common good rather than just one's own (wisdom). What differs is not the set of processes, but rather the purposes to which they are put.

Does the construct of meta-intelligence exist? Well, in the sense that there must be coordination among the functions of intellectual functioning as they serve different purposes, it must exist at some level. Is it a single entity? We do not know. But we do not know whether g is a single entity either. Rather, g is a statistical regularity derived from scores on intelligence tests. One could conceive of a meta-intelligence test, which would present problems and require one to decide when and how to use the different cognitive functions, whether intelligence, creativity, or wisdom in the differential-psychological tradition, or problem solving, reasoning, decision making, or concept formation in the cognitive-experimental tradition.

Does a construct of meta-intelligence serve a useful purpose? The construct is new, so only time will tell. It will need to be construct-validated. But I believe it serves at least three important purposes.

First, meta-intelligence is the means by which we understand our own range of higher mental abilities. What are the various things we can do with our minds? The various "things" are not abilities, like verbal, quantitative, and spatial, for example, but rather, organized collections of these abilities that can serve different purposes—intelligence, creativity, and wisdom, for instance. We understand that we can recognize, define, and solve convergent problems (intelligence), divergent problems (creativity), and problems with solutions seeking a common good (wisdom).

Second, meta-intelligence is the means by which we control which set of collections of abilities we use when and how. Creativity is useful in many instances, but likely not when solving a multiple-choice standardized test problem. Intelligence is useful, but sometimes, maximizing one's own individual outcomes, as in optimizing one's career success, can come at the expense of the greater common good, as, for example, when one's career success results in making other people's lives worse (such as those careers that contribute ultimately to harming people, such as through air or water pollution).

Third and finally, meta-intelligence coordinates the use of the different collections of abilities. A given problem may require intelligence, creativity, and wisdom, such as a problem of how to allocate scarce resources, such as of a new vaccine

against an illness that has become a pandemic. Meta-intelligence enables us to know what to do when.

Some researchers might, understandably, be reluctant to introduce yet another construct to those already in the list of psychological constructs currently being used. But I would suggest that we have always utilized a construct functionally equivalent to meta-intelligence, without giving it a name. We've always known that people need to decide what kinds of higher order mental resources they need to allocate to a given problem. Meta-intelligence simply names this construct.

A similar construct, of course, is metacognition (see, e.g., Fiedler et al., 2019). Metacognition involves understanding, control, and coordination of cognitive processes. Meta-intelligence is different, however, because it involves attitudes, as described above, not just cognitive processes. Utilization of intelligence, creativity, and wisdom, as well as of various functions of problem solving, reasoning, and decision making, can involve attitudes as much as it involves cognitive processes. As noted above, failures of utilization are at least as likely to be attitude-based as process-based. A person decides not to be creative not because they can't be, but because they fear the consequences, and often, rightfully so (Sternberg, 2020b).

Another similar construct is self-regulation (Vohs & Baumeister, 2017). Whereas metacognition is narrower than meta-intelligence, self-regulation is much broader, applying as it does to all aspects of a person, whether related to intellectual, emotional, or motivational functions. Self-regulation falls much more broadly into the domains of personality, social, and clinical psychology as well as of cognitive psychology.

A reviewer of this essay wonder whether the appropriate construct would be some kind of "meta-cognition" rather than "meta-intelligence," that is, the combination, of intelligence, creativity, and wisdom. There might be some value in such a construct, but that construct, if it exists, is not what this essay is about. Rather, this essay is about knowing what skills and attitudes to utilize where and when—under what circumstances. It is not some unified power, but rather, a power to understand, control, and coordinate different functions of the mind.

Other researchers might want to know where in the brain meta-intelligence is located. I doubt it is located in any one place, any more than intelligence is (Haier, 2020; Haier & Jung, 2007; Jung & Haier, 2007). Gardner (2011b) might disagree, but the current evidence is for broad distribution of intellectual skills in the brain. Almost certainly, meta-intelligence is distributed across parts of the brain. But the

exact parts remain to be determined. It further remains to be determined whether meta-intelligence can be extracted as a (probably higher order) psychometric factor. This is a first paper on the construct, and so many questions remain to be answered[1].

Is there any urgency to introducing such a construct? I believe there is. What has become clear, perhaps depressingly clear, is that the serious problems facing the world today cannot, or at best, have not been successfully solved by general intelligence alone (Sternberg, 2019a, 2019b, 2021). They take some kind of coordination of analytical-intelligence skills with creative and wisdom-based ones as well. That coordination so far has been lacking. Global climate change, air pollution, water pollution, weapons of mass destruction, pandemics, require creative and wise solutions that general intelligence alone does not provide. Meta-intelligence provides the key to coordinating these mental resources. We just have to find it within ourselves, utilize it, and develop it within our young people in order to reach better solutions to world problems than we so far have generated.

There is a tendency in intelligence research, and in some creativity and wisdom research, to turn inward—to seeking more and more refined understanding of cognitive and biological processes involved in intellectual functioning. Broader problems may be seen as beyond our range—as philosophical or political. But the construct we are studying, at least of intelligence, is too narrow. The world cannot afford a lot more high-g (general-intelligence) people that allow the conditions under which we live to keep becoming more and more degraded. Eventually, we may find IQs have gone higher and higher (Flynn, 2012), while adaptivity to the world has been left to viruses, bacteria, and cockroaches. That is not the future we want to look forward to. Meta-intelligence may provide one start toward understanding intelligence, creativity, and wisdom in their broader and interactive contexts within the world.

[1] 1. Although written subsequent to the writing of this paper, a follow-up paper was actually published first (i.e., earlier during calendar year 2021): Sternberg, R. J., Glaveanu, V., Karami, S., Kaufman, J. C., Phillipson, S. N., & Preiss, D. D. (2021). Meta-intelligence: Understanding, control, and interactivity between creative, analytical, practical, and wisdom-based approaches in problem solving. *Journal of Intelligence, 9*, 19, https://doi.org/10.3390/jintelligence9020019

References

Bransford, J. D., & Stein, B. S. (1993). *The ideal problem solver: A guide for improving thinking, learning, and creativity* (2nd ed.). Freeman.

Brown, A. L. (1978) Knowing when, where, and how to remember: A problem of metacognition. In R. Glaser (Ed.), *Advances in instructional psychology* (Vol.1 pp.77–165). Erlbaum

Carroll, J. B. (1993). *Human cognitive abilities: A survey of factor-analytic studies*. Cambridge University Press.

Cattell, R. B. (1971). *Abilities: Their structure, growth, and action*. Houghton-Mifflin.

Davidson, J. E. (2019). Inductive reasoning. In R. J. Sternberg & J. Funke (Eds.), *The psychology of human thought* (pp. 133–154). Heidelberg University Publishing. https://books.ub.uni-heidelberg.de/index.php/heiup/catalog/book/470

Evans, J. St. B. T. (2019). Deductive reasoning. In R. J. Sternberg & J. Funke (Eds.), *The psychology of human thought* (pp. 113–132). Heidelberg University Publishing. https://books.ub.uni-heidelberg.de/index.php/heiup/catalog/book/470

Feuerstein, R. (1979). *The dynamic assessment of retarded performers: The learning potential assessment device, theory, instruments, and techniques*. University Park Press.

Feuerstein, R. (1980). *Instrumental enrichment: An intervention program for cognitive modifiability*. University Park Press.

Fiedler, K., Ackerman, R., & Scarampi, C. (2019). Metacognition: Monitoring one's own knowledge, reasoning and decisions. In R. J. Sternberg & J. Funke (Eds.), *The psychology of human thought: An introduction* (pp. 89–110). Heidelberg University Publishing. https://books.ub.uni-heidelberg.de/index.php/heiup/catalog/book/470

Flynn, R. J. (2012). *Are we getting smarter?* Cambridge University Press.

Funke, J. (2019). Problem solving. In R. J. Sternberg & J. Funke (Eds.), *The psychology of human thought: An introduction* (pp. 155–176). Heidelberg University Publishing. https://books.ub.uni-heidelberg.de/index.php/heiup/catalog/book/470

Gardner, H. (2011a). *Creating minds*. Basic Books.

Gardner, H. (2011b). *Frames of mind: The theory of multiple intelligences* (rev. ed.). Basic Books.

Glück, J. (2019). Wisdom. In R. J. Sternberg & J. Funke (Eds.), *The psychology of human thought: An introduction* (pp. 307–326). Heidelberg University Publishing. https://books.ub.uni-heidelberg.de/index.php/heiup/catalog/book/470

Guilford, J. P. (1967). *The nature of human intelligence*. McGraw-Hill.

Haier, R. J., & Jung, R. E. (2007). Beautiful minds (i.e., brains) and the neural basis of intelligence. *Behavioral and Brain Sciences*, *30*(2), 174–178.

Haier, R. J. (2020). Biological approaches to intelligence. In R. J. Sternberg (Ed.), *Human intelligence: An introduction* (pp. 139–173). Cambridge University Press.

Jung, R. E., & Haier, R. J. (2007). The parieto-frontal integration theory (P-FIT) of intelligence: Converging neuroimaging evidence. *Behavioral and Brain Sciences*, *30*(2), 135–154.

Levering, K. R., & Kurtz, K. J. (2019). Concepts: Structure and acquisition. In R. J. Sternberg & J. Funke (Eds.), *The psychology of human thought: An introduction* (pp. 55–70). Heidelberg University Publishing. https://books.ub.uni-heidelberg.de/index.php/heiup/catalog/book/470

Lubart, T. I., & Thornhill-Miller, B. (2019). Creativity: An overview of the 7C's of creative thought. In R. J. Sternberg & J. Funke (Eds.), *The psychology of human thought: An introduction* (pp. 277-306). Heidelberg University Publishing. https://books.ub.uni-heidelberg.de/index.php/heiup/catalog/book/470

Lynch, S. F., & Kaufman, J. C. (2019). Creativity, intelligence, and wisdom: Could versus should. In R. J. Sternberg & J. Glück (Eds.), *Cambridge handbook of wisdom* (pp. 455–464). Cambridge University Press.

McGrew, K. S. (2005). The Cattell-Horn-Carroll theory of cognitive abilities: Past, present, and future. In D. P. Flanagan & P. L. Harrison (Eds.), *Contemporary intellectual assessment: Theories, tests, issues* (2nd ed. pp. 136–181). Guilford Press.

Minda, J. P. (2020). *The psychology of thinking: Reasoning, decision-making, and problem solving* (2nd ed.). Sage.

Nolte, J., Garabito, D., & Reyna, V. (2019). Decision making. In R. J. Sternberg & J. Funke (Eds.), *The psychology of human thought: An introduction* (pp. 177–198). Heidelberg University Publishing. https://books.ub.uni-heidelberg.de/index.php/heiup/catalog/book/470

Spearman, C. (1923). *The nature of intelligence and the principles of cognition*. Macmillan.

Spearman, C. (1927). *The abilities of man*. Macmillan.

Staudinger, U. M., Lopez, D. F., & Baltes, P. B. (1997). The psychometric location of wisdom-related performance. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *23*, 1200–1214.

Sternberg, R. J. (1980). Sketch of a componential subtheory of human intelligence. *Behavioral and Brain Sciences*, *3*, 573–584.

Sternberg, R. J. (1983). Components of human intelligence. *Cognition*, *15*, 1–48.

Sternberg, R. J. (1985a). *Beyond IQ: A triarchic theory of human intelligence*. Cambridge University Press.

Sternberg, R. J. (1985b). Implicit theories of intelligence, creativity, and wisdom. *Journal of Personality and Social Psychology*, *49*(3), 607–627.

Sternberg, R. J. (2003a). WICS: A model for leadership in organizations. *Academy of Management Learning & Education*, *2*, 386–401.

Sternberg, R. J. (2003b). *Wisdom, intelligence, and creativity synthesized*. Cambridge University Press.

Sternberg, R. J. (2018). A triangular theory of creativity. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, *12*, 50–67.

Sternberg, R. J. (2019a). A theory of adaptive intelligence and its relation to general intelligence. *Journal of Intelligence*, https://doi.org/10.3390/jintelligence7040023

Sternberg, R. J. (2019b). Why people often prefer wise guys to guys who are wise: An augmented balance theory of the production and reception of wisdom. In R. J. Sternberg & J. Glück (Eds.), *Cambridge handbook of wisdom* (pp. 162–181). Cambridge University Press.

Sternberg, R. J. (2020a). The augmented theory of successful intelligence. In R. J. Sternberg (Ed.), *Cambridge handbook of intelligence* (2nd ed., Vol. 2, pp. 679–708). New York: Cambridge University Press.

Sternberg, R. J. (2020b, November 19). Was your idea too creative? *Inside Higher Ed*, https://www.insidehighered.com/advice/2020/11/19/how-avoid-having-your-ideas-rejected-being-too-creative-opinion

Sternberg, R. J. (2021). *Adaptive intelligence: Surviving and thriving in a world of uncertainty*. Cambridge University Press.

Sternberg, R. J., & Ben-Zeev, T. (2001). Complex cognition: The psychology of human thought. Oxford University Press.

Sternberg, R. J., & Funke, J. (Eds.) (2019). *The psychology of human thought: An introduction*. Heidelberg University Press. https://books.ub.uni-heidelberg.de/index.php/heiup/catalog/book/470

Sternberg, R. J., & Lubart, T. I. (1995). *Defying the crowd: Cultivating creativity in a culture of conformity*. Free Press.

Sternberg, R. J., & O'Hara, L. A. (2000). Intelligence and creativity. In R. J. Sternberg (Ed.), *Handbook of intelligence* (pp. 609–628). University Press.

Sternberg, R. J., & Smith, E. E. (Eds.). (1988). *The psychology of human thought*. Cambridge University Press.

Vohs, K. D., & Baumeister, R. F. (Eds.) (2017). *Handbook of self-regulation* (3rd ed.). Guilford Press.

Wilhelm, O., & Schroeders, U. (2019). Intelligence. In R. J. Sternberg & J. Funke (Eds.), *The psychology of human thought: An introduction* (pp. 255–276). Heidelberg University Press. https://books.ub.uni-heidelberg.de/index.php/heiup/catalog/book/470

About the author

Robert J. Sternberg is Professor of Human Development at Cornell University and Honorary Professor of Psychology at Heidelberg University. Previously, he was IBM Professor of Psychology and Education at Yale University. His PhD is from Stanford and he holds 13 honorary doctorates. Sternberg has won the Grawemeyer Award in Psychology and the James and Cattell Awards from the Association for Psychological Science. He is past-president of the American Psychological Association and the Federation of Associations in Brain and Behavioral Sciences. Sternberg's most recent books are *The Nature of Intelligence and Its Development in Childhood* (Cambridge University Press, 2020) and *Adaptive Intelligence: Surviving and Thriving in a World of Uncertainty* (Cambridge University Press, February 2021). According to Google Scholar, he has been cited roughly 192,000 times and has an h index of 211. His wife, Karin, received her undergraduate and graduate degrees in psychology from Heidelberg University and the family hopes that their triplets, Samuel, Brittany, and Melody, age 9, also will receive their degrees from Heidelberg.

Correspondence:
Prof. Dr. Robert J. Sternberg (ORCID ID: 0000-0001-7191-5169)
Cornell University
Department of Human Development
College of Human Ecology
Ithaca, NY 14853 USA

E-Mail: robert.sternberg@cornell.edu
Homepage: https://www.robertjsternberg.com

Intelligentia Dei – Künstliche Intelligenz, menschliche Vernunft und göttliche Weisheit

MANFRED OEMING

Theologisches Seminar, Universität Heidelberg

Zusammenfassung

Die Studie analysiert die Bedeutsamkeit von religiöser Sprache in avantgardistischen technologischen Kontexten. Es zeigt sich, dass auch die Spitzenforschenden im Bereich der KI sehr gerne auf theologische Terminologie zurückgreifen, um die herausragende Wichtigkeit ihrer Errungenschaften zu explizieren. Sie definieren „Gott als das intelligenteste denkbare Wesen“ und identifizieren dieses mit den in der Entwicklung befindlichen Höchstleistungscomputern. KI gewinnt damit den Charakter eines Heilsereignisses und wird zum finalen Evolutionsschritt wahrer Religion. Die Verheißung göttlicher Intelligenz fungiert – wo wird in einem zweiten Teil gezeigt – in der gegenwärtigen Werbung als Lockmittel für bewusstseinserweiternde Techniken und Psychopharmaka. Demgegenüber ist die biblische Literatur sehr nüchtern und realistisch. Wie der dritte Teil aufzeigt, klärt die alttestamentliche Weisheit bei aller Wertschätzung der menschlichen Vernunft deren Grenzen kritisch auf und fungiert als Warnung vor leichtfertigen Heilsversprechen der KI und einer Hybris von Menschen, die das Menschliche und das Göttliche aus den Augen zu verlieren droht.

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24400

1 Einführung

Ein Kapitel über die „göttliche Intelligenz“, auch noch von einem Alttestamentler, der sich mit religiösen Vorstellungen befasst, die weit über 2000 Jahre alt sind – fällt das nicht völlig aus dem Rahmen der in diesem Band versammelten Studien zur künstlichen Intelligenz (KI), welche ganz moderne Fragestellungen betreffen und in die Zukunft des 21. Jh. n. Chr. vorausblicken? Wie wir sehen werden, ja und nein. Es zeigt sich nämlich, dass Forscherinnen und Forscher im Bereich der KI erstaunlich häufig auf religiöse Sprache rekurrieren und zum Teil sogar religiöse Ansprüche erheben. Zunächst soll daher unter 1. über die *Leistungsfähigkeit antiker mythischer Sprache* im Kontext von Naturwissenschaft und Intelligenz-Technik heute nachgedacht werden. Es soll dabei deutlich werden, dass die Arbeit mit dem Mythos auch in der Moderne sinnvoll, wenn nicht sogar notwendig ist, zugleich aber auch Gefahren in sich birgt. Unter 2. soll entfaltet werden, dass „göttliche Intelligenz“ in der Gegenwart vielfach als *Verheißungsgut* gehandelt wird, das sogar offensiv ins Schaufenster der Werbung gestellt wird: der Mensch soll endlich göttliche Intelligenz erlangen, er soll so werden wie Gott. Göttliche Intelligenz ist ein anerkanntes Ziel, nach dem die Spitzenköpfe der Wirtschaft, aber auch der Entwicklung von künstlicher Intelligenz streben. Unter 3. schließlich soll aufgezeigt werden, *welche Funktionen die uralten biblischen Überlieferungen von der Intelligenz Gottes ursprünglich hatten und wie die Weisheit Gottes damals (und hoffentlich auch in Zukunft) als kritische Instanz gegenüber einer ihre Grenzen vergessenden und verdrängenden Hybris der Menschen begegnet und die Menschen zu ihrer Verantwortung ruft.*

2 Über die Leistungskraft der religiösen Sprache im Rahmen der modernen Naturwissenschaften: Verständlichkeit, die aus dem Mythos quillt

Sobald die Naturwissenschaft aus der Welt der abstrakten Formeln in die Sphäre des mit gesundem Menschenverstand Nachvollziehbaren entfaltet werden soll, braucht sie sprachliche Mittel. Um ihre Einsichten jenseits von mathematischen Algorithmen verständlich zu machen, muss sie auf Werkzeuge zurückgreifen. Es zeigt sich rasch, dass auch im Bereich der Gehirn- und Intelligenzforschung solche aus der Kulturwissenschaft stammenden Sprachbilder notwendig werden. Je komplexer und je unanschaulicher die Theorien sind, desto mehr legen sich

Sprachmuster aus der Welt der Religionen nahe. Ich habe das im Rahmen der Feiern zum 100. Todestag von Robert Koch einmal untersucht: Der große Virologe (Bakteriologe?) gebrauchte bei der Publikation und Etablierung seiner medizinischen Theorien extensiv die Sprache der alttestamentlichen Feindpsalmen.[1] Ein winziges Bakterium, dessen schiere Existenz damals von anderen Wissenschaftlern noch bezweifelt wurde, wird bei Koch häufig personifiziert, d. h. als ein handlungsfähiges und mobiles Wesen mit anthropomorphen Zügen dargestellt. So wie „die Feinde“ in den alttestamentlichen Gebeten agieren, so greift auch das unsichtbare Bakterium an: Es umzingelt seine Opfer von allen Seiten und dringt in sie ein, es bringt sich in Stellung, setzt sich fest, und schlägt heimlich und unerwartet, aber äußerst brutal aus dem Hinterhalt zu. Die Infektionskrankheiten sind in der Sprache Kochs wie intelligente Antagonisten; sie schleichen umher und suchen, wen sie greifen können; sie bedienen sich dabei sehr flexibler diabolischer Taktiken und effektiver Antworten auf alle Abwehrversuche. Diese unheimliche „Invasion des Feindes“ kann in den mythischen Gebeten nur von Gott selbst gestoppt werden. Entsprechend hatte sein Impfstoff bei Koch Eigenschaften wie Gott; das Vakzin[2] errettete von dem heimtückischen Bösen.

Anfang des 20. Jh. ging es um die afrikanische Schlafkrankheit, welche die deutschen Kolonialsoldaten ebenso wie die Heere von einheimischen Hilfsarbeitern massenhaft erkranken ließ. (Übrigens hat der Nobelpreisträger Koch 1905/6 in Afrika Menschenversuche gemacht, die in Deutschland verboten waren, und die Ergebnisse bezüglich der Wirksamkeit seines Präparates gefälscht, um seinem Institut die Forschungsmittel der Wehrmacht zu sichern. Er hat nämlich einfach verschwiegen, dass nach seinen Anfangserfolgen die Schlafkrankheit – mit einigen Wochen Verzögerung – zurückkam und sehr zahlreiche Todesopfer forderte.) Das Impfpräparat wird bei Koch in die Rolle des rettenden Gottes gehüllt, der die unheimlichen und heimtückischen Feinde niederschlägt. Das ist in der aktuellen Darstellung von Impfpräparaten gegen Covid-19 nicht anders. Religiöse

[1] Vgl. M. Oeming, Die Mikroorganismen und die Kirche – Krankheit und Heilung bei Robert Koch, in der Stammzellenforschung und in der Bibel. In: Karlheinz Sonntag (Hrsg.), Viren und andere Mikroben: Heil oder Plage. Zum 100. Todestag von Robert Koch, Heidelberg: Winter 2011, 145–173; dabei konnte ich auf germanistischen Untersuchungen aufbauen: M. Hänseler, Metaphern unter dem Mikroskop. Die epistemische Rolle von Metaphorik in den Wissenschaften und in Robert Kochs Bakteriologie (Legierungen 6), Zürich 2009.

[2] Als Medikament testete er das arsenhaltige Mittel Atoxyl an Menschen.

Metaphern können also zur Illustration von wissenschaftlichen Einsichten nutzbar gemacht werden.

Auch im Bereich der aktuellen Intelligenzforschung begegnen einem solche theologischen „Sprachspiele". Es sind erstaunlich viele und auch erstaunlich prominente Persönlichkeiten, die sich in diesen religiösen, quasi-theologischen Gedankensphären produktiv einbringen. Der Übergang von der Erforschung der Intelligenz in die Sphäre des Religiösen scheint geradezu verführerisch. Erst die Verbindung mit der Aura des Göttlichen drückt aus, was Intelligenzforscher letztlich von sich selbst denken. Wir werden sein wie Gott, nein, wir werden Gott erzeugen. Nehmen wir vier kurze Beispiele:

Der in der Geschichte von *google* sehr bedeutende *Ray Kurzweil* hat eine Theorie zur Reduktion von Komplexitäten entwickelt:[3] Er geht davon aus, dass das Gehirn hierarchisch geordnet ist; in dieser Struktur spiegele sich die Struktur der Welt: Die Rangordnung des Seins bilde sich in der Existenz der ca. 300 Millionen Mustererkenner im menschlichen Neokortex ab. Das menschliche Gehirn gebrauche für seine Mustererkennungsprozesse lediglich *einen* Algorithmus. Im Resultat werde die technische Erschaffung eines *Modells* eines menschlichen Gehirns möglich. Mit der Produktion dieser dem Menschen ebenbürtigen künstlichen Intelligenz, die Kurzweil für das Jahr 2029 prognostiziert, beginne eine neue Ära: das „*Zeitalter der bewussten Maschinen*". Diese technischen Produkte würden zu Leistungen imstande sein, die bisher nur Menschen zugetraut werden können. Aber nicht nur das: Diese bewussten Maschinen werden in der Lage sein, neue, noch intelligentere Maschinen zu produzieren. Diese Erschaffung von künstlicher Intelligenz durch künstliche Intelligenz führt zu einem weiteren Epochensprung: 2045 würden die Menschen zusehends mit der von ihnen geschaffenen künstlichen Intelligenz fusionieren. Menschen würden dann die lästigen Grenzen, die ihnen bisher ihr biologischer Körper setzt, überwinden. Das ist eine neue Seinsform: Mensch, Maschine und Datenbanken werden zu einer Form des „*posthumanen Cyborgs*" verschmelzen. „With the development of psychological science about a century ago, so called psycho-utopian visions of a better society arose, based on the transformation of the human mind. Such visions seem today to have been replaced by digital utopias, based on the development of superfast computers

[3] Ray Kurzweil, *Das Geheimnis des menschlichen Denkens. Einblicke in das Reverse Engineering des Gehirns*, Berlin: Lola Books 2014.

and the enhancement of brain capacity through neural implants. The latter is a prominent feature of so called transhumanism.“ [4] Hier wird deutlich der Mythos von der Erschaffung des Menschen durch Gott aufgriffen und fortgeschrieben: „Our posthuman futures and education: Homo Zappiens, Cyborgs, and the New Adam“, so titelt Bo Dahlin sachgemäß.[5]

Noch weiter gehen die Gründer von Google *Lawrence Edward Page* (geb. 1973) und *Sergey Brin* (ebenfalls 1973 geboren); sie haben sich ernsthaft zum Ziel gesetzt, den Tod zu überwinden. Man kann das kaum glauben, aber diese wohl unbezweifelbar hochintelligenten Ingenieure haben 2013 die Firma Calico gegründet, welche die Biologie des Alterns entschlüsseln und dadurch schrittweise das Leben verlängern soll. 2015 folgte die Firma Verily, die Krankheiten antizipieren und dadurch heilen soll. Wenn der Krebs besiegt werden könnte, könnten Menschen im Durchschnitt drei Jahre länger leben. Doch das reicht ihnen noch lange nicht: Ein echter Fortschritt wäre für sie erst dann erreicht, wenn der Tod besiegt wäre. Mit diesen Visionen werden klassische religiöse Hoffnungen des Alten und Neuen Testaments aufgegriffen und als Ziel der Entwicklung von KI ausgegeben: „Den Tod verschlingt er auf ewig, und der Herr, Jahwe, wird die Tränen abwischen von jedem Gesicht“ (Jes 25,8). Freilich wird das Handeln Jahwes dabei durch die Genialität von menschlichen Gehirnen und noch genialeren Maschinen ersetzt. Intelligenzforschung verbindet sich mit Heilsversprechungen, die bislang nur der Religion vorbehalten waren. Apokalyptische Endzeitvisionen mutieren in eine computerwissenschaftliche Naherwartung.

Anthony Levandowski (geb. 1980) war bei google und ist bei Uber mit der Entwicklung von selbstfahrenden Autos befasst. Aber er ging viel weiter: er „will Gott programmieren. Im Herbst 2017 verkündet der Unternehmer, dass er eine Kirche gegründet hat und jetzt ihren Erlöser mithilfe von Computercodes erschaffen will: ‚Wenn etwas eine Milliarde Mal klüger ist als der klügste Mensch‘, so sagt Levandowski, ‚wie solle man solch eine Instanz anders nennen als Gott? ‘ Deswegen plant der Gründer nicht weniger als eine neue Religion, für die er sogar eine eigene Bibel schreiben will: *The Manual*, englisch für Gebrauchsanweisung.

[4] Bo Dahlin, The transhumanist ideas of Ray Kurzweil, Futures, 44 (2012), S. 55–63, 55.

[5] Bo Dahlin: Our posthuman futures and education: Homo Zappiens, Cyborgs, and the New Adam, Futures 44, (2012), S. 55–63.

Hinzu kommen sollen Gottesdienste und Pilgerstätten."[6] Pilgerfahrten gehen jetzt nicht mehr ins gelobte Land Kanaan, sondern nach Kalifornien zum Gott mit der fast unendlichen Festplatte.

„Einige Forscher und Cyborg-Experten glauben an technologisierte Spiritualität und KI als vollkommene Gottheit der Zukunft – und als Businessmodell der Weltrettung."[7]

Auch der israelische Historiker *Yuval Noah Harari* (geb. 1976), der an der Hebräischen Universität in Jerusalem lehrt, entfaltet in seinem Bestseller „Homo Deus" die Vision der Tech-Wissenschaftler, die versuchen, zu Gott zu werden.[8] Die Funktion von Religion war in der früheren Menschheitsgeschichte die Überwindung von Angst; die anfänglich primitiven Versuche, z. B. die Angst vor Blitzen durch die Vorstellungen von einem Blitze schleudernden Gott zu überwinden, haben sich im Laufe der Religionsgeschichte immer höher entwickelt, bis hin zum Monotheismus, der die Angst vor letzter Sinnlosigkeit des Daseins überwindet, indem er dem Universum eine letzte Sinnhaftigkeit verleiht. Mithilfe von Künstlicher Intelligenz lässt sich die Entstehungsgeschichte in eine Erhaltungsgeschichte umschreiben: „Am Anfang schuf Gott Himmel und Erde. Dann schufen die Menschen Gott, um die Erde zu retten." Dann entsteht ein Mensch, der selbst Gott ist.

Vom Standpunkt einer akademisch gebildeten und von kanonischen Schriften kritisch gefilterten Theologie sind solche utopischen Heilsverheißungen eines hochintelligenten New Ages schwer verständlich, offen gestanden peinlich. Sich mit solcher Materie ernsthaft zu befassen, erscheint fast schon als Ausweis von mangelnder Kritikfähigkeit. Aber man darf als Theologe und Bibelwissenschaftler diese Form einer sich geschickt zeitgeistgemäß mutierenden „Religion der Intelligenz" nicht unterschätzen. „Eine intelligente Maschine entwickelt eine noch intelligentere Maschine, die wiederum eine noch intelligentere Maschine entwickelt und immer so weiter. Das Ergebnis wäre eine Intelligenz-Explosion und das Entstehen einer gottgleichen Hyper-Intelligenz weit jenseits des menschlichen

[6] Joely Ketterer, Kann der Gott der Zukunft ein Computer sein? ZEIT Wissen Nr. 2/2018, 13. Februar 2018

[7] https://www.qiio.de/die-goettliche-kuenstliche-intelligenz/ (zuletzt aufgerufen 23.4.2021)

[8] Y. N. Harari, Homo Deus. A brief history of tomorrow, 2016, Kap. 11. Er spricht von der Religion „Dataism".

Fassungsvermögens. Je nachdem, wen man fragt, wird dieser Computer-Gott das Paradies auf Erden bringen oder aber den Untergang der Menschheit einläuten."[9] Cyborg-Experte Enno Park äußerte sich im Gespräch mit Deutschlandfunk Kultur am 21.11.2017 wie folgt dazu: „Ich glaube, dass so eine upgedatete Religion, die sich mehr mit unseren heutigen Problemen beschäftigt, aber trotzdem unsere Wünsche und Bedürfnisse was Hoffnung, das Leben nach dem Tod, Unsterblichkeit, die Erlösung und all diese Dinge angeht, bedient, durchaus eine zeitgemäße Sache wäre."[10] Wird die Künstliche Intelligenz (KI) Religionen ein Update verpassen? Einige Forscher und Cyborg-Experten glauben an technologisierte Spiritualität und KI als vollkommene Gottheit der Zukunft – und als Businessmodell der Weltrettung. Aber ist und bleibt ein solcher Wunsch nicht völlig illusorisch?

Durch die ungeheuren Leistungen, die die Computerwissenschaft hervorgebracht hat und sicher auch weiter hervorbringen wird, scheinen viele Topentwickler die Bodenhaftung zu verlieren. Sie verstehen die fundamentalen Unterschiede von schier unendlicher Datenerfassung, höchst komplexer Datenverarbeitung und Rechenleistung und der Idee eines personalen Gottes offenbar nicht. In meinen Augen sind die Missionare des neuen Gottes den Menschen vergleichbar, die den Turm von Babel bauen wollten. Sie meinten, schon oben bei Gott zu sein, mussten aber letztlich scheitern; Gott bleibt diesen Superprodukten von Denkmaschinen qualitativ unendlich überlegen, auch zu den Cyborgs muss Gott tief „hinabsteigen" (Genesis 11,5). Um die Rahmenbedingungen meines Denkens deutlich zu machen: Ich bin ein technikaffiner Mensch, ich freue mich über die Fortschritte der KI, die schon jetzt in meinen Alltag hineinragen. Ich schätze teilautonomes Fahren, wenn ein Abstandsradar meinen adaptiven Tempomaten unterstützt und das Fahren noch sicherer macht, wenn ein intelligentes Licht den Weg sehr weit ausleuchtet, ohne den Gegenverkehr zu blenden, oder wenn ein Notbremsystem ein Hindernis schneller erkennt als ich selbst es kann und mein Fahrzeug bei Gefahr rechtzeitig zum Stillstand bringt. Ich bewundere Fortschritte, die Menschen mit einer Einschränkung Hilfen verschaffen, sei es durch Blutzuckermessungen durch Sensoren

[9] Enno Park, Das Märchen vom Computer-Gott, 21.03.2019, https://www.deutschlandfunkkultur.de/kuenstliche-intelligenz-das-maerchen-vom-computer-gott.1005.de.html?dram:article_id=444126.

[10] https://www.deutschlandfunkkultur.de/way-of-the-future-kirche-will-kuenstliche-intelligenz-als.2156.de.html?dram:article_id=401230 (zuletzt aufgerufen 21.4.2021)

statt durch Blutentnahme bei Diabetikern, sei es durch die Möglichkeiten der Kommunikation mit Menschen, die wie Steve Hawkings an amyotropher Lateralsklerose leiden usw. usw. Die Forschung entwickelt sich rasant – Gott sei Dank! Aber es bleiben metaphysische Grenzen – Gott sei Dank!

3 Göttliche Intelligenz im Schaufenster der Werbung

De facto ist Intelligenz in der gegenwärtig real existierenden Welt begrenzt vorhanden, ja ein eher rares Gut. Deswegen suchen Menschen nach diversen Wegen, um sie bei sich selbst zu steigern. Wer im Bereich der Hilfsmittel zur Erhöhung der menschlichen Intelligenz das Internet durchsucht, stößt sofort auf lockende Werbeslogans, die ich hier bewusst nicht als eine Art Schleichwerbung umfangreich nachweisen möchte; sie lauten z. B. „Gehirndoping: Diese Pille macht schlauer". Die Werbunsgmacher greifen aber auch vollmundig zur religiösen Sprache: „Es ist Zeit, unsere göttliche Intelligenz zu aktivieren". Dabei wird ein spezifisches Bild vom Menschen vermittelt, wonach in jedem humanen Gehirn noch enorme Reserven schlummern. Von den potentiell möglichen Leistungen der grauen Zellen würden im normalen Alltag nämlich nur geringe Teile aktiviert. Jede und jeder habe aber die Möglichkeit, die noch nicht in Betrieb genommenen ungeheuren Vorräte zu erschließen. Was für eine beglückende Heilsbotschaft! Viel mehr aktives und produktives Hirn! Das kann (angeblich) durch die verhältnismäßig simple Technik der aus Indien stammenden, von Maharishi Mahesh Yogi (1918–2008) popularisierten „transzendentalen Meditation" geschehen, die in der autohypnotischen Repetition eines Mantras praktiziert wird: 20 Minuten am Morgen und 20 Minuten am Abend autosuggestiv AOM sprechen oder besser denken, und die Leistungsfähigkeit des Denkapparates wird enorm gesteigert. Oder die Gehirnleistung soll durch komplexe neognostische metaphysische Gedankengänge gesteigert werden, die freilich recht aufwändige Studiengänge erfordern.[11] Was traditionelle christliche Praktiken von Gebet und Studium (etwa der Mönche) anzielten, wird jetzt durch fernöstliche Übungen abgelöst, freilich sehr viel stärker am Gedanken der Leistungsfähigkeit und wirtschaftlichen Produktivität orientiert.

Am aggressivsten wird göttliche Intelligenz durch Psychopharmaka beworben. Der Markt hält harmlose Globoli, aber auch ernsthaftere chemische Substanzen

[11] https://unitydeutschland.de/

wie Ritalin oder Modafinil bereit. Die verfügbaren Medikamente sollen zuverlässig helfen, die vorhandenen Ressourcen effizient auszuschöpfen. Bei Ritalin wollen einige Studien diese Wirkung bei gesunden Menschen nachgewiesen haben: Das Medikament stütze nicht nur bei an ADHS leidenden Kindern die Konzentration auf eine Aufgabe, sondern steigere die Entscheidungsschnelligkeit bei erwachsenen Hochleistungsentscheidern. Auch viele Modafinil-Anwender berichten, unter dem Einfluss des Präparats besonders fokussiert und ausdauernd geistig arbeiten zu können. Künstler und Musiker erfahren, dass Kokain, LSD, Ecstasy oder Meskalin ihre Kreativität vergrößern.

Dass Medikamente und Drogen die Hirntätigkeit wirklich steigern können, ist unbestreitbar. „Denn Präparate wie Ritalin und Modafinil entfalten ihre Wirkung, indem sie in die Signalübertragung im Zentralnervensystem eingreifen. Beide bewirken eine Verbesserung der Signalübermittlung in den an Aufmerksamkeit und Konzentration beteiligten Hirnzentren, indem sie die Menge der Neurotransmitter Dopamin und Noradrenalin an den Neuronenkontakten erhöhen. Sobald die Einnahme gestoppt wird, versiegt die Wirkung jedoch schnell“, resümiert Ulrich Bahnsen.[12] Dasselbe gilt für Alzheimermedikamente. Präparate wie Donepezil erhöhen die Menge des Hirntransmitters Acetylcholin in den kognitiven Zentren. Tatsächlich stützen sie das Gedächtnis von Alzheimerpatienten in der Anfangsphase der Erkrankung ein wenig. Sie könnten aber auch zum „Hirndoping“ durch Gesunde verwendet werden.

Aber die Werbung lügt – wie fast immer. Der tatsächliche Effekt von Psychopharmaka bei Gesunden wird weit überschätzt. „Insgesamt bewegen sich die Effekte bei Gesunden auf dem Niveau mehrerer starker Espressi.“[13] «*Ritalin und Modafinil* haben eine gewisse Wirkung, wenn es darum geht, den Effekt längerer Schlaflosigkeit zu kompensieren.» Das hindert aber nicht daran, dass in der Managergesellschaft alle Wege zur Steigerung der Effizienz recht erscheinen. „Dennoch, glaubt der Neuroforscher Chatterjee, werde sich der *Missbrauch solcher Medikamente* ausbreiten, sobald die Einnahme gesellschaftlich akzeptiert sei. Wem die Arbeit flott von der Hand geht, der spart Zeit; wer mit maximaler Konzentration

[12] Ulrich Bahnsen, Die Superpille, https://folio.nzz.ch/2010/november/die-denkpille (zuletzt aufgerufen 23.4.2012).
[13] Bahnsen, NZZ.

am Werk ist, der leistet mehr.“ [14]Die schädlichen Nebenwirkungen werden (wie einst bei Robert Koch) verschwiegen. Besonders plastisch wird dies in einem Plakat zur Cannabis-Werbung: Es zeigt unter dem Titel „Cannabis ist Medizin“ das berühmte Gemälde Michelangelos „Die „Erschaffung Adams“. Darunter steht „Cannabis ist Medizin“ und „Cannabis hilft bei: Appetitlosigkeit, Angstzuständen und Alkoholismus … Aids, Epilepsie … psychischen Erkrankungen“. Daneben steht ein Mensch auf der Weltkugel und streckt die Arme aus nach dem Göttlichen. Risiken und Nebenwirkungen werden nicht erwähnt. Von göttlicher Intelligenz bleiben die Konsumierenden von sogenannten bewusstseinserweiternden Drogen aber weit entfernt. Der Konsum ist geradezu gefährlich und dumm! Statt göttliches Niveau zu erreichen, riskieren sie ihre körperliche und seelische Gesundheit und verlieren ihre Freiheit und werden zu bemitleidenswerten Abhängigen.

4 Funktion der Intelligenz Gottes im ursprünglichen Kontext der Bibel

4.1 Altes Testament

Gott als intelligenter Schöpfer

„Im Anfang schuf Gott den Himmel und die Erde“ – das ist der erste Satz der Bibel. Danach wird erzählt, wie Gott Zug um Zug die Ordnung der Welt in ein wohl strukturiertes Ganzes ins Dasein gerufen hat. In diesem mythologischen Bericht ist das altorientalische Wissen der damaligen Zeit verdichtet, ohne Polemik, sondern mit großer Ehrfurcht.[15] Die Struktur der Welt ist von ungeheurer Komplexität, und doch hierarchisch gegliedert:

4 Wenn ich die Himmel betrachte, das Werk deiner Finger, den Mond und die Sterne, die du gemacht hast:
5 Was ist der Mensch, dass du seiner gedenkst, und das Menschenkind, dass du dich seiner annimmst?

[14] https://folio.nzz.ch/2010/november/die-denkpille (Kursivierung M.O.).
[15] J. Gertz, Antibabylonische Polemik im priesterlichen Schöpfungsbericht?. ZThK 106 (2009) 137–155.

6 Du hast ihn nur wenig geringer gemacht als die Engel, und mit Herrlichkeit
und Ehre hast du ihn gekrönt.
7 Du hast ihn zum Herrscher gemacht über das Werk deiner Hände; alles hast
du unter seine Füße getan. (Psalm 8, 4–7)

Dabei ist die Frage nach der schöpferischen Intelligenz Gottes, d. h. nach seinen Intentionen mit der Schöpfung, kaum auf den chronologisch ersten Anfang gerichtet, sondern vielmehr nach der Gegenwart Gottes in der aktuellen Welt. Dass diese Welt so geschaffen wurde, dass sie überhaupt funktioniert, dass alle Faktoren so Hand in Hand greifen, wie sie es tun, dass Gott in der Lebenswelt des Menschen Leben und Sinn stiftend gegenwärtig ist, das flößte dem antiken Menschen großen Respekt ein.

> Diese Erkenntnis ist mir zu wunderbar und zu hoch; ich kann sie nicht begreifen. (Psalm 139,6)

Darum erkennt der weise Mensch die überlegene Vernunft Gottes an[16] und ruft sich selbst zu demütiger Selbstbegrenzung:

5 Verlass dich auf den HERRN von ganzem Herzen, und verlass dich nicht
auf deinen Verstand;
6 sondern denke an ihn in allen deinen Wegen, dann wird er dich recht führen.
(Sprüche 3,5–6)

[16] Der Kreationismus ist eine vor allem aus den USA nach Europa herüberkommende Anschauung von der Entstehung der Welt. „Die Behauptungen von Charles Darwin stimmen nicht“ – so lautet die Grundüberzeugung der Kreationisten wie auch der Vertreter des Intelligent Design, die sich jedoch ansonsten in ein weites Spektrum ausfalten. Für Vertreter des Intelligent Design ist der Gedanke wesentlich, dass es zwar eine Evolution gegeben habe, dass diese aber nicht nach dem blinden Zufall abgelaufen sei, sondern nach einem sinnvollen, göttlichen Plan. Das Prinzip des brutalen Konkurrenzkampfs der Arten ums nackte Überleben, das „survival of the fittest“, ist nicht der Schlüssel zur Realität des Lebens und erklärt nicht die Tatsachen. Darwin hat Unrecht, wenn er die zunehmend perfektionierte Anpassung an die jeweiligen Lebensräume, die Selektion des an bestimmte ökologische Nischen am besten Angepassten zum alleinigen Grundsatz einer umfassenden Weltanschauung machen will. Die unglaublichen komplizierten Gesetzmäßigkeiten und Funktionszusammenhänge des Universums und des Lebens könnten nur durch die Annahme einer überragenden Intelligenz und Macht als Ursache erklärt werden.

In diesem Appell artikuliert sich keine mutlose, dumpfe, anti-aufklärerische Haltung. Es geht nicht gegen den Schöpfungsauftrag, dass der Mensch als „Ebenbild Gottes“ sich seiner Vernunft frei zu bedienen hat, sondern darum, *die Grenzen der Vernunft des Menschen zu erkennen und anzuerkennen*. Der Mensch ist bevollmächtigt, sich die Erde mit all seinen Mitteln untertan zu machen und sie zum Nutzen der Menschheit einzurichten und immer weiter zu entwickeln. Aber Gottes Wissen um die Ordnung und die Ziele der Schöpfung bleibt unendlich überlegen. Der Mensch ist eben nur „fast wie Gott“ (Psalm 8,56); er bleibt letztlich *unter* Gott. Gott schenkt ihm Weisheit (chokmah), und dafür wird jeder/jede als „selig“ gepriesen:

> „Wohl dem Menschen, der Weisheit erlangt,
> und dem Menschen, der Einsicht gewinnt!“ (Spr 3,13; vgl. Spr 2,2f.).

Aber „die Weisheit“ im Sinne eines universalen Durchblicks bleibt dem Menschen entzogen, auch wenn er das gerne anders hätte und sich selbst an Gottes Statt setzen möchte.

Der biblische Theismus glaubt an eine alles Denk- und Machbaren übersteigende, insofern „übernatürliche“ Intelligenz, die das Universum erschaffen hat und die darin immer noch gegenwärtig ist, um das weitere Schicksal ihrer ursprünglichen Schöpfung zu beaufsichtigen und zu beeinflussen. Wie in vielen theistischen Glaubenssystemen ist dieser Gott eng in die Angelegenheiten der Menschen eingebunden. Er erhört z. B. Gebete, er zürnt über gute oder schlechte Taten und bestraft Sünden, er vergibt Schuld, und er greift durch das Vollbringen von Wundern in die Welt ein. Die Folgerung daraus ist, der göttlichen Intelligenz mehr zu vertrauen als der eigenen. Das ist aber kein impliziter Aufruf zur geistigen Untätigkeit oder Selbstverdummung.

Das Alte Testament hat vielmehr eine sehr differenzierte und subtile Beziehung zur kritischen Philosophie: In der aktuellen alttestamentlichen Forschung wird die Bedeutung der z. T. überaus „frei“ denkenden Weisheitsüberlieferungen zunehmend höher veranschlagt. Ich möchte diesen Prozess „Sapientialisierung“ nennen und meine damit die intensivere Durchdringung des frommen Überlieferungsgutes mit denkerischen Kategorien der Weisheit in ihren unterschiedlichen Spielarten. Die Religion Israels hat im Laufe ihrer Geschichte einen Zug ins Religi-

onsphilosophische bekommen (der sich übrigens in der Geschichte des Judentums fortsetzt bis in die Gegenwart). Diese Sapientialisierung ist nicht nur im Blick auf die fünf „Lehrbücher" der Bibel, dem Pentateuch der Weisheit (Proverbien, Hiob, Kohelet, Jesus Sirach, Sapientia Salomonis) zu beobachten, sondern auch im Rahmen der Geschichtsbücher und der prophetischen Schriften, ja sogar im Blick auf die Endredaktion des Pentateuchs und des Psalters. Die Geschichte dieser Denkbewegung ist aber noch keineswegs ausreichend erforscht. In allen Bereichen menschlicher Wirklichkeit – der Geschichte, des Rechts, des Ethos, des Rituals und des Gebets – hat sich der Glaube des Alten Testaments – teilweise notgedrungen und widerstrebend – der skeptischen Reflexion geöffnet und ist in spannungsvolle Dialoge mit dem „autonomen", d. h. erfahrungsorientierten Denken eingetreten. Die Spannungen zwischen überkommener religiöser Lehrmeinung einerseits und selbst erfahrener individueller Realität andererseits wird in der exilisch-nachexilischen Zeit intensiv wahrgenommen und thematisiert. Dies bewirkt aber keine „Krise der Weisheit", wie man in der Literaturgeschichte diesen Abschnitt der Weisheitsentwicklung in Israel traditionell nannte. Vielmehr bewirkt diese Störung der frommen Überlieferung, dieser scheinbar defiziente Modus der Religion meines Erachtens gerade eine „*Blüte der Weisheit*". Hiob 28 ist dafür ein sehr geeignetes Beispiel. Wer diesen Text lesend bedenkt, wird leicht verstehen: Er reflektiert zwar die Grenzen der Weisheit, gewinnt aber eben damit Raum für einen bescheidenen praktischen Glauben. Ein Text wie Hiob 28 ist mit seiner erkenntniskritischen Haltung kein Zeugnis für das „Scheitern" der Weisheit, sondern ganz im Gegenteil ein Höhepunkt der im Alten Testament auch enthaltenen kritischen jüdischen „Religionsphilosophie".

Die nachfolgende Übertragung der vier Abschnitte bemüht sich um möglichst große Wörtlichkeit, in welcher die Unsicherheiten und Unklarheiten nicht überspielt werden. Sie werden eine knappe Exdegese erfordern. Die gliedernden Überschriften stammen von mir.

I. Der Mensch hat gewaltige Möglichkeiten

1 a Ja, für Silber gibt es einen Fundort;
b und einen Ort für Gold, wo er es auswäscht;
2 a Eisen wird aus dem Staub hervorgeholt,
b und Gestein schmilzt er zu Kupfer.
3 a Eine Grenze setzt er der Finsternis;

b und er, er durchforscht bis zur äußersten Grenze das Gestein der
Dunkelheit und der Todesschatten.
4 a Er bricht einen Stollen fern von da, wo man wohnt;
b Die, die vergessen werden, ohne Halt für den Fuß hängen sie,
c fern von den Menschen schweben sie.
5 a Die Erde, aus der das Brot hervorkommt,
b ihr Unteres wird umgewühlt wie vom Feuer.
6 a Ihr Gestein ist die Fundstätte des Saphirs,
b und Goldstaub findet sich darin.
7 a Ein Pfad, den der Raubvogel nicht kennt
b und den das Auge des Rotmilans nicht erblickt hat, –
8 a nie haben die Söhne des Stolzes ihn je betreten,
b der Löwe ist auf ihm nicht geschritten.
9 a Nach dem harten Flintstein streckt er seine Hand aus,
b wendet die Berge um von der Wurzel an.
10 a In die Felsen treibt er Kanäle/Stollen,
b und alles Kostbares sieht sein Auge.;
11 a Vom Weinen der Wasserströme weg bindet er
b und ihr Geheimnis bringt er heraus ans Licht.

II. Das Kostbarste entzieht sich dem Menschen

12 a *Aber die Weisheit, wo wird sie gefunden*,
b *und wo ist denn die (Fund)stätte der Einsicht*?
13 a Nicht weiß der Mensch ihre Schicht,
b und nicht wird sie gefunden im Land der Lebenden.
14 a Die Tiefe sagt: In mir ist sie nicht! –
b und das Meer sagt: Nicht bei mir!
15 a Geläutertes Gold kann für sie nicht gegeben
b und Silber nicht abgewogen werden als Kaufpreis für sie.
16 a Sie wird nicht aufgewogen mit Gold aus Ofir,
b mit kostbarem Schoham-Stein (Onyx/Karneol?) oder Saphir.
17 a Gold und Glas sind ihr an Wert nicht vergleichbar,
b noch lässt sie sich eintauschen gegen ein goldenes Gerät.

18 a Der Korallen und des Bergkristalls wird gar nicht gedacht,
b *und ein Beutel (?) voller Weisheit ist mehr wert als Perlen.*
19 a Nicht vergleichbar ist ihr Wert mit Topas aus Kusch;
b mit reinem Gold wird sie nicht aufgewogen.
20 a *Die Weisheit nun, woher kommt sie,*
b *und wo ist denn die Fundstätte der Einsicht?*
21 a Verhüllt ist sie vor den Augen alles Lebendigen,
b und vor den Vögeln des Himmels ist sie verborgen.
22 a Der Abgrund und der Tod sagen:
b (Nur) vom Hören(sagen) haben wir mit unsern Ohren gehört, was man von ihr hören kann.

III. Allein Gott hat Zugang zur Weisheit

23 a *Gott hat Einsicht in ihren Weg*
b *und er kennt ihre Stätte.*
24 a Denn er blickt bis zu den Enden der Erde.
b Unter dem ganzen Himmel schaut er aus,
25 a um dem Wind ein Gewicht zu machen,
b und die Wasser begrenzt er mit einem Maß.
26 a Wenn er dem Regen eine Ordnung bestimmt
b und einen Weg für Blitz und Donner,
27 a dann sieht er sie und vermisst sie,
b stellt sie hin und erforscht sie auch.

IV. Was bleibt dem Menschen?

28 a Was bleibt dem Menschen? – Gottesfurcht!
29 a Und zu dem Menschen sprach er:
„*Siehe, die Furcht des Herrn, sie ist Weisheit*,
b *und vom Bösen ausweichen ist Einsicht*.“

Die Bildwelt der Verse 1–11 ist dem Bergbau entnommen. Voller Bewunderung wird festgestellt, dass der Mensch in ganz entlegene Bereiche vorzustoßen in der

Lage ist. Die thematischen Stichworte sind „Fundort“ und „Ort, Stätte“, die den Text durchziehen (V. 6.12.20). V. 4 ist rätselhaft, aber er scheint die absonderliche Haltung zu beschreiben, mit welcher ein Bergmann sich mitunter in den Stollen voranarbeitet. Diese schmutzige Arbeit erbringt glänzende Resultate. Wenn man weiß, dass diese Bildebene Vergleichsspender für den Bereich der Philosophie werden soll, dann hat der Text etwas geradezu Komisches. Wer in den Tiefen des Denkens nach den Edelsteinen der Reflexion sucht, ist so wie einer, der fern von den Menschen zwischen Oberwelt und Unterwelt „baumelt“ und sich regelrecht dreckig machen muss, bevor er zum Wertvollen vordringt. Aber trotz aller Mühseligkeiten und notwendigen Verrenkungen strahlt die Technik eine große Faszination aus. Was der Mensch doch alles kann! Er kann mehr als alle Tiere; sieht tiefer, stößt in unzugänglichste Regionen vor (V. 7f.). Wenn man die vergleichsweise bescheidenen Bergwerke bedenkt, wie sie die Palästina-Archäologen in Timna ausgegraben haben, dann erscheint „Er wendet die Berge um von der Wurzel“ (V. 9b) als eine erhebliche Übertreibung. Vielleicht aber rekurriert der Autor auf Beschreibungen des Bergbaus in (Ober-)Ägypten (vgl. „Kusch“ in V. 19) oder Südwestarabien, besonders im Marib, wo die zahlreichen Bodenschätze im größeren Stil abgebaut wurden. Aber die Frage, ob überhaupt ein realer Bergbau vor Augen steht und wo genau dieser anzusiedeln wäre, spielt nicht die entscheidende Rolle. Selbst wenn der Autor keine wirkliche Anschauung hat, die Eingangsstrophe V. 1–12 strahlt tiefe Bewunderung für den Menschen aus! Was an Schätzen in der Erde verborgen sein mag, „alles Kostbare sieht sein Auge“ (V. 10) und „ihr Geheimnis bringt er heraus ans Licht“ (V. 11).

Demgegenüber setzt die zweite Strophe mit wiederum elf Zeilen mit einem kritischen Paukenschlag ein. In fein herauspräpariertem Kontrast werden die Stichworte „Fundort“ und „Ort, Stätte“ aus V. 1 in V. 12 wieder aufgenommen, jetzt wird damit jedoch eine negative Aussage rhetorisch eindrucksvoll markiert. Die Lagerstätte der Weisheit ist unbekannt; ja sie ist nicht „im Land der Lebenden“ (V. 13) zu finden. Aber auch die (personifizierte) Unterwelt und das Meer können nur Negativmeldungen geben (V. 14): „Hier ist sie nicht.“ V. 15–19 wenden den Blick vom Ort auf den „Wert der Weisheit“. Eine Wertangabe ist nicht möglich. Die kostbarsten Dinge sind nicht wertvoll genug, um die Weisheit aufzuwiegen. So wie Gott selbst durch nichts Irdisches angemessen abgebildet werden kann, so auch nicht die Weisheit. Ihr Wesen ist demjenigen Gottes artverwandt: V. 21f. betonen ihre Verhülltheit für alles Lebendige. Wie Gott für Hiob nur „vom

Hörensagen“ ahnbar war, so auch die Weisheit. Die dritte Strophe (V. 23–27) entfaltet die Artverwandtschaft von Weisheit und Gott von einer anderen Seite aus: Nur Gott hat die Weisheit, exklusiv er kennt ihren Ort und den Weg zu ihr, die Weisheit ist Gottes. Der Mensch kann noch so viel wühlen, wie er will, er wird die Weisheit nie erlangen. Besonders interessant ist die Beschreibung der Art, wie Gott der Weisheit begegnet. Die Begriffe von V. 23–27 sind polyvalent und oszillieren zwischen Vergangenheit und Gegenwart. Gott sah die Weisheit damals bei der Schöpfung, er sieht sie aber auch je neu, wenn er dem „Wind, Blitz und Donner“ Wege und Ordnung gibt. In seinem Schöpfungshandeln hält und hielt Gott Kontakt zur Weisheit. Wenn man annimmt, dass alle vier Verben in V. 27 logisch miteinander kompatibel sind, dann beschreiben die Begriffe das, was ein antiker Wissenschaftler tun soll, und sind darin erstaunlich modern: Gott selbst realisiert das Ideal der Wissenschaft: genau hinschauen, abzählen, hinstellen und untersuchen. Nachdem Gott damals bzw. heute jeweils neu die Weisheit „studiert“ (hat), sprach er sie „dem Menschen“ (oder Adam?) zu. Auf diesen Schlussvers kommt es jetzt an. „Zu dem Menschen aber hat er gesprochen, wohl, die Furcht meines Herrn das sei Weisheit, und vom Bösen weichen Merksamkeit“ (so die Übersetzung von Buber/Rosenzweig). Die Frage nach der Gerechtigkeit Gottes lässt sich nicht beantworten. Für die Lösung der Theodizeefrage wäre solche göttliche Weisheit notwendig, aber sie ist unerreichbar. Gott, der nach V. 27 als studierter Kenner der Weisheit geschildert wird, hat nach V. 28 aus der Fülle seines Wissens „lediglich“ ein *particulum veritatis* weitergesagt. Dass der Mensch keinen Zugang zur kosmologischen Weisheit hat, kann eigentlich nicht gemeint sein, da die V. 1–11 einen eindrücklichen Hymnus auf die gewaltigen Möglichkeiten des Menschen singen. Der Mensch kann und weiß viel – Technisches. Hinter dieser handwerklichen Beherrschung der Welt leuchtet aber eine andere Qualität von Weisheit auf. Der „Ort der Weisheit“, zu dem es für den Menschen einen Zugang nicht gibt, bzw. die „Wohnstätte der Einsicht“, welche dem Menschen nicht erreichbar ist, weisen in eine andere Richtung. Zur Interpretation könnte man – leicht anachronistisch – auf die Kantische Philosophie zurückgreifen und sagen: Hiob 28 unterscheidet zwischen der Welt der Phänomena und derjenigen der Noumena, der Erscheinung und dem „Ding an sich“. Das Wissen um die höheren Dinge muss aufgehoben werden, um für den Glauben Platz zu schaffen. Weniger anachronistisch könnte man Hi 28 mit der platonischen Ideenlehre vergleichen, deren Kenntnis in Israel für die Zeit des Kapitels (ca. 350–250 v.Chr.) zumindest

in vulgarisierter Form mit Gründen vermutet werden kann. Das, was Gott zum Menschen sagt, ist keine „Abspeisung“, kein schwacher Ersatz, kein „Surrogat“ für das Eigentliche. V. 28 bringt vielmehr eine Sicht des Menschen zum Ausdruck, die man nur mit dem Begriff „Dialektik“ angemessen beschreiben kann. So ist der Mensch und entsprechend seine Weisheit: wahrhaft gewaltig und zugleich beschränkt. Beeindruckend tiefschürfend und zugleich restringiert. Im Theoretischen limitiert und zugleich im Praktischen durch Gott in absolute Verantwortung gerufen.

Die Einsicht, dass die Intelligenz Gottes ein wichtiger Teil des alttestamentlichen Gottesbildes ist, ist mir erstmals bei Bernhard Lang begegnet: „Jahwe – der biblische Gott. Ein Portrait. München 2002, S. 30–64“ Hier unterscheidet Lang fünf Bilder vom Gott der Bibel: Herr der Weisheit, Herr des Krieges, Herr der Tiere, Herr des Einzelnen (der persönliche Gott) und Herr der Ernte. Er orientiert sich dabei klar an Platons Politeia, wo der Nährstand, Wehrstand und der Lehrstand differenziert werden. Er setzt dies wiederum zu den Köperteilen in Beziehung:

Nährstand	Wehrstand	Lehrstand
Herr der Tier, Herr der Ernte	Herr des Krieges	Gott als Herr der Weisheit
Bauch	Beine	Kopf als Körperteil Gottes

Von den unterschiedlichen Aspekten und Wirksphären des biblischen Gottes betrifft Herr der Weisheit den höchsten Bereich, die Ebene der Steuerung und Lenkung. Mit Platon auf staatlicher Ebene gesprochen: Gott als Gesetzgeber, Gott als Bundesherr, Gott als König, Gott als Schreiber, Gott als strenger Buchhalter. Herr der Weisheit bezieht sich auf das Gottesbild auf seiner oberen Ebene: „Die judäischen Schreiber haben ein Gottesbild geschaffen, dem sie die eigenen Ideale von Weisheit, Diplomatie, Gesetz und Schriftlichkeit zugrunde legten. Ihr Gott ist der Herr des Bundes, des Gesetzes und des Buches. Später wurde im Wort „Thora“ („Weisung. Gesetz“) zusammengefasst, was die jüdische Religion ausmacht. … Israel wurde zum „Volk des Buches“, zur Textgemeinschaft; die höchste Weisheit und die tiefste Erkenntnis wurden nicht durch unabhängiges Beobachten von Welt und Mensch erworben, sondern durch Deutung eines schriftlichen Dokuments. Ausdrücke wie „Buchreligion“ „Gesetzesreligion“ oder „Offenbarungsreligion“ verweisen auf denselben zentralen Sachverhalt: die von Gott geoffenbarte und in einem Buch festgehaltene Bundesordnung bildet Grundlage und Mittelpunkt biblischer Theologie.“ (S. 60)

Dieses Gottesbild hat eine kulturprägende Kraft: das Höchste und Wichtigste an Gott (wie der Kultur) ist der Bereich der Steuerung, der Wissenschaft, des Intellektuellen. Dieser Aspekt Gottes rückt Religion stark in die Nähe von Aufklärung, Durchdringung und Beherrschung der Welt.

Um die verschiedenen Dimensionen des Bildes von Gott als „Herrn der Weisheit" differenzierter zu erfassen, könnte man einen religionsgeschichtlichen Vergleich heranziehen. Dabei ist außerordentlich auffällig, dass in den Kulturen in der Umwelt des Alten Testaments *Weisheit* häufig *mit einer Göttin* verbunden wird. In alten Zweistromland begegnet die *Weisheit als Frau* bzw. *als die Göttin Nina*: Nina ist die sumerische Stadtgöttin des Ortes Nina in der Nähe der Stadt Lagash. Sie gilt als Fruchtbarkeitsgöttin der Quellen und Kanäle, aber auch als Weisheitsgöttin der Orakel und als Traumdeuterin. Sie ist die Tochter von Enlil und die Schwester von *Ningirsu* und *Nisaba*. Ihre Symboltiere sind Skorpion und Schlange. *Nisaba* ist eine Göttin der Schreibkunst, damit eine Göttin der Wissenschaften, einschließlich der Architektur. Die ägyptische Göttin *Ma'at* ist mit der sumerischen *ME* oder mit *Pallas Athene*, die aus dem Kopf des Zeus geboren wurde und Wissen und Kriegsstrategie verbindet, wesensverwandt.

Diese Verbindung von Weisheit und weiblicher Gottheit findet ihren Widerhall auch im Alten Testament. In den Weisheitssprüchen Salomos (Prov 1–9) vollzieht sich eine bemerkenswerte Öffnung des Gottes Israels hin zur Weisheits*göttin*. „Frau Weisheit" hält lange Reden und wirbt um die lesenden jungen Männer, indem sie ihre vielfältigen Funktionen beschreibt (Prov 8,14–31):

14 Mir gehören Rat und Gelingen. Ich habe Verstand, mir gehört Macht.
15 Durch mich herrschen Könige, und Fürsten setzen fest, was Recht ist.
16 Durch mich regieren Beamte und Edle, alle gerechten Richter.
17 Ich liebe, die mich lieben, und die mich suchen, finden mich.
18 Reichtum und Ehre sind bei mir, stattlicher Besitz und Gerechtigkeit.
19 Besser ist meine Frucht als Gold und Feingold, und mein Ertrag als ausgewähltes Gold.
20 Auf dem Pfad der Gerechtigkeit gehe ich, inmitten der Wege des Rechts,
21 ich habe etwas, um es denen zu vererben, die mich lieben, und ihre Schatzkammer werde ich füllen.

Diese Eulogie der Frau Weisheit findet ihre Klimax in der Schilderung ihrer Rolle bei der urzeitlichen Erschaffung der Welt.

22 JHWH hat mich erworben als Erstling seines Weges, vor seinen Werken, ehedem.
23 *In der Urzeit wurde ich geformt, von Anfang an, von der Vorzeit der Erde an*.
24 Als es die Weltmeere noch nicht gab, als es noch keine Quellen reich an Wasser gab.
[. . .]
30 Da war ich bei ihm als *Ordnende*,
ich war es, an der er sich freute,
Täglich *erfreute ich mich* in seiner Gegenwart zu jeder Zeit.
31 *Als er sich freute bei der Vollendung* der bewohnten Erde
Und er sich erfreute an den Menschenkindern.

Frau Weisheit ist von Ewigkeit her, „vom Anfang an" *gebildet* worden; damit steht sie *unter* Gott. Aber sie war beim Schöpfungswerk selbst dabei. Es bleibt wohl ein Geheimnis, was אָמוֹן (amon) in Prov 8,30 genau meint; ob „Schoßkind" oder „Architekt". In jedem Falle bildet Frau Weisheit hier nicht eine reale Göttin (etwa Maat o. ä.) ab, sondern ist bloß als eine „rhetorische Figur" verstanden, als eine „Augenblicksgöttin", die keine metaphysische Seinsqualität hat, sondern nur eine poetische. Sie ist Symbolfigur für die Kraft, die Gott bei der *creatio prima* schon inne- und beiwohnte. Die ganze Tendenz des Kapitels ist eine Selbstanpreisung der Weisheit, eine Werberede, die durch Hinweis auf das extreme Alter der Weisheit deren Einfluss, Macht und Entscheidungskompetenz herausstreichen will.

4.2 Die alttestamentliche Sicht der Weisheit im kulturgeschichtlichen Vergleich – Hiob unter den Philosophen

Diese dialektische Sicht des Menschen möchte ich durch einen kulturgeschichtlichen Vergleich untermauern. der in der Forschung m.E. noch zu wenig beachtet wird. Der eine ist Sokrates, der andere Sophokles.

Derjenige, der in der Antike geradezu emblematisch als der Vertreter der Einsicht in die Begrenztheit menschlichen Wissens galt, war Sokrates. In der alttestamentlichen Forschung ist die Verbindung von Hi 28 zu Sokrates/Platon sehr selten

gezogen worden, angedeutet etwa bei C. A. Newsom[17] „Ich weiß, dass ich nicht weiß“ – diese Einsicht stellt Sokrates dem überheblichen Dünkel der mit ihm diskutierenden Scheinphilosophen immer wieder entgegen. Aus der vermeintlichen Klarheit führt Sokrates seine Gesprächspartner, die Sophisten, wieder und wieder zur Einsicht, dass ihre Gewissheiten ungewiss sind. Das ist ein Kerngedanke z. B. der Apologie des Sokrates, so lautet der klassische Abschnitt (in Schleiermachers Übersetzung):

> Allein dieser doch meint zu wissen, da er nicht weiß, ich aber, wie ich eben nicht weiß, so meine ich es auch nicht. Ich scheine also um dieses wenige doch weiser zu sein als er, dass ich, was ich nicht weiß, auch nicht glaube zu wissen. (21d)

Dieses Wissen um die Unwissenheit in Bezug auf das eigentliche Sein fasst Platon /Sokrates zwar nirgendwo in die Rede vom „Ort/Wohnstätte der Weisheit“. Eine Wendung wie Hi 28 konnte ich im Corpus Platonicum nicht finden. Es lassen sich aber doch verwandte Vorstellungen angeben. In den zentralen Gleichnissen der Politeia, dem Sonnengleichnis (506b–509b), dem Liniengleichnis (509c–511c) und dem Höhlengleichnis (514a–519b), wird die Unterscheidung von der Erscheinung und den dahinter stehenden Ideen mythisch eindrucksvoll entfaltet. Der Weg von den vordergründigen Abschattungen hin zur Fülle des Seins ist ein mühseliger Aufstieg, der nur wenigen Philosophen möglich ist. Hiob 28 ist radikaler als Sokrates. Der „locus intellegentiae“ (so übersetzt die Vulgata) ist dem Menschen überhaupt entzogen. Gegenüber aller sokratischen Hoffnung, durch philosophische Erziehung den Menschen zur Erkenntnis der Wahrheit, des Schönen und des Guten empor zu geleiten, ist das Buch Hiob skeptisch. Es bleibt „dem Menschen“ nur der Verweis auf die Gottesfurcht und die strikte Vermeidung des Bösen. So erspart sich das Alte Testament platonische Theorien wie die Annahme von Reinkarnationen, von Amnesien bei der Inkorporation der Seele oder der „gefiederten Seelen“.

Ein griechischer Vergleichstext, der eine erstaunliche Strukturanalogie zu Hi 28 aufweist, ist das Chorlied der thebanischen Alten aus der Antigone des Sophokles (496 bis 406 v. Chr.). In der berühmtem Übersetzung von Friedrich Hölderlin lautet das Lied:

[17] C.A. Newsom, Dialogue and Allegorical Hermeneutics in Job 28:28, in: E.J. van Wolde (Hg.), Job 28: Cognition in Context (Biblical Interpretation Series 64), Leiden 2003, 299–305, hier 300.

Ungeheuer ist viel. Doch nichts Ungeheurer, als der Mensch.
Denn der, über die Nacht des Meers,
wenn gegen den Winter wehet der Südwind,
führet er aus in geflügelten sausenden Häußern.
Und der Himmlischen erhabene Erde,
die unverderbliche, unermüdete, reibet er auf; mit dem strebenden Pfluge,
von Jahr zu Jahr, treibt sein Verkehr er, mit dem Rossegeschlecht',
und leichtträumender Vögel Welt bestrickt er, und jagt sie;
und wilder Tiere Zug, und des Pontos salzbelebte Natur
mit gesponnenen Netzen, der kundige Mann.
Und fängt mit Künsten das Wild, das auf den Bergen übernachtet und schweift,
und dem rauhmähnigen Rosse wirft er um den Nacken das Joch, und dem Berge bewandelndcn unbezähmbaren Stier.
Und die Red und den luftigen Gedanken und
städtebeherrschenden Stolz
hat erlernet er, und übelwohnender
Hügel feuchte Lüfte, und
die unglücklichen zu fliehen, die Pfeile.
Allbewandert, unbewandert. Zu nichts kommt er.

Sophokles, Antigone, Vers 323ff.

Dieser Chorgesang ist wie die ganze Antigone ein wichtiger theologischer Text, ein anthropologischer Kleintraktat mit großer Wirkung. Genau wie in Hiob 28 wird zunächst die staunenswerte gewaltige Größe des Menschen herausgestellt: er beherrscht die Seefahrt, den Ackerbau und die Viehzucht, er beherrscht die Jagd, er beherrscht die Rhetorik und die Philosophie, um dann ganz plötzlich mitten im Vers mit einem Wortspiel die Niedrigkeit des Menschen hervorzuheben: „allbewandert unbewandert kommt er zu nichts". Warum diese Skepsis angesichts der überwältigenden Größe des Menschen? – Weil er die entscheidenden Fragen des Lebens und Sterbens nicht beantworten kann! " „Dem Totenreich allein zu entrinnen versteht er nicht." Der Text des Sophokles scheint in gewisser Weise für griechische Anthropologie repräsentativ. Der Mensch hat Grenzen, die ihm von Gott gesetzt werden. Das ist tragisch. Der gewaltige Ödipus ist gerade durch die Flucht vor den (vermeintlichen) Eltern zum Mörder des wahren Vaters und

zum Gatten der leiblichen Mutter geworden. So wird auch seine herrliche Tochter Antigone tragisch scheitern.

Durch die religions- und kultgeschichtlichen Vergleiche wird noch deutlicher: Das Lied von der Weisheit in Hi 28 ist Ausdruck einer radikal kritischen Philosophie. Die vollumfängliche Weisheit ist dem Menschen ebenso entzogen wie der Zugriff auf das Wesentliche. „Ich sehe nur, dass wir nichts wissen können" sagt der Hiob-Dichter. Er resigniert damit vor der Theodizeefrage. Sie ist theoretisch nicht lösbar. Diese Kritik der reinen Vernunft führt aber nicht in sprachlose Resignation, sondern in eine Hochschätzung der praktischen Vernunft. Hiob gehört damit zu Recht unter die Philosophen.

4.3 Neues Testament

Analog zum Alten Testament wird im Neuen Testament „die Weisheit dieser Welt" kritisch hinterfragt. Bei Paulus kann man lesen:

18 Denn das Wort vom Kreuz ist denen, die verlorengehen, Torheit; uns aber, die gerettet werden, ist es Gottes Kraft.
19 Es heißt nämlich in der Schrift: Ich lasse die Weisheit der Weisen vergehen und die Klugheit der Klugen verschwinden.
20 Wo ist ein Weiser? Wo ein Schriftgelehrter? Wo ein Wortführer in dieser Welt? Hat Gott nicht die Weisheit der Welt als Torheit entlarvt?
21 Denn da die Welt angesichts der Weisheit Gottes auf dem Weg ihrer Weisheit Gott nicht erkannte, beschloss Gott, alle, die glauben, durch die Torheit der Verkündigung zu retten.
22 Die Juden fordern Zeichen, die Griechen suchen Weisheit.
23 Wir dagegen verkündigen Christus als den Gekreuzigten: für Juden ein empörendes Ärgernis, für Heiden eine Torheit,
24 für die Berufenen aber, Juden wie Griechen, Christus, Gottes Kraft und Gottes Weisheit.

Dieses tiefschürfende Plädoyer für das Kreuz impliziert eine Kritik an der „Klugheit der Klugen". Natürlich ist das ursprünglich nicht auf die Google-Entwickler gemünzt, und dennoch ist es berechtigt, diese Weltdeutung unter den gegenwärtigen Umständen auf die Diskussion um KI zu beziehen. Eine auf die Gegenwart zielende Applikation ist nichts Gewaltsames. Die Menschen wollen einen Turm

bauen, der bis in den Himmel reicht, sie wollen einen Computer bauen, der selbst Gott wird. Aber: „Hat Gott nicht die Weisheit der Welt als Torheit entlarvt?“ Anstatt mit Superleistungen sich selbst zu erlösen, besteht nach Auffassung des Neuen Testaments die wahre Weisheit in Gott: „Aber für die, die berufen sind, Juden wie Griechen, predigen wir Christus, Gottes Kraft und Gottes Weisheit.“ (1 Kor 1,24)

5 Fazit

Im Grundsatz ist die Bibel sehr wissenschaftsfreundlich: „Machet euch die Erde untertan!“ dazu gehört die Ausnutzung aller technischen Möglichkeiten. Die biblischen Schriftsteller wären über die enormen computertechnischen Errungenschaften des 21. Jahrhunderts glücklich und begeistert. (Teil)autonomes Autofahren, Pflegeroboter, automatisierte Produktionsstraßen und vieles andere mehr kann sehr segensreich wirken. Aber der Mensch muss Mensch bleiben. Wer kritisches Denken einfordert und einen Gott in Gestalt eines Superrechners peinlich empfindet, der ist ja nicht wissenschaftsfeindlich, sondern ganz im Gegenteil. Zur Wissenschaft gehört nämlich auch die Reflexion auf die Grenzen des Denkens und über die Grenzen des Machbaren. Das ist Teil der Verantwortlichkeit der Wissenschaft.[18] Das macht die Theologie als Wissenschaft mit aus. Als symbolträchtige Veranschaulichung dieses Gedankens möchte ich ein Grabdenkmal von Naturwissenschaftlern in Raum der Kirche bedenken: Isaac Newton (–1727) und Charles Darwin (1809–1882) haben in der Londoner Westminster Abbey ihre letzte Ruhe gefunden, 2018 ist ihnen Stephen Hawking (1942–2018) gefolgt (siehe Abb. 1).

Glauben und kritisches, aufgeklärtes Denken gehören zusammen. Die Intelligentia Dei wohnt in der Kirche, sie wohnt dort zusammen mit dem Trägheitsprinzip,

[18] Vgl. paradigmatisch Hans Jonas, Das Prinzip Verantwortung. Versuch einer Ethik für die technologische Zivilisation, Frankfurt 1978; Neuausgabe mit einem Nachwort von Robert Habeck. Berlin, 2020. Der kategorische Imperativ lautet bei Jonas: „Handle so, dass die Wirkungen deiner Handlung verträglich sind mit der Permanenz echten menschlichen Lebens auf Erden“ (Das Prinzip Verantwortung, 36).

[19] Isaac Newton grave in Westminster Abbey, fotografiert von Klaus-Dieter Keller am 17.6.2006 (public domain); (https://de.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton#/media/Datei:Isaac_Newton_grave_in_Westminster_Abbey.jpg) (zuletzt aufgerufen 28.5.2021).

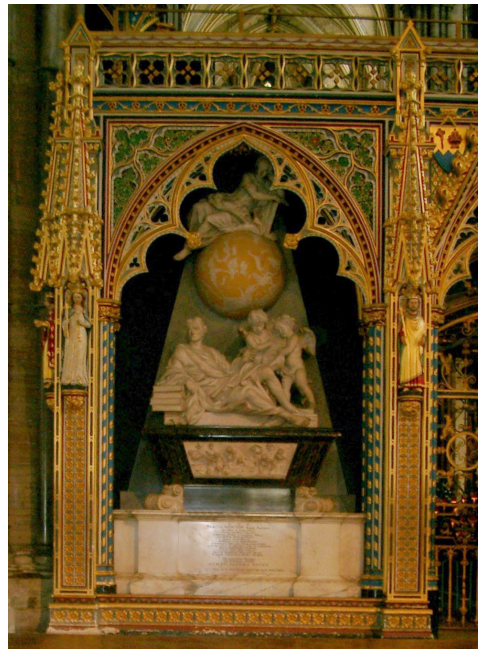


Abbildung 1: Grab von Isaac Newton, dem großen Physiker, in der Westminster Abbey, London.[19]

dem Aktionsprinzip und dem Wechselwirkungsprinzip, zusammen mit der Evolutionslehre und der modernen Astrophysik. Und vielleicht werden irgendwann auch die Erfinder von google dort bestattet werden. Aber Intelligentia Dei geht in aller Wissenschaft nicht auf, sondern bewahrt ihr Anderssein. Das wissen auch viele Naturwissenschaftler; stellvertretend sei Albert Einstein zitiert:

"Zu empfinden, dass hinter dem Erlebbaren ein für unseren Geist Unerreichbares verborgen sei, dessen Schönheit und Erhabenheit uns nur mittelbar und in schwachem Widerschein erreicht, das ist Religiosität. In diesem Sinne bin ich religiös."[20]

Zum Schluss erlaube ich mir, pars pro toto einen Gegenstand ins Zentrum zu rücken: mein Handy. Ich bewundere, was so ein modernes Smartphone alles leisten

[20] Albert Einsteins gesprochenes Glaubensbekenntnis, wahrscheinlich 1932 auf Schallplatte gesprochen, abgedruckt in der Zeitschrift „Die Naturwissenschaften" 53 (1966) Heft 8, S. 198.

kann, und ich möchte immer gerne das aktuellste Modell haben. Mich fasziniert die Miniaturisierung der künstlichen Intelligenz ungeheuer. Ich begeistere mich, wenn ich jetzt 182 Gigabyte Speicher in der Tasche mit mir tragen kann und über schnelles 5G-Netz meine gesamte Cloud blitzschnell herunterladen kann, wenn ich per Bildtelephonie mit meinen Kollegen und Freunden in der ganzen Welt verbunden sein kann. Wenn ich jederzeit Millionen Musiktitel hören und Filme schauen kann, wenn ich Forschungsliteratur der UB digital aufrufen kann und so weiter und so fort. Es ist jetzt schon phantastisch. Und die Entwicklungen schreiten rasant voran. Und wenn eines Tages diese Möglichkeiten meines Handys an meinem Körper und mein Gehirn „angedockt" werden können, dann würde ich mich dem vermutlich – nach reichlicher Überlegung und Rückversicherungen – nicht verweigern. Aber eines würde ich dennoch niemals zu meinem Handy sagen: „Mein Gott".

Die antike Vorstellung von der exklusiv göttlichen Intelligenz lässt sich empirisch nicht verifizieren; es gibt keinen der naturwissenschaftlichen Praxis adäquaten Beweis dafür. Aber man kann bei etwas Nachdenken doch aus vielerlei Hinweisen eine Ahnung davon erlangen. Diese religiöse Ahnung erweist sich – zumal in ihrer biblisch ausgebauten Form – schlussendlich als sehr sinnvolles, ja notwendiges aufklärerisches Korrektiv gegen eine versponnene, total illusorische und sich selbst maßlos überschätzende Technikgläubigkeit.

Über den Autor

Manfred Oeming ist seit 1996 Professor für alttestamentliche Theologie an der Universität Heidelberg; zuvor lehrte er in Bonn, Mainz und Osnabrück. Von 2002 bis 2006 war er Leiter der Hochschule für jüdische Studien in Heidelberg. Seit 2004 führt er in Kooperation mit der Universität Tel Aviv alljährlich Ausgrabungen in Israel durch, zunächst in Jerusalem (Ramat Rahel), seit 2012 in Aseka. Seine Publikationen verteilen sich auf Exegese (besonders Ijob und die Psalmen), Theologie und Hermeneutik des Alten Testaments, biblische Archäologie und Grenzfragen zwischen Bibelwissenschaft und Philosophie und Psychologie. 2019 erhielt er die Ehrendoktorwürde der Karls-Universität Prag.

Korrespondenzadresse:
Prof. Dr. Dr. h.c. Manfred Oeming
Universität Heidelberg
Alttestamentliche Theologie
Theologisches Seminar
Kisselgasse 1
69117 Heidelberg

E-Mail: Manfred.Oeming@ts.uni-heidelberg.de
Homepage:
https://www.uni-heidelberg.de/fakultaeten/theologie/personen/oeming.html

Politische Intelligenz? Ein Blick aus der Praxis zwischen Politik und Wissenschaft

THERESIA BAUER

Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg

Zusammenfassung

Es wird aus der Praxis politischen Handelns unter den Bedingungen einer Pandemie berichtet.

Ein Lagebericht

Es ist April 2021. Wir befinden uns mitten in der dritten Corona-Welle. Das sagt die Wissenschaft. Das sagt die Politik. Die Fakten liegen auf dem Tisch. Damit endet die Einigkeit aber oft. Selten war so unklar, was zu tun das Richtige ist. Selten wurde so offensichtlich, wenn die Politik zögerlich agiert und wenn ihre vielen kleinen Schritte nicht selten auch richtungslos wirken und widersprüchlich sind. Die öffentliche Debatte dazu ist nicht mehr nur vielschichtig und kontrovers, sie ist zunehmend gereizt. Politik sei verantwortungsscheu; es werden Verantwortliche, ja auch Sündenböcke für die belastende Situation gesucht. Selten war konsistentes und mutiges politisches Handeln mit klarer Orientierung so nötig.

Es ist April 2021. Wir befinden uns mitten in den Koalitionsverhandlungen, um in Baden-Württemberg eine neue Regierung für die nächsten fünf Jahre zu bilden. Sie soll stabil und handlungsfähig sein. Sie soll ambitioniert und schnell wirksam

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24401

Klimaschutz ins Zentrum ihres Handelns stellen. Dabei sind die öffentlichen Kassen Corona-bedingt ziemlich leer. Jedoch: Die verbleibende Zeit wird knapp, um die große Menschheitsaufgabe zu bewältigen und ein globales Desaster für unseren Planeten abzuwenden. Das sagt die Wissenschaft. Das sagt die Politik. Die Fakten liegen auf dem Tisch. Damit endet die Einigkeit aber oft.

Was zu tun ist das Richtige und was das richtige Tempo? In der Öffentlichkeit hat sich, forciert durch den Druck von Kindern und Jugendlichen auf der Straße, eine enorme Erwartungshaltung aufgebaut. Und das Bundesverfassungsgericht bestätigte sie, als es das Klimaschutzgesetz der Bundesregierung als zu wenig ambitioniert kassierte, weil es die Handlungsspielräume und Freiheitsrechte der nächsten Generationen gefährde. Die Bundespolitik muss nachbessern.

Gleichzeitig wachsen Ängste in der Bevölkerung vor tiefgreifenden Veränderungen angesichts der Transformationsdynamik von Digitalisierung, Künstlicher Intelligenz und wissenschaftlichem Fortschritt. Unternehmen, Familien, Bildungseinrichtungen, unsere Gesellschaft insgesamt stehen unter enormem Anpassungsstress. Selten war konsistentes und mutiges politisches Handeln mit klarer Orientierung so nötig.

Zwei aktuelle Handlungsfelder, in denen politische Intelligenz besonders gefragt ist. Und bei denen in der Öffentlichkeit Zweifel besonders lautstark zu vernehmen sind, ob genügend politische Intelligenz vorhanden sei, um die Probleme zu lösen. Sicher gehört das Schimpfen über Politik zum Grundrauschen der öffentlichen Debatten im Land. Es lässt sich leicht lästern über die vermeintliche Überforderung von Politikerinnen und Politikern und über ihre angebliche Unfähigkeit oder Unwilligkeit, ihren Aufgaben gut nachzukommen. Auch Journalistinnen und Journalisten, YouTuber sowie die professionelle Beraterbranche liefern unzählige Vorschläge und Ratgeber, wie Politik intelligenter, quasi als professionelles Handwerk, auszuführen sei. Es mangelt nicht an Ideen, wie Strategie und Taktik im Politischen funktionieren und wie Erfolg nach innen und außen gesichert werden kann. Wahrscheinlich gerade weil Politik in Gänze unter dem Verdacht steht, nicht zu liefern, was gebraucht wird. Zu Beginn der Pandemie hatten sehr viele Menschen der Politik kurzfristig sogar wachsendes Vertrauen entgegengebracht. In den letzten Monaten hat sich das Verhältnis wieder umgekehrt und massiv verschlechtert. Jetzt ist entschlossenes und kluges Handeln dringlich gefragt, damit die Corona-Krise und die Klima-Krise sich nicht zusätzlich zu einer Krise des Vertrauens in die Demokratie entwickeln.

In bemerkenswertem Gegensatz zum geringen öffentlichen Ansehen der Politik in der heutigen Zeit steht der Respekt vor dem Politischen und seinen anspruchsvollen Voraussetzungen in der politischen und philosophischen Ideengeschichte. Das schlägt sich auch in der wissenschaftlichen Debatte über Intelligenz nieder. Als „ethisch-moralische", „kommunikative" oder „politische" Intelligenz – manche nennen sie auch „Weisheit" – werden diese Ausprägungen von Intelligenz als besonders komplex und ethisch-politisches Handeln als die höchste Form von Intelligenz bewertet. Politische Intelligenz muss die verschiedenen Dimensionen von Intelligenz zusammenbringen und sie auf das gemeinsame Wohl und geteilte Wertevorstellungen ausrichten. Politische Intelligenz muss ein inter- und intrapersonelles Verständnis von Problemen, das über das einzelne Individuum hinausweist, hervorbringen und sich in größeren Kontexten verorten – und politische Intelligenz muss sich daran messen, wie man sich in der Praxis konkret verhält. Politische Intelligenz muss darauf abzielen, das Richtige zum richtigen Zeitpunkt im Blick auf das Gemeinwohl zu tun.

Aus berufenem Mund hört man gelegentlich: „Politik ist die Kunst, das Notwendige möglich zu machen." Wie lassen sich Erfolgsbedingungen für so verstandene politische Intelligenz verbessern? Und wie lässt sich dieses knappe Gut vermehren?

Mehr Wissenschaft in die Politik, lautet eine schlichte Antwort. Sie ist plausibel, aber sie ist auch allzu schlicht. Wissenschaftliche Erkenntnisse müssen selbstverständlich eine Rolle spielen im politischen Entscheidungsprozess. Denn gute politische Entscheidungen müssen so evidenzbasiert, rational und reflektiert wie möglich gefällt werden. Sie sollen möglichst auf Grundlage gesicherter Fakten und unterschiedlicher disziplinärer Perspektiven erfolgen. Aufgeklärte Politik kann nicht auf dem Treibsand der Ignoranz gelingen. Deshalb ist es zweifellos jede Anstrengung wert, das vorhandene Wissen noch besser zugänglich und verwertbar zu machen für politische Debatten und Entscheidungsfindungen. Ich stimme zu: In Sachen wissenschaftlicher Politikberatung gibt es Luft nach oben. Das gilt für Parlamente wie auch für Regierungen auf allen Ebenen.

Ein Beispiel: Die Regierung Kretschmann hat im letzten Jahr, als die Bewältigung der Corona-Pandemie die Regierungen von Bund und Ländern permanent gefordert hat, regelmäßig Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, meist aus der Medizin, zu unseren Kabinettssitzungen eingeladen. Allen Kabinettsmitgliedern wurde so Gelegenheit zum direkten Faktencheck gegeben. Zusätzlich wurden

wissenschaftliche Beratungsrunden in Ministerien etabliert. Diese neuen „Kontaktflächen“ zwischen Wissenschaft und Politik waren sehr hilfreich, um schnell erste fundierte Einschätzungen zu gewinnen in der unübersichtlichen Lage und um offene Fragen im Dialog zu adressieren. Es hat auch dazu geführt, in Einzelfällen konkreten Forschungsbedarf zu identifizieren und zügig entsprechende Forschungsprojekte mit Unterstützung durch das Land aufzusetzen. Als Wissenschaftsministerin hat mich ein Zweites besonders beeindruckt: Diese Begegnungen waren geeignet, bei den Regierungsmitgliedern ein tieferes Verständnis zu entwickeln, wie Wissenschaft mit dem umgeht, was sie nicht oder was sie noch nicht weiß. Alle am Tisch konnten erleben, mit welcher Vorsicht und Präzision seriöse Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Interesse ihrer Glaubwürdigkeit sich bemühten, immer wieder den begrenzten Geltungsbereich ihrer Aussagen auszuleuchten. Wie offensiv sie damit umgehen, dass sich ihre Forschung immer an der Grenze zu dem Unbekannten und noch-nicht-Verstandenen bewegt – und bewegen muss, wenn sie wirklich Neues hervorbringen will. Und wie in einem früheren Stadium als richtig erachtete Entscheidungen bei Vorlage neuer Erkenntnisse revidiert werden müssen. Was für ein Unterschied zum politischen Selbstverständnis und Diskurs! Selbstverständlich sind unsere Entscheidungen genauso ein ständiges Sich-Vortasten, Nachbessern, Korrigieren, ein ständiger Lern- und Anpassungsprozess an neue Gegebenheiten und Erfordernisse. Allein in meiner 10-jährigen Amtszeit als Wissenschaftsministerin wurde 15-mal das Landeshochschulgesetz novelliert. Von der Politik wird eine besondere Schnelligkeit ihrer Entscheidungen erwartet, weil wir uns möglichst tagesaktuell zu den Problemen verhalten und sie dem Anspruch nach lösen müssen. Von ihr ist man auch einen anderen sprachlichen Duktus gewohnt; einen der Sicherheit und Eindeutigkeit der Entscheidungen in der Vermittlung zu maximieren versucht. Will heißen: In der Politik legen wir üblicherweise gerade nicht die Vorläufigkeit und begrenzte Reichweite unserer Entscheidungen offen. Vermutlich würde es die Bürgerinnen und Bürger durchaus verstören, wenn wir ausgiebig die Unsicherheit, das begrenzte Wissen und den Zeitdruck erläuterten, die unsere Entscheidungen begleiten, die dennoch getroffen werden müssen. Jedenfalls kann uns auch der beste Rat seriöser Wissenschaft als Politikerinnen und Politiker nicht von diesen Rahmenbedingungen befreien.

Damit will ich nicht sagen, dass Politik grundsätzlich schnell und Wissenschaft per se langsam sei. Wir haben im letzten Jahr erlebt, mit welch ungeheurer Ge-

schwindigkeit von Seiten der Wissenschaft neue Erkenntnisse über die Pandemie geliefert wurden. Wissenschaft hat in beeindruckender Weise belegt, wie sehr sie in der Lage ist, global das Wissen zu teilen und zu vermehren. Es wurden in kürzester Zeit Impfstoffe entwickelt, die nun der wichtigste Schlüssel sind, um unser Zusammenleben in absehbarer Zeit von den belastenden wie notwendigen Restriktionen zu befreien. Damit Wissenschaft aber diese Leistungsstärke konkret entfalten kann, braucht sie im Vorfeld viel Zeit. So viel ist gewiss: Wissenschaft benötigt die Freiräume, um in langen Linien zu denken. Ohne Grundlagenforschung und ohne gewachsene Strukturen der wissenschaftlichen Kooperation, wäre der wissenschaftliche „Output" in jüngster Zeit nicht leistbar gewesen.

In der Politik sind wir zwar permanent getrieben von kurzfristigem Druck, sofort zu reagieren und eine fundierte Meinung zu allem und jedem zu haben. Das Resultat ist aber beileibe nicht immer schnelles und klares Entscheiden. Häufig dauert es, bis das politische Handeln gereift und durch- und umgesetzt ist. Und nicht immer liegt es für jeden erkennbar auf der Hand, ob eine getroffene Entscheidung in die richtige Richtung zielt. Das hat aber nach meiner Erfahrung am wenigsten damit zu tun, dass das nötige Wissen fehlen würde. Es liegt an der Vielschichtigkeit des Prozesses: Politik muss unterschiedliche Perspektiven und Interessenlagen integrieren und dabei in aller Regel Mehrheiten organisieren und Kompromisse aushandeln. Sie muss Auswirkungen auf verschiedene gesellschaftliche Bereiche berücksichtigen. Sie muss nach innen – in das eigene politische „Kollektiv" – wie nach außen – im Hinblick auf die politische Konkurrenz – und nicht zuletzt im Hinblick auf die Öffentlichkeit überzeugen und verständlich sein. Und sie muss dabei immer unter Knappheitsgesichtspunkten, insbesondere begrenzten finanziellen Ressourcen, agieren. Sie muss als Regierungspolitik das Beschlossene in gutes Verwaltungshandeln übersetzen. Eine politische Entscheidung braucht deshalb viele Menschen, die von einer gemeinsam ausgehandelten Entscheidung überzeugt sind und die sie gemeinsam richtig umsetzen wollen.

Deshalb ist es meist komplex im Einzelnen nachzuvollziehen, warum es nicht zügiger und besser vorangeht: Warum strahlen unsere Häuser nicht längst blau in der Sonne, weil Photovoltaik-Anlagen auf den Dächern zum neuen Normal geworden sind – wenigstens mal auf den landeseigenen Gebäuden? Woran lag es, dass Deutschland keine schnellere und effektivere Impfstrategie hatte? Dass es aber trotzdem gelang, die Verbreitung der Infektion und besonders die schweren Verläufe und Todeszahlen vergleichsweise gut zu begrenzen?

Politik ist Handeln. Politik in der Demokratie ist gemeinsames Handeln. Sich also darauf verständigen zu können, miteinander etwas Neues zu tun. Hannah Arendt definiert mit einem solchen Politikverständnis auch das Thema Macht: Es sei die menschliche Fähigkeit des Anfangen-Könnens. Die Fähigkeit, eine Veränderung in Gang zu setzen. Dieses kann in einer Demokratie nie nur von einzelnen Personen geleistet werden, sondern nur von vielen, die sich gemeinsam hinter einer Idee versammeln. Politische Intelligenz wächst, so verstanden, mit der Fähigkeit zum kollektiven Handeln.

Kann Wissenschaft in diesem Sinne dazu beitragen, Politik intelligenter zu machen? Unbedingt! Die Welt der Wissenschaft kann dazu beitragen, dass die Welt der Politik faktenbasierter, rationaler und konsistenter agieren kann. Wird die Welt der Politik intelligenter, wenn man sie durch die Welt der Wissenschaft ersetzt? Keineswegs. Denn der Sinn des Politischen ist ein völlig anderer als der Eigensinn der Wissenschaften, die nach Wahrheit(en) suchen. Das Richtige im rechten Moment im Hinblick auf das Gemeinwohl zu tun ist etwas ganz Anderes als Welt-Verständnis und neue Erkenntnisse hervorzubringen. Diese unterschiedlichen Logiken der beiden Welten lassen sich nicht austauschen. Sie können sich aber gegenseitig bereichern und verbessern durch mehr „Transfer“: Als Politikerin und als Wissenschaftsministerin ist es mir deshalb ein besonderes Anliegen, für mehr „Kontaktflächen“ und eine „höhere Leitfähigkeit“ zwischen den beiden Logiken zu sorgen.

Der Blick in die Geschichte zeigt, dass in Krisenzeiten oft das Vertrauen der Bevölkerung in ihre Regierungen sinkt, je länger die Krise andauert. Im Gegenzug gedeihen Sehnsüchte danach, von Experten oder Technokratie-Räten regiert zu werden, weil so vermeintlich der reine Sachverstand statt politischer Abwägungen zähle. Damit verbunden ist die naive Hoffnung, so die verloren geglaubte Eindeutigkeit und Klarheit des „technischen“ Regierungshandelns wieder zu erlangen oder auch das Bedürfnis zu befrieden nach Führung durch eine starke Hand, die Schutz und Sicherheit in unsicheren Zeiten biete.

Bemerkenswert im Corona-Krisenjahr war eine gegenläufige Beobachtung: Wissenschaft hat zwar in der Öffentlichkeit erkennbar an Relevanz und Sichtbarkeit gewonnen, bisweilen sogar an großer Popularität. Jedoch ist das traditionell sehr große Vertrauen der Öffentlichkeit in Wissenschaft in den letzten Monaten erheblich erodiert – das Misstrauen ist gewachsen. Wissenschaft solle sich aus der Politik heraushalten, war immer häufiger zu hören.

Wissenschaft hat sich in den letzten Monaten öffentlich erkennbar in den politischen Prozess des Ringens mit dem Unbekannten und des Umgangs mit Unsicherheit hineinbegeben. Sie taugt deshalb nicht als Rettungsanker für Politik-Frustrierte, um einfache Gewissheiten und vermeintliche Sicherheit (zurück) zu bekommen. Vielleicht wird Wissenschaft deshalb nun unter Verdacht gestellt, mit der Politik unter einer Decke zu stecken.

Ein weiteres Motiv kommt dazu, wenn der Vorwurf erhoben wird, dass Wissenschaft sich über ihr Terrain hinaus übergriffig ins Feld des Politischen hinein bewege. Wir kennen das Motiv aus den Debatten um den menschengemachten Klimawandel und die Fakten, die aus der Wissenschaft seit Jahren dazu präsentiert werden. Wir kennen die wütenden öffentlichen Attacken auf die Wissenschaft, weil sie mit gefühlt unangenehmen Wahrheiten Öffentlichkeit und Politik konfrontiere. Sie klingen uns alle noch in den Ohren als hässliche Begleitmusik der Ära Trump, die nun zum Glück Geschichte ist. Aber machen wir uns nichts vor, auch hierzulande hat wissenschaftsfeindliches oder gar pseudo-wissenschaftliches Geschwurbel an Boden gewonnen und fordert uns weiterhin heraus.

Wissenschaft, die sich einbringt in gesellschaftliche Streitfragen, gerät selbst in den Strudel des öffentlichen Streits. Selbst wenn sie dabei mit aller Seriosität und Glaubwürdigkeit vorgeht und mit größtmöglicher Präzision nur „das Ihre“ beiträgt, nämlich gesicherte Erkenntnis und rational begründetes Verständnis. Dieser Preis ist es wert. Denn eine liberale Demokratie lebt davon, dass die Suche nach der richtigen Haltung, nach der richtigen Priorität, nach dem richtigen Weg und nach dem vertretbaren Risiko immer ein Prozess des öffentlichen Ringens ist. Genau das unterscheidet das politische Handeln in einer liberalen Demokratie von dem in einem autoritären Regime. Unser politisches Handeln und unsere Fähigkeit des Anfangen-Könnens können sich nur dann entfalten, wenn viele Bescheid wissen, wenn sie sich ein fundiertes Urteil gebildet und sich eine Überzeugung erarbeitet haben. Mutiges, konsistentes und mit klarer Orientierung versehenes politisches Handeln hat nur dann eine Chance, wenn es von einer aufgeklärten und selbstbewussten Gesellschaft mitgetragen wird. Wie sollte das ohne den Beitrag der Wissenschaft gelingen?

Im Gegenzug sind Politik und Öffentlichkeit verpflichtet, auf die Stimme der Wissenschaft nicht nur dann zu hören, wenn es gerade passt und den eigenen Überzeugungen mehr Schlagkraft verleiht. Die Autorität des wissenschaftlichen Argumentes ist gerade dann zu berücksichtigen, wenn die wissenschaftliche Per-

spektive den eigenen Standpunkt und das Bisherige in Frage stellt. Das kann zu harten Konflikten führen, wie ich auch aus eigener Erfahrung berichten kann: Seit Jahren irritiert mich, dass die Regulierung der Gentechnik in Europa nicht mit dem aktuellen Stand der Wissenschaft einhergeht. Hier müssen dringend Perspektiven zusammengebracht werden. Leider war gerade hier immer wieder zu erleben, dass die wissenschaftliche Sicht auf die Gentechnik in der politischen Gemengelage viel weniger Gewicht besitzt als politische und wirtschaftliche Interessen. Das muss sich dringend ändern. Zum Glück hat eine jüngst vorgelegte Studie der EU-Kommission jetzt die Debatte neu eröffnet. Wenn wir die Stimme der Wissenschaft in relevanten Zukunftsfragen besser berücksichtigen wollen, dann muss das unabhängig von den jeweiligen politischen Motiven und Interessen der eigenen Person oder des eigenen Umfelds gelten!

Mehr aktive Kommunikation und Transfer aus der Wissenschaft sind also nicht nur gefragt im Hinblick auf direkte Kontaktflächen zu den politischen Entscheiderinnen und Entscheidern. Sie ist genauso wichtig in Richtung Öffentlichkeit, in Richtung der Bürgerinnen und Bürger, die sich für unser Zusammenleben und unsere gemeinsame Zukunft interessieren. Unsere Gesellschaft braucht die Expertise aus der Wissenschaft. Sie braucht die Hochschulen als den Raum, in dem ohne Unterlass das Bestehende kritisch geprüft, Erkenntnisse neu erarbeitet und vertieft werden. Unsere Hochschulen werden gebraucht als ein Raum, in dem die nächste Generation erlernt und erlebt, wie rationale, faktenbasierte und reflektierte Auseinandersetzung mit unserer Welt und den anstehenden Aufgaben funktioniert. Unsere Hochschulen werden gebraucht als ein Raum, in dem Menschen befähigt werden, sich den relevanten Problemen zu stellen, Lösungen für sie zu finden und nicht vor ihnen davonzulaufen.

Mehr und schnelleren Transfer aus der Wissenschaft brauchen wir auch in Richtung Wirtschaft und lokaler Strukturen: Da wo Transformation konkret wird und da wo Zukunft Gestalt annimmt in innovativen Produkten, Verfahren, Geschäftsmodellen und auch in veränderter sozialer Praxis. Wenn dieser Transferprozess gut funktioniert, dann ist eine weitere wichtige Voraussetzung geschaffen für intelligente Politik: Denn es ist nicht der top down Beschluss der Politik, der das Neue erfolgreich in die Welt bringt, sondern es sind die aktiven Verbindungen an den Schnittstellen von Wirtschaft, Gesellschaft, Wissenschaft und Politik, die Innovationsprozesse produktiv beschleunigen. Die Landesregierung hat dafür verschiedene Formate geschaffen, um diese Kontaktflächen systematischer zu

entwickeln: Es wurden Strategiedialoge zu den großen Transformationsthemen etabliert, die unsere Stärken in Baden-Württemberg besonders betreffen. Wirtschaft, Wissenschaft, Zivilgesellschaft und Politik kommen zusammen in einem regelmäßigen top-level Dialog, in dem wir uns über Ziele und Maßnahmen zur Zukunft unseres Automobilstandortes und zur Weiterentwicklung des Gesundheitsstandortes Baden-Württemberg verständigen. Dazukommen wird ein strategischer Dialog über innovatives Bauen und Planen.

Als weiteren Pfeiler dieser Politik setzen wir auf Innovationscampus mit internationaler Ausstrahlung: Wir unterstützen diejenigen Orte in Baden-Württemberg, an denen zur Bearbeitung von Zukunftsfeldern eine besondere Qualität und Dichte von Wissenschaft und Forschung, Unternehmen und Gründungsaktivitäten zusammenkommt und strategisch zusammenarbeitet, um für Talente und Ideen aus aller Welt attraktiv zu werden. Dies ist gelungen im Raum Tübingen/Stuttgart mit dem Cyber Valley rund um den Schwerpunkt Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen. Genauso unterstützen wir das besondere Potenzial in Heidelberg/Mannheim mit der vielversprechenden „Health and Life Science Alliance". Die Region hat mit ihrer internationalen Forschungsexzellenz das Zeug dazu, noch weiter über die Landesgrenzen hinaus zu wirken und wegweisende Impulse für Wirtschaft und Gesundheit zu setzen. So gesehen ist politische Intelligenz auch die Fähigkeit, Strukturen zu fördern, die das Anfangen-Können erleichtern, indem sie Begeisterung und Know-How für Erneuerung zusammenbringen.

Mit anderen Worten: Politische Intelligenz lebt von Voraussetzungen, die Politikerinnen und Politiker nicht alleine schaffen können. Sie lebt von der Urteilskraft, dem Verantwortungsbewusstsein und der Fähigkeit von vielen, sich den Aufgaben der Gegenwart und Zukunft zu stellen. Gute Überzeugungsarbeit, machbare Lösungsansätze, hartnäckige Sicherung von Mehrheiten und Ressourcen ist im Kern unser Geschäft als Politikerinnen und Politiker – und es bedarf ohne Zweifel einiger politischer Intelligenz dafür. Wirklich gut gelingen kann es aber nur auf einer breiten gemeinsamen Basis. Die ist ganz gewiss nicht ohne die Hilfe von Wissenschaft herstellbar.

Wir haben in Deutschland nicht die Institution eines *Scientific Advisors* der Regierung, aber wir haben viele Formate, die Wissenschaft, Wirtschaft und Politik in Begegnung bringen. Und deshalb gefällt mir die Maxime des US-amerikanischen Präsidenten Biden, die er kürzlich bei seiner Ernennung formulierte, auch so gut für unsere Politik:

> „Science will always be at the forefront of my administration – and these world-renowned scientists will ensure everything we do is grounded in science, facts and the truth.“[1].

Über die Autorin

Theresia Bauer MdL ist Ministerin für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg.

Korrespondenzadresse:
Theresia Bauer MdL
c/o Justyna Oser, persönliche Referentin der Ministerin
Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg
Königstr. 46
70173 Stuttgart

E-Mail: Justyna.Oser@mwk.bwl.de
Homepage: www.mwk.baden-wuerttemberg.de

[1] https://www.nytimes.com/2021/01/15/science/biden-science-cabinet.html (Stand: 08.05.2021)

Politische Intelligenz und Weisheit

SEBASTIAN HARNISCH

Institut für Politische Wissenschaft, Universität Heidelberg

Zusammenfassung

Politische Intelligenz kann als eine besondere Form mentaler Prozesse verstanden werden, die einen Akteur befähigt, zielgerichtet auf seine politische Umwelt einzuwirken und darin erkannte Probleme durch flexibles Denken und Handeln einer Lösung zuzuführen. In diesem Beitrag wird zunächst historisch vergleichend zwischen der sittlich-geprägten Weisheit bei Aristoteles und der Nutzen-geprägten Schlauheit bei Macchiavelli verortet. Sodann werden die Intelligenzvorstellungen unterschiedlicher Theorien über die internationale Politik und die Außenpolitik von Staaten anhand aktueller Beispiele diskutiert. Abschließend wird kritisch reflektiert, inwiefern in einer Zeit der „breiten Gegenwart" (Humbrich) – in der Vergangenheit und Zukunft zunehmend zum Gegenstand heutiger Politikvorstellungen wird – politische Intelligenz neu gedacht werden sollte.

1 Einleitung

Intelligenz bezeichnet in der modernen Wissenschaft eine besondere Form mentaler Prozesse, die einen Akteur befähigt, zielgerichtet auf seine Umwelt einzuwirken und darin erkannte Probleme durch flexibles Denken und Handeln einer Lösung zuzuführen (Draguhn 2021). Diese Fähigkeit ist gleichzeitig eine der ältesten politischen Tugenden, die die politische Theorie im alten Griechenland (Aristoteles *Phronesis*) und Indien (Kautilyas *Arthaśāstra*) ebenso verbindet wie die christlich-geprägte Klugheit bei Thomas von Aquin und die auf das Überleben des Staates gerichtete Staatsräson von Niccolo Macchiavelli (vgl. Kersting 2005a). Sie beinhaltet sowohl eine Sittlichkeit im praktischen Weltverhältnis des politisch

https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2021.1.24402

Handelnden als auch eine praktische und zielgerichtete Weltzugewandtheit, die auf Erhalt/Stabilität im Sinne der Resilienz eines bestehenden Gemeinwesens oder Etablierung einer neuen Ordnung gerichtet ist.

Der Begriff „Intelligenz" hat eine lange politische Geschichte und wird oft als unauflöslicher Gegensatz zwischen der (sittlich-geprägten) Weisheit bei Aristoteles und der (nutzen-geprägten) Schlauheit bei Macchiavelli interpretiert (vgl. etwa Sternberger 1997). In der westlichen Tradition tritt sie uns bei Aristoteles zunächst als persönliche Haltung entgegen, die das rechte Maß zwischen widerstreitenden kognitiven – Gerissenheit und Einfalt – sowie affektiven Dispositionen – Feigheit und Tollkühnheit – findet. So zielt die Tapferkeit als rechtes Maß der politischen und militärischen Klugheit mehr auf die Vermeidung der Feigheit als auf die Verhinderung der Tollkühnheit. Neben der Balance zwischen persönlichen Dispositionen ist die Klugheit auf die Lebensführung des Individuums in der Gemeinschaft gerichtet: so tritt die Tapferkeit neben die Gerechtigkeit und die Erfahrung, die den Einzelnen befähigen, ein sittliches und glückliches Leben in der Gemeinschaft zu führen und dabei Stetigkeit (nach innen) und Zuverlässigkeit (nach außen) zu erlangen (Kersting 2005b). Die *Phronesis* als praktische Klugheit in einer Situation, die alle Umstände berücksichtigt, ist bei Aristoteles primär auf die eigene Person gerichtet, sie geht damit über das reine Wissen (*episteme*) und Handeln/Herstellen (*poíēsis*) hinaus und kann als Selbstorientierungskompetenz auch auf die Haushalts- und Staatsführung gerichtet werden (Corcelius 2021; McCourt 2012).

In der östlichen Tradition findet sich die politische Klugheit prominent zuerst in Kautilyas Arthaśāstra, dem Grundlagenwerk der indischen Staatskunst aus dem 4. Jahrhundert v. Chr., das im 20. Jahrhundert nachweislich ebenso Max Webers Denken über Macht wie Hans Morgenthaus Denken über das Gleichgewicht der Mächte beeinflusste (Mitra/Liebig 2016). Politische Klugheit zeigt sich hier im richtigen Gebrauch von (physischem) Zwang und Wissen, u. a. geheimer Informationen, zum Erhalt der bestehenden (brahmanischen) Ordnung, aber ebenso im moralisch angemessenen Handeln (Gray 2014). So müsse beispielsweise ein erobernder Staat Milde und Toleranz gegenüber den Subjekten des Feindstaates walten lassen, um Gottes Willen nach Selbst- und Fremdentfaltung und moralischer Vervollkommnung zu erfüllen (Shahi 2019: 34).

Bei Thomas von Aquin zerfällt die mentale Selbstorientierungskompetenz analytisch in drei Handlungsphasen: die innere Beratschlagung (*consiliari*), die Auswahl

unter den möglichen Handlungsoptionen (*iudicare*) und die Ausführung der vernünftigsten Option (*praecipere*). Aber anders als bei Aristoteles und vergleichbar zur Kautilya zielt die Klugheit (*prudentia*) nicht primär auf das handelnde Individuum, sondern auf das *bonum commune*, die von Gott gegebene Ordnung (Horn 2005). Gleichwohl kennt die *prudentia politica* neben der Tugend des Monarchen, die sich in der *ars legislativa*, der *ars oeconomica* und *ars militaris* zum Wohl des Gemeinwesens zeigt, auch den einfachen Bürger als Träger politischer Klugheit, die sich in der Loyalität, dem Gemeinsinn und der Einsatzbereitschaft für das Gemeinwesen zeigt (Horn 2005: 64).

Eine vergleichende Begriffsgeschichte legt auch die Verzerrungen über die politische Klugheit bei Niccolo Macchiavelli frei. Vielfach ist die Auffassung vertreten worden, Macchiavelli ziele mit der Schrift „Il principe" darauf, dem Herrscher eine auf Machterhalt und Zwang und Täuschung beruhende Klugheit ohne Moral zu empfehlen, die den Erhalt des Staates allein zum höchsten Gut politischer Klugheit werden lasse (Staatsräson). Wie Otfried Höffe indes überzeugend herausgearbeitet hat (Höffe 2005), geht es Macchiavelli darum, den republikanischen Staat, der dem Wohl der Bürger verpflichtet ist, zu verteidigen. Da der Fürst mit der Verschlagenheit des Gegners rechnen müsse, dürfe er das Gemeinwesen nicht preisgeben, indem er dessen Zusicherungen Glauben schenke, sondern müsse dessen Verschlagenheit zur Grundlage des eigenen Handelns machen (Höffe 2005: 310).

Als analytischer Begriff kann politische Intelligenz daher als relationales Konzept verstanden werden, welches mentale und affektive Prozesse zur Selbstorientierung über Zeit (temporale Relationalität) mit Selbstorientierungsprozessen gegenüber Anderen (soziale Relationalität), insbesondere in sozialen Gruppen und politischen Gemeinwesen verbindet. Temporal bilden Stetigkeit nach innen, i.e. ontologische Sicherheit (Giddens 1991), und Verlässlichkeit nach außen, i.e. Reputation (Mercer 2010), wichtige individuelle und soziale Ressourcen für die Selbst-Bestimmtheit bei der Wahl politisch relevanter Ziele und Strategien, die von anderen Akteuren als authentisch zugeschrieben werden können. Ohne Empathie, jener Form der sozialen Relationalität, die durch die Identifikation mit dem Anderen dessen Interessen und Wünsche zu antizipieren versucht, können indes die Konsequenzen des eigenen Handelns nicht bemessen werden (Pedwell 2014). Fehlt es an dieser Selbst-Fremd-Orientierungskompetenz, so kann die Intention der eigenen Handlung durch die Handlung des Anderen, oder deren Ausbleiben, in

ihrer Wirkung verändert oder gar verkehrt werden. (Politische) Weisheit entsteht indes, wenn nicht nur die Empathie mit dem Selbst über Zeit stark ausgeprägt ist (Lebensweisheit), sondern auch die Fähigkeit zur Empathie mit Anderen in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft dazu führt, dass sich Dritte mit dieser Klugheit über Zeit, Raum und Affekt identifizieren können (transversale Weisheit). Soziale und emotionale Intelligenz sind auch deshalb wichtige Bestandteile jedweder politischen Intelligenz, weil sie neben den kognitiven und emotionalen auch die körperlichen und spirituellen Bedürfnisse von Individuen in Gemeinwesen anzusprechen oder einzusetzen vermögen (vgl. Funke 2021).

Drei Folgerungen für die politische Intelligenz sind wichtig: Erstens, Intelligenz tritt immer dann auf, wenn Akteurschaft – die Fähigkeit, Handlungsziele zu bestimmen und aus einer Reihe von alternativen Optionen jene auszuwählen, die nach Abwägung der Konsequenzen am besten geeignet erscheint – auf eine konkrete Problemsituation trifft. Akteure können über entsprechende kognitive, emotionale oder soziale Ressourcen verfügen, ohne dass diese je zur Anwendung gelangen und Gemeinschaften können politische Problemstellungen lösen, auch ohne dass politische Intelligenz anwesend sein muss. Politische Intelligenz ist deshalb eine besondere Relation zwischen individueller oder kollektiver Akteurschaft und gesellschaftlicher Problemstellung. Zweitens, politische Gemeinschaften – oder zumindest deren erkennbare Vorformen– können existieren, selbst wenn sie über keine eigenständigen Mechanismen oder Akteurschaft verfügen, welche Lösungen versprechen Sind beispielsweise Mitglieder einer ethnischen, soziokulturell oder politisch geprägten Gruppe über unterschiedliche Staaten verstreut, so kann es politischer Intelligenz bedürfen, diese (auf friedlichem Wege) zu einen. Schließlich, politische Intelligenz kann zur Ausbeutung oder Manipulation von Gemeinschaft eingesetzt werden, auch wenn diese Art von asymmetrischer Lösungskompetenzbeziehung keineswegs eine natürliche Folge politischer Intelligenz ist. Die wechselseitige und asymmetrische Bedingung von besonderer Akteursfähigkeit und gemeinschaftlicher Problemstellung erklärt aber, warum politische Intelligenz oft pejorativ gebraucht wird, im Sinne der Verschlagenheit, Untreue oder Herrschsucht von politischen EntscheidungsträgerInnen.

Intelligenz kann daher in sehr unterschiedliche relationale Formen politischer Ordnung münden: Alleinherrschaft, die durch Gewalt und Zwang, die geschickte wirtschaftliche oder politische Kooptation von Minder- und Mehrheiten oder die freiwillige Zustimmung der Herrschaftsunterworfenen legitimiert oder stabilisiert

wird. Charismatische Herrschaft, politisch oder religiös motiviert, basiert dabei häufig auf der fortdauernden Zuschreibung besonderer individueller Fähigkeiten und Kräfte, die eherner – d. h. im jeweiligen kulturellen Kontext überzeitlicher – Natur sind. Es verlangt besondere Formen politischer Intelligenz, um charismatische Herrschaft von Einzelnen oder Gruppen auf Dauer zu stellen oder durch andere Herrschaftsformen zu ergänzen oder zu ersetzen.

Die Herrschaft der Vielen indes erlaubt häufig nur solche Formen politischer Intelligenz, die zwischen den zur Herrschaft Befähigten und den der Herrschaft Unterworfenen eine gleichförmige Verteilung politischer Intelligenz im Sinne der Mäßigung, Gemeinschafts- und/oder Zukunftsorientierung vorsieht. Populistische Herrschaft, die häufig mit der Vorstellung einhergeht, ein einheitlicher und unbescholtener Volkskörper müsse gegen etablierte Eliten geschützt werden, destabilisiert regelmäßig das demokratische Kompetenzgefüge. Zunächst wird der Bevölkerung mangelnde Selbstbestimmungskompetenz unterstellt, um daraus einen Bedarf für charismatische Führung abzuleiten, sodass schließlich zunächst zeitweise und dann dauerhaft die bestehenden institutionellen Schranken für autokratische Herrschaft missachtet und abgeschafft werden.

Die Finanzialisierung der Marktwirtschaft (und der Neokolonialismus) produzieren neue Formen politischer Herrschaft, indem durch die besondere Funktionsweise von Märkten wirtschaftliche Abhängigkeiten geschaffen werden, welche die Herrschaftsunterworfenen auf Dauer ökonomisch binden (Merkel 2019). In dieser Form geht die politische Intelligenz in eine distinkte ökonomische Logik über, indem die herrschenden Gruppen die Bedürfnisse der Beherrschten antizipieren, z. B. Konsumgüter, und dadurch Abhängigkeitsverhältnisse perpetuieren und vice versa. Für einige ist dies ein gezielter und manipulativer Einsatz politischer Intelligenz zu Lasten vieler; für andere ist dies die unintendierte Konsequenz des Koagierens von Herrschenden und Beherrschten; politische Intelligenz bleibt, insbesondere in dieser speziellen Form, ein umstrittenes Konzept (Gallie 1956).

2 Theorien der Internationalen Beziehungen und politische Intelligenz

Die zentralen Theorien zur Erklärung der internationalen Beziehungen können beispielhaft für die Darstellung der unterschiedlichen Formen politischer Intelligenz herangezogen werden. Politische Intelligenz kann dabei als eine besondere

Relationskonstellation zwischen individueller oder kollektiver Akteurschaft und gesellschaftlicher Problemstellung verstanden werden, deren Konstruktion und Aufrechterhaltung regelmäßig aus Praktiken resultiert, die auf zwei Eigenschaften gerichtet sind: zum einen, die Menge und Qualität an Entscheidungskompetenz zwischen alternativen Handlungsoptionen zielführend auswählen zu können; zum anderen, die Art und Form politischer Problemkonstellationen erkennbar werden zu lassen, die einer Lösung bedürfen. Dabei können die Logik, die Mechanismen und die Implikationen dieser Eigenschaften, also wie genau die Entscheidungskompetenz erlangt wird und auf welche Problemstellungen sie sich richtet, erheblich variieren.

Positivistische Theorien der internationalen Beziehungen, Realismus und Rationalismus, gehen davon aus, dass Problemkonstellationen objektiv und unmissverständlich erkannt werden können, während kognitivistische und sozialkonstruktivistische Ansätze die Intersubjektivität und Ambiguität der Problemwahrnehmung betonen. Wenn Daten über die Problemkonstellationen aber für sich selbst sprechen, wie realistische und rationalistische TheoretikerInnen dies annehmen, dann ist deren zielgerichtete Verarbeitung für die Akteure relativ einfach: Nicht wie die Daten zu interpretieren sind, steht dann im Vordergrund intelligenter Lösungen, sondern welche Daten verfügbar sind und welche Ziel-Mittel-Konstellationen aus ihnen abgeleitet werden können.

Realistische Theorien fokussieren sich auf die Unsicherheit, die aus der anarchischen Umwelt der Staaten (oder auch zwischen rivalisierenden innerstaatlichen Akteuren) resultiert und welche Möglichkeiten zur Ausbeutung durch einen anderen Akteur/Staat sich daraus ergeben (Waltz 1979: 105; Mearsheimer 1994: 10). Angst, die psychische Disposition, eine negative Handlungsfolge und deren Kosten für wahrscheinlicher zu halten, ist daher der prägende Affekt der Akteure im Realismus. Diese Angst sorgt dafür, dass Informationen über aggressives Verhalten stark und über gutartiges Verhalten kaum wahrgenommen werden (Walt 1987). Und selbst wenn Staaten vertrauenswürdige Signale – in der Sprache der Theorie „kostenträchtige Signale“ aussenden –, so kann diesen Signalen kein Vertrauen geschenkt werden (Copeland 2000: 22).

Ganz gleich, wie viele Informationen von welcher Qualität vorliegen, weil Staaten niemals die zukünftigen Intentionen der anderen Staaten (er)kennen können, muss ihr Hauptaugenmerk auf den Fähigkeiten – den physischen Machtressourcen – liegen, die andere Staaten zur Verfügung haben werden, um diese (potentiell

malignen) Intentionen umzusetzen (Glaser 1994: 56; Grieco 1988: 500). Erfahrungswissen, i.e. die Verknüpfung zwischen eigenen und fremden Intentionen in Situationen mit unterschiedlicher Ressourcenverteilung, tritt in dieser Perspektive zurück, während die Anerkennung „objektiver Gesetzmäßigkeiten" der Macht in den Vordergrund rückt. Nicht die Entschlossenheit eines Akteurs, sondern dessen (militärische) Fähigkeiten, bedingt durch geografische (u. a. Nähe, Topografie) und technologische Faktoren (Überlegenheit von defensiven und offensiven Waffensystemen) bestimmen die Art und das Ausmaß des zielgerichteten Verhaltens, Abschreckung oder Angriff (Taliaferro 2000/2001).

Politische Klugheit, „political prudence", entsteht, so Hans Morgenthau, aus der ethischen Verantwortung des Staatsmannes gegenüber dem eigenen Staat und seinen Bürgern im Angesicht existentieller Unsicherheit. Sind die Konsequenzen des eigenen Handelns ungewiss, die potentiellen Kosten aber hoch, ist die Gefahr einer „tragischen Fehleinschätzung" der eigenen Fähigkeiten gegeben (Molloy 2009: 95; Barkin 2010: 116).

> „There can be no political morality without prudence; that is, without consideration of the political consequences of seemingly moral action. Realism, then, considers prudence— the weighing of the consequences of alternative political associations—to be the supreme virtue in politics. Ethics in the abstract judges action by its conformity with the moral law; political ethics judges action by its political consequences." (Morgenthau 1978: 10-11).

Entgegen dieser ethisch motivierten Position vertritt T. V. Paul in seiner Monografie über das Streben von Staaten nach Nuklearwaffen eine struktur-basierte Perspektive eines „prudential realism". Danach wären Staaten unter bestimmten machtpolitischen Bedingungen in der Lage, darauf zu verzichten, militärische Fähigkeiten anzuhäufen, weil diese von anderen Staaten als bedrohlich angesehen werden könnten (Paul 2000: 5): Staaten in Zonen niedriger bis moderater Bedrohung wären demnach bereit, auf das Streben nach Nuklearwaffen zu verzichten, weil sich ihr Kostenkalkül an probabilistischen und nicht an Worst-Case-Szenarien orientieren müsste. Lediglich in Zonen mit einem intensiven Sicherheitsdilemma ist das Streben nach Nuklearwaffen durch kleinere oder Mittelmächte wahrscheinlich - und deren spätere Aufgabe - unwahrscheinlich (Paul 2000: 24).

Politische Klugheit wird im klassischen Realismus also von dem begrenzten Umfang von Entscheidungskompetenz und der Art der problematischen Hand-

lungskonstellation beherrscht. Intelligente Akteurschaft beschränkt sich daher auf das kluge, d. h. zurückhaltende, Management der eigenen Affekte, die durch Angst vor den unabsehbaren Absichten anderer Akteure und den unabsehbaren Folgen des eigenen Handelns geprägt sind. Ergibt sich indes die Möglichkeit das eigene Machtpotential entscheidend auszubauen, durch Täuschung über die eigenen Fähigkeiten und/oder frühzeitiges Handeln angesichts wechselnder Machtrelationen, dann ist eine Vorteilsnahme zu Lasten des Anderen (relatives Gewinnstreben) am wahrscheinlichsten (Powell 1991).

Rationalistische TheoretikerInnen betrachten die Unsicherheiten der internationalen Politik grundsätzlich nicht weniger skeptisch als VertreterInnen der realistischen Tradition. Sie bewerten allerdings die Chancen deutlich größer, durch Informationen die Intentionen anderer Akteure und damit auch die Konsequenzen des eigenen Handelns besser einschätzen zu können. Realität spricht gleichsam für sich, aber nicht alle Daten sind bekannt. Agnostische Ignoranz, nicht Angst oder Furcht, prägt daher die Handlungsdisposition der Akteure im Rationalismus (Rathbun 2007: 542). Staaten, d. h. die sie repräsentierenden Entscheidungsträger verwenden daher geraume Zeit damit, jegliche Informationen über das Verhalten anderer Akteure zu sammeln und wiederholt zu bewerten. Indem Staaten ihre Fähigkeiten und Instrumente ständig der sich verändernden (verbesserten) Informationslage über die Intentionen und Fähigkeiten anderer Akteure anpassen – das sog. Bayesianisches Updating –, sind sie in der Lage, aus Erfahrungen zu lernen und so ihre Ziele effektiver und effizienter durchzusetzen (Morrow 1994: 163).

Die (a-)symmetrische Verteilung von Information, insbesondere Angaben über die Präferenzintensität eines Akteurs, werden dadurch zum primären Movens der internationalen Politik und die geschickte Offenlegung oder Verschleierung von Informationen zum Instrument intelligenter Politik. Um ihre Intentionen offenzulegen, können Staaten in Auseinandersetzungen und Verhandlungen sog. „kostenträchtige Signale“ senden, die ihre Bereitschaft offenlegen, nur bestimmte Ergebnisse zu akzeptieren (Fearon 1997).

Intelligente Politik zeichnet sich in rationalistischen Ansätzen daher primär dadurch aus, durch Bindungen in innerstaatliche und/oder internationale Institutionen die Kostenträchtigkeit von Entscheidungen zu verändern. So wurde durch

den Zusammenschluss der europäischen Kohle-und Stahlindustrien in der EGKS[1] (auch) die Bereitschaft signalisiert, eine autonome Aufrüstungspolitik aufzugeben. Durch die Etablierung von unabhängigen Zentralbanken signalisieren Regierungen regelmäßig, die Bereitschaft u. a. gegenüber Finanzmarktakteuren niedrige Inflationsraten auf Dauer stellen zu wollen (Goodman 1992). Indem Staaten durch vorausschauende Institutionenbildung in die Lage versetzt werden, ihre Handlungsintentionen effektiv(er) zu kommunizieren, wird Kooperation daher in all jenen Situationen möglich, die zuvor von RealistInnen durch die Annahme von ausbeuterischem Verhalten negiert wurden (Kydd 2005).

Die Geschicklichkeit bei der Informationsoffenbarung über die eigenen Intentionen kann daher schwächere Staaten befähigen, sich gegen stärkere Staaten in Konflikten oder Verhandlungen durchzusetzen, wenn sie glaubhaft machen können, dass sie einem bestimmten Politikziel extrem verpflichtet sind, bspw. keine Beugung gegenüber Sanktionsdrohungen zu erwarten ist (Bueno de Mesquita et al. 1997). Unterliegt die Ratifikation völkerrechtlicher Verträge, wie in den USA, oder europarechtlicher Verträge, wie in der Bundesrepublik, dem innerstaatlichen Ratifikationserfordernis einer (verfassungsändernden) Zweidrittelmehrheit, so können die jeweiligen Vertragspartner gewiss(er) sein, dass auch bei wechselnden Mehrheiten die jeweilige Regierung die vertraglichen Bindungen der Vorgängerregierung weiterhin einhalten werden.

Während innerstaatliche Institutionen (Transparenz, Rechtstaatlichkeit, Ratifikationserfordernisse etc.) die Selbstbindungsbereitschaft und damit eine längerfristige Affektkontrolle signalisieren, erlauben internationale Institutionen sowohl das Teilen verlässlicher Informationen über Normbefolgung, die Verknüpfung von gegenseitigen Verpflichtungen über Politikfelder und längere Zeiträume hinweg als auch die (unabhängige) Sanktion von Fehlverhalten (Abbott/Snidal 1998). Intelligente politische Lösungen entstehen im Rationalismus also dann, wenn Akteure durch Institutionen den Umfang und die Art von Informationen so gestalten, dass Erwartungshorizonte für kooperatives Verhalten entstehen können. Versucht eine Regierung also die negativen Folgen einer unpopulären Politik vor der eigenen Bevölkerung zu verschweigen, wie im Fall der Pentagon Papers, dann können Regeln über die Straffreiheit für sog. „Whistleblower“ dafür sorgen, dass

[1] Europäische Gemeinschaft für Kohle und Stahl (Vorläuferorganisation der Europäischen Gemeinschaften und der Europäischen Union)

diese Informationen für die WählerInnen verfügbar werden (Becker 2021). Folgt man dem liberalen Strang des Rationalismus, so entsteht „kluge Macht“ durch die wachsende Beteiligung von Bürgern und zivilgesellschaftlichen Gruppen an einer „internationalisierenden Politik“, welche die Bedürfnisse der interagierenden Gesellschaften mitberücksichtigt (Czempiel 1999).

Im Vergleich zu Realisten, und Rationalisten, die ihre Intelligenzkonzepte an die Struktur der Problemstellung knüpfen (Macht- oder Informationsasymmetrien), gründen Kognitivisten, und sozialkonstruktivistische TheoretikerInnen ihre Intelligenzmodelle auf die Ambiguität der Informationen für die handelnden EntscheidungsträgerInnen. Im Vergleich zu Rationalisten beklagen Protagonistinnen kognitiver Ansätze weniger die Verteilung oder Beschaffenheit von Informationen über die Welt – letztere wird als objektiv gegeben angesehen. Das Problem ist vielmehr die Komplexität der Informationen über die Welt, die auf begrenzte kognitive Ressourcen treffen und daher immer nur eine beschränkte Wahrnehmung/Perzeption der Realität zulassen (Goldgeier/Tetlock 2001). Die Fähigkeit zwischen alternativen Optionen zielgerichtet die „beste Lösung“ auszuwählen, wird gleich mehrfach erschwert, denn zum einen unterscheiden sich EntscheidungsträgerInnen oftmals in der Perzeption einer Problemstellung und kollektive Entscheidungen können insbesondere in Krisensituation durch individuellen Stress und soziale Gruppenzwänge beeinflusst werden (Levy 2013). Zum anderen sind die Folgen des eigenen Handelns aufgrund der Aufgabenexpansion von Staaten und der Handlungsinterdependenz zwischen unterschiedlichen Politikfeldern stark angewachsen, sodass die Zielabwägung zwischen rivalisierenden Gütern und Werten der eigenen Person oder Gruppe zunehmend erschwert wird (Haas 1980).

Um die kognitive und emotionale Konfusion zu vermindern, nutzen EntscheidungsträgerInnen daher eine Reihe von Bewältigungsstrategien, kognitiven Heuristiken und emotionalen Schutzmechanismen (Jervis 1976). Historische Analogien, Metaphern oder außenpolitische Denkbilder können grundsätzlich helfen, Entscheidungen zu treffen (Petersen 2015). Oftmals unterliegen diese Bewältigungsheuristiken jedoch gravierenden Beschränkungen und Verzerrungen: der Neigung, Verluste stärker zu gewichten als Gewinne (Neue Erwartungstheorie), das Verhalten anderer Akteure stärker deren Absichten als den Umständen zuzuschreiben (Attributionsfehler) oder die eigene Heuristik undifferenziert auf alle Problemkonstellationen anzuwenden und abweichende (negative) Informationen zu unterdrücken (Rapport 2018).

Um den kognitiven Beschränkungen von Individuen und Entscheidungsgruppen zu entgehen, propagieren kognitive TheoretikerInnen daher Lösungen, die darauf zielen, Wissen – i.e. Informationen über Ursache-Wirkungszusammenhänge in bestimmten Situationen – systematisch zu fördern und gezielt in den Politikprozess einzuführen: zum einen fordern sie den Austausch zwischen FachwissenschaftlerInnen und EntscheidungsträgerInnen zu intensivieren, um durch den systematischen Vergleich unterschiedlicher Handlungsweisen in ähnlichen Problemkonstellationen die Neigung von Entscheidern, an bestehenden Heuristiken trotz negativer Erfahrungen festzuhalten, zu mindern (Maliniak et al. 2020); zum anderen sollen (emotionale) Effekte des Gruppenzwangs durch die Anwendung von Advocatus-Diaboli-Techniken gemindert werden, sodass individuelle und kollektive Bedürfnisse nach sozialer Bestätigung nicht in kognitive Befangenheiten umschlagen (George/Stern 2002).

Politische Intelligenz entsteht im kognitivistischen Paradigma also dann, wenn Individuen und Kollektive selbstreflektiert die Beschränkungen ihrer kognitiven Fähigkeiten erkennen und diese durch kreative Lösungen, bspw. die bewusste Förderung abweichender Perspektiven, aufzuheben versuchen. Fachwissen, z. B. vermittelt durch internationale Organisationen oder epistemische Gemeinschaften (Haas 1990), ist aus dieser Perspektive „intelligente Macht", denn es erlaubt, die Voreingenommenheit bestehender Heuristiken und kollektiver Überzeugungen zu hinterfragen.

Im Zentrum sozialkonstruktivistischer Perspektiven auf politische Intelligenz steht die Intersubjektivität von Wissen über die Welt (Harnisch 2017). Während die meisten TheoretikerInnen davon ausgehen, dass eine materielle Umwelt existiert, kann deren Bedeutung nur durch intersubjektive Prozesse der sprachlichen oder praktischen Bedeutungszuweisung erfahren werden. Die Ungewissheit über die Intentionen und Fähigkeiten eines anderen Akteurs ist daher solange eine Unbestimmtheit, bis sie durch Sprache und Handlungen in einen feindlichen, rivalisierenden oder freundschaftlichen Beziehungskontext eingeordnet wurde (Wendt 1999).

Das sozialkonstruktivistische Verständnis von Ungewissheit als Unbestimmtheit subsummiert somit de facto das realistische Verständnis von Ungewissheit als Furcht und das rationalistische als Ignoranz (Rathbun 2007: 550). Weil menschliche Individuen und Kollektive über die Fähigkeit zur Selbstreflektion verfügen, haben sie aus dieser Perspektive grundsätzlich auch die Fähigkeit, ihre Umwelt

„neu zu verstehen". Diese „transformative Ontologie" des Sozialkonstruktivismus (Dessler 1989) verändert in mehrfacher Hinsicht die Konzeption politischer Intelligenz, weil diese, je nach kulturellem und zeitlichem Kontext, von Akteuren erst „gemacht" wird. Um ein vielzitiertes Aperçu Alexander Wendts (1992) zu paraphrasieren: „Politische Intelligenz ist das, was Akteure daraus machen".

Die Verteilung von Information im Rationalismus sowie die Verteilung von Wissen im Kognitivismus wird im sozialen Konstruktivismus zur mit Affekten besetzten Gewissheit über das „Selbst", i.e. ontologische Sicherheit (Mitzen 2006), und die Welt. Die Ko-Emergenz von affektbesetzten Akteursidentitäten – relativ stabilen Selbstzuschreibung über Zeit – und Normen – Standards angemessenen Verhaltens in einer Gruppe – steht daher im Zentrum des Wandels von Bedeutungszuschreibungen in der internationalen Politik. Dieser Wandel kann durch Sozialisationsprozesse – der (freiwilligen) Aneignungen von bestehenden Gruppennormen durch ein Neumitglied – oder Überzeugungsprozesse – die intersubjektive Verknüpfung von neuem Wissen mit bestehenden Normen und Werten – durch Individuen, sog. NormunternehmerInnen (Finnemore/Sikkink 1998) oder kollektive Akteure, bspw. Internationale Organisationen, erfolgen (Finnemore/Barnett 2004). Lernen ist in dieser Perspektive daher die intersubjektive Rekonstruktion der Wirklichkeit – inklusive der Identitäten und Rollen von Akteuren der Akteure – und nicht nur das bessere Verständnis der (objektiven) „kausalen Kräfte", die in ihr herrschen (Harnisch 2012).

Indem Prozesse des sozialen Bedeutungswandels mit affektbesetzten Identitätsveränderungen verknüpft werden, wird soziale und emotionale Intelligenz zum Gegenstand der sozialkonstruktivistischen Intelligenzkonzeption. Denn Staaten können Normen lediglich oberflächlich annehmen, um entsprechende Anerkennung als legitime Mitglieder einer Staatengemeinschaft zu erfahren (konstitutive Wirkung der Norm), ohne die aus der Norm erwachsenden Pflichten zu akzeptieren (regulative Wirkung der Norm). Regelmäßig versuchen Staaten daher normverletzende Staaten öffentlich (oder privat) zu beschämen (naming and shaming), in der Vermutung, dass der Entzug sozialer Anerkennung und Infragestellung der Glaubwürdigkeit eines Akteurs (Reputationsverlust) die Normbefolgung fördern könne. Untergräbt die Beschämung indes die innerstaatliche Legitimität einer Regierung oder die Identität einzelner EntscheidungsträgerInnen, kann die Beschämung in eine trotzige Abwehrhaltung gegenüber der Beschämung und/oder gar in den Austritt aus der Normgemeinschaft münden (Snyder 2020). Intelligente

Politik könnte vor diesem Hintergrund darin bestehen, danach zu fragen, ob die öffentliche Beschämung primär der Selbstvergewisserung und Legitimation des Beschämenden dienen soll, ganz gleich, welche Konsequenzen dies im Verhalten des Beschämten zeitigt; oder ob und wie die Beschämung, wie bspw. im Falle der Menschenrechtsverletzungen gegen die uighurische Minderheit durch die chinesische Regierung, formuliert sein muss, damit der beschämte Akteur sein Verhalten verändern kann, ohne seine Identität und Legitimität zu verlieren (Gallagher 2021).

Intelligente Politik entsteht demnach, wenn politische Akteure in einer Problemkonstellation Unbestimmtheit durch reflektierte Prozesse der Selbstvergewisserung - wer bin ich in dieser Situation und was macht diese Situation aus – und Bedeutungszuweisung zu einer „angemessenen Lösung" gelangen: Diese Lösung kann auf die Aufrechterhaltung der bestehenden Normen und Identitäten – status quo – oder deren Revision abzielen.

3 Ende der politischen Intelligenz?

Das Ende des Ost-West-Konfliktes und die Durchsetzung demokratischer und (neoliberaler) marktwirtschaftlicher Normen am Ende des 20. Jahrhunderts waren die beiden bedeutsamsten Entwicklungen in der internationalen Politik. Zu Beginn des 21. Jahrhundert haben sich Menschenrechte und marktwirtschaftliche Prinzipien ausgehend von der westlichen Staatengemeinschaft stark verbreitet. Die Formation alternativer Staatenbündnisse, der offene Bruch von Souveränitäts- und Menschenrechten durch Russland und China, das Scheitern US-geführter liberaler Interventionen in Afghanistan, Irak und Libyen, die Rücknahme demokratischer Regeln und Normen in vielen Demokratien sowie das Aufkommen populistischer Parteien und Regierungen in vielen Demokratien verdeutlicht, dass liberale Vernunftkonzeptionen, die auf der Würde eines jeden Menschen, Gewaltenteilung und Rechtsstaatlichkeit beruhen, herausgefordert sind.

Diese Beschleunigung der politischen Zeitläufte geht einher mit einem raschen, von Technologie angetriebenen, sozialen und wirtschaftlichen Wandel, der in einer „breiten Gegenwart" mündet (Gumbrecht 2010), die gleichzeitig immer mehr Vergangenheit inkorporiert und die Regelung der Zukunft, bspw. des anthropogenen Klimawandels, verspricht. Politische Intelligenz muss daher, zumindest in pluralistischen Gesellschaften, dieser neuen Komplexität gerecht werden, indem sie gleichzeitig multidimensionaler und ausgewogener wird: Im Angesicht einer

Pandemie globalen Ausmaßes sind Freiheits-, Eigentums- und Patentrechte möglicherweise zeitweise anders mit grundlegenden Menschenrechten auf körperliche Unversehrtheit in Einklang zu bringen, als dies unter „anderen Umständen" der Fall wäre. Unter den Bedingungen eines sich möglicherweise beschleunigenden anthropogenen Klimawandels müssen Verfassungsgerichte möglicherweise beherzter die richterliche Selbstbeschränkung auslegen, wenn die gewählten VertreterInnen primär den gegenwärtigen Demos repräsentieren, aber die Interessen des zukünftigen Demos und damit den Fortbestand des Gemeinwesens nicht hinreichend berücksichtigen. Unter den Bedingungen wachsender individueller und kollektiver Entfaltungsansprüche in der Gegenwart kann deren systematische Missachtung in der Vergangenheit, die über Sprache und Institutionen oftmals bis heute nachwirkt, nicht unausgesprochen bleiben, weil diese „Gleichzeitigkeit des Ungleichzeitigen" das Spektrum intelligenter Lösungen für die Gegenwart und Zukunft einschränkt. Intelligentes Vergessen kann deshalb immer nur ein beiderseitiges und freiwilliges sein und keines, das auf einem Oktroy beruht (Meier 2010). Während alte und neue Formen politischer Intelligenz zunehmend hinterfragt werden, müssen Politik, Wissenschaft und Gesellschaft daher nach alternativen Formen reflektierter Selbstorientierung suchen, um jeweils „angemessene Lösungen" zu finden.

Literatur

Abbott, Kenneth W., and Duncan Snidal (1998). Why States Act Through Formal International Organizations. Journal of Conflict Resolution 42(1): 3–32.

Barkin, J. Samuel (2010). Realist Constructivism: Rethinking International Relations Theory, Cambridge: Cambridge UP.

Becker, Elizabeth (2021). The Secrets and Lies of the Vietnam War, Exposed in One Epic Document, in: New York Times, June 9, 2021, https://www.nytimes.com/2021/06/09/us/pentagon-papers-vietnam-war.html?smid=url-share

Corcilius K. (2021). Phronesis / Praktische Weisheit. In: Rapp C., Corcilius K. (Hrsg.) Aristoteles-Handbuch. Stuttgart: J.B. Metzler, 351–359. https://doi.org/10.1007/978-3-476-05742-6_54

Bueno de Mesquita, Bruce/Morrow, James D./Zorrick, Ethan (1997). Capabilities, Perception and Escalation. American Political Science Review 91(1):15–27.

Copeland, Dale (2000). The Origins of Major War. Ithaca: Cornell University Press.

Czempiel, Ernst-Otto (1999). Kluge Macht. Außenpolitik für das 21. Jahrhundert, München.

Dessler, David (1989). What's at Stake in the Agent-Structure Debate? International Organization 43(3):441–473.

Draguhn, Andreas (2021). Intelligente Gehirne – Die Physiologie der Intelligenz In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Press, Heidelberg (in diesem Band).

Fearon, James D. (1997). Signaling Foreign Policy Interests: Tying Hands Versus Sinking Costs. The Journal of Conflict Resolution 41(1):68–90.

Finnemore, Martha/ Barnett, Michael (2004). Rules for the World: International Organizations in Global Politics. Ithaca and London: Cornell University Press.

Finnemore, Martha/Sikkink, Kathryn (1998). International Norm Dynamics and Political Change. International Organization 52(4): 887–917.

Funke, Joachim (2021). Die Psychologie der Intelligenz, In: R. M. Holm-Hadulla, J. Funke, M. Wink (Hg.). Intelligenz. Heidelberg University Press, Heidelberg (in diesem Band).

Gallagher, Adrian (2021). To Name and Shame or Not, and If So, How? A Pragmatic Analysis of Naming and Shaming the Chinese Government over Mass Atrocity Crimes against the Uyghurs and Other Muslim Minorities in Xinjiang, Journal of Global Security Studies, 2021;, ogab013, https://doi.org/10.1093/jogss/ogab013

Gallie, W. B. (1956). Essentially contested concepts, Proceedings of the Aristotelian Society 56, 167–198.

George, Alexander L./Stern, Eric K. (2002). Harnessing Conflict in Foreign Policy Making: From Devil's to Multiple Advocacy. Presidential Studies Quarterly, 32: 484–505.

Giddens, Anthony (1991). Modernity and Self-identity: Self and Society in the Late Modern Age. California: Stanford University Press.

Glaser, Charles L. (1994). Realists as Optimists: Cooperation as Self-Help. International Security 19(3):50–90.

Goodman, John B. (1992). Monetary Sovereignty: The Politics of Central Banking in Western Europe. Ithaca: Cornell University Press.

Gray, Stuart (2014). Reexamining Kautilya and Machiavelli: Flexibility and the Problem of Legitimacy in Brahmanical and Secular Realism, in: Political Theory 42:6, 635–657.

Goldgeier, James M., and Philip E. Tetlock (2001). Psychology and International Relations Theory. Annual Review of Political Science 4:67–92.

Grieco, Joseph M. (1988). Anarchy and the Limits of Cooperation: A Realist Critique of the Newest Liberal Institutionalism. International Organization 42(3):485–507.

Gumbrecht, Hans Ulrich (2010). Unsere breite Gegenwart, Berlin: Suhrkamp.

Haas, Ernst B. (1980). Why Collaborate?: Issue-Linkage and International Regimes. World Politics 32(3):357–405.

Haas, Ernst B. (1990). When Knowledge Is Power: Three Models of Change in International Organizations. Berkeley: University of California Press.

Harnisch, Sebastian (2017). Sozialkonstruktivismus in den Internationalen Beziehungen, in: Masala, Carlo/ Sauer, Frank (Hg.): Handbuch Internationale Beziehungen. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer VS, 215–232.

Harnisch, Sebastian (2012). Conceptualizing in the Minefield: Role Theory and Foreign Policy Learning in: Foreign Policy Analysis 8:1, 47–71.

Höffe, Otfried (2005) Klugheit im politischen Projekt der Moderne, in: Kersting, Wolfgang (Hg.) Klugheit: Weilerswist: Wiss. Buchgesellschaft, 301–317

Horn, Christoph (2005): Klugheit bei Thomas von Aquin, in: Wolfgang Kersting (Hg.), Klugheit, Weilerswist: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 42–67.

Jervis, Robert. (1976) Perception and Misperception in International Politics. Princeton: Princeton University Press.

Kersting, Wolfgang (Hg.) (2005a). Klugheit, Weilerswist: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

Kersting, Wolfgang (2005b). Der einsichtige Staatsmann und der kluge Bürger, Praktische Vernünftigkeit bei Platon und Aristoteles, in: Wolfgang Kersting (Hg.), Klugheit, Weilerswist 2005, 15–42.

Kydd, Andrew. (2005). Trust and Mistrust in International Relations. Princeton: Princeton University Press.

Levy, Jack S. (2013). Psychology and foreign policy decision-making. In L. Huddy, D.O. Sears, und J.S. Levy (Hrsg.) The Oxford Handbook of Political Psychology, 2. Aufl., Oxford: Oxford University Press, 301–333.

Maliniak, Daniel et al. (Eds.) (2020). Bridging the Theory-Practice Divide in International Relations, Georgetown University Press.

Meier, Christian (2010). Das Gebot zu Vergessen und die Unabweisbarkeit des Erinnerns. Vom öffentlichen Umgang mit schlimmer Vergangenheit. München: Siedler Verlag.

McCourt, David (2012). Phronēsis and Foreign Policy in Theory and Practice, E-International Relations, 23 November 2012. http://www.e-ir.info/2012/11/23/phronesis-and-foreign-policy-in-theory-and-practice/

Mearsheimer, John J. (1994). The False Promise of International Institutions. International Security 19(3):5–49.

Mercer, Jonathan (2010). Reputation & International Politics, Ithaca, NY: Cornell UP.

Merkel, Wolfgang (2019). Aus dem Gleichgewicht, in: Die Zeit 17.06. 2019, https://www.zeit.de/wirtschaft/2019-04/kapitalismus-finanzialisierung-globalisierung-demokratie-ungleichheit

Mitra, Subrata/Michael Liebig (2016). Kautilya's Arthashastra: An Intellectual Portrait. The Classical Roots of Modern Politics in India. Baden-Baden: Nomos.

Mitzen, Jennifer (2006). Ontological Security in World Politics: State Identity and the Security Dilemma. European Journal of International Relations 12(3):341–370.

Molloy, Seán (2009). Hans J. Morgenthau Versus E. H. Carr: Conflicting Conceptions of Ethics in Realism in: Bell, Duncan (Ed.) Political Thought and International Relations, Oxford: Oxford UP, 83–104.

Morgenthau, Hans (1978). Politics Among Nations, 5th edn., New York: Knopf.

Morrow, James (1994). Game Theory for Political Scientists. Princeton: Princeton University Press.

Paul, T. V. (2000). Power versus Prudence Why Nations forego Nuclear Weapons, Montreal: McGill-Queen's University Press.

Pedwell, Cathryn (2014). Affective Relations. The Transnational Politics of Empathy, Basingstoke: Palgrave MacMillan.

Petersen Michael B. (2015). Evolutionary political psychology: On the origin and structure of heuristics and biases in politics. Advances in Political Psychology 36:45–78.

Powell, Robert (1991). Absolute and Relative Gains in International Relations Theory. American Political Science Review 85(4):1303–1320.

Rapport, Aaron (2018). Cognitive Approaches to Foreign Policy Analysis, in: Thies, Cameron (Ed.) Oxford Encyclopedia of Foreign Policy Analysis, Vol. I, New York; Oxford UP, 167–185.

Rathbun, Brian C. (2007). Uncertain about Uncertainty: Understanding the Multiple Meanings of a Crucial Concept in International Relations Theory, International Studies Quarterly, 51:3, 533–557, https://doi.org/10.1111/j.1468-2478.2007.00463.x

Shahi, Deepshikha (2019). Kautilya and Non-Western IR Theory, Cham: Palgrave MacMillan.

Snyder, Jack (.2020). Backlash Against Naming and Shaming: The Politics of Status and Emotion. British Journal of Politics and International Relations 22(4):644–653.

Sternberger, Dolf (1997). „Das Wort ‚Politik' und der Begriff des Politischen". in Seibel, Wolfgang / Medick-Krakau, Monika / Münkler, Herfried / Greven, Michael Th. (Hrsg.): Demokratische Politik – Analyse und Theorie. Politikwissenschaft in der Bundesrepublik Deutschland. Politische Vierteljahresschrift – Sonderheft, 97–105.

Taliaferro, Jeffrey W. (2000/2001). Security Seeking Under Anarchy: Defensive Realism Revisited. International Security 25(3):128–161.

Walt, Stephen (1987). Origins of Alliances. Ithaca: Cornell University Press.

Waltz, Kenneth (1979). Theory of International Politics. New York: Random House.

Wendt, Alexander (1999). Social Theory of International Politics. Cambridge: Cambridge University Press.

Wendt, Alexander (1992). Anarchy Is What States Make of It: The Social Construction of Power Politics. International Organization 46(2):391–425.

Über den Autor

Sebastian Harnisch ist Professor für Internationale Beziehungen und Außenpolitik an der Universität Heidelberg, Mitglied des Direktoriums des Heidelberg Center for American Studies (HCA) und war langjähriges Vorstandsmitglied des Heidelberg Center for the Environment (HCE). Seine Forschungsprojekte und Publikationen umfassen die Bereiche Vergleichende Außen- und Sicherheitspolitik, Theorien der Internationalen Beziehungen, Nonproliferation, Netzpolitik und Klimawandel und sind u. a. von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), der Deutschen Stiftung Friedensforschung (DSF), der Fritz Thyssen Stiftung und der Korea Foundation gefördert worden.

Im Laufe seines wissenschaftlichen Werdegangs hat er an der Universität Trier, der Universität der Bundeswehr München, der Beijing Foreign Studies University, der Al-Farabi National Kazakh University und der China Foreign Affairs University gelehrt. Er war als Gastwissenschaftler an der Columbia University in New York, der Yonsei University in Seoul sowie am Japan Center for International Exchange in Tokio tätig. 2012-2013 war er Research Fellow am Marsilius-Kolleg Heidelberg.

Sebastian Harnisch ist Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats der Zeitschrift *Foreign Policy Analysis* sowie Mitherausgeber der Reihen *Foreign Policy and International Order* (Nomos Verlag) und *Oxford Research Encyclopedia for Foreign Policy Analysis* (Oxford University Press). Er hat zahlreiche Monographien, Sammelbände und Forschungsbeiträge in renommierten Fachzeitschriften veröffentlicht.

Korrespondenzadresse:
Prof. Dr. Sebastian Harnisch
Institut für Politische Wissenschaft
Universität Heidelberg
Bergheimer Str. 58
69115 Heidelberg

E-Mail: sebastian.harnisch@uni-heidelberg.de
Homepage:
https://www.uni-heidelberg.de/fakultaeten/wiso/ipw/mitarbeiter/harnisch/

Personenverzeichnis

A

Al-Ameery-Brosche, Ines 2, 20, 363
Aristoteles 23, 24, 30, 111, 541–543
Assmann, Jan 22

B

Basten, Ulrike 4, 14, 16, 219, 231, 240
Bauer, Theresia 2, 29, 531
Binet, Alfred 13, 183, 323–325, 327, 337
Boccaccio, Giovanni 5, 23, 467–472, 475, 476
Boring, Edwin 182, 280, 337
Botticelli, Sandro 26, 27
Buddha, Gautama 22
Byczkowski, Michael 2, 21, 22, 395

C

Ciccone, Madonna 25

D

Darwin, Charles 8, 70, 119, 128, 322, 513
Dawkins, Richard 8
Descartes, René 19
Dörner, Dietrich 189, 190, 193, 415
Draguhn, Andreas 2, 9, 10, 41

E

Einstein, Albert 29, 284, 527

Erbar, Claudia 3, 8, 67, 69, 72
Ermark, Florian 3, 16, 255

F

Fest, Joachim 26
Fiedler, Klaus 3, 16, 255, 263–268, 496
Firnhaber, Dietrich 3, 21, 413
Friedman, Milton 419
Fuchs, Thomas 3, 19, 206, 347, 354
Funke, Joachim 3, 6, 13, 181, 183, 190, 434, 479, 488, 490, 544

G

Gadamer, Hans Georg 30
Galilei, Galileo 19, 328
Galton, Francis 59, 322, 323, 326, 335, 336, 338, 339
Gardner, Howard 13, 14, 185, 186, 199, 200, 489, 496
Goethe, Johann Wolfgang von 7, 24, 25, 30, 395, 477
Goleman, Daniel 14, 201, 441
Goodall, Jane 118
Gorman, Amanda 25
Görtz, Magdalena 2, 21, 395
Green, Melanie C. 436
Güntürkün, Onur 49, 133–136

H

Habermas, Jürgen 26, 28, 30, 32
Harnisch, Sebastian 3, 30, 541
Hegel, Georg Wilhelm Friedrich 30, 31
Herpertz, Sabine 3, 14, 199, 209, 211
Heuveline, Vincent 3, 18, 20, 305, 383
Holm-Hadulla, Rainer Matthias 1, 2, 6, 7, 12, 14, 20, 24–26, 31, 156
Holstein, Thomas 3, 8, 141

I

Ishiguro, Kazuo 433, 438, 444–449, 458

J

Jaspers, Karl 22

K

Kahneman, Daniel 16, 235, 255, 257–259, 261, 423
Kandel, Eric 11, 143
Kant, Immanuel 256, 257, 417
Kierkegaard, Søren 379, 414
Knebel Doeberitz, Magnus von 4, 20, 379
Konfuzius 22, 26

L

Laotse 22
Leibniz, Gottfried Wilhelm 19
Leins, Peter 3, 8, 67
Lind, James 397
Lindenberg, Katajun 4, 14–16, 233, 238

M

Macchiavelli, Nicolo 30
Marciniak-Czochra, Anna 5, 17, 279
McEwan, Ian 4, 24, 433, 439, 442, 444, 447, 449, 451, 452, 454, 455, 457
Mitchell, Sandra 413, 416, 423, 427
Morrison, Jim 34

N

Nitze, Maximilian 399
Nünning, Vera 4, 23, 24, 433, 436, 452, 478

O

Oeming, Manfred 4, 18, 28, 29, 503, 505

P

Pearson, Karl 321, 330, 335, 336, 338
Platon 23, 26, 28, 193

R

Rappold, Gudrun A. 4, 11, 165, 171
Resch, Franz 2, 20, 363, 375
Richter, Gerhard 25, 26

Rolling Stones 25
Röntgen, Conrad 397, 398
Rorty, Richard 31

S

Salmen, Karolin 3, 16, 255
Shakespeare, William 26, 442
Simon, Theodore 13, 183, 324, 325, 337
Singer, Wolf 31
Sophokles 28, 29, 522–524
Spearman, Charles 13, 183, 184, 187, 326, 327, 330, 335, 336, 338, 491
Stern, William 183, 325
Sternberg, Robert .. 4, 13, 26, 185, 189, 191, 193, 436, 437, 441, 449, 452–454, 457, 487–490, 493, 494, 496, 497
Stiefel, Viola 3, 20, 305, 383
Stiehl, Thomas 5, 17, 279

T

Terman, Lewis 13, 183, 184, 325
Thunberg, Greta 167
Thurstone, Louis 13, 183, 184, 187, 336
Tuchman, Barbara 193
Turing, Alan 19, 348, 360, 370, 373, 442, 450, 454, 455, 457
Tversky, Amos 16, 235, 255, 257–259, 261

W

Wagner, Richard 26
Wechsler, David 13, 183, 184, 200, 280, 327
Weiand, Christof 5, 23, 463
Weiß, Christel 5, 18, 319
Wink, Michael 5, 6, 9, 117, 125, 126, 132

Z

Zarathustra 22