

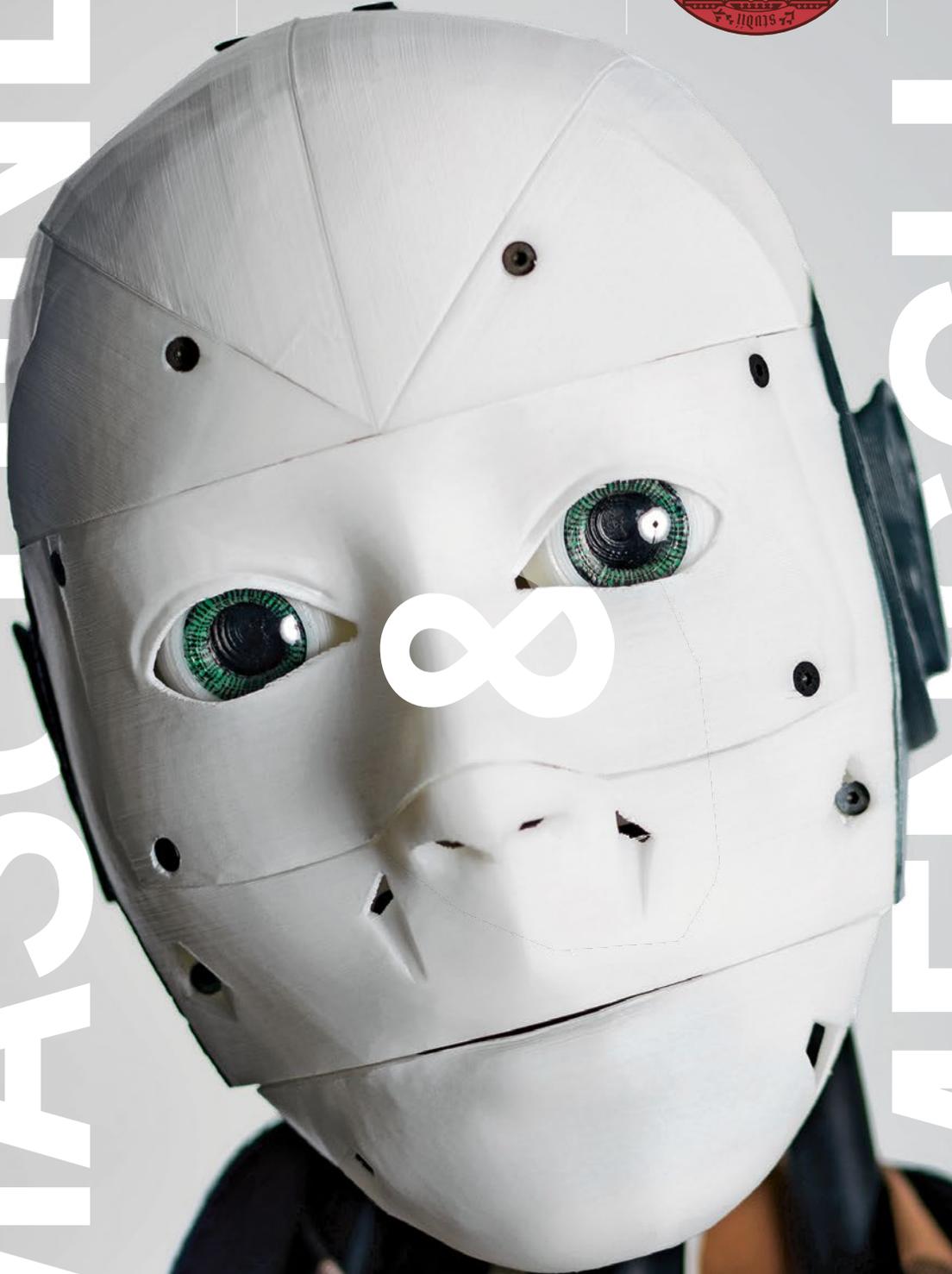
AUSGABE 16  
JULI 2020

RUPERTO CAROLA  
FORSCHUNGSMAGAZIN



UNIVERSITÄT  
HEIDELBERG  
ZUKUNFT  
SEIT 1386

WASCHINE



∞

MENSCH

# LIEBE LESERINNEN UND LESER DER RUPERTO CAROLA,

in den vergangenen Jahren sahen wir uns immer wieder mit der Gefahr konfrontiert, dass Teile unseres gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Lebens von Computerviren lahmgelegt werden könnten. Nun haben wir erleben müssen, dass ein die Menschen bedrohendes Virus zu einem weltweiten Shutdown bisher ungekannten Ausmaßes geführt hat. Doch nicht nur die Bedrohung durch Viren unterschiedlichster Art verbindet Maschinen und Menschen. Was sie gemeinsam auszeichnet und was Mensch und Maschine unterscheidet, wo beide voneinander lernen und wie sie sich gegenseitig ergänzen können, damit beschäftigt sich die aktuelle Ausgabe unseres Forschungsmagazins RUPERTO CAROLA zum Schwerpunktthema MASCHINE & MENSCH.

Der menschliche Körper kennt sowohl „Proteinfabriken“ als auch „Soft Machines“, Maschinen wiederum sind mittlerweile mit Künstlicher Intelligenz ausgestattet und können sich auf allen möglichen Ebenen bis hin zur Sprache mit dem Menschen messen. Elektronische und Neuroprothesen können als Mensch-Maschine-Schnittstellen fehlende oder verloren gegangene körperliche Funktionen ersetzen. Und die neuartige Disziplin der molekularen Ingenieurwissenschaften setzt winzige molekulare und nanoskalige Bausteine so zu molekularen Systemen zusammen, dass herkömmliche Ansätze der Robotik revolutioniert werden und futuristische Anwendungen in unseren Alltag vordringen können. Die aktuelle Forschung an der Universität Heidelberg in den Natur- und Lebenswissenschaften stellen wir Ihnen in dieser Ausgabe ebenso vor wie neueste Erkenntnisse zu MASCHINE & MENSCH aus den Wirtschafts-, Politik- und Geschichtswissenschaften, der Altersforschung, der Arbeits- und Organisationspsychologie, der Rechtswissenschaft und der Computerlinguistik sowie auch der Filmgeschichte. Aus unserem Expertengespräch wurden aufgrund der coronabedingten Beschränkungen „Denkanstöße von Experten“, zwei Einzelbeiträge, die wir zu einem Dialog aus den Blickwinkeln von Hirnforschung und Geoinformatik zusammengestellt haben.

Ich wünsche Ihnen in dieser besonderen Zeit eine erkenntnisreiche und anregende Lektüre!



Prof. Dr. Dr. h.c. Bernhard Eitel  
Rektor der Universität Heidelberg



KAPITEL

IM BLICK DER EXPERTEN  
DER BEGINN EINER GROSSEN ÄRA  
MIT- UND GEGENEINANDER: GEIST UND SOFTWARE  
DENKANSTÖSSE VON HANNAH MONYER & BERNHARD HÖFLE

6

MOLEKULARE INGENIEURWISSENSCHAFT  
GRUPPENDYNAMIK  
BIOHYBRIDE ROBOTER UND INTELLIGENTE IMPLANTATE  
CHRISTINE SELHUBER-UNKEL

16

BIOCHEMIE  
MOLEKULARE MASCHINEN  
BLICK IN DIE PROTEINWERKSTÄTTEN DER ZELLE  
ED HURT

24

BIOPHYSIK  
SOFT MACHINES  
WAS WIR VON BIOLOGISCHEN ZELLEN LERNEN KÖNNEN  
ULRICH SCHWARZ

32

KAPITEL

OHRENHEILKUNDE  
JENSEITS DER STILLE  
HÖREN KÖNNEN MIT ELEKTRONISCHEN PROTHESEN  
MARK PRAETORIUS & KURT STEINMETZGER

42

EXPERIMENTELLE NEUROREHABILITATION  
MIT GEDANKEN STEuern  
NEUROPROTHESEN ALS MENSCH-MASCHINE-SCHNITTSTELLE  
RÜDIGER RUPP

50

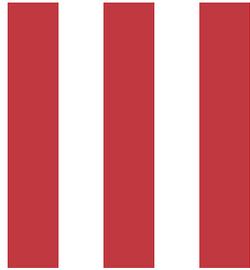
INTERDISZIPLINÄRE ALTERNSFORSCHUNG  
INTELLIGENTE ALLIANZEN  
ASSISTENZROBOTER FÜR MEHR LEBENSQUALITÄT IM ALTER  
KATJA MOMBAUR, ALEXANDER SCHUBERT & HANS-WERNER WAHL

58

ARBEITS- UND ORGANISATIONSPSYCHOLOGIE  
MIT DEM LAPTOP IM BETT  
DIGITALE ARBEITSWELT UND GESUNDHEIT  
KARLHEINZ SONNTAG

66

KAPITEL



KÜNSTLICHE INTELLIGENZ  
TIEFE NETZE  
VON MASCHINEN LERNEN  
ULLRICH KÖTHE

**76**

COMPUTERLINGUISTIK  
ALGORITHMUS FÜR KREATIVITÄT GESUCHT  
HERAUSFORDERUNGEN MASCHINELLEN SPRACHVERSTEHENS  
ANETTE FRANK & KATJA MARKERT

**86**

POLITIKWISSENSCHAFT  
BLAME GAME IM CYBERSPACE  
INFORMATIONSTECHNIK ALS WAFFE?  
SEBASTIAN HARNISCH & KERSTIN ZETTL

**96**

RECHTSWISSENSCHAFT  
FAHRERLOS  
AUTONOME VERKEHRSSYSTEME UND RECHT  
STEFAN J. GEIBEL

**106**

IMPRESSUM

**113**

KAPITEL



WIRTSCHAFTSKULTURGESCHICHTE  
MODERN TIMES  
IM TAKT DER MASCHINE  
GINA FUHRICH & KATJA PATZEL-MATTERN

**116**

WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN  
DAS ENDE DER ARBEIT?  
ZWISCHEN POTENZIAL UND RENTABILITÄT  
MELANIE ARNTZ

**126**

MITTELALTERLICHE GESCHICHTE  
FUNDAMENTALER WANDEL  
MASSENKOMMUNIKATION ALS MOTOR EINER NEUEN ZEIT  
BERND SCHNEIDMÜLLER & PAUL SCHWEITZER-MARTIN

**136**

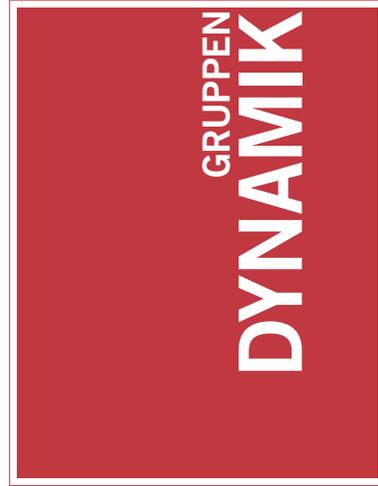
FILMGESCHICHTE  
FASZINIERENDE ZWITTER  
MENSCH-MASCHINEN IM FILM  
HENRY KEAZOR

**144**



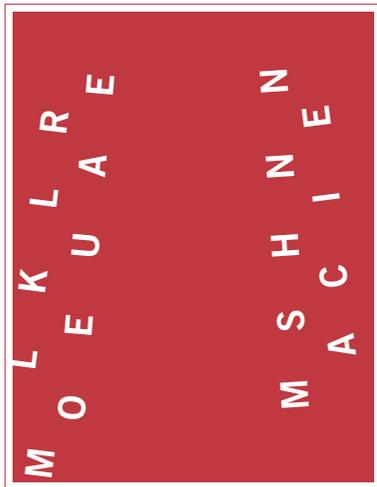
IM BLICK DER EXPERTEN  
DER BEGINN EINER GROSSEN ÄRA  
MIT- UND GEGENEINANDER: GEIST UND SOFTWARE  
DENKANSTÖSSE VON HANNAH MONYER & BERNHARD HÖFLE

6



MOLEKULARE INGENIEURWISSENSCHAFT  
GRUPPENDYNAMIK  
BIOHYBRIDE ROBOTER UND INTELLIGENTE IMPLANTATE  
CHRISTINE SELHUBER-UNKEL

16



BIOCHEMIE  
MOLEKULARE MASCHINEN  
BLICK IN DIE PROTEINWERKSTÄTTEN DER ZELLE  
ED HURT

24



BIOPHYSIK  
SOFT MACHINES  
WAS WIR VON BIOLOGISCHEN ZELLEN  
LERNEN KÖNNEN  
ULRICH SCHWARZ

32

# KAPITEL



**DER BEGINN  
EINER GROSSEN**

**ÄRA**

DER BEGINN EINER GROSSEN ÄRA

# MIT- UND GEGENEINANDER: GEIST UND SOFTWARE

DENKANSTÖSSE VON HANNAH MONYER &amp; BERNHARD HÖFLE

Die Neurobiologin Hannah Monyer und der Geoinformatiker Bernhard Höfle sprechen in ihren Denkanstößen über den Unterschied zwischen dem menschlichen Gehirn und einem Computer, darüber, was Maschinen besser können als Menschen und was Menschen besser als Maschinen, warum Algorithmen allein keine perfekten Ergebnisse erzielen und weshalb das Gehirn nur bedingt als Zeitmaschine bezeichnet werden kann.

# W

Wie definiert sich aus Sicht der Geoinformatik das Verhältnis von Mensch und Maschine – was unterscheidet sie, wo ähneln sie sich eventuell?

**Prof. Höfle:** In der Geographie interessiert uns nicht primär die Maschine als Forschungsobjekt, sondern vielmehr die Einbettung der Maschine in geographische Kontexte sowie räumliche und zeitliche Beziehungen im Dreieck Mensch – Umwelt – Technologie. Wie kann man beispielsweise die geographisch unterschiedliche Nutzung von Maschinen erklären, obwohl auf den ersten Blick keine Standortunterschiede vorliegen? Oder umgekehrt gedacht: Wie wirkt sich der Einsatz von Maschinen auf die räumliche Verteilung der Qualität von Böden, des Wassers und so weiter aus? Der Begriff des Geoengineering wäre hier ein Extremfall eines technischen Eingriffs in Umweltprozesse. Umgekehrt kann der Einsatz von Maschinen auch von geographischen Gegebenheiten abhängig sein, denken wir an die Internetverbindung und den Handyempfang oder die Energiegewinnung mit Photovoltaik.

Es gibt sicher geographische Aspekte, die mit Menschen und Maschinen korrelieren beziehungsweise „ähnlich“ sind, aber meist nicht kausal zusammenhängen. Beispielsweise benötigen Menschen und Maschinen Energie, um zu funktionieren, und diese muss an dem entsprechenden Ort verfügbar sein oder gemacht werden. Man könnte auch von Ähnlichkeit einer Ausprägung sprechen, wenn nicht mehr direkt erkennbar ist, ob es sich um eine Maschine oder einen Menschen handelt. In Sozialen

Medien fällt es uns immer schwerer, sogenannte „Bots“ von menschlichen Usern zu unterscheiden, weil sie – by design – „ähnlich“ sein sollen.

**Aus der Sicht der Neurobiologie: Kann man das menschliche Gehirn als Maschine bezeichnen?**

**Prof. Monyer:** Es gibt ja ganz unterschiedliche Maschinen – nehmen wir beispielsweise einen Motor: Wenn Sie ein neues Auto kaufen, dann setzen beim Motor nach und nach Alterungsprozesse ein und er funktioniert über die Jahre immer schlechter. Das ist beim menschlichen Gehirn nicht so: Wenn wir ein ganzes Menschenleben betrachten, dann gibt es Funktionen des Gehirns, die sich zunächst steigern, bis sie einen Höhepunkt erreichen, nach dem die Leistungen – vereinfacht gesagt – wieder abnehmen. Es gibt dabei Bereiche, die im dritten Lebensjahrzehnt ihren Leistungshöhepunkt erreichen, in anderen Bereichen spielt dagegen Erfahrung eine große Rolle, so dass man auch noch im fünften, sechsten oder siebten Lebensjahrzehnt große Leistungen vollbringen kann. Das gilt zum Beispiel für Kreativität – Beethoven und Goethe etwa waren bis zu ihrem Lebensende hochkreativ. In dieser Hinsicht also hinkt beispielsweise der Vergleich zwischen einem Motor und einem Gehirn ganz stark.

**Und wie sieht es beim Vergleich zwischen Gehirn und Computer aus?**

**Prof. Monyer:** Das ist sicher der aktuellere Vergleich – aber auch der ist nicht wirklich tauglich. Bereits seit der Antike wurde das Gehirn immer mit der jeweils neuesten Technik in Verbindung gebracht, wobei vor allem die Gedächtnisleistung gemeint war. In der Antike wurden etwa Sortiersysteme genutzt, um die Gedächtnisleistung zu steigern, oder auch Wachstafeln, die sozusagen dem Gedächtnis gleichgesetzt wurden, im Mittelalter übernahmen Bibliotheken die Funktion des Gedächtnisses. Mit fortschreitender Technik kamen dann Ende des 19. Jahrhunderts Tonbandaufnahmen oder später Filme dazu – das Gedächtnis als Film, der einzelne Eindrücke speichert. Und seit den 1950er/1960er-Jahren haben wir nun die vermeintliche Analogie zum Computer.

Unser Gedächtnis speichert jedoch im Gegensatz zu Computern Informationen nicht so ab, wie sie sich abgespielt haben, sondern das Gehirn sortiert beim Lernen, speichert gezielt Dinge und löscht andere. Was sich im Laufe eines Tages abspielt, geht durch einen Filter, und auch noch im Schlaf selektioniert unser Gehirn. Wenn zwei Menschen zusammen einen Nachmittag verbringen, wird später die Erinnerung daran bei beiden ganz unterschiedlich sein. Das ist keine bewusste Auswahl, sondern sie wird geprägt durch das, was wir bereits zuvor gelernt und gespeichert haben, und das differiert bei beiden Menschen – deshalb wird das gleiche Ereignis ganz unterschiedlich erinnert. Bei Computern ist das nicht so, und bei ihnen bleiben auch

„Ein Algorithmus kann eine verliebte Person an ihrem Verhalten erkennen – was Liebe aber ist, das kann der Computer nicht beantworten, weil er es nicht gelernt hat.“



Bernhard Höfle



Hannah Monyer

„Bereits seit der Antike wurde das Gehirn immer mit der jeweils neuesten Technik in Verbindung gebracht, wobei vor allem die Gedächtnisleistung gemeint war.“

selbst bei Löschvorgängen immer Spuren zurück – das ist bei unserem Gedächtnis ebenfalls anders. Sowohl im Wachzustand als auch im Schlaf werden uninteressante Ereignisse gar nicht erst gespeichert. Lernen und Vergessen sind beim Menschen Prozesse, die zur Adaptation in der Welt, zur Optimierung unserer Funktionsweise beitragen. Daher hinkt der Vergleich mit einem Computer: Unser Gehirn ist nicht einfach nur ein Speicher von Fakten, sondern diese Fakten werden bereits beim Eingang selektioniert und gehen durch einen Prozess, der geprägt ist durch das Vorangegangene – alles ist also immer kontextabhängig. Und das ist beim Eingang von Daten in einem Computer nicht der Fall.

**Wie kann man die Stärken von Maschine und Mensch verknüpfen, um geographische Fragestellungen besser beziehungsweise überhaupt beantworten zu können?**

**Prof. Höfle:** Viele geographische Phänomene sind aufgrund der wunderschönen Vielfalt und der lokalen Einflüsse nicht klar in ein vereinfachtes Zielschema für die automatische Datenauswertung zu packen, weshalb Algorithmen keine perfekten Ergebnisse erzielen. Für eine Bildererkennung mag sich ein Hund besser von einer Katze unterscheiden, auch ohne großes Vorwissen über die konkrete Katze oder den Hund auf dem Bild. Wenn man jedoch einen Blockgletscher von einem schuttbedeckten Gletscher unterscheiden will, ist es sehr wichtig, den geographischen Kontext des aufgenommenen Bildes zu kennen. Das heißt, der Algorithmus kann zwar den Gletscher sehr gut im Bild erkennen, er kann aber nicht die Frage nach der Genese des Gletschers beantworten. Ganz konkret erforschen wir hierbei die Automatisierung des Automatisierbaren in der Auswertung von Geodaten. Wie können die automatische und die manuelle Analyse am effektivsten kombiniert werden in Bezug auf Zeit für die Entwicklung, den Datenbedarf und die Genauigkeit des Ergebnisses?

**Warum fasziniert uns die Idee, Maschinen menschengleich zu programmieren beziehungsweise menschliche Eigenschaften auf sie zu übertragen, wie im Fall der Künstlichen Intelligenz (KI)?**

**Prof. Höfle:** Das Konzept, von der Natur zu lernen und mit diesen Erkenntnissen technische Maschinen („Hardware“) zu bauen, ist sehr alt. Der große neuartige Unterschied in den letzten Jahrzehnten ist die Möglichkeit, in einer digitalen Umgebung Algorithmen zu schaffen und diese mit vielen und komplexen Sensoren und Datensätzen zu verknüpfen. Vielleicht fasziniert uns dabei die Hoffnung, nun auch ein Abbild der menschlichen Sinne und „Software“ schaffen zu können. Dazu mag auch die Gemeinsamkeit beitragen, dass Geist und Software nicht direkt physisch greifbar und sichtbar für den Menschen sind. In der Geoinformatik ist sicher das sprechende Navigationsgerät ein gutes und einfaches Beispiel für eine solche Verknüpfung, die auch den geographischen Kontext berücksichtigt.

# „Auch durch den Einsatz von Computern und maschinellen Techniken haben wir sehr viel über die Funktionsweise unseres Gehirns gelernt.“

Hannah Monyer

**Prof. Monyer:** Menschen denken in Modellen. Wenn ich jemandem begegne, den ich noch nie gesehen habe, erhalte ich Informationen über ihn – über sein Geschlecht, welche Sprache er spricht und so weiter – und daraus erstelle ich ein Modell. Auch bei allen anderen Dingen, die uns auf der Welt umgeben, erzeugt das von mir Gelernte Modelle. Ich habe dann Erwartungen an die Welt und teste diese Erwartungen. Aber welche Erwartungen und Modelle ich erstellt habe, hängt mit dem bereits Gelernten zusammen, und bei neuen Erfahrungen lerne ich und revidiere dieses Modell. Evolutionär gesehen sind das Gedächtnis und das Vergessen sehr wichtig, damit wir uns immer wieder neu an eine Situation adaptieren, um in dieser Welt zu bestehen. Und da wir als Menschen also nur erfolgreich sein können, wenn das Gelernte revidiert wird, funktioniert auch KI, die ja von Menschen designt wird, als Analogie so, dass Feedback und Lernen und damit eine Adaptation stattfinden. Auch neuronale Netzwerke – eine der Methoden des maschinellen Lernens – sind nicht statisch, sondern sie lernen über Feedbacks, die hintereinander geschaltete Netzwerke sich geben.

## Was können Maschinen besser als Menschen und was Menschen besser als Maschinen?

**Prof. Höfle:** Menschen können alles besser, was Maschinen nicht besser können – also beinahe alles, auf das Leben, aber auch auf die Wissenschaft bezogen. Maschinen können klar definierte Aufgaben wie beispielsweise Messungen sehr gut und mit dem Ziel einer erhöhten Objektivität wiederholen. Der Einsatz von Maschinen soll genauere, objektive Ergebnisse mit bekannter Unsicherheit ermöglichen, was durch

manuelle Messungen nur schwer erreichbar ist. Im Bereich der Algorithmen geht es oft darum, vorgegebene Aufgaben auf große digitale Datensätze – Big Data – anzuwenden, die ein Mensch in keiner vernünftigen Zeit analysieren könnte und über die er schlichtweg aufgrund der großen Anzahl an Datensätzen und Verknüpfungen keinen „Überblick“ haben kann. Mir ist kein Mensch bekannt, der ein „Muster“ in einer Tabelle mit Milliarden von Zeilen und Tausenden Spalten erkennen kann. Dagegen sind Menschen Maschinen komplett überlegen, wenn es um das Finden von Erkenntnissen geht, nach denen gar nicht gesucht wurde oder die gar nicht vorstellbar waren. Maschinen orientieren sich am Bekannten und am aktuell Vorstellbaren – ein fiktives Beispiel: Ein Algorithmus kann eine verliebte Person an ihrem Verhalten erkennen – was Liebe aber ist, das kann der Computer nicht beantworten, weil er es nicht gelernt hat.

**Prof. Monyer:** Zu den Dingen, die Maschinen viel besser können als Menschen, gehören beispielsweise Bilderkennungs-systeme, die inzwischen auch im medizinischen Bereich genutzt werden, um bestimmte Tumoren zu erkennen. Das kann alles noch weiter optimiert werden, aber auf diesem Gebiet sind schon sehr große Durchbrüche erzielt worden. Spezielle Tätigkeiten können von Maschinen hervorragend ausgeführt werden und sind als Unterstützung für den Menschen absolut phantastisch. Und vieles, was wir über die Leistung und Funktion des Gehirns wissen, wurde nur über Fortschritte in der Welt der Computer ermöglicht – gerade auch durch den Einsatz von Computern und maschinellen Techniken haben wir sehr viel über die Funktionsweise unseres Gehirns gelernt.



**PROF. DR. HANNAH MONYER** ist seit 1999 Ärztliche Direktorin der Abteilung Klinische Neurobiologie an der Universitätsklinik Heidelberg, einer Brückenabteilung zwischen der Medizinischen Fakultät Heidelberg, der Universität Heidelberg und dem Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ). Nach ihrer Approbation 1983 in Heidelberg arbeitete sie zunächst als Assistenzärztin in der Kinder- und Jugendpsychiatrie in Mannheim, dann in der Neuropädiatrie in Lübeck. 1986 wechselte sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin an die Stanford University (USA) und kehrte drei Jahre später an das Zentrum für molekulare Biologie nach Heidelberg zurück. Dort erhielt sie 1993 ihre Lehrbefugnis für Biochemie, wurde im darauffolgenden Jahr Stiftungsprofessorin und baute ihre eigene Forschungsgruppe auf. Für ihre wissenschaftlichen Leistungen erhielt Hannah Monyer unter anderem im Jahr 2004 den Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der höchstdotierte Forschungspreis Deutschlands, und im Jahr 2017 den Tsungming-Tu-Preis, die höchste akademische Ehre für Ausländer in Taiwan.

Kontakt: [h.monyer@dkfz-heidelberg.de](mailto:h.monyer@dkfz-heidelberg.de)

# DEAR READERS OF RUPERTO CAROLA,

several times over the past few years we were faced with the danger of a computer virus paralysing parts of our societal and economic life. Now we have experienced how a different virus threatening all of humankind has led to a global shutdown of previously unimagined proportions. But the danger arising from various types of viruses is not the only link between humans and machines. The commonalities and differences between us and these complex devices, what each can learn from the other and how they can complement each other – that is the central subject of our latest RUPERTO CAROLA research journal entitled MACHINE & MAN.

The human body knows both “protein factories” and “soft machines”; conversely, machines are now equipped with artificial intelligence and can compete with humans in a number of areas, up to and including language. Electronic or neuroprostheses are human-machine interfaces that can compensate for missing or lost body functions. And the novel discipline of molecular systems engineering assembles tiny molecular and nanoscale components into molecular systems that will revolutionise conventional robotics and lay the groundwork for futuristic applications in our daily lives. In this edition we present the latest natural and life science research at Heidelberg University as well as the newest findings on the subject of MACHINE & MAN from the fields of economics, political science, history, ageing research, industrial and organisational psychology, law, computer linguistics and cinematic history. Due to restrictions relating to the coronavirus pandemic, our Expert Talk has been replaced by “The Expert View”, two articles that we have combined into a dialogue from the perspectives of brain research and geoinformatics.

I wish you a stimulating and enlightening reading experience in these special times!

Prof. Dr Dr h.c. Bernhard Eitel  
Rector of Heidelberg University

# „Menschen sind Maschinen komplett überlegen, wenn es um das Finden von Erkenntnissen geht, nach denen gar nicht gesucht wurde oder die gar nicht vorstellbar waren.“

Bernhard Höfle

Welche Probleme sehen Sie als Geoinformatiker im Verhältnis Mensch – Maschine?

**Prof. Höfle:** Negative Konsequenzen ergeben sich durch eine Produktion oder Nutzung von Maschinen, die nicht im Sinne der Nachhaltigkeit erfolgt. Auch ein Auto mit Verbrennungsmotor stellt durch die intensive Nutzung und in der Menge ein Problem für den Menschen beziehungsweise die Menschheit dar – Stichwort Klimawandel. Umgekehrt sollte so ein Fahrzeugtyp auch bald vom Aussterben bedroht sein. In der Geographie sind solche komplexen „Probleme“ spannende Forschungsgebiete, die beispielsweise bei uns am Institut im „TdLab Geographie“ transdisziplinär zum Thema Klimawandel erforscht werden (siehe Beitrag „Zusammen wirken. Die große Transformation“ in der Ausgabe KULTUR & NATUR).

Werden Maschinen eines Tages alle oder fast alle Aufgaben des Menschen übernehmen können? Gibt es Bereiche, die Maschinen nie werden ausfüllen können – oder kann man in dieser Hinsicht nichts ausschließen?

**Prof. Höfle:** Ausschließen darf man nichts, weil man die Zukunft nicht kennt. Man sollte vielmehr überlegen,

welche Aufgaben unter Berücksichtigung aller ethischen und moralischen Aspekte sinnvoll an Maschinen delegiert werden sollten, und nicht, was übertragen werden könnte. Nicht alles, was machbar ist, sollte auch tatsächlich umgesetzt werden. Dass in der KI-Forschung nach dem „Kann“ geforscht wird, ist verständlich im Bereich der Grundlagenforschung. Dies ist aber kein Ansatz, der unreflektiert und ohne gesellschaftliche Einordnung direkt in Anwendungen übertragen werden sollte. Dies gilt aber nicht nur für KI, sondern für Technologien im Allgemeinen.

**Prof. Monyer:** Meine Vorstellungskraft reicht im Moment noch nicht so weit, dass ich sagen würde, dass alles durch Technik ersetzbar ist. Eine spannende Frage momentan ist, ob Maschinen künftig auch Leistungen übernehmen können, die wir bisher spezifisch mit dem Menschsein verbinden: Kann KI beispielsweise kreative Prozesse übernehmen – können durch sie wunderbare Gedichte oder Bilder entstehen, die uns wirklich anrühren? Dazu müssten Computer beispielsweise lernen, in Metaphern zu denken. Ich könnte mir tatsächlich vorstellen, dass selbst Kreativität von Computern übernommen werden kann – aber dann wird sie anders sein und vielleicht anregend auf ihre Weise.



**PROF. DR. BERNHARD HÖFLE** ist seit 2017 Professor für Geoinformatik und 3D-Geodatenverarbeitung am Geographischen Institut der Universität Heidelberg. Nach einem Geographiestudium in Innsbruck (Österreich) und Uppsala (Schweden) und seiner Promotion an der Universität Innsbruck im Jahr 2007 war er zunächst als Postdoktorand an der Technischen Universität Wien (Österreich) und der Universität Osnabrück tätig. 2010 wechselte er als Teamleiter in die Abteilung Geoinformatik der Universität Heidelberg, wo er 2011 eine Juniorprofessur übernahm. Bernhard Höfles Forschungsschwerpunkte liegen in der Entwicklung neuer Methoden für die Analyse von Geodaten in den Geo- und Umweltwissenschaften, der automatischen Prozessierung von 3D/4D-Punktwolken und der Kombination von 3D-Geodaten mit Fernerkundung sowie 3D-Crowdsourcing. Er ist Mitglied des Interdisziplinären Zentrums für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) und des Heidelberg Center for the Environment (HCE) der Universität Heidelberg.

Kontakt: [hoefle@uni-heidelberg.de](mailto:hoefle@uni-heidelberg.de)

AT THE BEGINNING OF A GREAT ERA

# WITH AND AGAINST EACH OTHER: INTELLECT AND SOFTWARE

TALKING POINTS WITH HANNAH MONYER &amp; BERNHARD HÖFLE

Can the human brain be described as a kind of machine – and, by extension, human memory as a time machine? What do software and the human mind have in common, and what are the ethical dilemmas involved in the use of artificial intelligence (AI)? Neurobiologist Hannah Monyer and geoinformatics expert Bernhard Höfle present talking points on the relationship between man and machine, reflect on what tasks each can perform better and explain why algorithms alone do not produce perfect results.

The human brain – particularly its memory function – has always been associated with technology, says Hannah Monyer. But according to her, this comparison is flawed because unlike audio tapes or computers, the brain does not save information in precisely the way it occurred. Instead the brain sorts information during the learning process, saving some things and deleting others. “Our brain is not just a storage device for facts; the facts are selected even while they are registered and then undergo a process that is shaped by all that came before – every piece of information is put in a specific context.” She explains that neurobiologists owe much of their knowledge about the brain to advances in information technology – in many cases, it was computers that allowed scientists to learn how the brain works.

The field of geoinformatics combines the strengths of man and machine to answer questions of a geographical nature. According to Bernhard Höfle, machines can repeat clearly defined tasks such as measurements with the aim of achieving increased objectivity, while algorithms allow scientists to apply specific tasks to large digital data sets that would be impossible to process for humans. “On the other hand, humans are clearly in the lead when it comes to discovering things that we were not even looking for or could not conceive of.” He emphasises that with respect to AI, we need to define which tasks should be delegated to machines – with due regard to ethical and moral considerations – instead of all the things that could be delegated: “Not everything that is theoretically possible should ultimately be put into practice.” ●

PROF. DR BERNHARD HÖFLE is full professor of geoinformatics and 3D geodata processing at Heidelberg University's Institute of Geography, a position he has held since 2017. He studied geography in Innsbruck (Austria) and Uppsala (Sweden) and obtained his doctorate from the University of Innsbruck in 2007. After stations as a postdoctoral researcher at TU Wien (Vienna, Austria) and Osnabrück University, he transferred to Heidelberg University's geoinformatics research group in 2010, where he initially worked as a team leader before accepting a junior professorship in 2011. Bernhard Höfle's research interests are the development of new algorithms and methods for analysing geodata in the earth and environmental sciences, automatic processing of 3D/4D point clouds and the combination of 3D geodata with remote sensing and 3D crowdsourcing. He is a member of Heidelberg University's Interdisciplinary Center for Scientific Computing (IWR) and Heidelberg Center for the Environment (HCE).

Contact: hoeffe@uni-heidelberg.de

PROF. DR HANNAH MONYER has headed the Department of Clinical Neurobiology at Heidelberg University Hospital since 1999; her department is operated jointly by the Medical Faculty Heidelberg, Heidelberg University and the German Cancer Research Center (DKFZ). After qualifying as a physician in Heidelberg in 1983, she worked as a junior doctor in child and adolescent psychiatry in Mannheim, then in neuropaediatrics in Lübeck. In 1986 she accepted a position as research assistant at Stanford University (USA), and three years later transferred to the Center for Molecular Biology of Heidelberg University. There she earned her teaching credentials in biochemistry in 1993, became an endowed professor the following year and established her own research group. Among the awards Hannah Monyer has received for her work are the Gottfried Wilhelm Leibniz Prize of the German Research Foundation (2004), the most highly endowed research award in Germany, and the Tsungming Tu Award (2017), the highest academic honour bestowed on foreigners by the National Science Council of Taiwan.

Contact: h.monyer@  
dkfz-heidelberg.de

**“An algorithm  
can recognise a person  
in love by their  
behaviour, but it cannot  
tell you what love is,  
because that is something  
it has not learned.”**

Bernhard Höfle

**“Ever since antiquity,  
the brain – particularly memory  
performance – has been  
associated with the newest  
technology of the time.”**

Hannah Monyer

Aber sicher werden wir in Zukunft auch ethische Probleme berücksichtigen müssen – vor allem hinsichtlich der Daten, die eingegeben werden. Wie kommen wir zu diesen Daten, wie vermeiden wir, dass sie in die falschen Hände geraten und zu anderen Zwecken als den vorgesehenen genutzt werden, wie kann man Diskriminierung vermeiden, die schon im ersten Datensatz angelegt ist? Da stellen sich viele wichtige Fragen, und wir stehen praktisch am Beginn einer großen Ära – es ist faszinierend, auch rein intellektuell, dabei zu sein. Für sehr problematisch halte ich aber, dass wichtige gesellschaftliche Entscheidungen gefällt werden müssen, obwohl sehr viele Menschen bei diesem Fortschritt gar nicht mithalten und somit auch nicht mitentscheiden können. Ich als Neurowissenschaftlerin beispielsweise verstehe Informatik nicht, auch wenn ich in dieser Hinsicht besser aufgestellt bin als beispielsweise ein Romanist – dennoch bin ich nicht genug trainiert, um alles zu verstehen und mitreden zu können. Das heißt, es werden gesellschaftlich wichtige Entscheidungen von relativ wenigen Experten gefällt werden müssen.

#### Welche ethischen Probleme sehen Sie beim Einsatz von KI in der Geoinformatik?

**Prof. Höfle:** Spezifisch für die Geographie ist die Tatsache, dass sehr viele digitale Daten über einen Raumbezug verfügen – beispielsweise die GPS-Position eines aufgenommenen Bildes auf Social Media – und über diesen Raumbezug verschiedenste andere Daten miteinander verknüpft werden können. Es muss somit nicht zwingend eine direkte Verbindung zwischen den Datenbanken bestehen, da der Ort eine Verknüpfung erlaubt. Dieses Grundprinzip der Geoinformatik birgt bei einer Kopplung mit Big Data und KI auch das Potenzial des unsachgemäßen Einsatzes mit Blick auf den Datenschutz und die Privatsphäre. Beispiele hierzu sind in den vergangenen Jahren zahlreich durch die Medien gegangen.

#### Kann man das Gedächtnis als Zeitmaschine bezeichnen – etwa wenn man über einen bestimmten Geschmack in die Vergangenheit versetzt wird, wie es Marcel Proust in seinem Roman „Auf der Suche nach der verlorenen Zeit“ beschreibt?

**Prof. Monyer:** Bei Proust geht es um das Verlorenglaubte, zu dem man plötzlich wieder Zugang hat. Es gibt das episodische Gedächtnis von Fakten, die wir abspeichern – aber wir können nicht auf Kommando in der Zeit zurückgehen, denn wir wissen alle, dass das Gedächtnis nicht immer zuverlässig ist. Natürlich gibt es Dinge, die wir nie vergessen und zu denen wir immer Zugang haben – da funktionieren wir dann tatsächlich ein bisschen wie eine Maschine. Aber vieles ist nicht zugänglich und wird durch anderes dann wieder wachgerufen, was das Gedächtnis von einer Maschine unterscheidet. Ja, das Gedächtnis ermöglicht uns, in die Vergangenheit zurückzukehren, aus dem daraus Gelernten Schlüsse zu ziehen,

um richtige Entscheidungen zu treffen, bestimmte Wege zu vermeiden, andere zu verstärken. Aber es gibt auch Gelerntes, zu dem wir keinen bewussten Zugang haben, das aber dennoch unser Verhalten stark beeinflusst. Wir haben beispielsweise an die ersten vier Jahre unseres Lebens kaum Erinnerungen – es kann aber in dieser Zeit Erlebnisse geben, die ein Kind und sein späteres Leben stark beeinflussen, ohne dass es überhaupt Zugang hat zu diesen Erinnerungen. Also: Zeitmaschine ja, ich kann mich zurückversetzen in meine Vergangenheit – aber ich kann mich nicht an jedweden Ort und an alle Ereignisse erinnern, es ist immer nur eine Selektion.

Diese Prozesse verstehen wir Neurowissenschaftler noch nicht genau, wir wissen nicht, warum manches zugänglich ist und anderes nicht. Wir wissen, was unser Gedächtnis beeinflusst – zum Beispiel, dass Schlaf förderlich ist und Drogenkonsum dem Gedächtnis schadet. Aber noch können wir nicht alles einschätzen, es gibt einfach zu viele Faktoren, die so etwas Komplexes wie unser Gedächtnis beeinflussen. Auch das unterscheidet das Gehirn von einer Maschine: Wir wissen, dass wir vieles einfach – noch – nicht verstehen. ●

**Aufgrund der coronabedingten Beschränkungen war leider kein gemeinsames Gespräch möglich, so dass wir die jeweiligen Denkanstöße unserer Experten redaktionell zusammengestellt haben.**

# GRUPPEN DYNAMIK

GRUPPENDYNAMIK

# BIOHYBRIDE ROBOTER UND INTELLIGENTE IMPLANTATE

CHRISTINE SELHUBER-UNKEL

**Eine neue ingenieurwissenschaftliche Disziplin beschäftigt sich mit Bausteinen in Nanoteilchengröße und konstruiert neuartige Materialien mit verblüffenden Eigenschaften. Das eröffnet zahlreiche interessante Anwendungen: Sie reichen von intelligenten Implantaten, die bei medizinischen Problemen therapeutisch aktiv werden, bis hin zu lichtgesteuerten weichen Robotern, die von lebenden Muskelzellen bewegt werden und mit dem menschlichen Tastsinn ausgestattet sind. Das mag futuristisch erscheinen – die ersten Schritte auf dem Weg dorthin sind jedoch bereits gemacht.**

# A

Allein agiert ein Mensch anders als in der Gruppe – ähnlich verhalten sich Moleküle: In der Gruppe können einzelne Moleküle mit zuvor charakteristischen Eigenschaften und Funktionen völlig andere Eigenschaften und Funktionen entwickeln. Gezielt ausgewählt und geschickt konstruiert bilden solche Molekülgruppen funktionale molekulare Systeme und können als mikroskopische Maschinen arbeiten. Die Voraussetzung für deren Funktionstüchtigkeit ist der kontrollierte Zusammenbau aller molekularen Bausteine. Damit beschäftigt sich eine neue Disziplin an der Schnittstelle von Natur- und moderner molekularer Lebenswissenschaft: die molekulare Ingenieurwissenschaft. An der Universität Heidelberg forschen wir am neuen Institute for Molecular Systems Engineering (IMSE) an dieser interdisziplinären und hoch spannenden Schnittstelle von Chemie, Physik, Materialwissenschaft und Biologie.

Am Beispiel der Polymere lässt sich zeigen, wie sehr sich die Eigenschaften einzelner Moleküle von den Eigenschaften vieler solcher Moleküle in einer Gruppe unterscheiden: Im einfachsten Fall sind Polymere Kettenmoleküle, die in einer Lösung bestimmte chemische und physikalische Eigenschaften zeigen. Wird die Konzentration von Poly-

meren in einer Lösung aber erhöht, ändern sich die Verhältnisse ab einem gewissen Punkt dramatisch: Plötzlich spielen Prozesse wie das Verhaken und Verknäueln verschiedener Polymerketten eine große Rolle, die bei einer einzelnen Polymerkette nie zum Tragen kommen würden. Ein System von Polymerketten funktioniert also deutlich anders als eine einzelne Polymerkette: Die mechanischen Eigenschaften sind verändert, sie sind nun abhängig von der Konzentration der Polymerketten. Eine noch stärkere Veränderung lässt sich erreichen, wenn solche Ketten gezielt miteinander vernetzt werden. Dazu verhelfen sogenannte Vernetzermoleküle: Sie verknüpfen Polymerketten an definierten Stellen. Die Dichte der Verknüpfung entscheidet dann über die mechanischen Eigenschaften des derart komponierten Polymernetzwerks.

#### **Menschliches Ersatzgewebe aus dem Labor**

Warum ist es so wichtig, die mechanischen Eigenschaften von Polymeren festzulegen? Und welche praktischen Anwendungen können sich daraus ergeben? Auch hier können Polymere als Beispiel dienen, die schon heute für viele technische Anwendungen verwendet werden: In der Elektronik etwa dienen sie als Material für Isolierschichten, die Medizintechnik nutzt sie für Schläuche, die beispielsweise als Herzkatheter genutzt werden. Polymere spielen aber auch eine wichtige Rolle, wenn es darum geht, krankes oder verletztes menschliches Gewebe durch Ersatzgewebe zu ersetzen, das speziell dafür herangezüchtet wurde. Das ist das Ziel des „Tissue Engineering“, des gezielten Erzeugens von menschlichen Gewebeersatzmaterialien im Labor. Der Einsatz mancher solcher Gewebeersatzmaterialien in der Medizin ist bereits etabliert, sie dienen beispielsweise als Ersatz für erkrankte Herzklappen oder werden in der plastischen Chirurgie verwendet.

**„Die molekulare  
Ingenieurwissenschaft arbeitet  
an der Schnittstelle von  
Naturwissenschaft und moderner  
molekularer Lebenswissenschaft.“**

# „Ein großer Fortschritt wären künstliche Gewebe und Implantate, die intelligent auf Veränderungen reagieren.“

Will man im Labor Gewebe züchten, ist eine Grundsubstanz – eine „Matrix“ – notwendig, auf und in der Zellen wachsen können. An die Matrix müssen hohe Anforderungen gestellt werden. Bei der Auswahl der geeigneten Grundsubstanz gilt es beispielsweise, die mechanischen Eigenschaften zu berücksichtigen, die Zellen in ihrer natürlichen Umgebung im Körper erfahren: Jedes Gewebe im Organismus weist eine charakteristische Steifigkeit auf – und die im Labor nachgezüchteten Zellen können nur dann in den Körper integriert werden und dort problemlos ihre Funktion erfüllen, wenn auch der Parameter „Steifigkeit“ in der künstlichen Matrix korrekt angepasst wurde. Polymere eignen sich für derartige Anwendungen des Tissue Engineering hervorragend: Über den Vernetzungsgrad lassen sich die mechanischen Eigenschaften von Polymeren gezielt einstellen; das Ergebnis ist eine künstliche Matrix, auf der sich die Zellen gleichsam wie zu Hause fühlen und gut gedeihen können.

In meiner Arbeitsgruppe erforschen wir, wie die mechanischen Eigenschaften und die mikroskopische Struktur von Polymermaterialien Zellen beeinflussen können. Besonders spannend ist die Zellumgebung im Gehirn, die sehr wässrig und weich ist. Werden harte Implantate ins Hirn eingesetzt, kann es zur Bildung von Narben kommen, die die Funktion der umgebenden Hirnareale beeinträchtigen können. Um dies zu vermeiden, forschen wir an Polymeren, die einen sehr hohen Wasseranteil haben und sehr weich sind, sogenannte Hydrogele. Sie können chemisch modifiziert werden, so dass Zellen daran haften, und sie können sogar therapeutische Wirkstoffe speichern, die über längere Zeit freigesetzt werden. Gerade nach Tumoroperationen im Gehirn wäre es hilfreich, hirntolerante Implantate einzusetzen, die Chemotherapeutika freisetzen.

Ein weiterer großer Fortschritt wäre es, wenn künstliche Gewebe und Implantate selbstständig, quasi intelligent

auf Veränderungen reagieren könnten. Ein Beispiel ist ein autonom agierendes Implantat, das eine bakterielle Infektion frühzeitig als lebensbedrohliche Gefährdung erkennt und darauf unmittelbar mit dem Freisetzen von Antibiotika antwortet. Das ist noch reine Zukunftsmusik – erste Schritte auf dem Weg zu Materialien, die derart „vernünftig“ auf externe Reize reagieren, gibt es aber schon. Ein Beispiel, das aktuell in meiner Arbeitsgruppe erforscht wird, sind Materialien, die auf einen akuten epileptischen Anfall über eine äußere Steuerung mit der Freisetzung von antiepileptisch wirkenden Medikamenten reagieren.

## Mit Licht steuern

Eine zentrale Etappe auf dem Weg hin zu solchen intelligenten Materialien ist das Entwickeln von Materialien, die auf externe Reize wie Licht oder Temperatur reagieren. Man spricht von „responsiven Materialien“. Sie enthalten typischerweise responsive Moleküle, die auf externe Stimuli antworten. Ein Beispiel sind Azobenzol-Moleküle, die sich durch Licht verändern lassen. Sie existieren in zwei räumlichen Anordnungen: in einer lang gestreckten „trans“- und in einer angewinkelten „cis“-Konformation. Mit Licht unterschiedlicher Wellenlänge kann zwischen diesen beiden Konformationen hin- und hergeschaltet werden. Werden Azobenzole als individuelle Moleküle an Oberflächen gebunden, können die Bindungsprozesse mit diesem gezielten Hin- und Herschalten gesteuert werden. Azobenzole sind zudem erstaunlich photostabil, was gleich mehrere Millionen solcher lichtinduzierter Schaltzyklen ermöglicht – diese Eigenschaft macht die Moleküle auch für Anwendungen in der Biosensorik interessant.

Ein völlig anderes Potenzial entfalten Azobenzole, wenn sie als molekulares System in der Gruppe fungieren. Besonders spannend ist ihre Funktion als neuartige Antriebs-elemente, sogenannte molekulare Aktoren. Zu diesem Zweck können sie verwendet werden, weil Azobenzole

in der cis- und trans-Konformation unterschiedlich lang sind. Wenn das Azobenzol-Molekül von der trans- in die cis-Konformation wechselt, beträgt die absolute Längenänderung zwar nur 3,5 Ångström, was in etwa einem Drittel eines Nanometers entspricht – sie geht aber mit einer Verkürzung des Moleküls auf rund 60 Prozent einher. In ein geeignetes System eingebracht, macht es diese Verkürzung denkbar, das Azobenzol-Molekül als Aktor zu nutzen, der molekulare Maschinen und mikroskopische Bauteile antreibt.

### Weiche Roboter

Nicht ohne Grund wurde für das Design und die Synthese von derart photoschalterbasierten molekularen Maschinen im Jahr 2016 der Nobelpreis für Chemie vergeben – auch das zeigt die großen Chancen und Potenziale, die in der molekularen Ingenieurwissenschaft stecken. Man stelle sich nur folgendes Szenario vor: Molekulare Maschinen in Nanogröße regeln ebenso winzige Transportprozesse oder produzieren Nanoteilchen. Lichtsteuerbare Moleküle sind zudem auch für das Konzept der sogenannten weichen Robotik wichtig. Die weiche Robotik zielt darauf, die harten Materialien eines herkömmlichen Roboters durch weiche zu ersetzen. Photoschaltbare weiche Polymere könnten bei der Verwirklichung dieses Konzepts eine Schlüsselrolle einnehmen: Erste Experimente zeigen, dass das Einbringen von Photoschaltern in Polymere lichtsteuerbare Aktoren ermöglicht. Auf klassische Roboterelemente wie äußere Motoren könnte man dann völlig verzichten: Der Roboter ließe sich einfach durch Lichtimpulse steuern.

Eine Strategie ist es, lebende biologische Systeme in die Robotik zu integrieren. In solchen „biohybriden Robotersystemen“ werden Zellen als Aktoren eingesetzt: Muskelzellen beispielsweise üben Kraft auf ihre Umgebung aus – diese Kraft könnte auch verwendet werden, um robotische Systeme anzutreiben. Und dies wiederum setzt voraus, dass die Zellen in eine Matrix eingebettet sind, die es ihnen erlaubt, ihre zellulären Kräfte zu entwickeln und auf ein anderes System zu übertragen.

Mit den bereits beschriebenen intelligenten Materialien könnte die molekulare Ingenieurwissenschaft auch zu autonomen Reaktionen des Roboters beitragen. Ein wichtiger Beitrag hierzu wäre die Nachbildung des menschlichen Tastsinns: Ein mit dem menschlichen Tastsinn ausgestatteter weicher Roboter, etwa ein Pflegeroboter, könnte den Kontakt zwischen Mensch und Maschine angenehm und die Kontaktaufnahme zwischen Mensch und Roboter kontrollierbar gestalten.

### Bewegte Materialien

Ein in der wissenschaftlichen Literatur recht bekanntes Beispiel für ein bereits existierendes biohybrides Robotersystem ist der künstliche Stachelrochen. Das System besteht aus einer Matrix aus Silikon, auf der Herzmuskelzellen wachsen. Die Herzmuskelzellen sind gentechnisch so verändert, dass sie sich nur dann zusammenziehen und ihre Kraft ausüben, wenn Licht einfällt. Der kurze Lichtblitz löst die Kontraktion der Zellen aus, infolgedessen zieht sich die Oberfläche der Silikonschicht zusammen, was eine Bewegung bewirkt. Diese Bewegung sieht der Schwimmbewegung eines echten Rochens täuschend ähnlich – daher der Name „künstlicher Stachelrochen“.

Damit Muskelzellen kontrahieren können, sind elektrische Signale notwendig. Die Leitfähigkeit der Matrix, in der die Zellen wachsen, ist deshalb für viele Ansätze der biohybriden Robotik von großer Bedeutung. Es ist zu erwarten, dass die molekulare Ingenieurwissenschaft auch bei der Entwicklung solcher leitfähigen Materialien eine maßgebliche Rolle spielen wird. Ein Ziel könnte beispielsweise die Integration maßgeschneiderter kohlenstoffbasierter Nanomaterialien sein, die sich durch hohe Leitfähigkeit und genau definierbare mechanische Eigenschaften auszeichnen. An solchen lichtsteuerbaren robotischen Systemen forscht meine Arbeitsgruppe am IMSE: Wir versuchen in leitfähigen, lichtsteuerbaren Materialien dem Ziel näherzukommen, Greifbewegungen durch Zellkräfte zu erzeugen. Dabei untersuchen wir insbesondere, wie die mechanischen Eigenschaften der Muskelzellularumgebung



**PROF. DR. CHRISTINE SELHUBER-UNKEL** ist seit dem 1. Juli 2020 Professorin an der Fakultät für Chemie und Geowissenschaften der Universität Heidelberg, wo sie mit ihrer Arbeitsgruppe am neuen Institute for Molecular Systems Engineering (IMSE) an der interdisziplinären Schnittstelle von Chemie, Physik, Materialwissenschaft und Biologie forscht. Nach einem Physikstudium in Heidelberg und Uppsala (Schweden) wurde sie 2006 in Heidelberg in Physik promoviert und arbeitete anschließend als Postdoktorandin am Niels-Bohr-Institut in Kopenhagen (Dänemark). 2010 wurde sie Juniorprofessorin am Institut für Materialwissenschaft der Universität Kiel und leitete eine Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe. 2011 wurde Christine Selhuber-Unkel zur Professorin für „Biokompatible Nanomaterialien“ an der Universität Kiel ernannt und zwei Jahre später mit einem Starting Grant des Europäischen Forschungsrats (ERC) ausgezeichnet.

Kontakt: [christine.selhuber-unkel@uni-heidelberg.de](mailto:christine.selhuber-unkel@uni-heidelberg.de)

**„Durch Licht steuerbare Moleküle sind für das moderne Konzept der sogenannten weichen Robotik wichtig.“**

GROUP DYNAMICS

# BIOHYBRID ROBOTS AND INTELLIGENT IMPLANTS

CHRISTINE SELHUBER-UNKEL

In molecular systems engineering, tiny molecular and nanoscale components can be assembled into functional molecular systems. These systems can be fine-tuned to control the interactions of their individual components, creating novel properties that can accomplish specific tasks. These tasks can be microscopic or macroscopic in nature.

Strategies developed by molecular systems engineers might revolutionise conventional approaches in robotics, particularly in autonomous systems, paving the way for futuristic applications in our everyday lives. In this context, molecular systems engineering is predestined to innovate the field of human-machine-interactions: examples range from novel implantable materials for tissue engineering, where living components are combined with synthetic elements, to biohybrid robotic systems actuated by living components. ●

**“Molecules controlled  
by light are an  
important element of  
the modern  
concept of ‘soft robotics’.”**

**PROF. DR CHRISTINE SELHUBER-UNKEL** joined Heidelberg University's Faculty of Chemistry and Earth Sciences on 1 July 2020; at the new Institute for Molecular Systems Engineering (IMSE), she and her team conduct research at the intersection of chemistry, physics, materials science and biology. Prof. Selhuber-Unkel studied physics in Heidelberg and Uppsala (Sweden), earned her physics doctorate in Heidelberg in 2006 and worked as a postdoctoral researcher at the Niels Bohr Institute in Copenhagen (Denmark). In 2010 she was promoted to a junior professorship at the Institute for Materials Science at Kiel University and headed an Emmy Noether Junior Research Group. In 2011 Christine Selhuber-Unkel accepted the Professorship of Biocompatible Nanomaterials at Kiel University; two years later she received a Starting Grant from the European Research Council (ERC).

Contact: [christine.selhuber-unkel@uni-heidelberg.de](mailto:christine.selhuber-unkel@uni-heidelberg.de)

# „Biohybride Roboter könnten zahlreiche wichtige Aufgaben übernehmen, etwa in der Medizin oder in der Pflege.“

## An der Schnittstelle von Naturwissenschaften und molekularen Lebenswissenschaften

Das Institute for Molecular Systems Engineering (IMSE) der Universität Heidelberg ist ein neues interdisziplinäres Institut an der Schnittstelle der Naturwissenschaften und der molekularen Lebenswissenschaften, der Materialwissenschaften und des molekularen Engineerings. Es bildet einen zentralen Baustein der im Rahmen der Exzellenzstrategie etablierten Flagship-Initiative „Engineering Molecular Systems“. Hierbei stehen insbesondere Themen mit Anwendungsbezug der genannten interdisziplinären Bereiche im Vordergrund. Derzeit entsteht auf dem Campus Im Neuenheimer Feld ein Neubau für das IMSE mit physikalischen, chemischen, materialwissenschaftlichen und molekularbiologischen Laborräumen, dessen Fertigstellung im Laufe des Jahres 2021 geplant ist. Er wird im Süden das Gebäude des Centre for Advanced Materials (CAM) mit dem Neubau für das European Institute for Neuromorphic Computing (EINC) verbinden.

[www.imse.uni-heidelberg.de](http://www.imse.uni-heidelberg.de)

ihr Kontraktionsverhalten beeinflussen, zum Beispiel in den zuvor bereits erwähnten Hydrogelen. Eine besondere Herausforderung ist es hier, die mechanischen Eigenschaften eines Materials zu verändern und gleichzeitig eine starke Greifbewegung durchzuführen. Ein langfristiges Ziel bei diesem Projekt besteht natürlich auch darin, biosensorische Elemente zur Nachbildung des Tastsinns einzusetzen.

Die Vorstellung eines biohybriden Roboters, der von lebenden Muskelzellen angetrieben wird und mit menschlichem Tastsinn ausgestattet ist, mag nicht nur futuristisch, sondern auch ein wenig befremdlich erscheinen. Dennoch könnten solche Roboter äußerst nützlich sein, etwa dann, wenn sie anstelle des Menschen gefährliche Tätigkeiten ausführen. Womöglich könnten biohybride Roboter zahlreiche weitere wichtige Aufgaben übernehmen, etwa in der Medizin oder in der Pflege. Zweifelsohne müssen die ethischen Fragen solcher Anwendungen intensiv diskutiert werden: Die Zukunft wird zeigen, inwieweit es der Mensch erlauben wird, derartige Interaktionen mit Maschinen zuzulassen – und wo die Grenzen zu setzen sind. ●

M  
L  
O  
K  
E  
L  
A  
R  
U  
A  
E

M  
S  
H  
N  
A  
C  
I  
E  
N

MOLEKULARE MASCHINEN

# BLICK IN DIE PROTEINWERKSTÄTTEN DER ZELLE

ED HURT

**In jeder menschlichen Zelle finden sich rund eine Million kleiner Proteinfabriken, die Ribosomen. Die moderne Kryo-Elektronenmikroskopie erlaubt es nicht nur, den winzigen molekularen Maschinen bei der Arbeit zuzusehen, jüngst lieferte sie auch grundlegende Einblicke in den Herstellungsprozess der Ribosomen. Solche Erkenntnisse lassen auch die Ursachen von Krankheiten, etwa von Krebs, besser verstehen und auf eine gezieltere Behandlung hoffen.**

## U

Unablässig, ohne dass wir etwas davon bemerken, läuft in den Zellen unseres Körpers ein lebenswichtiger Prozess ab: die Herstellung von Proteinen. Der Organismus braucht die Eiweißstoffe überall und zu jeder Zeit für die vielfältigsten Aufgaben, ob als Bau-, Energie- und Transportstoffe oder als Enzyme für Stoffwechselreaktionen.

Proteine bestehen aus unterschiedlichen Aminosäuren, die sich nach den Bauanleitungen der Gene zu langen Ketten verbinden – ein Vorgang, der im Innern der Zellen in speziellen Proteinfabriken geschieht, den Ribosomen. Noch während des Synthese-Vorgangs in diesen kleinen zellulären Maschinen beginnen die langen Aminosäurefäden sich dreidimensional aufzufalten und erhalten dadurch ihre charakteristische, für die Funktion des Proteins wichtige

Gestalt. Für den Aufbau der Proteine verfügt der Körper über 20 Aminosäuren (beziehungsweise 21, wenn man Selenocystein hinzurechnet). Welche großen Möglichkeiten der Verknüpfung sich hieraus ergeben, zeigt ein simples Gedankenspiel: Schon bei einer Kettenlänge von nur 100 Aminosäuren bestehen  $20^{100}$  Varianten des Aneinanderreihens, was wiederum zu  $10^{130}$  verschiedenen Proteinen führt. Diese schier endlose Kombinationsmöglichkeit der Aminosäuren schafft ein unerschöpfliches Repertoire möglicher Proteine. In den Organismen auf unserer Erde, von den Bakterien über die Pflanzen und Tiere bis hin zum Menschen, sind aber „nur“ einige Millionen verschiedener Proteine verwirklicht.

Ein Bakterium ist mit rund 20.000 Ribosomen ausgestattet, jede menschliche Zelle verfügt im Schnitt über rund eine Million Miniaturproteinfabriken. Sie finden sich hauptsächlich im Zellplasma und haben einen Durchmesser von 25 Nanometern, das sind 0,000025 Millimeter. So winzig sie auch sind – Ribosomen gewährleisten nicht nur die mannigfaltigen Funktionen der Zellen, sondern auch die des gesamten Organismus. Doch wie stellt unser Körper die komplexen zellulären Miniaturanlagen her? Diese Frage ist seit jeher ein zentrales Thema der molekularen Zellbiologie. Woher kommen die Einzelbausteine für die Nanomaschinen? Wie werden sie angeliefert? Wer koordiniert und überwacht den Zusammenbau. Und wer gibt am Ende das Qualitätssiegel?

### Komplexe Miniaturanlagen

Als Bausteine für die Ribosomen dienen vier unterschiedlich lange Ribonukleinsäuren (ribosomale RNA). Sie bilden



**PROF. DR. ED HURT** wurde nach dem Studium der Biologie und Chemie 1983 an der Universität Regensburg promoviert. Anschließend forschte er als Postdoktorand am Biozentrum der Universität Basel (Schweiz), bevor er 1987 als Forschungsgruppenleiter an das European Molecular Biology Laboratory (EMBL) in Heidelberg wechselte. Nach seiner Habilitation wurde Ed Hurt 1995 auf eine Professur an die Universität Heidelberg berufen. Von 2003 bis 2005 leitete er das Biochemie-Zentrum der Universität Heidelberg (BZH). Für seine grundlegenden Beiträge zum Verständnis der molekularen Vorgänge in Zellen wurde Ed Hurt vielfach ausgezeichnet, unter anderem im Jahr 2001 mit dem Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft, dem höchstdotierten Forschungspreis Deutschlands. Seine Untersuchungen zur Anfangsphase der Entstehung von Ribosomen werden mit einem Advanced Grant des Europäischen Forschungsrats (ERC) in Höhe von rund zwei Millionen Euro gefördert.

Kontakt: ed.hurt@bzh.uni-heidelberg.de

### Forschung und Lehre zu molekularen Maschinen

Das Biochemie-Zentrum der Universität Heidelberg (BZH) wurde 1996 als vierte zentrale wissenschaftliche Einrichtung der Universität gegründet. Es vereint die Aktivitäten in biochemischer Forschung und Lehre der Fakultäten für Biowissenschaften sowie Chemie und Geowissenschaften und der Medizinischen Fakultät Heidelberg. Ziel der Forschung am BZH ist es, ein detailliertes mechanistisches und strukturelles Verständnis molekularer Maschinen zu erhalten. Aktuell sind 13 Forschungsgruppen am BZH angesiedelt sowie zwei Sonderforschungsbereiche: der SFB/TRR 83 „Molekulare Architektur und zelluläre Funktionen von Lipid/Protein-Komplexen“ und der SFB/TRR 186 „Molekulare Schalter in der Raum-Zeit-Kontrolle der zellulären Signaltransmission“. Geschäftsführender Direktor ist derzeit Prof. Dr. Michael Brunner.

[www.bzh.uni-heidelberg.de](http://www.bzh.uni-heidelberg.de)

das Grundgerüst und werden als „28S“- , „18S“- , „5.8S“- und „5S“-Ribonukleinsäuren bezeichnet (der Buchstabe „S“ steht für „Svedberg“, eine biochemische Größenkonstante). Als weitere Bauelemente dienen rund 80 verschiedene ribosomale Proteine, die hauptsächlich die Oberfläche des RNA-Gerüsts besiedeln. Zusammen mit der „Boten-RNA“, der „Transfer-RNA“ und weiteren sogenannten Translationsfaktoren lagern sich eine große (60S) und eine kleine (40S) ribosomale Untereinheit zur funktionsfähigen Proteinfabrik zusammen.

In Betrieb genommen stellen die Ribosomen nicht etwa unaufhörlich und unkontrolliert Proteine her, sondern unterliegen einer ausgeklügelten molekularen Steuerung. Das erlaubt es den Zellen, die Produktivität ihrer Proteinfabriken präzise zu kontrollieren, was äußerst wichtig ist, drohen doch bei Fehlsteuerungen schwere Krankheiten, etwa Krebs. Läuft alles normal, fabrizieren beispielsweise die Ribosomen in den Muskelzellen die Proteine Aktin und Myosin – sie sind unerlässlich für die Funktion der Muskulatur; in Blutvorläuferzellen sind Ribosomen an der Produktion des Blutfarbstoffs Hämoglobin beteiligt, dem Sauerstofftransporteur unseres Körpers; in Zellen der Bauchspeicheldrüse werden von den Ribosomen Enzyme gefertigt, ohne die Nahrung nicht verdaut werden kann.

Der genetische Bauplan schreibt für die Proteinproduktion unterschiedliche Größen vor: Ein Protein kann aus nur 50 Aminosäuren bestehen wie das blutzuckersenkende Hormon Insulin; es kann sich aber auch – wie das Muskelprotein Titin – aus bis zu 35.000 aneinandergereihten Aminosäuren zusammensetzen. Dementsprechend kurz oder lang sind die Produktionszeiten: Ein kleines Protein wird in nur wenigen Sekunden zusammengebaut, für die Konstruktion eines „Riesen“ wie Titin benötigt die Zelle einige Stunden.

### Molekulare Fossilien

Da die Ribosomen auch selbst Proteine enthalten, stellt sich dem zellbiologischen Forscher die Frage: Was war zuerst da, das Ribosom oder die Zelle?

Dass Zellen immer aus Zellen hervorgehen, weiß man schon lange. Die klassische „Ei-oder-Henne-Frage“ betrifft somit die Zeit, als das Leben auf unserem Planeten entstand. Das liegt schätzungsweise 3,8 Milliarden Jahre zurück. Schon die „Mutter aller Zellen“ war vermutlich bereits mit Ribosomen ausgestattet und hat durch eine niemals unterbrochene Zellteilungslinie bis zum heutigen Tag überlebt. Unser allererster Urahn war wahrscheinlich der primitive Vorläufer eines Bakteriums, „Luca“ genannt (Last Universal Common Ancestor): Alle heute lebenden Organismen sollen von Luca abstammen. Interessanterweise haben die Ribosomen heutiger Zellen noch immer Ähnlichkeiten mit denen von Luca – das macht Ribosomen zu „molekularen Fossilien“.

# „Die Biogenese der Ribosomen gehört zu den kompliziertesten und energieaufwendigsten Konstruktionsvorgängen in lebenden Zellen.“

All diese Vermutungen haben Wissenschaftler dazu veranlasst, die ersten evolutiven Prozesse beim Übergang von der unbelebten (abiotischen) in die biotische Welt im Reagenzglas nachzustellen. Die Forscher folgten dabei der Hypothese, dass das Leben auf unserer Erde in einer reinen „RNA-Welt“ – noch ganz ohne Proteine – entstanden ist. In dieser frühen Phase bildeten sich die vier Grundbausteine der RNA (Adenin, Guanin, Cytosin und Uracil) aus kleinen anorganischen Molekülen wie Kohlendioxid, Wasserstoff und Ammoniak in einer Art „Ursuppe“, einem Ozean oder Tümpel. Sie verknüpften sich – beschleunigt von der thermischen Energie der sich langsam abkühlenden Erde – zu kurzen RNA-Ketten. Einige dieser Ketten erlangten katalytische Aktivität und trieben Stoffwechselwege und Biosynthesen an, die sich parallel entwickelten, beispielsweise die Verknüpfung der ersten, noch einfach gebauten Aminosäuren zu Proteinen. Die Proteine wiederum lagerten sich an RNA-Moleküle an.

Aus dieser komplexen Gemengelage könnten sich die ersten primitiven Ribosomen gebildet haben, vermutlich abgeschottet von der Außenwelt in Lipidmembranvesikeln. Über weitere Zwischenstufen formten sich im Laufe der Evolution die Zellen der verschiedenen Organismen mit den heute typischen Bestandteilen einschließlich des Moleküls DNA als Träger der genetischen Information. Unterdessen behielten die Ribosomen ihren Grundbauplan unverändert bei – einmal erfunden, wurde an ihrem Bauprinzip nicht mehr gerüttelt. Dies gilt vor allem für das „Katalyse-Zentrum“ des Ribosoms: Als Katalysator knüpft dort die „nackte“ 28S-ribosomale RNA – frei von jeglichem Protein – neu eintreffende Aminosäuren an die wachsende Proteinkette. Dieser Umstand hat zum Begriff „Ribozym“ geführt: Er drückt aus, dass als Katalysator nicht – wie sonst üblich – ein Enzym auf Proteinbasis, sondern die RNA fungiert. Die vom Ribozym vermittelte Herstellung

der Proteine ist seit jeher eine Hauptstütze für die Hypothese von der ursprünglich reinen RNA-Welt – erst später übernahmen die Enzyme vom Proteintyp die Herrschaft.

## Modellieren wie ein Bildhauer

Seit geraumer Zeit wollen wir mit unseren Forschungsarbeiten am Biochemie-Zentrum der Universität Heidelberg klären, wie die Ribosomen in den heutigen Zellen zusammengesetzt werden. Diese Arbeiten finden auch im Rahmen meines „ERC Advanced Grant“ statt und werden für einen Zeitraum von fünf Jahren vom Europäischen Forschungsrat (ERC) unter dem Titel „Encapsulated Eukaryotic Ribosome Assembly“ gefördert. Was uns in erster Linie interessiert, sind die frühen Zwischenstufen des Zusammenbaus der Ribosomen: Die vorläufigen Ribosomen erscheinen noch wie grobe Klötze, sie sind weit entfernt vom Aussehen der reifen Ribosomen. Schon bald aber beginnen diverse Umwandlungs- und Reifungsprozesse, ein modellierender Schaffensprozess, der vergleichbar ist mit der Arbeit eines Bildhauers, der aus einem unbehauenen Marmorblock eine feingliedrige Skulptur erschafft – etwa wie Michelangelo seine Pietà.

Die Biogenese der Ribosomen zählt zu den kompliziertesten Gestaltungsprozessen in lebenden Zellen. Mehr als 200 Helferproteine arbeiten an der Vollendung des funktionsfähigen Ribosoms im Mikrokosmos mit: Um sichtbar zu machen, was im Nanobereich im Innern der Zelle geschieht, bedarf es eines hochauflösenden Instruments, des Kryo-Elektronenmikroskops, das atomare Strukturen darstellen kann. Diese moderne Methode der Kryo-Elektronenmikroskopie hat es uns schließlich erlaubt, das Fertigen der Ribosomen in einer Klarheit nachzuvollziehen, die zuvor unvorstellbar war.

Man kann die Fertigung der Ribosomen auch mit dem Zusammenbau eines Automobils an einem Fließband

# „Man kann die Fertigung der Ribosomen auch mit dem Zusammenbau eines Automobils an einem Fließband vergleichen, an dem viele Monteure arbeiten.“

vergleichen, an dem viele Monteure arbeiten. Wie das künftige Automobil durchläuft das Vorläufer-Ribosom verschiedene Montagestufen in diversen Werkshallen: Die erste Fertigungsstation ist das Kernkörperchen (Nukleolus) im Zellkern, die zweite die Kerngrundsubstanz (Nukleoplasma), wobei schon hier diverse Qualitätskontrollen erfolgen. Das fast fertige Ribosom wird aus dem Zellkern in das Zellplasma exportiert. Dort erhält es seinen letzten Schliff. Wenn es sich als fehlerfrei erwiesen und das Gütesiegel des „Zell-TÜVs“ erhalten hat, kann das fertige Ribosom mit seiner Aufgabe, der Proteinproduktion, beginnen.

In den vergangenen Jahren ist es uns gelungen, elementare Schritte des Entstehens von Ribosomen im Reagenzglas zu rekonstruieren. Dafür nutzten wir eine breite Palette von Methoden aus Genetik, Biochemie und Strukturbiologie. Die Fertigung des Ribosoms wird, wie bereits erwähnt, von zahlreichen Helferproteinen vermittelt: Mit maßgeschneiderten Werkzeugen bearbeiten sie das noch unfertige Ribosom, entfernen Überflüssiges oder fügen angelieferte Bauteile an der korrekten Stelle ein. Ein wichtiger molekularer Fertigungsschritt sieht beispielsweise so aus: Die verschiedenen ribosomalen RNA-Moleküle (18S, 5.8S, 28S) sind noch zu einer langen Vorläuferkette verbunden; jetzt gilt es, die einzelnen Moleküle herauszuschneiden und an ihren Enden zurechtzustutzen. Ähnlich wie Michelangelo den Marmorblock mit Hammer und Meißel modellierte, nutzen die Helferproteine molekulare Werkzeuge, um die ribosomale Vorläufer-RNA von überhängenden Enden (5'-ETS und 3'-ETS) und internen Einschüben (ITS1 und ITS2) zu befreien, die für das reife Ribosom unbedeutend sind.

Eine unserer früheren Mitarbeiterinnen, Dr. Lisa Fromm, hat ein Werkzeug – eine Art molekulares Skalpell – entdeckt, das für diese Art der Arbeit höchst geeignet ist: Mit diesem „Skalpell“ (eine sogenannte „Endonuklease“) wird das interne Verbindungsstück „ITS2“ an einer Stelle zunächst präzise angeschnitten und danach von weiteren enzymatisch-aktiven Werkzeugen so lange zurechtgefeilt, bis nur noch die reife ribosomale RNA übrig ist. Alle molekularen Werkzeuge der Helferproteine sind eng aufeinander abgestimmt; manche liegen gebündelt vor wie die Einzelteile eines Schweizer Taschenmessers: mit einer Klinge für den präzisen Schnitt, einer Schere, die überflüssige RNA-Bausteine abzwackt oder einer Feile für den Feinschliff. Es hat sich gezeigt, dass viele der Helferproteine nur vorübergehend aktiv sind, dabei aber einem präzisen zeitlichen Ablauf folgen. Nach getaner Arbeit verlassen sie das Vorläufer-Ribosom, um der nächsten Gruppe von „Monteuren“ Platz zu machen.

Gemeinsam mit Strukturbiologen um Prof. Dr. Roland Beckmann von der Ludwig-Maximilians-Universität

MOLECULAR MACHINES

# THE CELLULAR PROTEIN FACTORY

ED HURT

Our body contains countless tiny molecular machines that drive the cells to perform their various functions, up to and including the maintenance of the entire organism. How our body manufactures these molecular machines has always been a central question in molecular cell biology. Ribosomes, which act as protein factories and undertake the synthesis of all cellular proteins and enzymes, are quite large, complex and numerous, with about a million of them working in a typical human cell.

Where do the individual components of these nano-machines come from, how are they delivered and, most importantly, who coordinates and monitors the assembly process and ultimately “stamps” them with the seal of approval? Fundamental insights into ribosome assembly were recently provided by cryo-electron microscopy, which, in conjunction with biochemistry and genetics, gives us an idea of the mechanisms behind this incredibly complex cellular assembly process. These insights can help us better understand the molecular causes of certain diseases (including cancer) that involve an altered or defective ribosome production. ●

PROF. DR ED HURT studied biology and chemistry and earned his PhD at the University of Regensburg in 1983. He then worked as a postdoctoral researcher at the University of Basel's Center for Molecular Life Sciences (Switzerland) before moving to the European Molecular Biology Laboratory (EMBL) as head of a research group in 1987. Following his habilitation, Ed Hurt accepted a professorship at Heidelberg University in 1995. From 2003 to 2005, he headed the Heidelberg University Biochemistry Center (BZH). Ed Hurt has received numerous awards for his vital contributions towards clarifying molecular assembly processes in cells, among them the 2001 Gottfried Wilhelm Leibniz Prize of the German Research Foundation, the most highly endowed research award in Germany. His long ongoing investigations regarding the mechanisms of ribosome assembly were recently funded by an Advanced Grant of the European Research Council (ERC) to the amount of roughly two million euros.

Contact: ed.hurt@  
bzh.uni-heidelberg.de

**“The process of ribosome assembly is not unlike a car being put together by an immense number of workers standing in an assembly line.”**

München konnten wir einige der beschriebenen Montageschritte mittels Kryo-Elektronenmikroskopie auch bildlich darstellen. Damit ist es gelungen, nahezu jedes Helferprotein sichtbar zu machen, das am Vorläufer-Ribosom werkelt; gelegentlich ließ sich sogar ein Helferprotein „in Aktion“ einfangen, etwa dann, wenn es gerade dabei war, einzelne RNA-Nukleotid-Bausteine des Vorläufer-Ribosoms zu bearbeiten. Viele solcher „Schnappschüsse“ des heranreifenden Ribosoms haben wir zwischenzeitlich chronologisch geordnet und sind damit unserem Traum einen entscheidenden Schritt näher gekommen: ein Dokumentarfilm, der in zehn bis 20 Minuten zeigt, wie eine molekulare Maschine entsteht – das ist genau die Zeit, die die Zelle braucht, um ein Ribosom herzustellen.

Aber noch weitere überraschende Ergebnisse erbrachten unsere strukturellen Untersuchungen. Die ribosomale RNA scheint beispielsweise im frühesten Vorläufer-Ribosom an manchen Stellen noch gar nicht richtig gefaltet vorzuliegen. Vermutlich ist sie deshalb von einer schützenden Proteinschale umschlossen: Es scheint, als sollten äußere störende Einflüsse ferngehalten werden, damit sich die Nanomaschine ungestört entwickeln kann. Als wir untersuchten, wie das 90S-Vorläufer-Ribosom die RNA einkapselt, um sie vor unerwünschten Außenkontakten zu bewahren, zeigte sich: Eines der Helferproteine – eine sogenannte RNA-Helikase – löst unter Energieverbrauch vorläufige RNA-Strukturen auf, damit sich diejenigen RNA-Kontakte einstellen können, die für das funktionsfähige Ribosom essenziell sind.

#### **Neue Medikamente gegen Krebs**

Solche detaillierten Einblicke in die Geburtsstube der Ribosomen lassen uns nicht nur nachvollziehen, wie die lebenswichtigen Miniaturproteinfabriken von der Zelle zusammengebaut werden. Sie lassen uns auch besser verstehen, wie dieser Vorgang mit anderen elementaren zellulären Prozessen wie dem Zellzyklus, dem Zellwachstum und der Differenzierung von Zellen verwoben ist. Und das wiederum verhilft uns zu wichtigen Einsichten in die molekulare Entwicklung von Krankheiten, etwa von Krebs, und wie Krankheiten wirksamer begegnet werden kann. Sich rasch teilende Krebszellen etwa haben einen enorm hohen Bedarf an Ribosomen. Womöglich könnte ein geeigneter Hemmstoff die in Krebszellen krankhaft angeheizte Ribosomenproduktion zügeln. Derzeit suchen wir mit Computerhilfe („virtual screening“) nach kleinen organischen Substanzen, die imstande sind, die Komplexbildung zweier Helferproteine zu unterbinden, die unerlässlich für das Herstellen von Ribosomen in menschlichen Zellen ist. Eventuell lassen sich diese Hemmstoffe zu neuartigen Arzneien gegen Krebs weiterentwickeln. ●

„Die Einblicke  
in die Geburtsstube  
der Ribosomen  
lassen auf ein besseres  
Verständnis  
der molekularen  
Entwicklung  
von Krankheiten wie  
Krebs hoffen.“

**SOFT**

**MACHINES**

SOFT MACHINES

# WAS WIR VON BIOLOGISCHEN ZELLEN LERNEN KÖNNEN

ULRICH SCHWARZ

**Anders als die meisten von Menschen gemachten Maschinen bestehen biologische Zellen nicht aus harten, sondern aus weichen Materialien. Wie aber können solche „Soft Machines“ ihre Aufgaben robust, präzise und reproduzierbar ausführen? Das Wissen darüber, wie die Natur weiche Stoffe für ihre vielfältigen Zwecke nutzt, lässt sich auch für Anwendungen nutzen, beispielsweise für die Konstruktion weicher Roboter.**

# D

Der menschliche Körper besteht aus der unvorstellbar großen Anzahl von  $3 \times 10^{13}$  Zellen, die sich während der Embryonalentwicklung durch wiederholte Teilungen aus einer einzigen befruchteten Eizelle entwickelt haben. Danach nimmt der Körper einen relativ stabilen Zustand ein. Nichtsdestoweniger werden aber auch dann noch in unserem Körper in jeder Sekunde rund zehn Millionen neue Zellen gebildet. Die meisten Neuproduktionen sind rote Blutzellen, die eine Lebenszeit von rund 120 Tagen haben, sowie die Zellen der Haut und des Darms, von denen manche nur wenige Tage überdauern. Im stabilen Zustand ist der Körper also im „Fließgleichgewicht“: Das Erzeugen und das Verschwinden von Zellen heben sich genau auf.

Menschliche Zellen haben eine typische Größe von zehn Mikrometern und lassen sich mit einem einfachen Lichtmikroskop gut beobachten. Ihre Unterstrukturen aber sind

mit zehn bis 100 Nanometern deutlich kleiner. Zu diesen winzigen Gebilden zählen die zellulären Verpackungs- und Transportsysteme oder das Zellskelett, ein aus Proteinfasern aufgebautes Netzwerk, das der Zelle mechanische Stabilität verleiht, ihr aber auch Formveränderungen und aktive Bewegung erlaubt. War man früher auf das Elektronenmikroskop angewiesen, wenn man Strukturen im Nanometerbereich beobachten wollte, kann man heute den innerzellulären Strukturen mit der supraaufgelösten Lichtmikroskopie live bei der Arbeit zusehen – dank neuer Methoden, für deren Entwicklung der Heidelberger Physiker Stefan Hell 2014 gemeinsam mit zwei Kollegen den Nobelpreis für Chemie erhielt. Alle bisherigen Beobachtungen zeigen, dass in der Zelle eine extrem dynamische Situation herrscht und es auch innerhalb der Zellen fortwährend zu Umorganisationen kommt. Und da alle beteiligten Strukturen aus weichen Materialien bestehen, stellt sich die Frage: Wie kann die Zelle ihre wichtigen Funktionen mit derart weichen Materialien überhaupt robust, präzise und reproduzierbar ausführen?

## Was genau ist „weiche Materie“?

Aus dem Alltag sind uns weiche Materialien vor allem als Lebensmittel bekannt, beispielsweise als Quark, Joghurt oder Ketchup. Weitere Alltagsbeispiele sind Dispersionsfarben oder Klebstoffe. Weiche Materialien nehmen einen physikalischen Zustand ein, der zwischen einem Festkörper (etwa einem Kristall) und einer Flüssigkeit (beispielsweise Wasser) liegt. Weil weiche Materie auf einer großen

Zeitskala wie eine Flüssigkeit fließen kann, spricht man auch von „komplexen Flüssigkeiten“. Auf einer kleinen Zeitskala hingeben verhält sich weiche Materie elastisch, worauf sich der Begriff „viskoelastische Materialien“ bezieht. Während harte Materie wie Metall oder hartes Plastik eine typische Steifigkeit im Bereich von Gigapascal (1 GPa =  $10^9$  Pa) hat, misst man weiche Materie typischerweise mit Kilopascal (1 kPa =  $10^3$  Pa). Weiche Materie ist also um sechs Größenordnungen weicher als harte Materie.

Das wichtigste Beispiel für weiche Materie sind wir selbst beziehungsweise unsere Zellen, die einen typischen elastischen Modulus von Kilopascal haben. Aber mit welchen weichen Materialien baut die Zelle ihre Strukturen? Da wir im dreidimensionalen Raum leben und Zellen sich von der Umwelt abgrenzen sollten, muss es eine zweidimensionale geschlossene Schicht geben, die die Zelle definiert. Für diesen Zweck haben sich in der Natur die „Lipidmembranen“ durchgesetzt, dünne zweilagige Schichten aus Lipiden (Fetten), in die verschiedene Proteine eingelassen sind. Lipidmembranen definieren nicht nur die äußere Grenze von Zellen, sondern auch viele ihrer inneren Räume (Kompartimente), insbesondere die zellulären Transportvesikel. Solche Vesikel bestehen aus einer Lipidmembran, die sich zu einer Kugel geschlossen hat. Um Formveränderungen zu bewirken, kann die Zelle auf Prozesse zurückgreifen, welche die Membran intrinsisch krümmen. Eine Alternative ist es, Strukturen zu nutzen, die von außen auf die Membran drücken und sie auf diese Weise verformen.

Das wird am besten von Polymeren bewerkstelligt, Kettenmolekülen, die von der Zelle schnell auf- und auch wieder abgebaut werden können. In menschlichen Zellen wird diese Art von Dynamik vor allem vom Strukturprotein Aktin bewirkt, einem Bestandteil des Zellskeletts. Mit diesen Polymeren und mit ihren Lipidmembranen verfügt die Zelle über zwei sehr mächtige Systeme der weichen Materie.

Die hohe Dynamik der Lipidmembranen und Polymere kann heute sehr gut vermessen werden: Eine typische Zelle schnürt selbst im Ruhezustand pro Sekunde etwa 100 Vesikel in ihr Inneres ab und polymerisiert Tausende von Aktinstäbchen mit einer Wachstumsgeschwindigkeit von 0,2 Mikrometern pro Sekunde, was etwa 100 neuen Aktinmonomeren pro Stäbchen und Sekunde entspricht. Diese hohe Dynamik der zellulären Membranen und Polymere ist beeindruckend, aber nicht verwunderlich. Das Leben ist ein kontinuierlicher Materialfluss: ein „eingefrorenes System“ könnte nicht auf äußere Einflüsse reagieren, es könnte sich nicht bewegen und nicht replizieren – mithin nicht leben. Physikalisch betrachtet sind diese Formveränderungen unvermeidlich, weil unsere Zellen bei einer relativ hohen Körpertemperatur arbeiten. Die kinetische Energie ihrer Bestandteile ist demzufolge sehr hoch. Tatsächlich verlieren Lipidmembranen und Aktinpolymere schon bei einer Länge von rund einem Mikrometer ihre anfänglich eingeschlagene Richtung, weil zufällige Zusammenstöße mit Bestandteilen der Umgebung sie stark verformen.

**„Die hohe Dynamik in der Zelle ist sowohl aus biologischen wie aus physikalischen Gründen notwendig.“**

### Entstehung, Rolle und Aufdeckung von Struktur

Die Frage, wie in komplexen Systemen aus dem Zusammenspiel vieler Komponenten neue Phänomene entstehen können, ist das Thema des Exzellenzclusters „STRUKTUREN: Emergenz in Natur, Mathematik und komplexen Daten“. Das Themengebiet des von den Fakultäten für Physik und Mathematik gemeinsam getragenen Exzellenzclusters reicht von der subatomaren Teilchenphysik bis zur Kosmologie und von der fundamentalen Quantenphysik bis zur Neurowissenschaft. In sieben „Comprehensive Projects“ forschen rund 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Physik, Mathematik und Informatik. Anwendungsgebiete für ihre Fragestellungen sind beispielsweise Quanten- oder neuromorphe Computer, die Rechnungen ausführen können, welche traditionellen Computern nicht möglich sind, oder Strukturbildungsprozesse in der Astro- oder Biophysik, die ebenfalls auf dem Zusammenspiel vieler Bestandteile beruhen.

Das Exzellenzcluster wurde im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder an der Universität Heidelberg eingerichtet. Beteiligt sind neun Universitätsinstitute sowie die Max-Planck-Institute für Astronomie (MPIA) und Kernphysik (MPIK) in Heidelberg, das Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS) und das Zentralinstitut für seelische Gesundheit (ZI) in Mannheim. Sprecher sind Prof. Dr. Manfred Salmhofer (Institut für Theoretische Physik), Prof. Dr. Anna Wienhard (Mathematisches Institut) und Prof. Dr. Ralf S. Klessen (Zentrum für Astronomie).

[www.thphys.uni-heidelberg.de/~structures](http://www.thphys.uni-heidelberg.de/~structures)

### Kontrolle durch Rückkopplung

Die hohe Dynamik in der Zelle begründet sich also sowohl biologisch wie physikalisch. Will man nun die Frage beantworten, wie ein derart dynamisches System imstande ist, die für die zellulären Lebensfunktionen wichtigen Prozesse zuverlässig auszuführen, gilt es zwei Aspekte zu beachten. Zum einen reden wir stets von einer Vielzahl von Prozessen. Das heißt: Das einzelne Ereignis ist weniger wichtig als die statistischen Eigenschaften des Gesamtsystems. Wie aus der statistischen Physik bekannt ist, wird mit einer größer werdenden Anzahl von Ereignissen ihr Durchschnitt sehr scharf – genau das ist die Basis der Thermodynamik, die die Materialeigenschaften makroskopischer Systeme beschreibt. Die oben beschriebene hohe Zahl an Umorganisationen führt also dazu, dass das System als Ganzes ein klar definiertes durchschnittliches Verhalten hat. Noch wichtiger ist aber ein zweiter Aspekt: Formveränderungen der weichen Materie werden in biologischen Systemen

# „Formveränderungen der weichen Materie werden in biologischen Systemen typischerweise von Rückkopplungsprozessen kontrolliert.“

typischerweise von Rückkopplungsprozessen kontrolliert; die Veränderung der Form wird also kontinuierlich überwacht und bei Bedarf nachgesteuert. Während es für diese Aufgaben in normalen Maschinen normalerweise zwei getrennte Einheiten gibt, nämlich die Sensoren („Fühler“) und die Aktuatoren („Stellglieder“), so sind in der Zelle diese Aufgaben nicht immer klar voneinander getrennt: In der Regel sind sie in einem System eng miteinander verbunden. Bei der Verformung der biologischen Membran etwa entsteht eine mechanische Spannung, die wiederum biochemische Prozesse anstößt, die noch stärkere Verformungen bewirken. Dadurch entsteht eine nicht-lineare Rückkopplungsschleife, die schnelle und dauerhafte Formveränderungen erlaubt.

### Die Physik der weichen Materie

Die weiche Materie wurde lange als ein physikalisches System betrachtet, für das mathematisch exakte Gesetze nur schwer zu formulieren sind. Das hat sich seit den 1980er-Jahren geändert; im Jahr 1991 erhielt der französische Physiker Pierre-Gilles de Gennes für seine theoretischen Beiträge zur Physik der weichen Materie den Nobelpreis. Heute wenden wir die mathematische Theorie für die Dynamik von Membranen und Polymeren routinemäßig auf Probleme der Biophysik und der Zellbiologie an. Dabei zeigt sich: Die dynamischen Formveränderungen,

die wir in biologischen Zellen beobachten können, folgen klaren physikalischen Regeln – wenn man beachtet, dass man eine statistische Beschreibung wählen muss und dass die physikalischen Gesetze von biochemischen Kontrollvorgängen überlagert werden.

Unsere Arbeitsgruppe untersucht diesen Themenkomplex mit Konzepten und Methoden der theoretischen Physik. Wir verbinden beispielsweise mathematische Gleichungen für die Mechanik von weicher Materie mit Reaktions-Diffusions-Gleichungen für biochemische Kontrollsysteme und vergleichen unsere Vorhersagen dann mit den Ergebnissen experimenteller Arbeiten. Gemeinsam mit Kollegen aus Chicago konnten wir so beispielsweise in quantitativer Weise zeigen, wie die Krafterzeugung von Zellen im engen Kontakt mit einer weichen Umgebung gesteuert wird, indem die entsprechenden biochemischen Signale mit Licht kontrolliert wurden. In Zusammenarbeit mit Kollegen

#### Designermaterie nach dem Vorbild der Natur

Ein stark interdisziplinärer Ansatz verfolgt das gemeinsam von der Universität Heidelberg und dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) getragene Exzellenzcluster „3D Matter Made to Order“ (3DMM2O), das Natur- und Ingenieurwissenschaften verbindet. Es beschäftigt sich mit der Frage, wie man digitale Blaupausen durch additive Fertigung – insbesondere 3D-Druck – in Designermaterie mit gewünschter Funktion umsetzen kann. Eine wichtige Motivation ist dabei das Vorbild biologischer Systeme, die Moleküle auf der Nanometerskala zusammensetzen können, um damit gewünschte Funktionen auf der Zell- oder Gewebeebene zu erzielen. Für Anwendungen mit biologischen Systemen ist es das langfristige Ziel, industriell fabrizierte Werkstoffe und lebende Systeme miteinander zu integrieren, indem beispielsweise organotypische Systeme durch 3D-gedruckte Strukturen kontrolliert werden. Ziel ist die vollständige Digitalisierung der 3D-Fertigung und -Materialverarbeitung.

Das Exzellenzcluster wurde im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder eingerichtet. Sprecher sind Prof. Dr. Martin Wegener vom KIT und Prof. Dr. Uwe Buz von Organisch-Chemisches Institut der Universität Heidelberg. Ein zentrales Strukturelement ist die HEiKA Graduiertenschule „Functional Materials“, die Masterstudierende, Doktorandinnen und Doktoranden in das Forschungsgebiet einbindet. HEiKA steht für die Heidelberg Karlsruhe Strategic Partnership, die alle gemeinsamen bilateralen Aktivitäten des KIT und der Universität Heidelberg umfasst.

[www.3dmattermadetoorder.kit.edu](http://www.3dmattermadetoorder.kit.edu)

vom European Molecular Biology Laboratory (EMBL) in Heidelberg konnten wir nachweisen, wie biochemische Signale die Verformung und den hydrodynamischen Fluss in Eizellen von Seesternen steuern. Zusammen ergeben viele solcher Projekte und Erkenntnisse ein neues Bild der Zelle als weiche Maschine. Während die Präzision und die Robustheit von molekularen Prozessen in der Zelle schon lange zum Begriff der „molekularen Maschinen“ geführt haben, beispielsweise für die Ribosomen (siehe den Beitrag von Ed Hurt ab S. 24), fangen wir jetzt mithilfe der Physik der weichen Materie an zu verstehen, wie die für das Leben so wichtige Präzision und Robustheit auch auf der zellulären Skala erreicht wird.

Für ein umfassendes Verständnis der weichen Materie in biologischen Systemen gilt es, das Wissen verschiedener Fachbereiche einzubeziehen. Aus diesem Grund arbeiten an der Universität Heidelberg auf diesem Gebiet unterschiedliche Forschungsgruppen eng zusammen, was insbesondere für die beiden Exzellenzcluster „STRUKTUREN“ und „3D Matter Made to Order“ gilt, die 2019 ihre Arbeit aufgenommen haben. In „STRUKTUREN“ untersuchen wir beispielsweise gemeinsam mit Mathematikern, wie modernste methodische Entwicklungen im Bereich der Modellierung mit finiten Elementen verwendet werden können, um biophysikalische Modelle für mechanisch vermittelte zelluläre Rückkopplungsschleifen in Computermodellen zu implementieren. Ein Ziel der Forschungsarbeiten in „3D Matter Made to Order“ ist es, das Verhalten von Zellen und Zellverbänden mit dreidimensional gedruckten Designerumgebungen zu kontrollieren. Für Einzelzellen sind die Methoden, die es erlauben, das Verhalten der Zelle in strukturierten Umgebungen vorherzusagen, bereits gut etabliert. Nun sollen mathematische Modelle helfen, auch größere Zellverbände durch Designerumgebungen zu kontrollieren, beispielsweise um die Funktionalität einer so komplexen zellulären Struktur wie der Netzhaut (Retina) in Zellkultur zu erreichen.

#### Faszinierende neue Anwendungen

Viele der Projekte benötigen noch grundlegende Entwicklungsarbeit. In der angewandten Physik und in den Ingenieurwissenschaften aber gibt es schon jetzt neue praktische Anwendungen, die nach dem Vorbild der weichen biologischen Systeme entwickelt wurden. Beispiele sind auf Vesikelbasis hergestellte künstliche Zellen, dreidimensional gedruckte weiche Metamaterialien oder „weiche Roboter“, die im Unterschied zu herkömmlichen Robotern nicht aus Metall, sondern aus weichem Plastik bestehen. Wie die weichen Materialien in der Zelle, zeigen weiche Roboter schon unter kleinen Kräften große Formveränderungen. Auch in den menschengemachten „Soft Machines“ gibt es – ebenfalls nach dem Vorbild der Zellen – nicht unbedingt eine klare Trennung



**PROF. DR. ULRICH SCHWARZ** ist seit 2009 Professor für Theoretische Physik an der Universität Heidelberg mit den Arbeitsgebieten Statistische Physik, Physik der weichen Materie und Theoretische Biophysik. Seine Arbeitsgruppe ist sowohl am Institut für Theoretische Physik als auch am BioQuant-Zentrum für Quantitative Biologie angesiedelt. 1998 wurde Ulrich Schwarz nach einem Physikstudium in Freiburg, Baltimore (USA) und München am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam promoviert. Nach einem zweijährigen Forschungsaufenthalt am Weizmann-Institut in Israel leitete er eine Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), erst in Potsdam und ab 2005 in Heidelberg am Zentrum für Modellierung und Simulation in den Biowissenschaften (BIOMS). 2008 wurde er als Professor für Theoretische Biophysik an das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berufen. Ulrich Schwarz ist Mitglied verschiedener Heidelberger Initiativen an den Schnittstellen zwischen Physik, Mathematik, Biologie und Materialwissenschaften, insbesondere der Exzellenzcluster „STRUKTUREN“ und „3DMM2O“ sowie der Max Planck School Matter to Life. Von 2011 bis 2013 war er Sprecher des Fachverbands „Biologische Physik“ der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, seit 2020 ist er Mitglied im Fachkollegium „Biophysik“ der DFG.

Kontakt: [schwarz@thphys.uni-heidelberg.de](mailto:schwarz@thphys.uni-heidelberg.de)

SOFT MACHINES

# WHAT WE CAN LEARN FROM BIOLOGICAL CELLS

ULRICH SCHWARZ

The human body consists of  $3 \times 10^{13}$  cells that undergo constant renewal, in some cases with lifetimes of a few days only. Inside each cell, every second hundreds of bubble-like compartments move from the outer membrane into the cell to import molecules, and thousands of polymers are assembled to build an internal skeleton for mechanical stability. Each of these transformations involves rapid self-assembly and large deformations. In view of these amazing dynamics, we must ask ourselves how these processes are controlled so as to ensure reliable and precise cell function. How do these “soft machines” achieve the same level of control as man-made machines?

To answer this question, we need a rigorous theory of soft matter, which earlier has been deemed impossible. Today soft matter physics is a large and mature research field that investigates “all things squishy”, e.g. membranes, polymer solutions and networks, colloidal dispersions and liquid crystals. Our group applies these methods to a wide range of problems related to the mechanics and adhesion of biological cells. From this we learn how nature achieves its exquisite control over soft matter. First, one must consider the statistics of many reorganisation events: while each event in itself might have a random component, averaging the sum of all events reveals a clear system response. Second, reorganisations of membranes and polymers in cells are always controlled by biochemical or mechanical feedback loops.

At Heidelberg, several large initiatives support projects at the intersection of physics, biology and engineering that aim to better understand how biology uses the laws of physics to realise structures and functions that are superior to man-made systems. While our focus is on providing a fundamental understanding and mathematical models for life and life-like processes, we also have a strong interest in applications such as molecular machines, synthetic cells or soft robots. ●

PROF. DR ULRICH SCHWARZ has held a chair for Theoretical Physics at Heidelberg University since 2009, specialising in statistical physics, soft matter physics and theoretical biophysics. His research group is part of both the Institute for Theoretical Physics and the BioQuant Center for Quantitative Analysis of Molecular and Cellular Biosystems. Ulrich Schwarz studied physics in Freiburg, Baltimore (USA) and Munich and earned his PhD at the Max Planck Institute of Colloids and Interfaces in Potsdam in 1998. After a two-year research stay at the Weizmann Institute in Israel, he headed an Emmy Noether Junior Research Group of the German Research Foundation, first in Potsdam and from 2005 on in Heidelberg at the Center for Modeling and Simulation in the Biosciences (BIOMS). In 2008 he accepted a professorship for theoretical biophysics at the Karlsruhe Institute of Technology (KIT). Ulrich Schwarz is a member of various Heidelberg initiatives at the intersection of physics, mathematics, biology and materials science, including the Excellence Clusters STRUCTURES and 3DMM20 and the Max Planck School Matter to Life. From 2011 to 2013 he was the speaker of the division “Biological Physics” of the German Physical Society, and in 2020 he was elected into the review panel “Biophysics” of the German Research Foundation.

Contact: schwarz@  
thphys.uni-heidelberg.de

**“Soft machines  
can be under-  
stood and built  
using physical  
methods.”**

### Simulation lebensähnlicher Prozesse

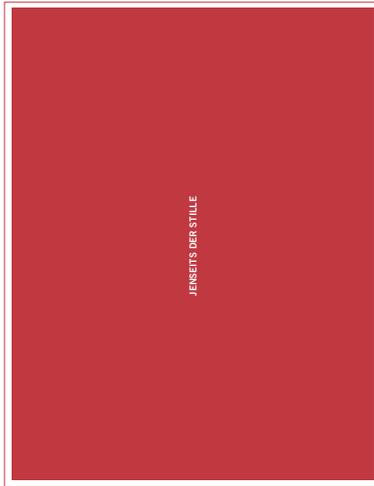
Was genau ist Leben aus physikalisch-chemischer Sicht? Können lebensähnliche Prozesse, Funktionen und Objekte im Labor simuliert werden? Wie können aus Molekülen und Materialien lebensähnliche Systeme gebaut werden, das heißt Systeme, welche in ihren Funktionen Zellen, Zellnetzwerke und Organismen ähneln? Diesen grundlegenden Fragen widmet sich die Max Planck School Matter to Life, ein gemeinsames Forschungs- und Ausbildungsnetzwerk der Universitäten Heidelberg und Göttingen, der Technischen Universität München und des DWI Leibniz-Instituts für Interaktive Materialien in Aachen sowie mehrerer Max-Planck-Institute, darunter das Heidelberger MPI für medizinische Forschung. Letzteres hat zusammen mit der Universität Heidelberg die Sprecherfunktion der Max Planck School Matter to Life. Matter to Life bündelt verteilte Exzellenz in einem innovativen Forschungsfeld, das sich mit der Konstruktion lebensähnlicher Prozesse und Systeme beschäftigt.

Das forschungsnahe Ausbildungsprogramm steht Bachelor-Absolventen aus den Fachbereichen Chemie, Physik, Biologie, Biochemie, Biotechnologie und Materialwissenschaften offen, die bereits im Laufe des Studiums eigenständige Forschungsprojekte verfolgen können. Nach erfolgreich abgeschlossener Masterarbeit können sie ihre Labortätigkeit während eines Doktorandenstudiums fortsetzen. Die insgesamt drei neuen Max Planck Schools, die 2019 starteten, stellen eine neue Art der Kooperation in der Graduiertenausbildung dar und werden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung für eine Pilotphase von fünf Jahren mit insgesamt neun Millionen Euro pro Jahr gefördert.

[www.maxplanckschools.de/de/matter-to-life](http://www.maxplanckschools.de/de/matter-to-life)

von Sensoren und Aktuatoren. Stattdessen werden beide direkt miteinander verbunden. Ein Beispiel ist das Design von weichen Plastikstrukturen, die unter mechanischem Druck eine Knickinstabilität durchlaufen und in eine vollkommen neue Konfiguration einrasten. Die dafür nötigen Einzelteile können mittels 3D-Druck hergestellt und beispielsweise genutzt werden, um neue Strukturen mit wenig Energie rasch auf- und ebenso schnell wieder abzubauen. Solcherart faszinierende Anwendungen sind keine unrealistischen Wunschträume. Die Natur selbst zeigt uns in vielerlei Hinsicht, dass solche weichen Maschinen prinzipiell möglich sind und mit physikalischen Methoden verstanden und gebaut werden können. ●

**„Weiche Maschinen können mit physikalischen Methoden verstanden und gebaut werden.“**



OHRENHEILKUNDE  
**JENSEITS DER STILLE**  
HÖREN KÖNNEN MIT ELEKTRONISCHEN PROTHESEN  
MARK PRAETORIUS & KURT STEINMETZGER

42



EXPERIMENTELLE NEUROREHABILITATION  
**MIT GEDANKEN STEuern**  
NEUROPROTHESEN ALS MENSCH-  
MASCHINE-SCHNITTSTELLE  
RÜDIGER RUPP

50



INTERDISZIPLINÄRE ALTERNSFORSCHUNG  
**INTELLIGENTE ALLIANZEN**  
ASSISTENZROBOTER FÜR MEHR  
LEBENSQUALITÄT IM ALTER  
KATJA MOMBAUR, ALEXANDER SCHUBERT & HANS-WERNER WAHL

58



ARBEITS- UND ORGANISATIONSPSYCHOLOGIE  
**MIT DEM LAPTOP IM BETT**  
DIGITALE ARBEITSWELT UND GESUNDHEIT  
KARLHEINZ SONNTAG

66

# KAPITEL



JENSEITS DER STILLE

JENSEITS DER STILLE

# HÖREN KÖNNEN MIT ELEKTRONISCHEN PROTHESEN

MARK PRAETORIUS & KURT STEINMETZGER

**Eine Welt ohne Töne und Musik – für die meisten Menschen unvorstellbar, für taube Menschen Realität. Allerdings keine zwangsläufig unveränderbare Realität: Denn mit Cochlea-Implantaten – elektronischen Prothesen, die die Funktion der beschädigten Teile des Innenohrs übernehmen – können sogar Kinder, die ohne Hörsinn zur Welt gekommen sind, und Erwachsene mit erworbenem Hörverlust (wieder) hören. Für ältere Menschen steigt damit die Lebensqualität, weil sie mit neuer Qualität am Sozialleben teilnehmen können; für Kinder mit hochgradigen Hördefiziten kann es bedeuten, dass sich ihr Sprech- und Sprachvermögen altersgemäß und weitgehend normal entwickelt.**

**„Ein  
Cochlea-Implantat  
kommt infrage,  
wenn herkömmliche  
Hörgeräte  
kein ausreichendes  
Sprachverstehen  
mehr ermöglichen.“**

# N

„Nicht sehen können trennt von den Dingen, nicht hören können von den Menschen.“ Dieser Satz wird Immanuel Kant zugeschrieben; auch die taubblinde amerikanische Schriftstellerin Helen Keller soll ihn verwendet haben. Sie erkrankte im Alter von 19 Monaten an Hirnhautentzündung und verlor daraufhin ihr Seh- und Hörvermögen. Heute könnte Helen Keller womöglich ein Cochlea-Implantat dazu verhelfen, wieder hören zu können.

Normalerweise funktioniert der Hörsinn so: Das Ohr nimmt Schallwellen auf, und druckempfindliche Zellen – die Haarzellen des Innenohrs (Cochlea) – wandeln die mechanischen Reize in elektrische Nervensignale um. Ein Cochlea-Implantat, eine elektronische medizinische Prothese, kann den Signalweg von der Aufnahme des Schalls bis hin zum Erzeugen des Nervensignals ersetzen und die Funktion beschädigter Teile des Innenohrs übernehmen. Das Implantat besteht aus einer äußeren und einer inneren Komponente: Der äußere, sichtbare Teil enthält Mikrofon und Stromversorgung zur Signalverarbeitung, der innere, unsichtbare Teil sitzt unter der Haut im Bereich der Schläfe. Von dort reicht ein Elektrodenträger bis zur Cochlea, wo der zum Gehirn führende Hörnerv elektrisch stimuliert wird. Dass das Implantat den Hörsinn ersetzen kann, verdanken wir der natürlicherweise strengen Zuordnung der Tonhöhen in den unterschiedlichen Abschnitten des Innenohrs. Der Frequenzumfang, der mit einem Implantat zu erzielen ist, lässt sich deshalb schon vorab abschätzen; selbst ein nur teilweise im Hochtonbereich ausgefallenes Innenohr lässt sich heute mit einem geeigneten Elektrodenträger versorgen.

Ein Cochlea-Implantat kommt immer dann infrage, wenn das Hören bei einem Menschen in einem Maß beeinträchtigt ist, dass herkömmliche Hörgeräte kein ausreichendes Sprachverständnis mehr ermöglichen. Voraussetzung ist, ein gravierendes Hördefizit frühzeitig zu erkennen – das gilt vor allem für Kinder. Schon seit dem Jahr 2009 gibt es ein bundesweites Neugeborenen-Hörscreening; in Heidelberg offeriert das „Dietmar-Hopp-Stoffwechsellzentrum“ am Universitätsklinikum seit 2019 die Möglichkeit, unklare Ergebnisse der Hörtests bis zur endgültigen Abklärung nachzuverfolgen. Wurde bei einem Kind ein Hördefizit festgestellt, steht an erster Stelle die Versorgung mit einem

Hochleistungshörgerät. Zeigt sich daraufhin innerhalb der ersten sechs Lebensmonate keine ausreichende Reaktion des Hörsinnes, ist nach weiteren Untersuchungen die Versorgung mit einem Cochlea-Implantat geboten: Wenn die Implantation der Hörprothese vor dem ersten Geburtstag des Kindes erfolgt, können wesentliche Funktionen der natürlichen Hörbahn noch zeitgerecht ausreifen; ein Regelschulbesuch ist diesen Kindern später meist ohne weitere Einschränkungen möglich.

Die zweite Gruppe von Betroffenen, die von einem Cochlea-Implantat profitieren kann, bilden Menschen, die den Hörsinn erst nach dem Erwerb der Lautsprache verloren haben. Der Maßstab für die Versorgung mit einem Cochlea-Implantat ist dabei nicht Taubheit im Sinne eines „Überhaupt-nicht-mehr-hören-Könnens“ – es ist vielmehr ein in Mitleidenschaft gezogenes Sprachverständnis, das zur sozialen Teilhabe nicht mehr ausreicht. Wenn ein Patient trotz Hörgerät im Sprach-Hörtest nurmehr die Hälfte oder noch weniger der gesprochenen Worte versteht, ist das Implantat für ihn oft eine gute Option. Das gilt auch dann, wenn nur ein Ohr vom Hördefizit betroffen ist. Viele der uns selbstverständlich erscheinenden Fähigkeiten – etwa das Richtungshören oder das Verstehen von Sprache in lauter Umgebung – beruhen darauf, dass unsere beiden Ohren unabhängig voneinander funktionieren. Nur dann können wir unterschiedliche Laufzeiten des Schalls oder seine unterschiedliche Dämpfung zur Orientierung nutzen.

### Schnittstelle zwischen Maschine und Mensch

Um die Schnittstelle zwischen Maschine und Mensch – also zwischen Elektrodenträger und Hörnerv – optimal zu gestalten, sind viele Arbeitsschritte und viele unterschiedliche Disziplinen erforderlich. In Heidelberg wird das im ambulanten Rehabilitationszentrum für Cochlea-Implantate realisiert: Audiologen passen regelmäßig die Stimulationsparameter an, Logopäden und Psychologen unterstützen die Patienten, hinzu kommen zahlreiche auditherapeutische Angebote. Als erste Einrichtung bundesweit ist das Heidelberger Zentrum von der Deutschen Gesellschaft für Audiologie als zertifiziertes audiologisches Zentrum anerkannt worden. Es war auch beteiligt an der Entwicklung eines Algorithmus, der es erleichtern soll, den Patienten das Cochlea-Implantat anzupassen: Bereits während der Operation erfolgende Messungen charakterisieren, wie Implantat und Hörnerv zusammenspielen; die auf diese Weise gewonnenen Ergebnisse und ermittelten Schwellenwerte können wertvolle Hinweise geben für weitere Optimierungen und den anzustrebenden Stimulationsrahmen.

Eine wichtige Aufgabe im Zentrum ist es, ältere Patienten zu beraten. Sie stellen häufig die Frage: „Lohnt sich das überhaupt noch?“ Darauf können wir eine eindeutige Antwort geben: Ja, es lohnt sich. In welchem Ausmaß



**APL. PROF. DR. MARK PRAETORIUS** leitet seit dem Jahr 2005 die damals neu eingerichtete **Sektion Otologie und Neuro-Otologie** der Hals-, Nasen- und Ohrenklinik am Universitätsklinikum Heidelberg und lehrt als **außerplanmäßiger Professor** an der Medizinischen Fakultät Heidelberg der Universität Heidelberg. In seiner **Habilitation** beschäftigte er sich mit der **Genherapie des Innenohres**, worüber er in **Baltimore und Kansas City (USA)** geforscht hat. Sein aktueller **klinischer und wissenschaftlicher Schwerpunkt** liegt in der **Diagnose, Therapie und Rehabilitation von Hörstörungen aller Altersgruppen**. Dies schließt **höverbessernde Operationen, implantierbare Hörsysteme und Cochlea-Implantate** ein.

Kontakt: [mark.praetorius@med.uni-heidelberg.de](mailto:mark.praetorius@med.uni-heidelberg.de)

# „Wird ein Hördefizit bei Kindern frühzeitig erkannt und werden sie rechtzeitig mit einem Cochlea-Implantat versorgt, können wesentliche Funktionen der natürlichen Hörbahn noch zeitgerecht ausreifen.“

auch ältere Patienten von einem Implantat profitieren können, wissen wir aus einer Befragung von Patienten, die nach ihrem 80. Geburtstag mit einem Cochlea-Implantat versorgt worden sind: In der „Cochlea-Implantat-Gruppe“ zeigte sich im Vergleich zur herkömmlichen Versorgung mit einem Hörgerät ein deutlich verbessertes Sprachverstehen. Das bessere Verstehen von Sprache stellte sich meist schon drei Monate nach der ersten Aktivierung des Implantats ein und ging einher mit einer erheblich gesteigerten Lebensqualität. Das Mehr an Lebensqualität ist der intensiveren sozialen Teilhabe geschuldet: Die Betroffenen müssen in Gesprächen nicht ständig nachfragen, die Kommunikation fällt leichter.

Ein Cochlea-Implantat kommt auch dann infrage, wenn ein Mensch einen Hörsturz erlitten hat, das Hörvermögen des einen Ohres bis hin zur „sozialen Ertaubung“ betroffen ist, das zweite Ohr jedoch noch ausreichend hört. Die Befragung unserer Patienten zeigte auch hier ein positives Bild: Nach der Versorgung mit dem Implantat ist den Betroffenen das Richtungshören deutlich besser möglich, ebenso das Sprachverstehen – und zwar sowohl für das

Verstehen von Sprache in ruhiger Umgebung als auch bei Störgeräuschen, was der alltäglichen Wirklichkeit eher entspricht. Auch subjektiv bewerteten die Patienten in unserer Befragung das wiedererlangte Hören mit beiden Ohren als positiv.

## Hörrehabilitation bei Neugeborenen

Eine besondere Herausforderung ist die Hörrehabilitation von Neugeborenen, die im Hörtest auffällig geworden sind: Sie können keine differenzierte Rückmeldung geben, die dabei hilft, ein Cochlea-Implantat optimal anzupassen. Die Diagnose wird auch dadurch erschwert, dass neuro-wissenschaftliche Untersuchungen mit einem Cochlea-Implantat prinzipiell nur eingeschränkt durchführbar sind: Die Implantate enthalten metallische Bauteile, Messungen mit der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) sind wegen der dabei auftretenden starken Magnetfelder nicht möglich. Eine objektivierte Beurteilung des erreichten Hörerfolgs – ohne Rückmeldung des Patienten – wäre nicht nur im Fall von Neugeborenen und kleinen Kindern wünschenswert, sie würde auch generell einen Fortschritt im klinischen Alltag darstellen.



DR. KURT STEINMETZGER ist seit November 2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Sektion Biomagnetismus der Neurologischen Klinik am Universitätsklinikum Heidelberg. Zuvor promovierte er am University College London (Großbritannien) über das Thema der Sprachwahrnehmung mit normalem Gehör sowie bei Menschen, die aufgrund von Ertaubung ein Cochlea-Implantat tragen. Mit Unterstützung der Dietmar Hopp Stiftung erforscht er derzeit, wie sich die Gehirnaktivität beim Hören mit intakten Ohren und Cochlea-Implantaten unterscheidet, um damit die Diagnostik und Therapie bei gravierenden Hörschädigungen zu unterstützen.

Kontakt: [kurt.steinmetzger@med.uni-heidelberg.de](mailto:kurt.steinmetzger@med.uni-heidelberg.de)

BEYOND SILENCE

# OVERCOMING DEAFNESS WITH ELECTRONIC PROSTHESES

MARK PRAETORIUS &amp; KURT STEINMETZGER

Deafness severely limits the scope and quality of human social interactions. If the cause is damage of the inner ear, hearing can be restored with a cochlear implant (CI). These devices are surgically implanted and directly stimulate the auditory nerve via a cable inserted into the cochlea. The inner part of the CI is magnetically connected to an outer part, which processes the acoustic input and looks somewhat like a hearing aid. If a person understands less than half the number of words in the absence of any background noise, they will usually benefit from a CI. This applies to subjects of all age groups and even in case of unilateral deafness, where an implant can restore spatial hearing.

A second group of patients, besides adults who lost their hearing over the course of their life, are children born without hearing. For these children, it is crucial that implantation take place as early as possible, ideally before their first birthday. If this time frame is met, they will often be able to acquire language and have a normal school career. However, especially in small children, it is very difficult for the clinician to know whether an implantation was successful, as verbal responses cannot yet be given. An objective evaluation of their hearing based on brain activity measurements would thus represent a significant step forward.

This endeavour is complicated by the fact that CIs contain metal parts and are thus incompatible with several neuroscientific methods, such as magnetic resonance imaging. In contrast, functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) permits an unrestricted investigation of CI-based hearing. By shining infrared light into the brain, we can measure which brain areas are activated by acoustic input. In a project funded by the Dietmar Hopp Stiftung, we are currently using this method to evaluate and monitor the hearing of younger and older CI users, hoping that our results can support and improve the rehabilitation of their hearing. ●

ADJUNCT PROF. MARK PRAETORIUS became head of the then-new Otology and Neuro-Otology Unit of Heidelberg University Hospital's Department of Otorhinolaryngology in 2005 and is an adjunct professor at Heidelberg University's Medical Faculty Heidelberg. The topic of his habilitation thesis was gene therapy of the inner ear, for which he conducted research in Baltimore and Kansas City (USA). His current clinical and scientific focus is the diagnosis, therapy and rehabilitation of hearing impairments in patients of all age groups, including corrective hearing surgery, implantable hearing systems and cochlea implants.

Contact: mark.praetorius@  
med.uni-heidelberg.de

DR KURT STEINMETZGER joined Heidelberg University Hospital in November 2017 as a postdoctoral researcher in the Department of Neurology's Biomagnetism Unit. He earned his doctorate at University College London (UK) with a thesis on speech perception with normal hearing and in individuals who wear a cochlea implant due to hearing loss. With the support of the Dietmar Hopp Stiftung, he is currently investigating the differences in brain activity between people with normal hearing and those with cochlea implants in order to improve the diagnosis and therapy of severe hearing impairments.

Contact: kurt.steinmetzger@  
med.uni-heidelberg.de

**“The key to a successful use of cochlea implants is neuroplasticity – the brain’s fascinating ability to change and adapt throughout an individual’s life.”**

# „Die Grundlage für den Erfolg von Cochlea-Implantaten ist die Neuroplastizität – die faszinierende und lebenslange Anpassungsfähigkeit des Gehirns.“

Die „funktionelle Nahinfrarotspektroskopie“ ist eine neue neurowissenschaftliche Methode, die es erlaubt, Cochlea-Implantat tragende Personen uneingeschränkt, schmerzfrei, geräuschlos und ohne längere Vorbereitungszeit zu untersuchen: Lichtquellen auf einer Stoffhaube, die über den Kopf gezogen werden kann, senden Infrarotlicht in Richtung Gehirn. Hirnregionen, die aktiv und demzufolge stärker durchblutet sind, absorbieren das Infrarotlicht stärker. Die funktionelle Nahinfrarotspektroskopie lässt sich zudem mit der konventionellen Ableitung der Hirnströme (Elektroenzephalogramm, EEG) kombinieren. Das führt zu Ergebnissen von hoher räumlicher und zeitlicher Präzision. Dank Unterstützung der Dietmar Hopp Stiftung konnte inzwischen ein kombiniertes System erworben werden, das nun in einem mehrjährigen gemeinsamen Projekt der Hals-Nasen-Ohren-Klinik mit der Neurologischen Klinik der Universitätsklinik Heidelberg eingesetzt wird.

## **Faszinierende Anpassungsfähigkeit des Gehirns**

Während dieses Projektes haben wir mit dem kombinierten System bereits über zwanzig erwachsene Personen untersucht. Allen diesen Patienten ist gemeinsam, dass sie auf einem Ohr noch weitgehend normal hören, auf dem anderen Ohr aber taub und aufgrund dessen mit einem Cochlea-Implantat versorgt worden sind. Während unserer Untersuchung haben wir den Patienten die gleichen Klänge dargeboten – und zwar einmal dem intakten Ohr und einmal dem mit dem Implantat versorgten Ohr. Das hat es uns erlaubt, das normale akustische Hören mit dem „elektrischen“ Implantat-Hören zu vergleichen.

Es zeigte sich, dass die Hirnareale, die beim akustischen und elektrischen Hören aktiviert werden, weitgehend über-

einstimmen. Der zeitliche Verlauf der Hirnaktivierung beim Hören mit dem Implantat erwies sich jedoch als deutlich verzögert. Nichtsdestoweniger ist das Gehirn in der Lage, das neue elektrische und das gewohnte akustische Hören zu einer Einheit zu verschmelzen: Die Fusion der unterschiedlichen Sinneseindrücke gelingt bereits nach einer Eingewöhnungszeit von wenigen Monaten. Diese faszinierende Anpassungsfähigkeit des Gehirns, seine „Neuroplastizität“, ist grundlegend für das Funktionieren der Cochlea-Implantate. Über die Lebensspanne hinweg nimmt die Neuroplastizität zwar ab – unsere Ergebnisse zeigen aber, dass das Gehirn selbst im gehobenen Erwachsenenalter noch zu dieser Leistung fähig ist.

Wir hoffen, den Verlauf der Anpassungsleistung des Gehirns nachvollziehen zu können, indem wir Kinder, die mit einem Cochlea-Implantat versorgt wurden, nach der Operation in regelmäßigen Abständen untersuchen. Dabei gehen wir von folgender Annahme aus: Eine über die Zeit hinweg schrittweise zu messende Angleichung der Hirnaktivierung von Cochlea-Implantat tragenden Kindern an die Hirnaktivierung von normal hörenden Kindern spiegelt eine positive Entwicklung wider und signalisiert den Erfolg der Implantation. Ergeben die Untersuchungen indes, dass eine solche Angleichung und positive Entwicklung ausbleibt, könnte frühzeitig darauf reagiert werden, beispielsweise, indem man die Kinder gezielt fördert und den Therapiekreislauf intensiviert.

Auf dieser Basis wollen wir eine Brücke von unseren grundlagenwissenschaftlichen Arbeiten zur klinischen Praxis bauen. Das Ziel dabei ist, die Hörrehabilitation tauber Kinder aktiv zu begleiten und optimal zu unterstützen. ●

**MIT  
GEDANKEN  
STEUERN**

MIT GEDANKEN STEUERN

# NEUROPROTHESEN ALS MENSCH- MASCHINE-SCHNITTSTELLE

RÜDIGER RUPP

**Die Diagnose Querschnittlähmung bedeutet für die Betroffenen massive Einschränkungen ihrer Bewegungsfähigkeit bis hin zur vollständigen Lähmung. Zu ihren vordringlichsten Wünschen gehört es, wieder ihre Hände gebrauchen zu können – ein Wunsch, den die Forschung in der „Experimentellen Neurorehabilitation“ an der Klinik für Paraplegiologie der Universität Heidelberg umsetzen will: Elektronische Systeme, die mit dem Nervensystem interagieren, können gelähmten Menschen wieder zu Bewegungen verhelfen. Das ultimative Ziel solcher Mensch-Maschine-Schnittstellen ist die direkte Gedankensteuerung.**

# „Die Signale der Hirnareale, die für eine Bewegung zuständig sind, verändern sich schon dann, wenn man sich die Bewegung vorstellt.“

# Q

„Querschnittlähmung – das Ende“, so titelte die Boulevardpresse, als Samuel Koch im Jahr 2010 in der Sendung „Wetten, dass ...?“ vor laufenden Kameras bei einem waghalsigen Sprung über ein fahrendes Auto stürzte und sich das Genick brach. In Deutschland muss die Diagnose Querschnittlähmung jährlich rund 2.000 Mal gestellt werden, zumeist aufgrund von Verkehrs-, Arbeits- oder Haushalts- und Sportunfällen, aber auch wegen Entzündungen, Tumoren oder Rückenmarksinfarkten. Für die Betroffenen sind die Konsequenzen dramatisch: Alle Bewegungen unterhalb der Verletzungsstelle sind beeinträchtigt, die Sensibilität der Körperbereiche ist gestört. Selbst autonome Funktionen, allen voran die Blasen- und Darmkontrolle, funktionieren nicht mehr wie zuvor. Besonders schwer trifft es Menschen, deren Halsmark geschädigt wurde. Dann ist die Bewegung aller Gliedmaßen eingeschränkt – bis hin zur vollständigen Lähmung. Welcher Verlust an Lebensqualität damit einhergeht, mag die Antwort des ehemaligen Superman-Darstellers Christopher Reeve andeuten, der nach einem Reitunfall im Jahr 1995 vom Hals abwärts bewegungsunfähig war. Im Interview mit dem „Time Magazine“ antwortete er auf die Frage, was die größte Umstellung in seinem Leben nach der Rückenmarksverletzung gewesen sei: „Obviously

my new life means adjusting to the fact that I can never be alone“ („Offensichtlich bedeutet mein neues Leben, dass ich mich mit der Tatsache arrangieren muss, nie wieder allein sein zu können.“)

## Sich wieder bewegen können

An einer ursächlichen Therapie der Rückenmarkschädigung arbeiten viele Forschergruppen weltweit – eine Heilung indes ist nach heutigem Kenntnisstand nicht in Sicht. Bei einigen Patienten lassen sich verlorene Körperfunktionen mit einem intensiven physio- und ergotherapeutischen Training zurückgewinnen. Die neurobiologische Grundlage dafür ist die Fähigkeit des zentralen Nervensystems (auch des Rückenmarks), sich lebenslang umstrukturieren und lernen zu können. Der Fachmann spricht von „Neuroplastizität“. Je schwerer aber die Verletzung des Nervensystems ist, desto ausgedehnter ist die Lähmung – und desto geringer ist das neurologische und funktionelle Erholungspotenzial. Dennoch bleiben selbst nach schweren Verletzungen noch Strukturen des Rückenmarks intakt, etwa Nervenzellen (Neuronen) unterhalb der Verletzungsstelle, deren Fortsätze als periphere Nerven die Muskeln von Armen und Beinen versorgen. Spätestens seit den Experimenten des italienischen Naturforschers Luigi Galvani mit Fröschen wissen

wir, dass motorische Nerven und die von ihnen angesteuerten Muskeln mit elektrischen Impulsen zur Kontraktion ange-regt werden können. Diese Erkenntnis nutzt die moderne Funktionelle Elektro-stimulation für „Neuroprothesen“, mit denen Menschen mit Querschnittlähmung dazu verholfen werden soll, sich wieder bewegen zu können. Aus einer Umfrage der Christopher & Dana Reeve Foundation ging hervor, dass sich die Betroffenen vor allem wünschen, wieder ihre Hände gebrauchen zu können. Dies zu erreichen, ist ein Schwerpunkt unserer Forschungsarbeiten in der Sektion „Experimentelle Neurorehabilitation“ der Klinik für Paraplegiologie der Universität Heidelberg mit dem Ärztlichen Direktor Prof. Dr. Norbert Weidner.

Eine „Greifneuroprothese“ ist für das Er-zeugen verschiedener Griffmuster konzi-piert, vor allem aber für den Schlüssel- und Zylindergriff. Mit dem Schlüsselgriff (Dau-men bewegt sich auf die gebeugten Finger) lassen sich flache Gegenstände greifen, etwa eine Gabel oder ein Stift. Der Zylin-dergriff (der abgespreizte Daumen bewegt sich in Richtung Zeigefinger) erlaubt es, größere Gegenstände zu greifen, etwa ein Glas. Greifneuroprothesen werden den Nutzern individuell angepasst, wobei sieben unterschiedlich große Elektroden, die über eine leitfähige Gelschicht verfügen, an bestimmten Stellen auf die Ober- und Unterseite des Unterarms geklebt werden. Die Elektroden für den Daumen-muskel haben einen Durchmesser von drei Zentimetern, für den Fingerstrecker und Fingerbeuger messen sie vier mal sechs Zen-timeter. Von Nachteil ist, dass sich die Elektroden nur schwer korrekt auf Ober- und Unterarm platzieren lassen. Ein aus Neopren gefertigter Unterarmärmel (Elektrodenhandschuh), in den die Elek-troden und Kabel eingebettet sind, kann den Nutzern und ihren Pflegepersonen das umständliche tägliche Anbringen der Elektroden erleichtern.

Ein Schulterpositionssensor bildet bei der Greifneuroprothese die Mensch-Maschine-Schnittstelle: Über das Vor und Zurück beziehungsweise Auf und Ab der gegenüber-liegenden Schulter werden der Grad des Handschließens beziehungsweise Hand-

öffnens und die Greifkraft gesteuert. Diese Steuerung muss der Nutzer langwierig erlernen. Wir versuchen deshalb, noch er-haltene, an der Handfunktion beteiligte Bewegungen in die Mensch-Maschine-Schnittstelle einzubeziehen. Ist es dem Nutzer beispielsweise noch möglich, die Hand zu heben, bietet sich anstelle des Positionssensors an der Schulter ein Biege-sensor an, der den Grad des Handhebens am Handgelenk misst und den Daumen- und Fingerschluss intuitiv steuert.

### Positive Erfahrungen

Die Klinik für Paraplegiologie der Univer-sität Heidelberg ermöglicht es Menschen mit Querschnittlähmung seit dem Jahr 2013, Greifneuroprothesen in der „Ambulanz Obere Extremität bei Querschnittlähmung“ zu testen. Die seither gemachten Erfah-rungen zeigen: Bei etwa der Hälfte der Be-troffenen, denen es nicht mehr möglich war, die Hand zu benutzen, gelang es, den Schlüssel- und Zylindergriff mithilfe der Greifneuroprothese wiederherzustellen. Als Ausschlusskriterien erwiesen sich Schä-digungen der motorischen Nervenzellen im Bereich der Verletzungsstelle sowie eine aufgrund von Spastiken eingeschränkte Ge-lenkbeweglichkeit. Die maximalen Kräfte, die mit der Greifneuroprothese erzeugt werden können, reichen aus, um typische Alltagsaufgaben zu erledigen, etwa einen Krug Wasser anzuheben und ein Glas Wasser einzuschwenken. Einer derart erfolg-reichen Anwendung geht allerdings ein bis zu zwölfwöchiges häusliches Elektro-stimulationstraining zum Aufbau und Stärken der Muskulatur voraus.

Bei allem, was bereits erreicht wurde – eine Reihe ungelöster Probleme bleibt. Den Nutzern von Greifneuroprothesen bereitet vor allem das alltägliche Anziehen und korrekte Platzieren der Elektroden Probleme. Bei Drehungen des Handgelenks können sich die Elektroden verschieben, und auf-grund des geänderten Stromflusses kann es zu unerwünschten Stellungen der Finger oder zu Kraftverlust kommen, vor allem in dem für die Greiffunktion wichtigen Daumen. Wegen des mit der Querschnitt-lähmung einhergehenden Sensibilitäts-verlusts spüren die Betroffenen nicht, wie stark sie mit der Hand zugreifen. Und

schließlich gilt es, die Bedienung der Pro-thesen zu verbessern: Sie verlangt dem Nutzer eine ständige hohe Aufmerksamkeit ab und sollte intuitiver handhabbar sein.

Im Rahmen des europäischen „More-Grasp-Projekts“ ([www.moregrasp.eu](http://www.moregrasp.eu)) haben wir entscheidend dazu beitragen können, bisherige Probleme zu beheben. Fehlplatzierungen der Elektroden etwa versuchen wir mit einem „Multielek-trodenarray“ zu verhindern, das aus kleinen Einzelelektroden von je zwölf Millimeter Durchmesser besteht. Die Einzelelektroden lassen sich zu einer größeren Verbund-elektrode zusammenschalten und inner-halb des Arrays elektronisch „verschieben“. Tests zeigen, dass die Nutzer damit in die Lage versetzt werden können, die Elek-troden nach Anlegen des Ärmels selbst optimal zu positionieren. Die Messung der Rotation des Handgelenks erlaubt zudem eine dynamische Kompensation von Elek-troden- und Hautverschiebungen. Auf diese Weise lassen sich stabile Greifmuster erreichen. All diese Anpassungen laufen automatisiert ab: Der Nutzer muss sich nicht darum kümmern und kann sich auf die Greifaufgabe konzentrieren. Zusätz-liche Elektroden, die auf Körperregionen mit erhaltener Sensibilität, etwa auf Ober-arm oder Schulter, aufgebracht werden, können dem Nutzer die aktuelle Greifkraft rückmelden. Aus der Handprothetik ist bekannt, dass die Rückmeldung der Greif-kraft oder Handstellung ein wesentlicher Faktor für eine erhöhte Nutzerakzeptanz ist.

### Vorstellung von Bewegung

Das ultimative Ziel einer intuitiven Mensch-Maschine-Schnittstelle ist die direkte Gedankensteuerung. Dann sind keine Hilfs-bewegungen wie die der Schulter mehr notwendig; auch Menschen mit schweren Lähmungen und wenig erhaltenen Rest-funktionen könnten mit ihren Gedanken technische Assistenzsysteme steuern. Die Steuerung von Greifneuroprothesen auf der Basis von nicht-invasiven Gehirn-Computer-Schnittstellen – sogenannte Brain-Computer-Interfaces (BCIs) – ent-wickeln wir seit rund zwei Jahrzehnten zusammen mit Prof. Gernot Müller-Putz vom „Institute for Neural Engineering“ der Technischen Universität Graz in

# „Wir konnten zeigen, dass es Nutzern grundsätzlich möglich ist, eine Greifneuroprothese allein durch die gedankliche Vorstellung einer Handbewegung zu steuern.“

Österreich. Doch wie können Brain-Computer-Interfaces bei Querschnittgelähmten überhaupt funktionieren?

Die Signale der Hirnareale, die für eine Bewegung zuständig sind (primärer Motor-kortex), verändern sich nicht nur, wenn die Bewegung ausgeführt wird, sondern schon dann, wenn man sich die Bewegung vorstellt. Im Zustand der Ruhe feuern die Nervenzellen des primären Motor-kortex eher im Gleichtakt – bei einer Bewegungsvorstellung hingegen werden die Aktivierungsmuster zunehmend asynchron. Diese Veränderungen können mithilfe von Oberflächenelektroden im Elektroenzephalogramm (EEG) registriert und von einem Computer nach einer Anlernphase an die individuellen Nutzergegebenheiten in Echtzeit detektiert werden. Daraus lässt sich ein Schaltsignal generieren. Wir konnten zeigen, dass es Nutzern grundsätzlich möglich ist, eine Greifneuroprothese allein durch die gedankliche Vorstellung einer Handbewegung zu steuern. Den alltäglichen Einsatz von Brain-Computer-Interfaces erschweren allerdings zwei Probleme: zum einen treten bei etwa einem Viertel der Menschen natürlicherweise nur geringe Signalmodulationen bei einer Bewegungsvorstellung auf; zum anderen kann es bei Personen mit einer schwachen Signalmodulation häufig



**PRIVATDOZENT DR. ING. RÜDIGER RUPP** hat im Jahr 1996 nach dem Studium der Elektrotechnik die Sektion „Experimentelle Neurorehabilitation“ der Klinik für Paraplegiologie des Universitätsklinikums Heidelberg aufgebaut. Nach der Promotion am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Jahr 2008 wurde ihm 2018 die „Venia Legendi“ im Fach „Experimentelle Neurologie“ der Universität Heidelberg verliehen. Seine Hauptforschungsinteressen gelten gedankengesteuerten Greifneuroprothesen und robotischen Gangtrainingsmaschinen.

Kontakt: [ruediger.rupp@med.uni-heidelberg.de](mailto:ruediger.rupp@med.uni-heidelberg.de)

zu fälschlicherweise erkannten Schaltsignalen kommen. Diese Probleme lassen sich zwar durch ein intensives Training verbessern, dennoch erreichen nicht alle Nutzer bis zum Trainingsende eine ausreichend zuverlässige Kontrolle.

Eine Lösung können sogenannte Hybrid-BCIs sein. Dazu werden BCIs mit traditionellen Benutzerschnittstellen wie einem Schulterpositionssensor kombiniert. Während des europäischen TOBI-Projekts – ein inzwischen abgeschlossenes Projekt mehrerer europäischer Universitäten und Forschungsinstitute mit dem Ziel, Anwendungen zur Steuerung von Geräten per Gedanken zu entwickeln – gelang uns erstmals die Steuerung einer Greifneuroprothese, die wir mit einer aktiv angetriebenen Ellenbogenorthese kombiniert hatten. Wir konnten damit einem Nutzer mit vollständig fehlender Hand- und Ellenbogen-, aber noch erhaltener Schulterfunktion dazu verhelfen, selbstständig eine Laugenstange und eine Eiswaffel zu essen.

## In den Körper implantiert

Mit Elektroden, die in den Körper implantiert werden (invasive Neuroprothesen), lassen sich wesentlich mehr Greifmuster erzeugen als mit nicht-invasiven Neuroprothesen. Weil dann die Platzierung der Oberflächenelektroden entfällt, vereinfacht

CONTROL BY THOUGHT

# NEUROPROSTHESES AS HUMAN-MACHINE INTERFACES

RÜDIGER RUPP

A spinal cord injury resulting from trauma or disease leads to an impairment of motor, sensory and autonomous functions below the level of the lesion. Individuals with tetraplegia and paralysis of both arms following severe injury to the cervical spinal cord lose their ability to live independently. Neuroprostheses are technical systems that stimulate peripheral nerves and muscles using electrical impulses, with the aim of restoring motor functions such as the ability to grasp an object.

Non-invasive grasp neuroprostheses can generate a key or cylinder grasp in people with tetraplegia. However, the selectivity and reproducibility of non-invasive stimulation are quite limited. This can be overcome by invasive systems with electrodes attached to muscles or nerves – albeit at greater cost and with all the risks involved in complex surgeries. Due to differences in neurological status and in end users' priorities, individualisation of the neuroprosthetic components is a must. Personalisation is not only important for the stimulation components, but also for the human-machine interface by which the end user gains full system control. At this time, human-machine interfaces are mainly based on preserved movements, e.g. a shoulder joystick is used to control the hand by means of movements of the contralateral shoulder.

We have intensively investigated the possibilities of using brain-computer interfaces (BCIs) that are based on imagining movements as a more intuitive neuroprosthesis control input. Non-invasive systems provide only a limited number of control outputs, but even a single channel was enough to allow an individual with no preserved elbow and hand function to eat an ice cream cone. Invasive systems based on electrodes on or in deeper layers of the motor cortex permit simultaneous control of multiple joints of a robot arm in real time. However, their domestic use is restricted by the limited biological stability of intracortical electrodes and the need for daily algorithmical tuning. ●

ASSOCIATE PROF. RÜDIGER RUPP (EngD) studied electrical engineering and from 1996 onwards established the Section of Experimental Neurorehabilitation at Heidelberg University Hospital's Spinal Cord Injury Center. He earned his doctorate at the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) in 2008, and in 2018 received his teaching credentials in the subject of "Experimental Neurology" from Heidelberg University. His research interests are thought-controlled grasp neuroprostheses and robotic gait training machines.

Contact: [ruediger.rupp@med.uni-heidelberg.de](mailto:ruediger.rupp@med.uni-heidelberg.de)

**“The ultimate goal of an intuitive human-machine interface is direct thought control.”**

# „Derzeit können Greifneuroprothesen nur Nutzern angeboten werden, die noch imstande sind, ihre Schulter zu bewegen.“

sich auch die Bedienung erheblich. Die Rückmeldungen von Nutzern solcher „Freehand-Greifneuroprothesen“, die zwischenzeitlich über 300 Mal implantiert worden sind, waren sehr positiv. Nachteilig ist, dass invasive Neuroprothesen teuer sind; kommt es zu Defekten an Elektroden und Kabeln oder treten Infektionen auf, ist der Austausch der Teile aufwendig; grundsätzlich ist die Gruppe der potenziellen Nutzer aufgrund fehlender Skalierbarkeit begrenzt. Im „Innovationscluster INTAKT“ ([www.intakt-projekt.de](http://www.intakt-projekt.de)) wollen wir eine neue Generation von implantierbaren, vernetzbaren und kabellosen Miniaturimplantaten für eine größere Zahl von Betroffenen entwickeln. Das Projekt, an dem insgesamt 17 Partner aus Wissenschaft und Industrie beteiligt sind, wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

Mittlerweile werden auch invasive BCIs mit Elektroden eingesetzt, die auf die Oberfläche des Gehirns gelegt oder in das Gehirn implantiert werden. Zumindest mithilfe der in den Motorkortex eingebrachten, aus bis zu 100 Einzelelektroden bestehenden Nadelelektroden lassen sich

beeindruckende Ergebnisse erzielen. Oberflächlich auf das Gehirn aufgebrachte Elektroden erfassen die Aktivität von mehreren Millionen Nervenzellen – die in tieferen Gehirnschichten eingebauten Elektroden erfassen gezielt die Feuerungsraten von nur wenigen 100 Nervenzellen. Mit einem derart hochinvasiven System konnte eine Querschnittgelähmte die zehn Freiheitsgrade eines Roboterarms simultan in Echtzeit kontrollieren und selbstständig ein Stück von einer Tafel Schokolade abbeißen – ein solcher Erfolg kann mit nicht-invasiven BCIs bis auf Weiteres nicht erreicht werden.

Aber auch invasive BCIs haben Nachteile: Die Elektroden sind langfristig nicht stabil, nur zehn Prozent sind nach mehreren Jahren noch intakt. Müssen die Elektroden entfernt werden, besteht ein hohes Risiko, dabei Hirnstrukturen zu verletzen – die Frage ist, ob ein solcher Elektrodenwechsel überhaupt je funktionieren kann. Ein zweites Problem ist, dass zwei Drittel der registrierten Nervenzellnetzwerke gleichsam über Nacht die Fähigkeit zur Steuerung wieder vergessen, weshalb der Computeralgorithmus täglich neu angelernt und kalibriert werden muss. Hierzu sind in der Regel technische Experten notwendig. Neue Forschungsergebnisse zeigen zudem, dass sich mit invasiven BCIs zwar die gewünschte Nutzerintention hinsichtlich der Handbewegung im Raum, nicht aber die gewünschte Greifkraft oder der Wunsch nach einem Steifstellen des Ellenbogens oder Schultergelenks gut bestimmen lassen.

Wir betrachten invasive und nicht-invasive Neuroprothesen nicht als konkurrierende Entwicklungen: Sie sind Alternativen zur Versorgung von Menschen mit Querschnittlähmung. Bei aller Faszination, die von der komplexen Technik ausgeht, darf nicht vergessen werden, wozu die technischen Entwicklungen dienen. Kein Geringerer als Albert Einstein hat dafür die richtigen Worte gefunden: „Die Sorge um den Menschen selbst und sein Schicksal muss stets das Hauptanliegen aller fachwissenschaftlichen Bestrebungen bilden. Vergesst das nie bei all euren Formeln und Diagrammen!“ ●

**INTELLIGENTE**

**ALLIANZEN**

INTELLIGENTE ALLIANZEN

# ASSISTENZROBOTER FÜR MEHR LEBENSQUALITÄT IM ALTER

KATJA MOMBAUR, ALEXANDER SCHUBERT & HANS-WERNER WAHL

**Roboter können älteren Menschen helfen, möglichst lange ihre Mobilität und Unabhängigkeit zu bewahren. Auf diese Weise tragen die Maschinen entscheidend zum Erhalt der Lebensqualität im Alter bei. In Heidelberg arbeiten Wissenschaftler der unterschiedlichsten Disziplinen im Forschungsprojekt HeiAge gemeinsam an intelligenten Mobilitätssystemen, die speziell auf die Bedürfnisse der älteren Bevölkerung zugeschnitten sind.**

# D

Die Lebensqualität älterer und alter Menschen sicherzustellen, ist angesichts der demographischen Entwicklung eine der großen Herausforderungen unserer Zeit. Ein wichtiges Ziel dabei ist es, die Mobilität der Menschen zu erhalten und damit ihre Unabhängigkeit und Lebensqualität bis ins hohe Alter zu stärken. Noch hat die „analoge Welt“ das Alter voll im Griff: Mobilitätshilfen, die derzeit eingesetzt werden, um ältere Menschen etwa beim Gehen oder Aufstehen zu unterstützen, sind in der Regel denkbar simpel und ohne jede moderne Technik. Typische



**PROF. DR. KATJA MOMBAUR** hat Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Stuttgart und in Toulouse (Frankreich) studiert und wurde im Jahr 2001 im Fach Mathematik promoviert. Ihre wissenschaftliche Laufbahn führte sie unter anderem an die Seoul National University (Südkorea) und das Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS-CNRS) in Toulouse. Von 2010 und 2020 war sie Professorin an der Universität Heidelberg und forschte zunächst am Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) und anschließend am Institut für Technische Informatik (ZITI). Zum 1. März 2020 nahm Katja Mombaur einen Ruf an die University of Waterloo (Kanada) auf den Canada Excellence Research Chair (CERC) in Human-Centred Robotics and Machine Intelligence an. Der Fokus ihrer Forschungen liegt auf menschlichen Bewegungsstudien und dem Design und der Regelung von humanoiden Robotern, Exoskeletten und Assistenzsystemen mithilfe von mathematischen Modellen und Algorithmen.

Kontakt: [katja.mombaur@ziti.uni-heidelberg.de](mailto:katja.mombaur@ziti.uni-heidelberg.de),  
[katja.mombaur@uwaterloo.ca](mailto:katja.mombaur@uwaterloo.ca)

Beispiele sind Rollatoren, Stöcke, Haltegriffe oder Gehgestelle – passive Hilfen, die Bewegungen nicht aktiv unterstützen können. Eine deutliche Verbesserung versprechen hier neue Ansätze aus der Robotik.

Robotische Assistenzsysteme sind derzeit Gegenstand zahlreicher Forschungsprojekte: Intelligente Mobilitätshilfen sind mit einer speziellen Sensorik ausgestattet, die den Zustand, die Absichten und die Umgebung eines Nutzers erfassen können. Integrierte Motoren erlauben es den Systemen zudem, sich mit dem Nutzer mitzubewegen, ihm Kraft bereitzustellen und ihn darin zu unterstützen, eine beabsichtigte Bewegung auszuführen. Im Idealfall können die Systeme sogar lernen: Sie passen sich den schwindenden motorischen Fähigkeiten älterer Menschen an und bieten Hilfe dort, wo sie auch tatsächlich notwendig ist.

Bislang werden solche Assistenzsysteme überwiegend im klinischen Bereich oder in der Rehabilitation eingesetzt. Langfristig soll sich die Assistenzrobotik jedoch auch ins private Umfeld ausweiten – immer da, wo sie von älteren Menschen genutzt werden kann, die nur leichte Bewegungseinschränkungen haben. Vorab muss dazu sichergestellt werden, dass die Interaktion zwischen Mobilitätsassistentenroboter und Mensch im Alltag selbstverständlicher wird und dass Nutzer der Sicherheit und Zuverlässigkeit der Technik ein ausreichend großes Maß an Vertrauen entgegenbringen. Diesen beiden Zielen will das Heidelberger Projekt „Assistenzsysteme und digitale Technologien zur Verbesserung der Mobilität im Alter“, kurz HeiAge, ein bedeutendes Stück näherkommen. Dem im Jahr 2019 begründeten und von der Carl-Zeiss-Stiftung geförderten Konsortium der Universität Heidelberg gehören Wissenschaftler vieler Disziplinen an, von der Mathematik und (Technischen) Informatik (Katja Mombaur, Lorenzo Masia, Alexander Schubert) über die Psychologie (Hans-Werner Wahl, Joachim Funke, Laura Schmidt), Gerontologie (Andreas Kruse) und Sportwissenschaft (Klaus Hauer) bis hin zu den Rechtswissenschaften (Jan C. Schuhr).

#### Intelligente Rollatoren und Exoskelette

Im Bereich der Grundlagenforschung gilt es zunächst besser zu verstehen, wie sich der Mensch bewegt und wie seine Gangstabilität gewährleistet wird. Es gibt bisher nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen zu Laufbewegungen in verschiedenen Altersstufen, zu destabilisierenden und stabilisierenden Kräften bei älteren Menschen oder zum Einfluss von Laufgeschwindigkeit, Körperkraft und Bewegungsumfang auf die Stabilität des Gangs. Ein vollständiges Bild von Bewegung und Stabilität und der Art und Weise, wie sich die Mobilität im Alter verändert, existiert aber bei Weitem nicht. Zudem fehlen berechenbare Kriterien zur Voraussage von Stabilität und Fallrisiko. Ein wichtiges Teilprojekt von HeiAge umfasst daher experimentelle

#### Mobilität im Alter: Neue Allianzen an der Universität Heidelberg

Das 2019 gestartete Forschungsprojekt „Assistenzsysteme und digitale Technologien zur Verbesserung der Mobilität im Alter“ (HeiAge) will die bereits in Heidelberg vorhandene Kompetenz zum Thema Altern nutzen, um digitale Technologien für ältere Menschen zu entwickeln und für sie nutzbar zu machen. Auf diese Weise sollen Digitalisierung und Robotikassistenzsysteme ein fester Bestandteil der Heidelberger Altersforschung werden.

Im Netzwerk Altersforschung (NAR) arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler verschiedener Disziplinen schon länger intensiv am Thema Psychomotorik und intelligente Assistenzsysteme für ältere Menschen. Die Forschungsarbeiten des 2007 gegründeten NAR umfassen die Bereiche Biologische Grundlagenforschung und Medizinische Altersforschung, Verhaltens-, Geistes- und Sozialwissenschaftliche Altersforschung sowie Medizinisch-Geriatrie und Sportwissenschaftliche Interventionsforschung. Mit dem Institut für Technische Informatik (ZITI), das das Projekt HeiAge koordiniert, und dem Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) verfügt die Universität zudem über Institutionen mit langer Erfahrung in Robotik, Medizintechnik und autonomen Systemen sowie der Entwicklung effizienter Methoden zur Simulation und Optimierung komplexer Systeme.

Weitere an HeiAge beteiligte Einrichtungen sind das Institut für Gerontologie, das Psychologische Institut, das Juristische Seminar und das Krankenhaus Bethanien als Geriatriisches Zentrum der Universität Heidelberg. Die inneruniversitäre Kooperation der Partner wird durch das Marsilius-Kolleg unterstützt. Das Projekt wird ebenso von der Carl-Zeiss-Stiftung gefördert wie das Heidelberg Center for Motion Research (HCMR), ein Zentrum für interdisziplinäre Bewegungsforschung, das seit dem Jahr 2017 besteht und die Basis für quantitative wie qualitative Bewegungsstudien bietet.

<https://orb.iwr.uni-heidelberg.de/heiage>  
[www.nar.uni-heidelberg.de](http://www.nar.uni-heidelberg.de)

Studien, die zu einem besseren Verständnis der Veränderung von Bewegung und Stabilität im Alter beitragen sollen. Unsere Erkenntnisse sollen in Modelle integriert werden, die Kriterien für Stabilität beziehungsweise Instabilität formulieren. Auf dieser Basis wollen wir effiziente Algorithmen zur Stabilisierung der Menschen entwickeln.

# „Anders als rein passive Hilfen, etwa Rollatoren oder Gehstöcke, sind intelligente Mobilitätshilfen imstande, sich an die Bedürfnisse der Nutzer anzupassen und Bewegungen aktiv zu unterstützen.“

Konkret einfließen können die Erkenntnisse beispielsweise in bewegungsunterstützende Robotersysteme für ältere Menschen mit mittlerer bis hoher Gebrechlichkeit. Zwei der HeiAge-Projektpartner waren bereits an einem EU-Projekt zur Entwicklung von zwei Prototypen derartiger Robotersysteme beteiligt: Der erste Prototyp besaß die grundlegende Form eines Rollators; der zweite Prototyp imitierte das Verhalten eines menschlichen Pflegers, indem der Roboter den Patienten mithilfe einer Haltevorrichtung festhielt, so dass ein höherer Grad an Unterstützung möglich war. Beide Prototypen hatten eine Reihe technischer Fähigkeiten – allerdings waren sie dadurch auch hochgradig komplex, sehr schwer und teuer. Dagegen verfolgt der Mobilitätsroboter in Form eines intelligenten Rollators, den wir gerade in HeiAge entwickeln, das Ziel, mit bewusst einfachen mechanischen Konzepten und effizienter Designauslegung ein leichtes, kostengünstigeres und einfach zu steuerndes System anzubieten. Damit wollen wir einen optimalen Kompromiss zwischen Benutzerakzeptanz und technischen Fähigkeiten finden.

Eine weitere Aufgabe ist die Entwicklung von „Exoskeletten“ und „Exosuits“ speziell für ältere Menschen mit geringer bis mittlerer Gebrechlichkeit. Exoskelette und Exosuits sind Assistenzsysteme „zum Anziehen“, die Menschen teilweise oder vollständig beim Gehen oder bei anderen

körperlichen Tätigkeiten unterstützen können. Es gibt verschiedene Arten von Exoskeletten, beispielsweise für die untere und obere Extremität oder für den Bereich Rumpf und Wirbelsäule. Exoskelette, mit denen sich etwa ein querschnittgelähmter oder ein sehr gebrechlicher Mensch dauerhaft, unabhängig und ohne zusätzliche Hilfen im Alltag fortbewegen könnte, existieren nicht. Im Rahmen von HeiAge arbeiten wir unter anderem daran, eines der bereits verfügbaren Exoskelette gezielt an die Bedürfnisse älterer Menschen anzupassen.

Exosuits, die aufgrund der verwendeten Materialien auch als „weiche Exoskelette“ bezeichnet werden, können den Nutzern in der Regel nur eine geringe Unterstützung geben. Ihr Tragekomfort aber und ihr geringer Energieverbrauch machen sie zu idealen Kandidaten, um Menschen mit geringen körperlichen Problemen bei leichten Tätigkeiten wie Laufen oder Greifen zu unterstützen oder einzelne schwache Gelenke zu stärken. Ein weiteres Ziel von HeiAge ist daher die Entwicklung eines Exosuits, der älteren Menschen mit leichten körperlichen Problemen die notwendige Unterstützung beim Sport bietet soll.

## „Exergames“ und Alterssimulationsanzüge

Mithilfe eines kognitiv-motorischen Trainings wollen sogenannte Exergames die Mobilität steigern. Es handelt

# „Es ist unser großes Anliegen, praxisrelevante Ergebnisse zu erarbeiten, die älteren Menschen bereits in naher Zukunft unmittelbar zugutekommen können.“

sich dabei um eine neue Trainingsform, die Spielcharakter hat, aber dennoch auf den Erkenntnissen der Sport- und Rehabilitationswissenschaft zur Trainingssteuerung basiert. Die bisherigen Studien zeigen, dass Exergames von Nutzern als spielerisch und unterhaltsam wahrgenommen werden - und dass dies einhergeht mit positiven Anreizen, ein Training zu beginnen und es nachhaltig zu betreiben. Auf diese Weise lassen sich mit Exergames nicht nur Alltagsleistungen verbessern, sondern auch gezielt klinisch relevante Altersrisiken minimieren. Eine unserer Neuentwicklungen besteht darin, den internen Datenstrom zu nutzen, der zur Spielsteuerung in allen Exergames vorhanden ist, um die Bewegungen zu analysieren und den Trainingsfortschritt abzubilden. In einer weiteren Phase wollen wir individuelle Fehler, Fehlercluster, Fehlerketten und schließlich Fehlerhierarchien identifizieren. Diese Daten ermöglichen es, für den Nutzer eine individuelle Trainingsteuerung ohne externe Supervision zu entwickeln - eine solch konsequente Weiterentwicklung von Exergames fehlt bislang.

Von einer gänzlich anderen Seite nähern wir uns dem Thema Mobilität im Alter unter dem Stichwort „Instant Ageing“, also „sofortiges Altern“: Einige Hersteller bieten sogenannte Alterssimulationsanzüge an, die junge und gesunde Menschen unmittelbar in die Situation eines

alten gebrechlichen Menschen versetzen. Diese Anzüge werden zu verschiedenen Zwecken eingesetzt, beispielsweise für Pfleger und andere Betreuungspersonen - die Validität solcher Simulationen sowie wechselseitige Einflüsse von Instant Aging und subjektivem Alternserleben sind bislang jedoch kaum erforscht. Wir wollen die technische Informatik, die Biomechanik und die psychologische Altersforschung miteinander vernetzen, um auf diese Weise neue Erkenntnisse zu gewinnen, die längerfristig zu einer kritischen Evaluierung des Instant Aging aus biomechanischer und psychologischer Perspektive führen.

## Praxisrelevante Forschung

Es ist unser großes Anliegen, im Rahmen des HeiAge-Projektes praxisrelevante Ergebnisse zu erarbeiten, die älteren Menschen bereits in naher Zukunft unmittelbar zugutekommen können. Der Transfer unserer Ergebnisse in die Wirtschaft und die Gesellschaft - und damit direkt zum älteren Individuum - ist ein zentraler Bestandteil des Forschungsprojekts. Um neue Technologien für ältere Menschen zu entwickeln und bereitzustellen, gilt es, nicht allein die technische Seite zu betrachten, also die biomechanische, mathematische und algorithmische Grundlagenforschung. Auch psychologische, ethische, rechtliche und soziale, pflegerische und juristische Fragen



**PROF. DR. HANS-WERNER WAHL** ist Psychologe, Seniorprofessor und Direktor des Netzwerks Altersforschung (NAR) an der Universität Heidelberg. Er wurde im Jahr 1989 an der Freien Universität Berlin promoviert und habilitierte sich 1995 an der Universität Heidelberg. Von 2006 bis 2017 leitete er die Abteilung für Psychologische Altersforschung am Psychologischen Institut der Universität Heidelberg. Seine Forschungsschwerpunkte umfassen die Untersuchung der Rolle des subjektiven Alternserlebens, psychische Adaptationsprozesse im späten Leben, speziell im Umgang mit chronischen Funktionsverlusten, sowie die Rolle von Technologien für ältere Menschen. Hans-Werner Wahl war 2013/14 Fellow des Marsilius-Kollegs der Universität Heidelberg.

Kontakt: wahl@nar.uni-heidelberg.de

# ROBOT ASSISTANTS FOR BETTER QUALITY OF LIFE IN OLD AGE

KATJA MOMBAUR, ALEXANDER SCHUBERT & HANS-WERNER WAHL

One of the great challenges for ageing societies is ensuring that older adults can enjoy a good quality of life for as long as possible. For many older people, autonomous motor behaviour is a major aspect of such quality of life. However, compensatory aids that are able to help with impaired motor behaviour – sit-to-stand and walking in particular – are mostly “analogue” devices, many of them quite inflexible and unable to meet the highly heterogeneous needs of older users.

While research on motor-enhancing robotic systems and the related biomechanical evidence is well established, there are still large gaps in our knowledge, and established insights require constant updating because of continuous improvements in assessment procedures and in robot software and hardware. Against this background, our interdisciplinary HeiAge project, which targets “Assistive Systems and Digital Technologies to Improve Mobility in Old Age” with generous support from the Carl Zeiss Foundation, is spearheading a synergetic mix of convergent approaches.

We want to understand the complexity of human biomechanics and decision-making in older people and develop innovative algorithms for controlling the stability of motion. This includes the development of new robotic systems such as an intelligent rollator and exoskeletons that may help with various mobility impairments. HeiAge also deals with a number of technology-related issues that require input from behavioural and social scientists and legal experts. For example, we will be the first to provide a biomechanical characterisation of instant-ageing suits, while also exploring the psychological impact of wearing such a device. We will also investigate legal challenges related to robot assistants, such as issues of liability in case of system failures.

Above all, HeiAge’s ambition is to explore options for efficient outreach and implementation, which is why we involve stakeholders such as health insurances and policymakers throughout the project. ●

**PROF. DR HANS-WERNER WAHL** is a psychologist, senior professor and director of the Network Ageing Research (NAR) at Heidelberg University. He earned his doctorate at Freie Universität Berlin in 1989 and his teaching credentials at Heidelberg University in 1995. Between 2006 and 2017, he headed the Department of Psychological Ageing Research at Heidelberg University's Institute of Psychology. His research interests include investigations into the role of subjective ageing experience, mental adaptation processes in later life, especially in connection with chronic loss of function, and the role of technologies for older people. In 2013/14 Hans-Werner Wahl was a fellow of the Marsilius Kolleg at Heidelberg University.

Contact: wahl@nar.uni-heidelberg.de

**PROF. DR KATJA MOMBAUR** studied aerospace engineering at the University of Stuttgart and in Toulouse (France) and earned her PhD in mathematics in 2001. Her academic career led her to Seoul National University (South Korea) and the Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS-CNRS) in Toulouse. From 2010 to 2020, she was a professor at Heidelberg University, where she worked at the Interdisciplinary Center for Scientific Computing (IWR) and then at the Institute of Computer Engineering (ZITI). On 1 March 2020, Katja Mombaur transferred to the University of Waterloo (Canada), where she holds the Canada Excellence Research Chair (CERC) in Human-Centred Robotics and Machine Intelligence. Her research focuses on human motion studies and on the design and control of humanoid robots, exoskeletons and assistance systems using mathematical models and algorithms.

Contact: katja.mombaur@ziti.uni-heidelberg.de, katja.mombaur@uwaterloo.ca

**“Unlike passive devices such as rollators and canes, intelligent mobility aids are able, through technical innovation, to adapt to the needs of users and actively support human motion.”**

**DR ALEXANDER SCHUBERT** studied mathematics and physics at Heidelberg University and earned his PhD as a scholar at the Heidelberg Graduate School of Mathematical and Computational Methods for the Sciences with an interdisciplinary thesis involving mathematics, robotics, psychology and art. In 2017 he became the scientific manager of the Heidelberg Center for Motion Research (HCMR), an interdisciplinary research network that investigates human motion.

Contact: alexander.schubert@ziti.uni-heidelberg.de

# „Ein Schwerpunkt sind Assistenzroboter, die die Mobilität von älteren und alten Menschen wiederherstellen oder zumindest verbessern können.“

müssen einfließen und werden in unserem interdisziplinären Forschungskonsortium in eigenen Querschnittsprojekten berücksichtigt.

Die psychologische Altersforschung untersucht beispielsweise Entscheidungsfindungs- und Planungsaspekte menschlicher Mobilität. Denn nur ein grundlegendes Verständnis der zugehörigen kognitiven Prozesse erlaubt es, Mobilitätsassistenzsysteme mit intelligenten Regelungen auszustatten. Zu den ethischen und politischen Fragestellungen zählt etwa die Balance zwischen der erhöhten Sicherheit durch die technische Assistenz und der potenziellen Beschneidung der individuellen Autonomie der Nutzer. Nicht zuletzt treten bei der Entwicklung von Assistenzsystemen zahlreiche rechtliche Forschungsfragen auf – diese reichen beispielsweise von der Verantwortungszurechnung bei Fehlfunktionen über die Erhebung und Verarbeitung verschiedenster Daten durch das System bis hin zu sozialrechtlichen Ansprüchen.

Um alle Themen angemessen berücksichtigen zu können, ist ein konstanter Austausch zwischen den Entwicklern der technischen Innovationen, den Wissenschaftlern angrenzender Forschungsgebiete, den Repräsentanten von Krankenkassen, Ärzte- und Pflegeverbänden sowie den politischen Entscheidungsträgern bereits während der technologischen Entwicklungsphase der neuen Assistenzsysteme notwendig. Das HeiAge-Projekt der Universität Heidelberg bietet auch hierfür die besten Voraussetzungen. ●



**DR. ALEXANDER SCHUBERT** studierte Mathematik und Physik an der Universität Heidelberg, an der er als Stipendiat der „Heidelberger Graduiertenschule der mathematischen und computergestützten Methoden für die Wissenschaften“ (HGS MathComp) auch mit einem interdisziplinären Thema zwischen Mathematik, Robotik, Psychologie und Kunst promoviert wurde. Seit 2017 leitet er als Scientific Manager das Heidelberg Center for Motion Research (HCMR), einen interdisziplinären Forschungsverbund verschiedenster Fächer, die sich der Untersuchung der menschlichen Bewegung widmen.

Kontakt: [alexander.schubert@ziti.uni-heidelberg.de](mailto:alexander.schubert@ziti.uni-heidelberg.de)

**MIT DEM LAPTOP**

**IM**

**BETT**

MIT DEM LAPTOP IM BETT

# DIGITALE ARBEITSWELT UND GESUNDHEIT

KARLHEINZ SONNTAG

**Digitalisierung und Dynamisierung – unter diesen Schlagworten lässt sich die aktuelle Entwicklung der Arbeitswelt zusammenfassen. Informations- und Kommunikationstechnologien spielen eine immer größere Rolle, so dass Mensch-Maschine-Systeme schon lange nicht mehr nur in der Industrie das Bild von Arbeit (mit)bestimmen. Dadurch werden auch die Anforderungen an die Beschäftigten immer anspruchsvoller, während zugleich die Grenzen zwischen Arbeit und Freizeit etwa durch Homeoffice und erweiterte Erreichbarkeit via Smartphones und Laptops zunehmend verschwimmen. Wie wirkt sich das auf Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter aus – und wie können Arbeitgeber diese Aspekte fördern? Heidelberger Arbeits- und Organisationspsychologinnen und -psychologen forschen dazu vor Ort in realen Arbeitsumgebungen und entwickeln so auf den Arbeitsalltag abgestimmte Methoden und Konzepte.**

# M

Mensch und Maschine gelten in der Arbeitspsychologie nicht als Antagonisten – vielmehr wirken beide in einem komplexen wechselseitigen Bedingungsgefüge zum Wohle des Menschen bei der Ausübung seiner Arbeitstätigkeit. So das Selbstverständnis einer humanorientierten Arbeitswissenschaft, zu der sich die Arbeits- und Organisationspsychologie zählt. Die Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine sind unterschiedlich komplex – je nachdem, in welchem Ausmaß die eingesetzten Arbeitsmittel mechanisiert, automatisiert und digitalisiert sind: Die Bandbreite reicht vom Handhaben einfacher Werkzeuge über die Bedienung stationärer Maschinen und mobiler Endgeräte bis hin zum Programmieren, Überwachen und Steuern computergestützter Anlagen und Systeme. Seit einigen Jahren lässt sich feststellen, dass computergestützte Arbeitsmittel deutlich zunehmen und sich zugleich manuelle Tätigkeitsanteile hin zu mehr kognitiv-anspruchsvollen Anteilen verlagern. Ihren vorläufigen Höhepunkt findet die Computertisierung von Arbeitsmitteln und deren Vernetzung in der digitalen Transformation. Treiber in Industrie, Dienstleistung und Verwaltung sind die innovativen Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) wie Cloud-Computing, Big Data, Künstliche Intelligenz, cyber-physische Systeme, Robotik, Sensorik und deren digitale Vernetzung in Teilsysteme, Prozesse, Geschäftsmodelle und Produkte. Digitale Plattformen gewährleisten darüber hinaus als internetbasierte Foren einen unmittelbaren wirtschaftlichen und sozialen Austausch.

Bei der arbeitspsychologischen Analyse und Gestaltung moderner Mensch-Computer-Interaktionen stehen sich forschungsmethodisch zwei Aspekte gegenüber: auf der einen Seite die Anforderungen, die sich aus der Organisation traditioneller oder digitaler Arbeit und ihrer technischen Infrastruktur in Form von Hard- und Software ergeben. Auf der anderen Seite die individuellen Leistungsvoraussetzungen des Menschen, seine sensumotorischen – also das Zusammenspiel von sensorischen und motorischen Leistungen betreffenden –, kognitiven, emotionalen und motivationalen Potenziale und Ressourcen. Wie Anforderungsmerkmale, Kompetenzen und Verhaltensdispositionen bei Beschäftigten individuell in der Tätigkeit zusammenspielen, bezeichnen wir in der Arbeitspsychologie als „Beanspruchungsleben“. Funktioniert das Zusammen-

spiel nicht, so dass Beschäftigte sich über- oder auch unterfordert fühlen, sind Auswirkungen auf das Wohlbefinden, die Leistungsfähigkeit und die psychische Gesundheit die Konsequenz. Das zeigt sich in Symptomen emotionaler Erschöpfung und im Stresserleben.

Um das individuelle Befinden von Beschäftigten gestalten und verbessern zu können, ist es nicht nur nötig, die aktuellen Tätigkeitsanforderungen sowie potenzielle arbeitsbedingte Stressfaktoren – sogenannte Stressoren – zu kennen, sondern man muss auch vorhandene Ressourcen identifizieren. Bei solchen arbeitsbezogenen Ressourcen unterscheiden wir drei Kategorien: „Organisationale Ressourcen“ umfassen Arbeitsbedingungen und -strukturen wie zum Beispiel Handlungsspielräume, Partizipationsmöglichkeiten oder eine entwicklungsförderliche Unternehmens- und Führungskultur. „Soziale Ressourcen“ beziehen sich auf die Unterstützung durch das soziale Umfeld, also durch Kollegen, Vorgesetzte, Betriebsrat, Familie oder Freunde. „Personale Ressourcen“ bezeichnen schließlich individuelle Voraussetzungen wie beispielsweise persönliche Kompetenzen, den psychophysischen Gesundheitsstatus oder sogenannte Copingstrategien,

## „Mensch und Maschine gelten in der Arbeitspsychologie nicht als Antagonisten.“

also Verhaltensmuster zur Bewältigung von Problemen, aber auch Eigenschaften wie Selbstvertrauen, Widerstandsfähigkeit oder Einstellungen und Werte. All diese Ressourcen ermöglichen dem Menschen, sich mit Situationen auseinanderzusetzen, sie kompetent zu bewältigen und dadurch Stress verursachende Einflüsse zu verhindern oder abzumildern.

### **Stressoren und arbeitsbedingte Gesundheitsrisiken**

Zahlreiche aktuelle Studien, systematische Reviews und eigene Untersuchungen zu den Auswirkungen der digitalen Transformation auf die Beschäftigten zeigen einhellig, dass sich die psychischen Belastungen am Arbeitsplatz verändert haben: Die Befragten nehmen eine Verdichtung und Intensivierung ihrer Arbeit wahr, beispielsweise müssen sie Aufgaben schneller erledigen, oftmals auch mehrere gleichzeitig. Die Digitalisierung bringt demnach eine zunehmende Komplexität der Arbeitsinhalte, steigende Informationsmengen und mehr „Kommunikationsrauschen“ mit sich – Letzteres beispielsweise durch ständigen E-Mail-Verkehr mit überflüssigen cc-Setzungen. Höhere IKT-Anforderungen erfordern nach Aussage der Befragten eine ständige Weiterentwicklung vorhandener Fachkompetenzen.

Weiterführende Analysen stellen signifikante Zusammenhänge zwischen Digitalisierung auf der einen und emotionaler Erschöpfung sowie Konflikten zwischen Arbeit und Familie auf der anderen Seite fest – das gilt vor allem dann, wenn die Beschäftigten in ihrer Freizeit IKT-Anwendungen zu Arbeitszwecken nutzen. Betroffen sind vorrangig Beschäftigte in der IT-Branche, Führungskräfte und sogenannte knowledge worker, deren Arbeit darin besteht, Wissen zu entwickeln und zu nutzen. Bei diesen Studien und Reviews handelt es sich zwar um subjektive Einschätzungen, aber nicht zuletzt aufgrund teilweise großer Stichprobenumfänge weisen die Befunde auf arbeitsbedingte Gesundheitsrisiken hin, die auf Informationsüberflutung, Arbeitsunterbrechungen und arbeitsbezogener erweiterter Erreichbarkeit beruhen.

Ergänzend zur subjektiven Sichtweise haben wir Heidelberger Arbeitspsychologen einen objektiven Analyseansatz entwickelt, um psychische Belastungen identifizieren und beurteilen zu können. Dieser Ansatz basiert auf dem stresstheoretischen „Job-Demand-Control-Modell“, das Arbeitsanforderungen und vorhandene Entscheidungsspielräume einander gegenüberstellt und damit das Ausmaß individuellen Stresserlebens bestimmt. Bei der Umsetzung in die betriebliche Praxis erfasst ein Analyseteam, das sich aus geschulten betrieblichen Experten des Arbeits- und Gesundheitsschutzes wie Arbeitsmedizinern, Fachkräften für Arbeitssicherheit und Betriebsräten sowie einem Arbeitspsychologen als Moderator zusammensetzt, die psychischen Belastungen. Die Teammitglieder beobachten und befragen Mitarbeiter bei ihrer Tätigkeit anhand dreizehn skalierbarer Belastungsdimensionen, zu denen beispielsweise Aufgabenkomplexität, Arbeitsunterbrechungen, Konzentrationserfordernisse, Verantwortungsumfang oder Handlungs- und Zeitspielräume gehören. Auf diese Weise lassen sich kritische Belastungskombinationen für die Betroffenen darstellen können: zum Beispiel häufige Unterbrechungen der Arbeit, während sich die Beschäftigten zugleich stark konzentrieren müssen, oder die Problematik, dass Mitarbeiter mit intensivem Kundenkontakt dabei ihre eigenen Emotionen unter Kontrolle halten müssen. Auf dieser Grundlage werden dann in moderierten Workshops gemeinsam mit den Fach- und Führungskräften technische, organisatorische oder personelle Verbesserungen der Arbeitstätigkeit entwickelt.

### **Ressourcenorientierte Gesundheitsförderung**

In einer sich stetig verändernden Arbeitswelt und unter deren dynamischen Umfeldbedingungen steigt der Bedarf an einer ressourcenorientierten Gesundheitsförderung in den Organisationen erheblich. Es gilt, Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit der Beschäftigten aufrechtzuerhalten und zu fördern. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei die Prävention, um ungewollte Ereignisse zu vermeiden, gesundheitliche Risiken am Arbeitsplatz abzuwenden und Schutzfaktoren sowie Ressourcen zu



**PROF. DR. KARLHEINZ SONNTAG** ist seit 1993 Professor für Arbeits- und Organisationspsychologie an der Universität Heidelberg, seit 2017 Seniorprofessor. Vor seiner Berufung nach Heidelberg forschte und lehrte er an der Ludwig-Maximilians-Universität München und der Universität Kassel. Er übernahm zudem Gastprofessuren an der Universität Bern (Schweiz, 1999), der Wirtschaftsuniversität Wien (Österreich, 2005) und der Université de Fribourg (Schweiz, 2007). Karlheinz Sonntags Forschungsschwerpunkte liegen in der humanen Gestaltung digitalisierter Arbeitswelten, der Kompetenzmodellierung und -entwicklung, der Analyse psychischer Belastung am Arbeitsplatz, der Gesundheitsförderung sowie dem Führungsverhalten in Veränderungsprozessen. Er leitet aktuell das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte wissenschaftliche Begleitvorhaben MEGa (Maßnahmen und Empfehlungen für die gesunde Arbeit von morgen).

Kontakt: [karlheinz.sonntag@psychologie.uni-heidelberg.de](mailto:karlheinz.sonntag@psychologie.uni-heidelberg.de)

# „Untersuchungen weisen auf arbeitsbedingte Gesundheitsrisiken hin, die auf Informationsüberflutung, Arbeitsunterbrechungen und erweiterter Erreichbarkeit beruhen.“

stärken. Entsprechende Interventionen zielen entweder auf eine Veränderung von Arbeitsbedingungen ab, was als „verhältnisorientierte Prävention“ bezeichnet wird, oder auf Verhaltensänderungen der Akteure – die „verhaltensorientierte Prävention“.

Die Chancen der Digitalisierung ermöglichen es, individuelle Handlungs- und Zeitspielräume flexibel zu gestalten. Gleichzeitig ist die Harmonisierung verschiedener Lebensbereiche wie Arbeit, Familie und Freizeit für die Beschäftigten nicht trivial. Zur Verbesserung dieser sogenannten Life-Balance haben wir im Rahmen eines wissenschaftlichen Begleitvorhabens zu dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung initiierten Förderschwerpunkt „Maßnahmen und Empfehlungen für die gesunde und sichere Arbeit von morgen“ unter anderem ein Online-Training erprobt. Die Teilnehmer sollen dazu angeregt werden, sich mit der Harmonisierung unterschiedlicher Lebensbereiche kritisch auseinanderzusetzen und Strategien zu entwickeln, wie sie Potenziale nutzen können, um ihre persönliche Life-Balance zu stärken. In einer Kombination aus Wissensvermittlung und praktischen Übungen werden in mehreren Modulen Ressourcen wie die Fähigkeit zur Selbstregulation, Achtsamkeit, soziale Unterstützung oder Zielsetzung und -verfolgung aufgebaut. Eine wichtige Rolle spielen dabei auch Strategien zum Umgang mit erweiterter Erreichbarkeit, da diese eine Folge der digitalen Transformation ist, die mit einem höheren arbeitsbedingten Gesundheitsrisiko einhergeht. Wenn IKT-Anwendungen inzwischen auch im Familien- und Freizeitbereich zu Arbeitszwecken genutzt werden – beispielsweise im Homeoffice –, sind für einen gesunden Umgang in hohem Maße individuell angepasste Strategien nötig.

## Gesunde Arbeit 4.0

Mit vorbeugenden Gesundheits- und Fördermaßnahmen für Beschäftigte in einer sich durch digitale Technologien wandelnden Arbeitswelt befasst sich von 2015 bis 2021 das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt MEgA (Maßnahmen und Empfehlungen für die gesunde Arbeit von morgen). Das wissenschaftliche Begleitvorhaben des BMBF-Förderschwerpunkts „Präventive Maßnahmen für die sichere und gesunde Arbeit von morgen“ steht unter der Leitung von Arbeits- und Organisationspsychologen der Universität Heidelberg. Neben eigener Forschung koordinieren und begleiten sie die Entwicklungsarbeiten von bundesweit 30 Verbundprojekten mit mehr als 150 Partnern aus Forschung und betrieblicher Praxis. Im Zentrum stehen Themen wie Bedarfsanalysen für das Human-Ressource-Management, gesundheitsförderliche Führung und Kompetenzentwicklung, präventive Arbeitsgestaltung, Assistenzsysteme und Mensch-Roboter-Kollaborationen. Die in enger Zusammenarbeit mit der betrieblichen Praxis entwickelten Maßnahmen wie Checklisten, Leitfaden, Analysetools oder Trainingsprogramme sind in einer Toolbox systematisch erfasst und abrufbar. Über Netzwerke und eine interaktive Plattform können sich Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und Sozialpartner schnell und aktuell austauschen.

[www.gesundearbeit-mega.de](http://www.gesundearbeit-mega.de)

### Umgang mit komplexen technischen Systemen

In komplexen Mensch-Maschine-Systemen wie beispielsweise Cockpits, Leitständen, Operationsälen oder Fertigungssystemen fallen unterschiedliche Tätigkeiten an: Diese Tätigkeiten können dazu beitragen, bestehende Zustände des Systems herzustellen und einzuhalten, Prozesse zu initiieren und zu koordinieren oder definierte Zustände stabil zu halten. Es kann sein, dass die Beschäftigten das System lediglich überwachen müssen, es kann aber auch sein, dass sie eingreifen und interagieren müssen. Komplexe Systeme konfrontieren den Menschen mit großen Informationsmengen und sind nicht vollständig einsehbar, also intransparent. Einzelne Komponenten des Systems interagieren auf vielfältige Weise miteinander, sind vernetzt und unterliegen einer Eigendynamik. Diese aus der Forschung bekannten Eigenschaften tragen zu einer großen Informationslast für den Beschäftigten bei und stellen anspruchsvolle kognitive Anforderungen an die Kapazitäten menschlicher Informationsverarbeitung.

Arbeitspsychologisch lässt sich mit verschiedenen Maßnahmen fördern, dass Eingriffe in ein derartiges System gelingen – etwa bei der Diagnose und Behebung von Störungen: beispielsweise mit einer software-ergonomischen Interface-Gestaltung, also einer Gestaltung von Benutzerschnittstellen zwischen Mensch und Maschine für eine bessere Bedienbarkeit, mit der Entwicklung wissensbasierter Assistenzsysteme oder mit der Gestaltung computergestützter Lernprozesse und Trainingsprogramme. Wir haben beispielsweise auf der Basis arbeits-, kognitions- und instruktionspsychologischer Konzepte eine simulationsbasierte E-Learning-Umgebung – ein sogenanntes Diagnose-KIT – für Mechatroniker und Instandhalter entwickelt und in der betrieblichen Aus- und Weiterbildung eines Technologiekonzerns getestet und überprüft.

Bei der Frage, welcher Trainings- und Lernbedarf besteht, haben wir uns am Handeln und Wissen erfahrener Instandhalter beim Beheben konkreter Störungssituationen in flexibel automatisierten Fertigungssystemen orientiert. Vor Ort wurden in einem mehrstufigen Verfahren verschiedene arbeits- und wissensanalytische Methoden eingesetzt, beispielsweise Tätigkeitsanalysen, kognitive Aufgabenanalysen oder Experten-Novizen-Vergleiche, mit denen sich erfahrungsbasiertes Wissen definieren lässt. So konnten wir aufgrund der gesammelten Erfahrung der Experten herausarbeiten, welche speziellen Situationen und Tätigkeiten trainiert werden sollten, um erfolgreich mit verschiedenen im Arbeitsalltag auftretenden Problemen umgehen zu können. Auf dieser fundierten empirischen Grundlage haben wir eine simulationsbasierte Lernumgebung und anspruchsvolle Lernaufgaben mit hohem Realitätsgehalt didaktisch und methodisch aufbereitet, um ein aktives und eigenständiges Lernen zu ermöglichen.

Das Diagnose-KIT besteht aus sechs frei kombinierbaren Lernmodulen:

1. Anlagensimulation: Die realitätsnahe Simulation einer speicherprogrammierbaren Fertigungszelle befördert in 26 Takten Metallzylinder, die hydraulisch gepresst werden. Lernende können über eine grafische Oberfläche die Anlage bedienen und die gleichen Eingriffe und Diagnosen durchführen wie die Instandhalter am originalen Vorbild. Neben einem fehlerfreien Modus gibt es 20 Übungsaufgaben, in denen typische oder besonders schwierige Störungen einzelner Anlagenkomponenten zu finden sind.
2. Tutorielle Systeme: Zwei Einführungstutorials beinhalten das technische Grundwissen über die Anlagenfunktionen und über die Bedienung der simulierten Anlage. Informative Elemente wechseln sich mit dazwischengeschalteten Übungseinheiten ab.
3. Videos zur „kognitiven Modellierung“: Passend zu Übungsaufgaben in der Simulation wurden Videos erstellt, die zeigen und erläutern, wie ein Experte dieselbe Störung systematisch diagnostiziert. Lernende können die Videos bei Bedarf aufrufen; Reflexionsfragen stellen das eigene Vorgehen dem des Experten gegenüber.
4. „Transferanker“: Um Lernsituationen in verschiedenen Kontexten zu ermöglichen und so den Transfer zu verbessern, wurden Einführungstutorials und Videos für zwei weitere Anlagen entwickelt.
5. Adaptive tutorielle Hilfen: Lernende sollen beim Problemlösen nur so viel Unterstützung erhalten, wie sie benötigen. Das Diagnose-KIT setzt dies mit automatischen Programmfunktionen um, die auf ungünstige Diagnosehandlungen mit entsprechenden Hinweisen reagieren – bei sinnvollem Vorgehen bleiben diese aus.
6. Kooperatives Lernen: Außerhalb der E-Learning-Umgebung werden an realen Modellanlagen problembasierte Aufgaben zur Störungsdiagnose in Kleingruppen trainiert.

Um den Erfolg unseres Diagnose-KITs messen zu können, haben wir überprüft, inwieweit die Lernenden das Gelernte übertragen konnten: zum einen auf ähnliche simulierte Problemstellungen (Binnentransfer), zum anderen auf neue simulierte Störungen (Inhaltstransfer). Schließlich haben wir auch gemessen, inwieweit sie die Störungsdiagnose an der realen Anlage anwenden konnten (Kontexttransfer). Im Vergleich mit einer Kontrollgruppe, die nicht das Diagnose-KIT nutzte, zeigten sich dabei bedeutsame Effekte für alle Lernmodule. Will man also Gelerntes im Arbeitsalltag kompetent nutzen, ist es unabdingbar, zunächst genau vor Ort im realen Arbeitsumfeld herauszufinden, was trainiert werden muss und wie es trainiert werden sollte.

### Führungsverhalten in Veränderungsprozessen

Ein Charakteristikum moderner Arbeit sind technische und organisationale Veränderungen, die immer häufiger

IN BED WITH THE LAPTOP

# DIGITAL WORKING AND HEALTH

KARLHEINZ SONNTAG

Digitalisation and dynamisation – these are the catchwords describing current developments in the workplace. With the increasing role played by information and communication technologies, human-machine systems have long begun to shape our understanding of work even beyond the shop floor. This means that employees must meet ever more stringent demands, while the boundaries between work and leisure time become more and more blurred as employers expect their staff to work from home and to be permanently available via their smartphone or laptop.

This transformation of the workplace and of workers' lives has obvious and palpable consequences for the professionals and executives concerned. How does this affect employees – and how can employers contribute to maintaining their staff's health, well-being and productivity? These are the questions at the root of the concepts and methods that Heidelberg industrial and organisational psychologists have been investigating, developing and designing for years and whose aim is to devise a mode of working that allows for personal development while ensuring the workers' long-term health.

Efforts to design modern work processes focus mainly on three fields: competence development, health promotion and leadership during change processes. A meaningful assessment of current work requirements, reliable identification of potential stressors and resources and the development of valid competences and interventions all require a great deal of "field research" under real working conditions. There is an enormous need for basic psychological knowledge and findings that can be transferred to and applied in the modern workplace. ●

**PROF. DR KARLHEINZ SONNTAG** has held the Chair of Industrial and Organisational Psychology at Heidelberg University since 1993, and became a senior professor in 2017. Before his transfer to Heidelberg, he held teaching and research positions at Ludwig-Maximilians-Universität in Munich and at the University of Kassel. He was a visiting professor at the University of Bern (Switzerland, 1999), Vienna University of Economics and Business (Austria, 2005) and Université de Fribourg (Switzerland, 2007). Karlheinz Sonntag's research interests are the humane design of digitalised workplaces, competence modelling and development, the analysis of psychological stress in the workplace, health promotion and leadership during change processes. He currently heads the MEgA project (Preventive Measures for Safe and Healthy Work Practices of Tomorrow), which is funded by the Federal Ministry of Education and Research.

Contact: karlheinz.sonntag@psychologie.uni-heidelberg.de

**“Industrial  
psychology does  
not regard  
humans and  
machines  
as antagonists.”**

und intensiver auftreten und dabei auch immer mehr Folgen nach sich ziehen. Auf der Suche nach Ressourcen und potenziellen Stressoren spielen Führungskräfte eine zentrale Rolle. Sie sehen sich der Herausforderung gegenüber, Veränderungen in immer kürzeren Zyklen mitzugestalten und die Potenziale ihrer Mitarbeiter abzurufen – sie sind zugleich Betroffene und Gestalter.

Wie unsere Studien zur Führungsforschung bei Veränderungen in der Automobilindustrie zeigten, leidet insbesondere das mittlere Management, bestehend aus Teamleitern, Meistern oder Abteilungsleitern, unter einer hohen Veränderungsdynamik. Für eine angemessene Bearbeitung fehlt die Zeit, und einzelne Veränderungsprozesse sind nicht oder suboptimal aufeinander abgestimmt. Zwei Drittel von 1.150 Befragten bemängelten eine ausreichende Kommunikation. Inkonsistente und verspätete Informationen verstärkten das Gefühl der Unsicherheit. Fast 70 Prozent der Befragten waren der Meinung, dass es keine oder nur teilweise Möglichkeiten gibt, sich an der Planung von Veränderungsprozessen zu beteiligen. Je niedriger sie in der Managementhierarchie verankert sind, desto geringer empfinden Führungskräfte ihre Möglichkeiten zur Partizipation bei organisationalen Restrukturierungsvorhaben.

Gefragt nach Ressourcen, die genutzt werden sollten, um Veränderungsbereitschaft zu fördern, nannten die Befragten vorrangig eine transparente und ehrliche Kommunikation, die Einbeziehung der Führungskräfte in die Planungsprozesse, eine vertrauensvolle Führung und Unterstützung durch die Vorgesetzten sowie arbeitsinhaltliche Ressourcen wie ein angemessener Handlungsspielraum und eine Aufgabendichte, die auch tatsächlich bewältigt werden kann. Korrelationsanalysen zeigten, dass diese Ressourcen signifikant mit der Veränderungsbereitschaft des mittleren Managements zusammenhängen. Auf Basis dieser Analysen wurden bedarfsgerechte Maßnahmen der Teamentwicklung und des Coachings erprobt, die Kommunikation, Abstimmung und Partizipation der Führungsverantwortlichen bei bevorstehenden oder laufenden Veränderungsprozessen verbessern sollen.

#### **Transformationaler Führungsstil**

Führungskräfte sind aber auch verantwortlich für die Gestaltung eines entwicklungsförderlichen und motivierenden Veränderungsklimas innerhalb ihres Teams. Ziele von Erfolg versprechenden neueren Ansätzen in der Führungsforschung sind daher positive Einstellungen gegenüber Veränderungen sowie der Abbau von Widerständen und zynischen Einstellungen. Zu einem solchen „transformationalen“ Führungsstil gehören Einfluss durch Vorbildlichkeit und Glaubwürdigkeit, Motivieren durch begeisternde realisierbare Visionen, Anregung zur kritischen Reflexion, Förderung kreativen Denkens und individuelle Unterstützung, Wertschätzung und Förderung. Zahlreiche inter-

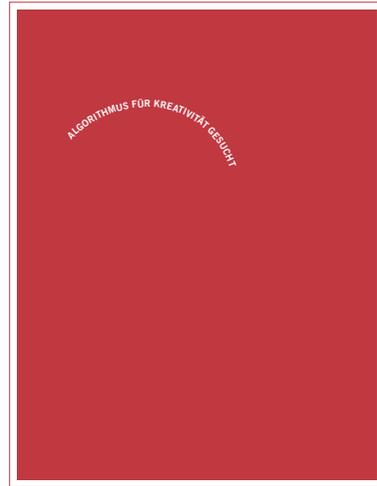
nationale Studien und Metaanalysen haben die Wirksamkeit transformationaler Führung belegt. In unseren Studien konnten wir zeigen, dass Mitarbeiter von Führungskräften, die in diesem Sinne führen, häufiger neue IKT-Anwendungen nutzen und aufgeschlossener gegenüber Veränderungen sind. Werden die Mitarbeiter zusätzlich ermutigt, proaktiv und eigenverantwortlich an Probleme heranzugehen, verstärken sich diese Effekte. Eine weitere Studie zeigte zudem eine deutliche Steigerung der Arbeitszufriedenheit und der Zufriedenheit mit der Life-Balance bei den Mitarbeitern, wenn Führungskräfte transformational führen. ●

„Auf der Suche nach Ressourcen und potenziellen Stressoren spielen Führungskräfte eine zentrale Rolle.“



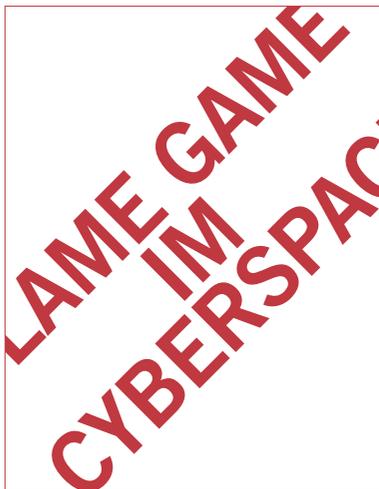
KÜNSTLICHE INTELLIGENZ  
TIEFE NETZE  
VON MASCHINEN LERNEN  
ULLRICH KÖTHE

76



COMPUTERLINGUISTIK  
ALGORITHMUS FÜR KREATIVITÄT GESUCHT  
HERAUSFORDERUNGEN MASCHINELLEN SPRACHVERSTEHENS  
ANETTE FRANK & KATJA MARKERT

86



POLITIKWISSENSCHAFT  
BLAME GAME IM CYBERSPACE  
INFORMATIONSTECHNIK ALS WAFFE?  
SEBASTIAN HARNISCH & KERSTIN ZETTL

96



RECHTSWISSENSCHAFT  
FAHRERLOS  
AUTONOME VERKEHRSSYSTEME UND RECHT  
STEFAN J. GEIBEL

106

# KAPITEL



TIEFE

NETZE

TIEFE NETZE

# VON MASCHINEN LERNEN

ULLRICH KÖTHE

Während der Operation eines Patienten berechnen sogenannte invertierbare neuronale Netze den Sauerstoffgehalt des Blutes in Geweben und Gefäßen. Dabei erkennen diese Netze automatisch Bildbereiche, die von Instrumenten oder Tüchern verdeckt sind, als „kein Gewebe“ und ignorieren sie. Ein Beispiel für eine medizinische Anwendung, die Forschungsergebnisse der Arbeitsgruppe „Explainable Machine Learning“ am Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen der Universität Heidelberg nutzt. Das maschinelle Lernen bildet gemeinsam mit der logikbasierten KI und der Mustererkennung die drei grundlegenden Ansätze auf dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz (KI). Die Anwendungsgebiete der KI reichen vom Sieg eines Computers über die weltbesten menschlichen Go-Spieler bis zu Bildsegmentierung, Fluoreszenzmikroskopie oder Diagnostik in der Krebsmedizin oder der Augenheilkunde.

# N

Nahezu jedem ist heute im Alltag einer der größten Erfolge der Künstlichen Intelligenz (KI) vertraut: das Navigationsprogramm. Es speichert relevante geographische Informationen in einer riesigen Datenbank und beantwortet mittels effizienter Suchverfahren Anfragen nach dem kürzesten Weg oder der schnellsten Verbindung. Das Navigationsprogramm ist ein Anwendungsbeispiel für die „logikbasierte KI“, einen von drei grundlegenden Ansätzen, die sich im Feld der Künstlichen Intelligenz unterscheiden lassen. Neben der logikbasierte KI gibt es die „Mustererkennung“ und das „maschinelle Lernen“. Alle drei Ansätze existierten mehr oder weniger von Anfang an nebeneinander. Das „Perzeptron“ beispielsweise – eines der ersten künstlichen neuronalen Netze – wurde bereits im Jahr 1958 von dem US-amerikanischen Wissenschaftler Frank Rosenblatt eingeführt. Geändert hat sich hingegen, welcher Ansatz jeweils im Mittelpunkt des Interesses stand: Bis etwa zum Jahr 1985 war es die logikbasierte KI, zwischen 1985 und 2012 die Mustererkennung – seit 2012 hat das maschinelle Lernen seinen Siegeszug angetreten. Mit dem maschinellen Lernen und wie man es optimieren kann, beschäftigt sich auch unsere Forschergruppe im Rahmen des Exzellenzclusters „STRUKTUREN“ der Universität Heidelberg.

## Die Logik als Basis

Die logikbasierte KI entstand aus dem konsequenten Weiterdenken der Erfindung des Computers um 1940. Es hatte sich seinerzeit schnell gezeigt, dass Computer nicht nur einfache Berechnungen automatisieren können wie etwa ein Taschenrechner. Sie können auch anspruchsvollere Aufgaben bewältigen, beispielsweise Differenzialgleichungen lösen oder große Datenmengen systematisch nach relevanten Informationen durchsuchen. Digitale Computer beruhen auf der mathematischen Formalisierung der Logik, von George Boole (1815 bis 1864) bis zu Alan Turing (1912 bis 1954). Der Erfolg dieses Vorgehens legte die Hypothese nahe, dass geistige Leistungen generell der Ausdruck eines ausgeklügelten Anwendens logischer Verfahren sind.

Die logikbasierte KI erforscht, wie sämtliches Wissen über eine Domäne der Welt formal in Wissensbasen gespeichert werden kann und wie daraus mittels logischer Schlussregeln

## Das Interdisziplinäre Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen

Das Interdisziplinäre Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) wurde 1987 als bundesweit erstes universitäres Forschungszentrum seiner Art gegründet. Die Forschung am IWR befasst sich mit Fragestellungen aus Natur-, Technik- und Geisteswissenschaften und bearbeitet sie mit dem Methodenrepertoire des Wissenschaftlichen Rechnens: der mathematischen Modellierung, Simulation und Optimierung, der Bild- und Datenverarbeitung sowie der Visualisierung. Als Querschnittsdisziplin trägt das Wissenschaftliche Rechnen entscheidend zur Lösung anspruchsvoller Probleme aus Wissenschaft und Technik bei und gilt damit als eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts. Seine Methoden kommen bei so unterschiedlichen Fragestellungen zum Einsatz wie dem Entwurf effizienter Brennstoffzellen, der Simulation der Vorgänge beim Hirninfarkt, der Prognose des Pestizidabbaus im Boden oder auch der Optimierung von Bewegungsabläufen.

Das IWR umfasst heute 50 Forscherteams aus unterschiedlichen Fakultäten sowie neun von jungen Wissenschaftlern geführte Nachwuchsgruppen. Rund 500 Forscherinnen und Forscher arbeiten im Rahmen des Zentrums in interdisziplinären Kooperationen zusammen. Neben Mathematik, Physik, Chemie und Informatik sowie den Lebenswissenschaften sind zunehmend auch Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Psychologie, Kognitionswissenschaften sowie Geistes- und Kulturwissenschaften vertreten. Die Infrastruktur des IWR umfasst unter anderem Hochleistungsrechner, 3D-Graphiklabore sowie spezielle Laser-Scanner. Auf Initiative des IWR entstand 2007 die im Rahmen der Exzellenzinitiative geförderte „Heidelberger Graduiertenschule der mathematischen und computergestützten Methoden für die Wissenschaften“ (HGS MathComp). Dort forschen derzeit rund 100 Doktorandinnen und Doktoranden aus allen am IWR vertretenen Fächern.

[www.iwr.uni-heidelberg.de](http://www.iwr.uni-heidelberg.de)

neues Wissen und konkrete Handlungsempfehlungen abgeleitet werden können. Nicht nur zur eingangs erwähnten Navigation, auch in den Naturwissenschaften ist die logikbasierte KI unverzichtbar: Computer-Algebraprogramme wie „Mathematica“ und „Maple“ erledigen in wenigen Sekunden schwierige mathematische Herleitungen, für die ein Experte Stunden oder gar Tage benötigt – und das, ohne sich dabei auf halbem Wege zu verrechnen.

Um das Jahr 1980 wurden zwei Nachteile des logikbasierten Ansatzes deutlich. Erstens ist er für viele Fragestellungen nicht effizient genug, weil zahlreiche Verfahren „NP-hart“ sind: Das bedeutet, dass ihre Laufzeit exponentiell mit der Problemgröße wächst. Noch schwerer wiegt der zweite Nachteil: Die Logik hat es sehr schwer, mit Unsicherheit umzugehen. Logische Aussagen sind entweder wahr oder falsch – die reale Welt aber lässt sich nicht in ein solch einfaches Schwarz-Weiß-Schema zwängen. Im Leben gilt es, ständig Entscheidungen zu treffen, ohne zuvor das gesamte verfügbare Wissen sammeln und auswerten zu können; auch der beste Plan wird häufig aufgrund zufälliger Ereignisse hinfällig. Das gilt selbst in exakten Wissenschaften wie der Physik. Dort sind der möglichen Genauigkeit von Messungen und Vorhersagen prinzipielle Grenzen gesetzt, beispielsweise in chaotischen Systemen wie dem Wetter oder bei der Unschärferelation in der Quantenmechanik. Der zweite Ansatz der Künstlichen Intelligenz – die Mustererkennung – postuliert deshalb als zentrale Entitäten der Künstlichen Intelligenz Muster anstelle von Fakten und Regeln.

#### Das Erkennen von Mustern

Die Mustererkennung wurde besonders von der Wahrnehmungs- und Gestaltpsychologie inspiriert. Deren Kernaussage, „Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“, verdeutlicht, dass komplexe Phänomene nur im Zusammenspiel ihrer Teile verstanden werden können. Der Begriff „Muster“ wird dabei sehr weit gefasst. Das Elektrokardiogramm eines gesunden und eines herzkranken Menschen etwa weist unterschiedliche zeitliche Muster auf, die dem Arzt bei der Diagnose helfen; in Bildern werden bestimmte Pixelmuster vom Auge des Betrachters als Gesichter, Bäume, Menschen, Tiere oder Fahrzeuge interpretiert.

Als Formalismus, der mathematisch adäquat ist, um derartige Muster zu beschreiben, hat sich die Wahrscheinlichkeitsrechnung erwiesen, insbesondere die „Bayes'sche Statistik“. Sie erlaubt präzise Aussagen darüber, wie sich Unsicherheiten und Fehler in den Prämissen und Beobachtungen auf die Unsicherheit und Verlässlichkeit der Folgerungen und Vorhersagen auswirken. Die Frage, ob ein Bild einen Menschen zeigt, muss nun nicht mehr mit einem einfachen Ja oder Nein beantwortet werden – sie kann Unsicherheit ausdrücken, etwa, wenn es sich bei der Gestalt auf dem Bild auch um eine Puppe handeln könnte.

Im Alltag sind die Errungenschaften der Mustererkennung ebenfalls weitverbreitet. Jedem vertraut ist die Gesichtserkennung in digitalen Kameras: Sie sorgt dafür, dass Gesichter möglichst genau fokussiert werden. Die Anwendung mit der momentan größten Relevanz jedoch sind die Internet-Suchmaschinen. Einst gab ein Mustererkennungsalgorithmus

**„Die Anwendung der Künstlichen Intelligenz mit der momentan größten Bedeutung sind die Internet-Suchmaschinen.“**

**„Tiefe neuronale  
Netze erkennen  
komplexe Muster  
auch bei sehr  
großer Variabilität der  
Erscheinungs-  
formen zuverlässig  
und robust.“**

namens „PageRank“ den Anstoß zur Gründung der Firma Google – das aktuelle Suchverfahren von Google ist leider geheim. Die Bedeutung einer umfassenden Volltextsuche für die Wissenschaft kann gar nicht hoch genug bewertet werden: Aus Stunden und Tagen in der Bibliothek, um relevante Literatur inklusive ihrer Querverbindungen und Zitate zu recherchieren, sind heute Minuten oder gar Sekunden am Bildschirm geworden.

Doch selbst die Mustererkennung kann viele KI-Probleme nicht lösen: Die verwendeten statistischen Methoden sind zu schwach für die gewaltige Vielfalt real vorkommender Muster. Das wird besonders deutlich, wenn man den Stand der automatischen Übersetzungsprogramme vor rund zehn Jahren betrachtet. Damals wurde der englische Satz „Air travel is known to be the fastest mode of transportation to reach a particular destination“ von einem typischen Algorithmus übersetzt in: „Luftreisen ist bekannt, um die schnellste Weise des Transports zu sein, um einen besonderen Bestimmungsort zu erreichen.“ Noch schlimmer erging es dem Satz „Out of Dell ink for your Dell printer?“. Aus ihm wurde „Aus dem Kleinen engen Tal schwärzen für Ihren Drucker des Kleinen engen Tales mit Tinte?“ – der Algorithmus war nicht imstande, das Wort „Dell“ als Firmenname zu erkennen.

Die breite Einführung des maschinellen Lernens – insbesondere des sogenannten tiefen Lernens – ab dem Jahr 2012 hat die Situation grundlegend verändert. Aktuelle Programme übersetzen auf der Basis neuronaler Netze die Beispielsätze korrekt mit „Der Flugverkehr ist bekanntlich das schnellste Transportmittel, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen“ und „Keine Dell-Tinte für Ihren Dell-Drucker?“. Nach wie vor beruht das maschinelle Lernen auf dem Erkennen von Mustern. Es gibt aber mittlerweile einen entscheidenden Unterschied: Zuvor wurden die Modelle, die vorkommende Muster und deren Wahrscheinlichkeiten beschreiben, manuell von Experten erstellt. Heute werden sie mittels geeigneter Trainingsdaten automatisch optimiert, also maschinell „gelernt“.

Überraschenderweise hat sich gezeigt, dass maschinell gelernte Modelle den manuell erstellten deutlich überlegen sind. Dafür gibt es mehrere Gründe: Erstens haben sich die Lernverfahren in den letzten Jahren mit der Entwicklung schneller Hardware (insbesondere der GPUs, der „Graphics Processing Units“) und neuer Algorithmen stark verbessert. Zweitens sind inzwischen sehr große Trainingsdatensätze verfügbar, die ein Mensch nicht mehr umfassend verwerten kann – ein Computer aber sehr wohl. Drittens erweisen sich moderne neuronale Netze mit bis zu 1.000 Neuronenschichten – sogenannte „tiefe Netze“ – als extrem mächtige Bayes'sche Modelle. Sie erkennen komplexe Muster auch bei sehr großer Variabilität der Erscheinungsformen zuverlässig und robust,

beispielsweise Personen, Fahrzeuge und Hindernisse in natürlichen Bildern. Die Vorreiter der künstlichen neuronalen Netze – Geoffrey Hinton, Yoshua Bengio und Yann LeCun – wurden für ihre Arbeiten im Jahre 2018 mit dem Turing Award ausgezeichnet, dem „Nobelpreis“ der Informatik. Die von ihnen und vielen anderen Wissenschaftlern initiierten Methoden eröffnen auch für die Forschung in den Natur- und Lebenswissenschaften völlig neue Möglichkeiten.

### Biologische Anwendungen

Tiefe Netze werden beispielsweise genutzt, um bildgebende Verfahren zu verbessern. Exemplarisch zeigen das zwei Anwendungen der Fluoreszenzmikroskopie, einer modernen mikroskopischen Methode. Dabei werden bestimmte Strukturen im Innern von Zellen gezielt mit sogenannten Fluorophoren gefärbt, so dass genau diese zellulären Strukturen aufleuchten, wenn sie mit geeignetem Laserlicht dazu angeregt werden. Für eine optimale Bildqualität sollte der Anregungslaser eine hohe Intensität haben. Dies schädigt aber die Zellen (Phototoxizität) und verhindert, sie in ihrer Entwicklung zu beobachten. Niedrige Laserintensitäten wiederum führen zu stark verrauschten Bildern. Die Lösung, die Forscher der Max-Planck-Gesellschaft um Florian Jug und Eugene Myers dafür gefunden haben: Man nimmt in einer Trainingsphase Bildpaare auf, die die gleichen Zellen zunächst mit niedriger und dann mit hoher Intensität abbilden. Anhand dieser Daten erlernt ein neuronales Netz, Bilder hoher Qualität aus den korrespondierenden verrauschten Bildern zu rekonstruieren. Eine solche „content-aware image restoration“ macht es nach einer Trainingsphase möglich, niedrige Laserintensitäten zu benutzen, ohne dabei starke Abstriche bei der Bildqualität hinnehmen zu müssen.

Eine andere Variante der Fluoreszenzmikroskopie, für die Stefan Hell, Eric Betzig und William Moerner im Jahr 2014 den Chemie-Nobelpreis erhielten, versucht, das Abbe'sche Auflösungslimit von 200 Nanometern zu überwinden. Hierzu sorgt man beispielsweise mit chemischen Tricks dafür, dass zu jedem Zeitpunkt nur wenige Fluorophore aktiv sind. Deren Lichtpunkte sind dann im Bild so weit separiert, dass man ihre Position auf 1/10 Pixel, also 20 Nanometer, genau lokalisieren kann. Um ein supraauflösendes Bild zusammensetzen, braucht man allerdings bis zu 10.000 Einzelaufnahmen. Mit nur 100 Einzelaufnahmen kommt man aus, wenn viele Fluorophore gleichzeitig aktiviert werden. Weil jetzt aber die Lichtpunkte überlappen, versagen klassische Verfahren zur Lokalisierung. Kürzlich ist es dem Team von Anna Kreshuk am European Molecular Biology Laboratory (EMBL) mit neuronalen Netzen gelungen, auch bei hoher Punktdichte eine zuverlässige und genaue Lokalisation zu gewährleisten. Praktisch bedeutet das: Die Aufnahme eines supraauflösenden Bildes dauert nicht

# „Neuronale Netze erreichen in der Medizin bei vielen diagnostischen Fragen die Genauigkeit der besten Experten.“

mehrere Minuten, sondern nur noch wenige Sekunden – damit können auch zeitliche Veränderungen der Zellen sichtbar gemacht werden.

Eine noch größere Bedeutung hat das tiefe Lernen für die Bildsegmentierung und -klassifikation. Ein spektakuläres Beispiel ist der aus einer Kooperation von Janelia Research und Google unter Leitung von Stephen Plaza und Viren Jain hervorgegangene „Hemibrain-Datensatz“ für die Hirnforschung. Er umfasst einen großen Teil des Gehirns einer Fruchtfliege (*Drosophila melanogaster*) mit dem Ziel, das „Konnektom“ zu verstehen, das vollständige Netzwerk aller Nervenzellen (Neuronen). Um gleichzeitig die feinsten neuronalen Strukturen und die volle Ausdehnung der Nervenzellfortsätze abbilden zu können, benötigt man eine dreidimensionale Auflösung von acht Nanometern und ein Bildfeld von 0,25 Millimetern in jeder Raumrichtung, also circa  $30.000^3$  Pixel. Die Segmentierung sämtlicher 25.000 Nervenzellen und 20 Millionen Synapsen – der Verknüpfungen der Nervenzellen – in diesem 27 Terabyte umfassenden Datensatz war nur durch neue Verfahren des tiefen Lernens in Verbindung mit einer rigorosen Qualitätskontrolle durch menschliche Experten („proof reading“) möglich.

Ähnliche Entwicklungen beobachten wir in anderen Bereichen der Biologie, beispielsweise bei der Hochdurchsatzmikroskopie. In der Medizin wurde unlängst gezeigt, dass neuronale Netze bei vielen diagnostischen Fragen, vor allem in der Krebsmedizin und der Augenheilkunde, die Genauigkeit der besten Experten erreichen. Daher etabliert sich zunehmend ein effizientes arbeitsteiliges Verfahren: Der Computer weist den Arzt auf interessante

Bereiche in den Daten hin und schlägt Interpretationen vor – der Arzt konzentriert sich auf Diagnose und Bewertung.

## Induktives und transduktives Vorgehen

Gerade die Erfolge in der Medizin verdeutlichen allerdings auch ein prinzipielles Problem aktueller neuronaler Netze: Sie liefern zwar hervorragende Ergebnisse, aber es ist nicht offensichtlich, wie sie dabei vorgehen und auf welche Muster sie ihre Entscheidungen stützen. Ein solches Black-Box-Verhalten ist für Anwendungen inakzeptabel, bei denen Fehler potenziell lebensbedrohlich sind. Hier hilft wiederum ein Blick in die Geschichte, um die Ursachen des Problems zu verstehen.

Die Naturwissenschaften verfolgen traditionell einen induktiven Ansatz: Daten aus Beobachtungen und Experimenten werden benutzt, um dahinterliegende allgemeine Gesetze zu identifizieren. Dieses theoretische Verständnis ermöglicht es, korrekte Vorhersagen für neue Experimente und Situationen zu treffen. Das maschinelle Lernen ist anfangs ebenso vorgegangen. Die Erfolge aber waren bis circa 1990 bescheiden: Die meisten Fragestellungen waren zu komplex für die damaligen theoretischen Werkzeuge. Der russisch-amerikanische Mathematiker Vladimir Vapnik hat deshalb den „transduktiven Ansatz“ eingeführt, der die Aufgabe drastisch vereinfacht, indem er Vorhersagen direkt von Beobachtungen ableitet. Das „inverse Pendel“ verdeutlicht den Unterschied zwischen einem induktiven und einem transduktiven Vorgehen. Bei diesem Beispiel muss ein aufrechter Stab auf einem Finger oder Roboterwagen balanciert werden. Der induktive Ansatz stellt zunächst die physikalischen Bewegungsgleichungen für jedes beliebige inverse Pendel auf. Daraus lassen sich – nach Einsetzen

DEEP NETWORKS

# LEARNING FROM MACHINES

ULLRICH KÖTHE

Artificial intelligence (AI), a field of study that is barely 70 years old, has already made major inroads into daily life, for example in the form of navigation programmes, internet search engines and automatic language translation. The widespread adoption of neural networks and deep learning over the last decade has led to substantial progress in the quality of results and the scope of potential applications. The present article illustrates this with a description of recent advances in biological and medical imaging.

Heidelberg University, and specifically my research group “Explainable Machine Learning”, focuses on artificial intelligence applications in the natural and life sciences. These applications pose additional challenges to AI methods: models should not merely compute accurate results and good predictions, they also need to make their reasoning explicit and provide insights into the underlying natural phenomena. Current AI algorithms, which mainly follow the so-called transductive approach, do not offer this capability. We aim at designing new model types that open up the black box by combining the transductive approach with the classical inductive paradigm of scientific inquiry. Promising first examples demonstrate the potential of this combination for interpretable artificial intelligence. ●

ADJUNCT PROF. ULLRICH KÖTHE has been heading the research group “Explainable Machine Learning” in Heidelberg University’s Visual Learning Lab since 2017. Prior to that, he designed machine learning methods for image analysis in the life sciences in the “Image Analysis and Learning” research group at Heidelberg University’s Interdisciplinary Center for Scientific Computing (IWR) and investigated the fundamental performance limits of generic image analysis methods at the University of Hamburg. He was also a leading contributor to several open source software projects for image analysis. Ullrich Köthe’s research focuses on artificial neural networks whose processes can be understood and interpreted by humans, and examines how these networks can be used as research tools in the natural and life sciences. In his function as e-learning representative of the computer science department, he also coordinates online teaching in this field.

Contact: ullrich.koethe@  
iwr.uni-heidelberg.de

**“Artificial neural networks in medical applications can answer many diagnostic questions with the same accuracy as the best experts.”**



**APL. PROF. DR. ULLRICH KÖTHE** leitet seit 2017 die Arbeitsgruppe „Explainable Machine Learning“ im Visual Learning Lab der Universität Heidelberg. Zuvor entwickelte er in der „Image Analysis and Learning“-Gruppe am Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) der Universität Heidelberg maschinelle Lernverfahren für die Bildanalyse in den Lebenswissenschaften und untersuchte an der Universität Hamburg die prinzipiellen Leistungsgrenzen generischer Bildanalyseverfahren. Außerdem war er federführend an mehreren Open-Source-Softwareprojekten für Bildanalysealgorithmen beteiligt. Ullrich Köthe erforscht neuronale Netze, deren Vorgehen für Menschen nachvollziehbar und interpretierbar ist, und wie sich solche Netze als Erkenntniswerkzeuge in den Natur- und Lebenswissenschaften einsetzen lassen. Er koordiniert außerdem als eLearning-Beauftragter der Informatik die Online-Lehre in diesem Bereich.

Kontakt: [ullrich.koethe@iwr.uni-heidelberg.de](mailto:ullrich.koethe@iwr.uni-heidelberg.de)

der Parameter eines konkreten Pendels – die passenden Steuerkommandos für die Hand oder den Roboter berechnen. Ein Mensch hingegen lernt das Balancieren eher transduktiv: Durch fortgesetztes Üben setzt das Gehirn die beobachteten Bewegungen des Stabs direkt in die notwendigen Bewegungen der Hand um.

Die Unterscheidung zwischen induktivem und transduktivem Vorgehen ist im maschinellen Lernen weitverbreitet. Die meisten Erfolge der letzten Jahre – von der Bildsegmentierung bis zum Gewinn des Computers gegen die weltbesten menschlichen Go-Spieler – beruhen auf dem transduktiven Ansatz. Dadurch gingen allerdings das theoretische Verständnis und die Interpretierbarkeit der Lösungen verloren. Es ist deshalb an der Zeit, dem induktiven Ansatz wieder mehr Aufmerksamkeit zu schenken. Diesem Ziel widmet sich unsere Arbeitsgruppe „Explainable Machine Learning“ am Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) der Universität Heidelberg. Dazu kooperieren wir im Rahmen des Exzellenzclusters „STRUKTUREN: Emergenz in Natur, Mathematik und komplexen Daten“, des von der Klaus Tschira Stiftung geförderten Informatics4Life-Projekts und anderer Initiativen mit vielen Forschern aus den Natur- und Lebenswissenschaften.

#### **Invertierbare neuronale Netze**

Im Zentrum unserer Forschung stehen sogenannte invertierbare neuronale Netze (INNs). Klassische „feed-forward Netze“ funktionieren nur in einer Richtung, von den Eingaben zu den Ausgaben. Invertierbare neuronale Netze hingegen können in beiden Richtungen betrieben werden – von Eingaben zu Ausgaben und umgekehrt. Wir erforschen, wie man diese Fähigkeit von INNs nutzen kann, um die Vorteile von transduktiven und induktiven Methoden im selben Modell zu vereinen: Der transduktive Aspekt stellt dabei sicher, dass unsere Netze ebenso präzise Ergebnisse liefern wie Standardnetze; der induktive Aspekt sorgt für die Interpretierbarkeit dieser Ergebnisse.

Dabei beachten wir beispielsweise auch die Frage, ob eine gegebene Eingabe überhaupt zur betrachteten Domäne passt, was die Arbeitsgruppe der Informatikerin Lena Maier-Hein am Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ) in Heidelberg für eine medizinische Anwendung nutzt: Invertierbare neuronale Netze berechnen während der Operation eines Patienten den Sauerstoffgehalt des Blutes in Geweben und Gefäßen aus multispektralen Bildern. Bildbereiche, die während der Operation etwa durch Instrumente oder Tücher verdeckt sind, werden von INNs automatisch als „kein Gewebe“ erkannt und ignoriert. Standardnetze hingegen geben in solchen Bereichen oft unsinnige Antworten. In einer weiteren Arbeit konnten wir zeigen, dass invertierbare Netze unter bestimmten Bedingungen neue Variablen, sogenannte Konzepte, entdecken,

die für Menschen intuitiv verständlich sind. Wir finden beispielsweise im sogenannten MNIST-Datensatz rund 20 anschauliche Konzepte, mit denen sich die Variationsbreite handgeschriebener Zahlen nachvollziehbar erklären lässt.

Derartige Konzepte sollen im nächsten Schritt die Basis für kausale Erklärungen liefern. Der Vorteil von kausalen Interpretationen gegenüber rein statistischen Korrelationen liegt auf der Hand. Wenn man keine kontrolliert randomisierten Experimente durchführen kann, ist die datengetriebene Extraktion kausaler Relationen jedoch sehr anspruchsvoll – das haben die Untersuchungen des US-amerikanischen Informatikers Judea Pearl und vieler anderer Wissenschaftler gezeigt. Ein erster Hinweis, was Lernverfahren hier leisten können, wurde vor wenigen Monaten von Forschern des Massachusetts Institute for Technology (MIT) um James Collins publiziert: Ihr Modell war nach Training auf einigen Tausend Molekülen mit bekannter Wirkung in der Lage, aus 100 Millionen Kandidatenmolekülen 23 potenzielle neue Antibiotika zu identifizieren – mehrere von ihnen haben sich in Untersuchungen mit Tieren tatsächlich als hochwirksam erwiesen. Mächtige interpretierbare Modelle, bei denen tiefe Netzwerke automatisch aussagekräftige Variablen und kausale Zusammenhänge identifizieren, sind deshalb ein vielversprechender Weg, um maschinelles Lernen zukünftig – über die Datenanalyse hinaus – als eine allgemeine Erkenntnismethode in den Natur- und Lebenswissenschaften zu etablieren. ●

ALGORITHMUS FÜR KREATIVITÄT GESUCHT

ALGORITHMUS FÜR KREATIVITÄT GESUCHT

# HERAUSFORDERUNGEN MASCHINELLEN SPRACHVERSTEHENS

ANETTE FRANK & KATJA MARKERT

**Ob Schachspiel, Quiz oder virtuelle Debatte: Dank Künstlicher Intelligenz sind Maschinen heutzutage in der Lage, sich in allen möglichen Disziplinen mit Menschen zu messen – auch auf sprachlicher Ebene. Systeme, die das sogenannte tiefe Lernen anwenden, können beispielsweise Texte in hoher Qualität übersetzen oder Fragen des täglichen Lebens beantworten. Mit der Entwicklung und Untersuchung von Methoden, die diese und andere sprachliche Anwendungen für Maschinen ermöglichen, befasst sich die Computerlinguistik – auch an der Universität Heidelberg.**



In unserer Informationsgesellschaft ist die Verarbeitung menschlicher Sprache durch Computer allgegenwärtig: Smartphones müssen die Bedeutung von Spracheingaben erfassen, maschinelle Übersetzungen helfen bei der Kommunikation und Informationen müssen aus großen Datenmengen extrahiert und zusammengefasst werden. Die Computerlinguistik entwickelt Methoden, um Maschinen

beizubringen, wie man Sprachfertigkeiten wie das Übersetzen oder Zusammenfassen von Texten, das Beantworten von Fragen oder das Erzählen von Geschichten ausführt. Damit Maschinen menschliche Sprache automatisch verarbeiten und interpretieren können, erforschen Computerlinguistinnen und -linguisten die mathematischen und logischen Eigenschaften natürlicher Sprache und entwickeln algorithmische und statistische Verfahren zur automatischen Sprachverarbeitung. In diesem Beitrag erklären wir, wie Menschen Sprache nutzen und verstehen, welche Herausforderungen für maschinelles Sprachverstehen sich daraus ergeben, wie solches Wissen in sprachtechnologischen Anwendungen eingesetzt wird und welche Projekte wir dabei am Institut für Computerlinguistik der Universität Heidelberg verfolgen.

#### **Wie Menschen Sprache nutzen und verstehen**

Den Inhalt von Sprache zu erschließen heißt, Entitäten zu erkennen, ihre Relationen zueinander und ihre Beteiligung

# „Sprache zeichnet sich neben Diskursgebundenheit auch durch Kreativität aus.“

in Ereignissen zu verstehen und ganze Sachverhalte in Beziehung zu setzen – zum Beispiel zeitlich oder kausal.

- (1) [Tina<sub>1</sub> made spaghetti<sub>2</sub> for her<sub>1</sub> boyfriend<sub>3</sub>]<sub>4</sub>. It<sub>4</sub> took a lot of work, but she<sub>1</sub> was very proud. Her<sub>1</sub> boyfriend<sub>3</sub> ate the whole plate<sub>2</sub> and said it<sub>2</sub> was good.

In Beispiel (1) sind solche Entitäten „Tina“, die „Spaghetti“ und „Tinas Freund“. Neben Ereignissen werden auch Gefühle („proud“) und Eigenschaften („good“) zum Ausdruck gebracht. Dafür stellt das Lexikon einer Sprache geeignete Ausdrücke bereit. Charakteristisch für Diskurse ist, dass auf bereits eingeführte Entitäten – sogenannte Referenten – mit Pronomina Bezug genommen werden kann. So bezieht sich „her“<sub>1</sub> auf Tina, „it“<sub>2</sub> auf das Gericht, „her boyfriend“<sub>3</sub> auf Tinas Freund und „It“<sub>4</sub> auf das Vorbereiten der Spaghetti durch Tina.

Menschen fällt es leicht, Bezugselemente für Pronomina zu identifizieren und so die im Text dargestellten Sachverhalte korrekt zu interpretieren. Wie stark diese Fähigkeit von unserem Weltwissen abhängt, wird klar, wenn nur eines von mehreren Bezugselementen möglich ist, da alles andere unserem Weltwissen widerspricht – siehe Beispiel (2). Verfahren, mit denen man erkennt, welche Ausdrücke in einem Text sich auf die gleiche Entität beziehen, bezeichnet man als Koreferenzresolution oder -auflösung. Klassische Verfahren zur Koreferenzresolution, denen derartige Wissen fehlt, können solche Fälle nicht lösen, denn sie benötigen Weltwissen, um je nach Kontext die korrekte Entität zu wählen, auf die sich das Pronomen bezieht.

- (2) a. Joan<sub>1</sub> made sure to thank Susan<sub>2</sub> for all the help she<sub>1,2</sub> had received/given.  
b. The trophy<sub>1</sub> doesn't fit into the brown suitcase<sub>2</sub> because it<sub>1,2</sub> is too large/small.

Wie essenziell Koreferenzauflösung im Diskurs ist, lässt sich anhand von Meinungsanalyse verdeutlichen. In Beispiel (3) kritisiert Mexikos Präsident einen Sachverhalt, der nur durch korrekte Auflösung der sogenannten abstrakten

Anapher „this“ als Gegenstand seiner Kritik interpretierbar ist – als Anapher bezeichnet die Sprachwissenschaft ein zurückverweisendes Element eines Textes.

- (3) [U.S. gun laws enable weapons to flow from the U.S. to the hands of Mexico's drug cartels]<sub>1</sub>. ... Mexico's president criticizes this/this issue<sub>1</sub>.

Doch anaphorische Bezüge können auch ohne Pronomina und ohne Gleichsetzung der Entitäten vorliegen. In Beispiel (4) stehen „the supermarket“ und „the owner“ zueinander in Beziehung, beschreiben aber nicht die gleiche Entität. In Beispiel (5) wird im zweiten Satz deutlich, dass John an einem Ort ankommt („arrived“) – nicht aber wo. Dies kann aus dem Vorsatz erschlossen werden: Er kam in London an, dem Ziel der Reise („travel to London“).

- (4) The supermarket went out of business. The owner soon found a new job.  
(5) John traveled to London. His train arrived at 6 pm.

Schließlich bleiben auch Beziehungen zwischen Sachverhalten, wie sie durch Konjunktionen („because“, „before“) angezeigt werden, oft implizit, solange sie vom Hörer rekonstruiert werden können. Obwohl in Beispiel (6) die Folge (Kevin ist hingefallen) der Ursache (Maria hat ihn gestoßen) im Text vorangeht, benötigen wir zur korrekten Interpretation kein explizites „because“: Unser Alltagswissen ist dafür ausreichend.

- (6) Kevin fell. Mary pushed him.

Ein mit Anaphorik verwandtes Phänomen ist die sogenannte Präsupposition – die implizite Voraussetzung: So wird durch ein Verb wie „öffnen“ in Beispiel (7) ein notwendiger Vorzustand (geschlossen sein) mitverstanden („präsupponiert“) – selbst wenn das Ereignis negiert ist.

- (7) John opened the door. / John did not open the door.

Die Prinzipien, die solchen Sprachphänomenen zugrunde liegen, beschrieb der englische Sprachphilosoph Paul Grice 1975 als Konversationsmaxime der Quantität, der Qualität, der Relation und der Art und Weise. Phänomene der oben beschriebenen „Implicitness“ fallen unter die Maxime der Quantität: „Sei nur so informativ wie nötig“.

### Bildliche Sprache

Sprache zeichnet sich neben Diskursgebundenheit auch durch Kreativität aus. Bildliche Sprache benutzt Worte innovativ so, dass diese von ihrer allgemein akzeptierten Bedeutung abweichen, zum Beispiel, um abstraktere Gegebenheiten zu veranschaulichen, rhetorische Effekte zu erzielen oder auch Sachverhalte verkürzt darzustellen. Oberflächlich gesehen verletzt bildliche Sprache die Grice'sche Maxime der Qualität („Be truthful“) durch die übertragene Bedeutung.

Bekannte Beispiele sind Metaphern, in denen ein Vehikel aus einer Domäne übertragen einen sogenannten Tenor aus einer anderen Domäne plastisch zum Ausdruck bringt. In Beispiel (8) beschreibt das Vehikel „attacked“ aus der konkreteren, physischen Domäne des Kriegs einen Tenor aus der Domäne des Streits.

(8) *Jane attacked all my arguments.*

Während Metaphern eine Ähnlichkeitsbeziehung zwischen zwei Domänen herstellen oder ausnutzen, wird bei Metonymien nicht eine Ähnlichkeits-, sondern eine sogenannte Kontiguitätsbeziehung der realen sachlichen Zusammengehörigkeit zwischen zwei Entitäten zum verkürzten Bezug genutzt: In Beispiel (9) steht Vietnam für den Vietnamkrieg und nutzt die Beziehung zwischen einem Ereignis und seinem Ort aus.

(9) *John was traumatized by Vietnam.*

Metaphern und Metonymien sind oft keine willkürlichen Einzelfälle von Domänenübertragungen, sondern sprachliche Ausdrucksformen systematischer konzeptueller Metaphern. Weitere Beispiele für die oben eingeführte konzeptuelle Metapher ARGUMENT IS WAR sind „Jane shot down all my arguments“ oder „We declared a ceasefire during dinner“. Ein weiteres Beispiel einer konzeptuellen Metapher ist EMOTIONS ARE HEAT („The crowd was fired up“). Metonymien sind ebenfalls oft regularisiert. So ist PLACE-FOR-EVENT nicht nur für Vietnam, sondern für jeden Ort mit einem mit ihm stark assoziierten Ereignis nutzbar. Weitere metonymische Muster sind PLACE-FOR-SPORTSTEAM („Germany lost the world cup final“) oder AUTHOR-FOR-BOOK („I read Chaucer“).

Metaphorische und metonymische Übertragungen variieren stark in ihrer Kreativität. Innerhalb einer konzeptuellen

### Maschinelle Verarbeitung natürlicher Sprache

Im Jahr 1988 wurde an der Universität Heidelberg der erste Lehrstuhl für Computerlinguistik eingerichtet, den der „Vater der Heidelberger Computerlinguistik“, Prof. Dr. Peter Hellwig, übernahm. 1993 startete an der Neuphilologischen Fakultät der Magisterstudiengang Computerlinguistik, 2005 zog das Institut aus den Räumlichkeiten des Germanistischen Seminars in der Altstadt auf den naturwissenschaftlich-medizinischen Campus Im Neuenheimer Feld um. Aktuell verfügt das Institut über zwei Professuren für Computerlinguistik und eine Professur für Linguistische Informatik sowie über fünf Honorarprofessuren. Das Studienfach Computerlinguistik wird als Bachelor- und als Masterstudiengang angeboten.

Das Forschungsspektrum reicht von der Untersuchung grundlegender computerlinguistischer Fragestellungen bis zur Entwicklung vielfältiger Anwendungen. In der Grundlagenforschung finden dabei linguistische Forschungsfragen, beispielsweise aus Semantik und Diskurs, ebenso Beachtung wie Probleme auf den Gebieten der Forschung zur Künstlichen Intelligenz (KI) und des maschinellen Lernens. Auf der Anwendungsseite deckt das Institut von der maschinellen Übersetzung über Frage-Antwort-Systeme, automatische Textzusammenfassung und Argumentanalyse bis hin zur Anreicherung von Wissensdatenbanken ein breites Spektrum aktueller Forschung ab.

Das Institut kooperiert eng mit der „Heidelberger Graduiertenschule der mathematischen und computer-gestützten Methoden für die Wissenschaften“ (HGS MathComp) der Universität Heidelberg und dem Fachbereich Informatik der Technischen Universität Darmstadt sowie mit dem Leibniz-Institut für Deutsche Sprache (IDS) in Mannheim. Mit der Abteilung „Natural Language Processing“ des Heidelberger Instituts für Theoretische Studien (HITS) betreibt es ein gemeinsames Doktorandenprogramm „Semantic Processing“ mit integrierten Graduiertenkollegs.

[www.cl.uni-heidelberg.de](http://www.cl.uni-heidelberg.de)

Metapher oder eines metonymischen Musters ist die Verwendung mancher Worte so gebräuchlich, dass sie uns überhaupt nicht mehr als Metaphern auffallen und die entsprechende bildliche Bedeutung sogar in Lexika aufgeführt ist (siehe „attack“ in „Jane attacked all my arguments“). Andere dagegen greifen zwar auf die gleiche konzeptuelle Metapher zurück, sind aber bedeutend ungewöhnlicher (wie „ceasefire“ in „We declared a ceasefire during dinner“). Des Weiteren können ganze Domänen innovativ zueinander

in Beziehung gesetzt werden: So setzt Emily Dickinson in ihrem berühmten Vers „hope is the thing with feathers“ das Gefühl der Hoffnung mit der Vogelwelt gleich, was keiner der typischen konzeptuellen Alltagsmetaphern entspricht.

### Herausforderungen für maschinelles Sprachverstehen

Maschinelles Sprachverstehen muss die Bedeutung von Sätzen aus der Bedeutung von Wörtern im Kontext konstruieren. Dafür sind syntaktische, also den Satzbau betreffende Beziehungen ausschlaggebend: Sie zeigen an, welche Rolle eine Entität in Bezug auf ein Verb spielt: In Beispiel (10) werden je nach Verb („bekommen“ vs. „verwirren“) die Professorinnen als Subjekt („sie bekommen Formulare“) oder Objekt („Formulare verwirren sie“) interpretiert. Lokale syntaktische Relationen im Satz tragen also wesentlich zur Bestimmung der Bedeutung bei.

(10) weil die Professorinnen<sub>nomlakk</sub> viele Formulare<sub>akklnom</sub> (bekommen)verwirren)

Für die Auflösung des Bezugs von Pronomina wie in den Beispielen (1) bis (3) stehen aber lokale syntaktische Beziehungen zum Verb als Indikatoren nicht zur Verfügung. Hier spielt mehr und mehr das Weltwissen eine Rolle: Ist es plausibel, dass sich Joan bei Susan bedankt, wenn Joan Susan geholfen hat – oder eher, wenn Susan Joan geholfen hat? Warum passt der Pokal nicht in die Tasche – ist der Pokal zu groß oder die Tasche?

Die sogenannten Winograd-Sätze in Beispiel (2) gelten als Turing-Test (Die „Winograd Schema Challenge“ wie auch der Turing-Test sind Tests der Maschinenintelligenz): Um den Bezug der Pronomina aufzulösen, wird Wissen über die Welt benötigt – Wissen um physikalische Gesetze, über die Interaktion zwischen Menschen und vieles mehr. Wissen, das Menschen im Laufe ihres Lebens erwerben. Ebenso ist für ein tieferes Verständnis von Metaphern Wissen über die entsprechenden Domänen nötig.

Wie können wir dieses Wissen sammeln und für Maschinen verfügbar machen?

Um Faktenwissen über die Welt zu erlangen, nutzt die Computerlinguistik ihre eigenen Methoden: Wissen lässt sich aus Texten extrahieren und in Datenbanken speichern. Das Paradigma NELL („Never Ending Language Learning“) zieht Informationen aus Texten der Wikipedia, den Nachrichten und wissenschaftlichen Artikeln in Medizin oder Bioinformatik. Für eine hohe Qualität werden Fakten extrahiert, die in lokalen syntaktischen Mustern ausgedrückt werden.

Doch wollen wir mit dieser Methode Alltagswissen extrahieren, das zur Interpretation von Anaphern und Präsuppositionen und zum „Lesen zwischen den Zeilen“

nötig ist, stehen wir vor einer Quadratur des Kreises: Das Wissen, das für Menschen so selbstverständlich ist, dass es ohne Weiteres für Schlussfolgerungen genutzt werden kann, wird – nach Paul Grice – sprachlich meist nicht explizit gemacht und kann daher durch Methoden wie NELL nicht ohne Weiteres aus Texten gewonnen werden. Im Gegenteil: Nachrichtentexte berichten vor allem über sogenannte saliente, also auffallende Ereignisse. Schlösse man also aus der Frequenz von Erwähnungen darauf, was in der Welt passiert, würden Maschinen lernen, dass weit mehr Morde verübt als Menschen geboren werden – da Letzteres selten erwähnt wird; oder dass Menschen eher streiken, als täglich zur Arbeit zu gehen. Dies wurde als „reporting bias“ erkannt und führte dazu, dass Alltagswissen („commonsense knowledge“) explizit von Menschen erfragt wurde – anhand von Templates, die menschliches Wissen zu bestimmten Beziehungen erfragen: „X is used for / is a prerequisite for / is a subevent of Y“. Aus den ermittelten Konzeptpaaren X,Y für 30+ Relationstypen wurde das Begriffsnetz „ConceptNet“ erstellt.

Wie aber wird solches Wissen in sprachtechnologischen Anwendungen eingesetzt?

### Einsatz in sprachtechnologische Anwendungen

Mit Methoden des „tiefen Lernens“ („deep learning“), zum Beispiel sogenannten rekurrenten – also rückgekoppelten – Netzwerken oder vortrainierten Sprachmodellen wie BERT, sind Aufgaben der Sprachverarbeitung auf immer höherem Niveau lösbar. Wesentlich dafür sind unüberwacht trainierte Wortvektoren – sogenannte word embeddings, die versuchen, die Bedeutung von Wörtern mit Zahlen zu erfassen und die den neuronalen Netzwerken reiche Repräsentationen für das Vokabular vieler Sprachen liefern.

Doch können diese Modelle über Wort- und Satzfolgen eines Textes verallgemeinern? Können sie Texte verstehen und kompakt zusammenfassen? Können sie Fragen zu Texten beantworten, die nicht als Muster im Text vorgegeben sind? Haben die Modelle dafür das nötige Hintergrundwissen?

Die Herausforderungen, die sich für maschinelles Sprachverstehen stellen, haben wir anhand vieler Phänomene veranschaulicht. Die Computerlinguistik in Heidelberg forscht vor allem zu Anwendungen, die vielfältige Facetten expliziter, impliziter sowie kreativer Sprache im Kontext betreffen. Im Folgenden erläutern wir kurz einige unserer Forschungsarbeiten:

### Verarbeitung bildlicher Sprache

Zur automatischen Erkennung metaphorischer oder metonymischer Worte (wie „attack“ in „Jane attacked all my arguments“) lernen die aktuellsten Systeme aus speziellen Metaphernkorpora, in denen jedes Wort als metaphorisch oder wörtlich „annotiert“ – also mit



**PROF. DR. ANETTE FRANK** leitet die „NLP Group“ am Institut für Computerlinguistik der Universität Heidelberg. Frühere Stationen waren das Institut für Maschinelle Sprachverarbeitung in Stuttgart, das Xerox Research Centre Europe in Grenoble (Frankreich) und das Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz in Saarbrücken. Schwerpunkt ihrer Forschung ist die Erforschung maschinellen Sprachverstehens, beispielsweise für textbasierte Frage-Antwort-Systeme oder computationelle Argumentation. Zentral sind dabei die Analyse impliziter Sprache, Integration von Wissen und Phänomene der Diskursemantik, zum Beispiel abstrakte Anaphern. Zusammen mit Katja Markert leitet Anette Frank gemeinsam mit dem Leibniz-Institut für deutsche Sprache (IDS) in Mannheim den Leibniz-WissenschaftsCampus „Empirical Linguistics and Computational Language Modeling“.

Kontakt: frank@cl.uni-heidelberg.de

# „Maschinelles Sprachverstehen muss die Bedeutung von Sätzen aus der Bedeutung von Wörtern im Kontext konstruieren.“

linguistischen Informationen angereichert - wurde. Die Systeme basieren stark auf der Verwendung von „word embeddings“. Allerdings sind die erreichten guten Ergebnisse trügerisch. In einer Untersuchung unseres eigenen, auf „BERT embeddings“ basierenden Systems sowie zweier bekannter Systeme anderer Gruppen stellt sich heraus, dass diese alle ungenügend generalisieren. Sie lernen vor allem konventionalisierte metaphorische Bedeutungen wie „attack“ für die verbale Attacke und zeigen eine deutlich schlechtere Sprachverwendung für unkonventionalisierte und kreative Metaphern wie beispielsweise die Benutzung von „ceasefire“ im obigen Beispiel „We declared a ceasefire during dinner“: Dies steht im Gegensatz zu menschlichen Annotatoren, denen solche Metaphern besonders auffallen.

In einer unserer Forschungsarbeiten aus dem Jahr 2018 erkennen wir dagegen Metaphern mit einem linguistisch motivierten Modell, das im Rahmen des Leibniz-WissenschaftsCampus entstanden ist. Die Arbeit unterscheidet automatisch zwischen Affixoiden (für die Bildung neuer Wörter verwendbaren Wortbestandteilen), die metaphorisch gebraucht werden (wie „hai“ in „Miethai“), und entsprechendem wörtlichen Gebrauch als selbstständiges Wort in einem zusammengesetzten Begriff („hai“ in „Hammerhai“). Zusätzlich zu statistischen Merkmalen benutzen wir psycholinguistische und Emotionsmerkmale sowie Wissen aus dem maschinenlesbaren Wortnetz „GermaNet“ und erzielen damit eine hohe Unterscheidungs-güte dieser Phänomene.

## **Text Summarization – Textzusammenfassung**

Automatische Textzusammenfassung kürzt einzelne Sätze sowie ganze oder mehrere Texte mit dem Ziel, nur den

## **Analyse digitaler Sprachdaten: Leibniz-WissenschaftsCampus**

Die Entwicklung neuer Methoden, Modelle und Werkzeuge, mit denen digitale Sprachbestände erfasst und analysiert werden können, ist das Ziel des Leibniz-WissenschaftsCampus „Empirical Linguistics and Computational Language Modeling“, einer Forschungs Kooperation des Instituts für Computerlinguistik der Universität Heidelberg und des Leibniz-Instituts für Deutsche Sprache (IDS) in Mannheim. Von Sommer 2015 bis Ende November 2020 entwickelt das Verbundprojekt innovative Forschungsmethoden für die Anwendung korpuslinguistischer und computerlinguistischer Sprachmodellierung in den Geistes- und Sozialwissenschaften, den „Digital Humanities“. Die Förderung wird gemeinsam von der Leibniz-Gemeinschaft, dem Leibniz-Institut für Deutsche Sprache, der Universität Heidelberg und dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg getragen. Mit dem Förderinstrument Leibniz-WissenschaftsCampus soll die interdisziplinäre Zusammenarbeit von universitärer und außeruniversitärer Forschung forciert werden.

<http://wisscamp.de>

wichtigsten Inhalt wiederzugeben. Während sich bei der Zusammenfassung mehrerer Texte die meisten Systeme auf fünf bis zehn eng verwandte Texte beschränken, behandeln wir auch die Zusammenfassung von großen Mengen an Nachrichtentexten zu einem länger dauernden

Ereignis (wie dem Untergang der „Deepwater Horizon“-Ölplattform) in strukturierten Timelines. Ein Exzerpt einer von einem Journalisten geschriebenen Timeline der „Washington Post“ ist wie folgt:

**2010-04-20**

Deepwater Horizon drilling rig explodes about 42 miles off Louisiana, killing 11 men.

**2010-04-22**

The rig, having burned and been showered with water during firefighting efforts, sinks. The force of the sinking breaks off the rig's drillpipe, allowing oil to spew out into the gulf.

**2010-05-02**

The federal government closes 3 percent of federal waters in the gulf to fishing.

Unser System „Tilse“ erzeugt Timelines durch Optimierungsalgorithmen, die die wichtigsten Sätze zu Ereignissen aus vielen Zeitungsartikeln extrahieren, datieren und zusammenstellen. Dabei wird die Auffälligkeit von Unterereignissen modelliert, indem man abbildet, welche Sätze in großen Korpora semantisch zentral sind. Mehrfach vorhandene Informationen werden durch spezielle Diversitätsfunktionen eliminiert. Diese Funktionen werden temporalisiert, um den datenspezifischen Eigenschaften der Timeline-Zusammenfassung Rechnung zu tragen, zum Beispiel der Auffälligkeit von Ereignissen über einen kurzen oder einen langen Zeitraum hinweg. Während das System den aktuellsten Stand für das Problem darstellt, zeigt sich bei der Inspektion der generierten Timelines, dass zwar wichtige Ereignisse ausgewählt und datiert werden, aber die Kohärenz – also der Zusammenhang – oft zu wünschen übrig lässt. Beispielsweise ist es oft nicht möglich, verständliche Pronomina oder Referenzketten wie im menschlichen Beispiel „Deepwater horizon drilling rig“ — „the rig“ zu generieren. So beginnt die systemgenerierte Timeline mit:

(11) **2010-04-20.** The well began leaking oil into the Gulf after BP's Deepwater Horizon oil rig exploded on 10 April, killing 11 workers.

Dies wählt zwar das wichtigste Anfangsereignis, aber „the well“ und „the Gulf“ sind nicht vollständig interpretierbar. Hier ist deshalb in Zukunft auf eine stärkere Integration von Koreferenz und Weltwissen zu achten.

**Reading Comprehension – Leseverstehen**

Wie gut ein sprachverarbeitendes System einen Text versteht, wird – wie bei Schülern – durch Aufgaben zum Leseverstehen („reading comprehension“) geprüft. Das System erhält eine Textpassage und muss im Multiple-Choice-Verfahren die korrekte Antwort für eine Frage

auswählen oder eine Textlücke durch das korrekte Wort füllen – siehe Beispiel (12). Dafür entwickelten wir den „Knowledgeable Reader“: ein System, das für den gegebenen Text relevantes Hintergrundwissen aus dem Begriffsnetzwerk „ConceptNet“ identifiziert und diese Fakten – siehe Background Knowledge in (12) – in die Verarbeitung des Textes integriert. Durch sogenannte Attentiongewichte über den integrierten Fakten lässt sich feststellen, welche Fakten für welche Textstellen berücksichtigt werden. Wir zeigen, dass die Integration von Alltagswissen die Ergebnisse signifikant verbessert und dass der „Knowledgeable Reader“ inkorrekte Vorhersagen, die ohne solches Hintergrundwissen getroffen würden, mithilfe des integrierten Wissens korrigieren kann.

(12) **Text:** The prince arrived on a white horse with a sword in his hand. The fairy asked him to guard the apple tree from the wolves. The hero beat the wolves off with the sword. But they attacked again and again. The prince got tired and the wolves damaged the tree. He mounted his XXX sadly and headed home.

**Candidates:** sword – wolves – horse – hand – tree  
**Background Knowledge:**  
horse IsUsedFor riding; sword Causes death;  
human HasA hand; mount RelatedTo animal

**Computational Argumentation**

Die Kunst des Argumentierens durch das Anführen von Voraussetzungen (Prämissen) und das Ziehen einer Schlussfolgerung (Konklusion) geht zurück auf die Tradition der Griechen und Römer. Doch auch für die Moderne ist Argumentation relevant, dient sie doch zur Abwägung von Argumenten und Interessen in schwierigen Entscheidungen. Angesichts polarisierender Diskussionen in Sozialen Medien benötigen wir Systeme, die die Logik von Argumenten überprüfen und rhetorische Täuschungen offenlegen und bewerten können. Doch auch in Argumenten bleiben relevante Prämissen – sogenannte Enthymemes wie in Beispiel (13) – oft implizit. Die Logik von Argumenten ist damit für Maschinen nicht einfach nachvollziehbar. In unserem Forschungsprojekt ExPLAIN des DFG-Schwerpunktprogramms RATIO („Rational Argumentation Machines“) entwickeln wir Verfahren, um implizite Prämissen in Argumenten aufzuspüren, zu ergänzen und so Argumente für Maschinen interpretierbar zu machen.

Beispiel (13) zeigt ein Beispiel aus argumentativen Microtexts. Wesentlich für das Verständnis, wie die Konklusion (13.a) durch die Prämisse (13.c) gestützt wird, sind implizite Prämissen in (13.b), die von menschlichen Annotatoren ergänzt wurden. Unsere vollständige Annotation der Microtexts zeigt, dass die ergänzten Prämissen zu 80 Prozent einer der in „ConceptNet“ definierten Relationen entsprechen (13.b). Auch in argumentativen Texten kann



**PROF. DR. KATJA MARKERT** ist Professorin für Computerlinguistik an der Universität Heidelberg. Zuvor forschte und lehrte sie an den Universitäten Edinburgh und Leeds (beide Großbritannien) und Hannover. Sie beschäftigt sich vor allem mit Semantik und Diskurs. Dabei liegen ihre Schwerpunkte auf der automatischen Modellierung kreativer Sprache sowie der Anaphernresolution. Im Anwendungsbereich entwickelt sie Modelle für die automatische Textzusammenfassung. Zusammen mit Anette Frank leitet Katja Markert gemeinsam mit dem Leibniz-Institut für deutsche Sprache (IDS) in Mannheim den Leibniz-WissenschaftsCampus „Empirical Linguistics and Computational Language Modeling“.

Kontakt: markert@cl.uni-heidelberg.de

AN ALGORITHM FOR CREATIVITY?

# HOW MACHINES ATTEMPT TO UNDERSTAND HUMAN LANGUAGE

ANETTE FRANK &amp; KATJA MARKERT

Artificial intelligence is a widely discussed subject in science and society. Machines are already able to outperform humans in playing chess, answering quiz questions and in debating. Computational linguists develop methods whereby machines are taught various language skills: using “deep learning”, today’s systems can translate texts in high quality, answer text questions at the level of an eight-year-old or respond to questions about daily life.

But the performance we measure in our labs does not always reflect the true abilities of these systems. So-called artefacts – frequent patterns in the data – can help systems achieve deceptively high results that do not stand up to closer scrutiny. To detect such illusory effects, researchers need to design probing tasks to test whether the systems really have an in-depth knowledge of language. The fundamental question is: what challenges must a system endowed with language capabilities be able to solve?

First and foremost, such systems must capture the meaning conveyed by language. This is, however, quite challenging: for one thing, language is typically embedded in, and relies on, context. For another, meaning is not only conveyed by what is said – explicit language – but also by what is not said – implicit language, i.e. content that can be inferred by what has been said before or that does not require words because we can infer it from world knowledge. Finally, human language is creative and innovative, which makes it hard for machines to understand.

The semantics of explicit and implicit language in context is a major research topic for computational linguistics in Heidelberg. We describe how to model explicit and implicit language in context, how to integrate language with knowledge and inferential processes, how to model creative and innovative language – and how this inspires applications such as text summarisation, textual question answering and computational argumentation. ●

PROF. DR ANETTE FRANK heads the “NLP Group” at Heidelberg University’s Department of Computational Linguistics. Before transferring to Heidelberg, she worked at the Institute for Natural Language Processing in Stuttgart, the Xerox Research Centre Europe in Grenoble (France) and the German Research Center for Artificial Intelligence in Saarbrücken. Anette Frank’s research interests are automatic language understanding, e.g. for text-based question-answer systems or computational argumentation. Central aspects of this field of study include the analysis of implied language, integration of knowledge and phenomena of discourse semantics, such as abstract anaphors. Together with Katja Markert and the Leibniz Institute for the German Language (IDS) in Mannheim, Anette Frank heads the Leibniz Science Campus “Empirical Linguistics and Computational Language Modeling”.

Contact: frank@  
cl.uni-heidelberg.de

**“In order to understand human language, machines must be able to construct the meaning of sentences from the meaning of words in context.”**

PROF. DR KATJA MARKERT is a professor of computer linguistics at Heidelberg University. She previously held faculty appointments at the universities of Edinburgh and Leeds (UK) and the University of Hanover. Katja Markert is particularly interested in semantics and discourse, with special focus on automatic modelling of creative language and anaphora resolution. She also develops applications based on her research, specifically models for automatic text summarisation. Together with Anette Frank and the Leibniz Institute for the German Language (IDS) in Mannheim, Katja Markert heads the Leibniz Science Campus “Empirical Linguistics and Computational Language Modeling”.

Contact: markert@  
cl.uni-heidelberg.de

also Hintergrundwissen implizit bleiben und dem Leser zur Vervollständigung überlassen werden.

(13) Rekonstruktion impliziter Prämissen (Enthymemes) in Argumenten:

a. Prämisse

Our constitution enshrines an inviolable human dignity.

b. Enthymemes

Human dignity includes the protection of life.

PartOf(human dignity, protection of life)

Protection of life is the opposite of extinction of life.

Antonym(protection of life, extinction of life)

Death penalty extinguishes life.

Causes(death penalty, extinction of life)

c. Konklusion

The death penalty is a legal remedy which is not applicable in Germany.

Ziel des ExPLAIN-Projekts ist es, solche impliziten Prämissen in Argumenten zu erkennen und explizit zu machen.

Um sogenannte Inferenzketten wie in Beispiel (13.b) zu erzeugen, entwickeln wir Systeme zur dynamischen Vorhersage sogenannter Relationstripel, die in „ConceptNet“ noch nicht enthalten sind. Hierfür haben wir das neuronale COREC-System entwickelt. Dieses erweitern wir aktuell zur Erzeugung von Inferenzketten, um vollständige Argumentrepräsentationen herzustellen und so den Zusammenhang von Argumenten für Mensch und Maschine transparent und nachprüfbar zu machen.

Die Forschung über neuronale Systeme kehrt also zu den Grundlagen der menschlichen Sprache zurück: Welche Herausforderungen muss ein mit Sprachfähigkeiten ausgestattetes System bewältigen können? Denn es ist in erster Linie die mit der Sprache vermittelte Bedeutung, die die Systeme erfassen müssen. Diese Semantik von expliziter und impliziter Sprache im Kontext ist ein wichtiges Forschungsthema der Heidelberger Computerlinguistik. ●

**„Mit Methoden des ‚tiefen Lernens‘ (‚deep learning‘) sind Aufgaben der Sprachverarbeitung auf immer höherem Niveau lösbar.“**

**BLAME GAMERS  
CYBERSPACE**

BLAME GAME IM CYBERSPACE

# INFORMATIONSTECHNIK ALS WAFFE?

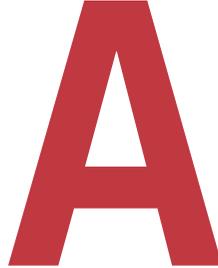
SEBASTIAN HARNISCH & KERSTIN ZETTL

**Konflikte zwischen Staaten müssen sich nicht in blutigen Kriegen äußern, sondern können auch versteckter im virtuellen Raum der Informationstechnologie ausgetragen werden. Die Bandbreite sogenannter Cyberangriffe ist groß und reicht vom Diebstahl geistigen Eigentums über Desinformationskampagnen und Wahlmanipulation bis zu Eingriffen in die Infrastruktur eines gegnerischen Landes – indem Kraftwerke durch einen Hackerangriff abgeschaltet werden. Mithilfe eines weltweit einmaligen Datensatzes untersuchen Heidelberger Politikwissenschaftlerinnen und Politikwissenschaftler das Verhalten von Demokratien und Autokratien in solchen Cyberkonflikten.**



**KERSTIN ZETTL (M.A.)** ist seit 2019 wissenschaftliche Mitarbeiterin in einem von der Deutschen Stiftung Friedensforschung geförderten Forschungsprojekt zu Cyberkonflikten unter der Leitung von Sebastian Harnisch am Institut für Politische Wissenschaft der Universität Heidelberg. Gleichzeitig arbeitet sie an ihrer Dissertation zum Vergleich autokratischer und demokratischer Cyber-Proxy-Strategien. Zuvor studierte sie Politikwissenschaft, Psychologie und Bildungswissenschaft an der Universität Heidelberg.

Kontakt: [kerstin.zettl@ipw.uni-heidelberg.de](mailto:kerstin.zettl@ipw.uni-heidelberg.de)



Als im US-Präsidentenwahlkampf 2016 der Öffentlichkeit nach und nach E-Mail-Inhalte zugespielt wurden, die für die Demokratische Partei kompromittierend waren, lag die Zuschreibung – auch Attribution genannt – einer Wahlbeeinflussung durch Russland auf der Hand. Private IT-Firmen und ungenannte Regierungsquellen deuteten in Richtung des Kreml. Die russische Regierung, so der Vorwurf, habe zwei Hackergruppierungen mit der Infiltrierung der Netzwerke des „Democratic National Committee“ (DNC) beauftragt – sogenannte „Cyberproxys“, wie staatlich beauftragte oder unterstützte nichtstaatliche Akteure in Cyberkonflikten genannt werden. Eine offizielle Zuschreibung der US-Regierung folgte zeitnah allerdings nicht. Erst im Oktober 2016 und damit mehrere Monate nach dem Vorfall kam es zu einer offiziellen Erklärung der US-Regierung, in der Russland der Wahlbeeinflussung beschuldigt wurde.

Das Zögern der Obama-Administration steht für einen größeren Trend: Demokratische Regierungen schrecken regelmäßig davor zurück, bekannt gewordene Cyberangriffe auf ihr Land bestimmten Tätern öffentlich zuzuschreiben. Geschieht dies doch, werden bislang selten fremde Regierungen direkt als Angreifer genannt, stattdessen wird von „staatlich gesponserten“ Cyberangriffen gesprochen. Das zeigen die Daten unseres Forschungsprojekts „Sicherheit durch Verschleierung: Warum Regierungen Proxys in Cyberkonflikten einsetzen“ am Institut für Politische Wissenschaft.

#### **Der Heidelberger Cyberkonfliktdatensatz HD-CY.CON**

In dem von der Deutschen Stiftung Friedensforschung geförderten Projekt untersuchen wir, ob und inwiefern sich Autokratien und Demokratien im Cyberkonfliktverhalten, insbesondere dem Gebrauch von Proxys, unterscheiden. Aufbauend auf Untersuchungen, die durch das Field of Focus 4 der Universität Heidelberg gefördert wurden, starten wir mit der These, dass Autokratien Proxys für Cyberangriffe nutzen, während Demokratien diese primär zur Attribution einsetzen, also zur Identifizierung des Angreifers. Indem die Zuschreibung an IT-Firmen ausgelagert wird, kann vermieden werden, dass eine demokratische Regierung durch die selbst getätigte Verantwortungszuweisung unter öffentlichen Handlungsdruck gerät: Wo kein Angreifer, da kein



**PROF. DR. SEBASTIAN HARNISCH** hat seit 2007 eine Professur für Internationale Beziehungen und Außenpolitik am Institut für Politische Wissenschaft der Universität Heidelberg inne. Zuvor forschte und lehrte er unter anderem an Universitäten in Trier, München, Peking (China), New York (USA), Seoul (Südkorea) und Tokio (Japan). Seine Forschungsprojekte und Publikationen umfassen die Vergleichende Außen- und Sicherheitspolitik, Theorien der Internationalen Beziehungen, Nonproliferation, Netzpolitik und Klimawandel. Mit der Thematik der Attribution von Cyberangriffen beschäftigt er sich besonders seit 2019 im Rahmen eines von der Deutschen Stiftung Friedensforschung geförderten Forschungsprojektes.

Kontakt: [sebastian.harnisch@ipw.uni-heidelberg.de](mailto:sebastian.harnisch@ipw.uni-heidelberg.de)

# „Aufgrund ihrer großen digitalen Angriffsflächen scheuen demokratische Staaten längerfristige Cyberkonflikte, welche durch eigene Gegenmaßnahmen erst ausgelöst werden können.“

Täter. Für Cyberangriffe auf Demokratien könnte somit gelten: Wo kein Täter, da keine Strafverfolgung und kein Richter.

Im Rahmen des Forschungsprojektes erstellen wir zunächst einen umfassenden, weltweit einmaligen Datensatz: HD-CY.CON. Dieser erfasst sowohl die beschriebene offensive Proxynutzung autokratischer Staaten als auch die vermutete defensive, auf Attribution ausgerichtete Proxynutzung von Demokratien. Der Ansatz grenzt sich von bereits existenten Cyberkonflikt Datensätzen durch seinen besonderen Fokus auf den Aspekt der Attribution ab: Wer identifiziert regelmäßig welche Akteure als vermeintliche Täter? Liegt hierbei ein Muster gemäß den Angriffstypen (Cyberkriminalität, -spionage, -konflikte) und ihrer Intensitäten vor? Werden die Zuschreibungen von dritten Akteuren regelmäßig angefochten? So erfassen wir bislang für die Jahre 2000 bis 2017 Anzahl, Art und Attribution von Cyberangriffen und -gegenangriffen in ihrer Dynamik und analysieren sie.

## **Attribution ist der Anfang von allem**

Theoretisch folgen wir mit den beschriebenen Überlegungen den bisherigen Forschungsarbeiten zum sogenannten Attributionsproblem: In der Cybersicherheitsforschung versteht man darunter jene stark erschwerte Verantwortungs-

zuzuweisung im Falle von Cyberattacken, die auf die technische Komplexität und die politischen Verschleierungsmöglichkeiten im Internet zurückgeht. Ohne Attribution ist jedoch auch kein zielgerichtetes Handeln möglich, beispielsweise die Abschreckung von Angriffen durch die glaubwürdige Androhung von Gegengewalt. Politische Verschleierungsstrategien dienen dazu, je nach Regimetypus die Konsequenzen eigener, fremder oder beauftragter Handlungen zu vermeiden. So können in konventionellen Konflikten unterlegene Autokratien mit der Beauftragung von Proxys die Kosten von Gegenmaßnahmen entweder auf die Beauftragten abwälzen oder solche Kosten gänzlich vermeiden. Demokratien dagegen können als Opfer von Angriffen die Verantwortungszuschreibung IT-Firmen überlassen und somit gesellschaftliche Forderungen nach Gegenmaßnahmen (zunächst) vermeiden.

Aufgrund ihrer großen digitalen Angriffsflächen scheuen demokratische Staaten bislang längerfristige Cyberkonflikte, die durch eigene Gegenmaßnahmen erst ausgelöst werden können. Zwar haben auch demokratische Regierungen nach Cyberangriffen ein starkes Interesse daran, politische Verantwortung zuzuweisen. Doch sind sie im Falle einer offiziellen Zuschreibung durch gesellschaftlichen Druck eher gezwungen, auch eine Reaktion folgen zu lassen - und diese muss sich, aufgrund ihrer rechtsstaatlichen

# „Um Drohungen und Abschreckung im Cyberraum zu kommunizieren, muss der Drohende sich und sein Drohpotenzial zu erkennen geben.“

Standards, mit transparenten und substanziellen technischen Beweisen unterfüttern lassen. Zudem besteht kein internationaler Konsens darüber, wie allgemeingültige Attributionsstandards zwischen Staaten aussehen sollten, wer über deren Einhaltung befindet und welche Form der Reaktion auf welche Art von Cyberangriff völkerrechtlich angemessen ist. Schon allein die Regeln für notwendige Cyberschutzmaßnahmen und die Meldepflicht bei Attacken auf Wirtschaftsunternehmen, wozu auch kritische Infrastruktur gehören kann, sorgen für Kopfzerbrechen: So gibt es in vielen Staaten Auseinandersetzungen darüber, wer die Kosten von Cyberangriffen tragen sollte – der Staat oder die Unternehmen. Kurz: Es bestehen diverse Anreize für demokratische Regierungen, offizielle Zuschreibungen von Cyberangriffen zu vermeiden.

## Attribution und Cyberforensik

In seiner Entstehungsgeschichte zielte das Internet als „Netzwerk der Netzwerke“ auf die ungehinderte Kommunikation von gleich(gesinnt)en Teilnehmern und weniger auf die zweifelsfreie Identifizierung der Kommunikationsteilnehmer. Dies beflügelte in der Gründergeneration unter anderem die Vision eines dezentralen, von staatlicher (All-)Macht losgelösten und deshalb demokratisierenden Mediums. Für potenzielle Angreifer bietet der technische Aufbau des Netzes zudem vielfältige Möglichkeiten der eigenen Identitätsverschleierung, unter anderem auch durch das sogenannte „Darknet“. Drei technische Verschleierungswege sind besonders prominent: erstens immer ausgefeiltere

Verschlüsselungstechniken, zweitens die Verwendung sogenannter Proxyserver – gewissermaßen „Mittler“ in der Kommunikation zwischen zwei Computern, die Anfragen stellvertretend annehmen und weitergeben – zum Umleiten des mit dem Angriff verbundenen Datentransfers über Transitländer, sowie drittens die Instrumentalisierung von Botnetzen, also aus mehreren gekaperten Computern zusammengesetzten Netzwerken, die für Angriffe instrumentalisiert werden können.

Potenzielle Angreifer können daher im Cyberraum relativ leicht sicherstellen, dass ihre Angriffe unerkannt bleiben, wenn sie dies wünschen. Dies gilt vor allem bei Cyberespionageattacken, denn hier zieht der Angreifer keinen Nutzen aus dem Bekanntwerden des Angriffes oder seiner Vorgehensweise (Detektion), sondern möchte die bestehenden Hintertüren auch für künftige Angriffe offenhalten. Anders dagegen bei Cyberkonflikten mit kinetischen Effekten, das heißt physischen Folgen, verursacht durch Cyberangriffe, welche somit in ihrer Wirkung konventionellen Militärschlägen am ehesten ähneln. Ein Beispiel dafür ist die Abschaltung eines Stromkraftwerks auf fremdem Territorium im Zuge eines konventionellen Krieges, so geschehen in der Ukraine durch einer russischen Hackergruppe zugeschriebene Cyberangriffe. In solchen Fällen ist das Ziel oft nicht nur die sichtbare Wirkung, sondern auch das Bekanntwerden der Angriffsart: Der militärische Gegner soll verunsichert und damit von weiteren Eskalationshandlungen abgeschreckt werden

# „Eine inhaltlich falsche Attribution kann im schlimmsten Falle eine nicht beabsichtigte Potenzierung des Konflikts nach sich ziehen.“

oder die Bevölkerung des gegnerischen Landes soll erpresst werden, um die gesellschaftliche Unterstützung für die Regierenden zu schwächen. Kurz: Um Drohungen und Abschreckung im Cyberraum zu kommunizieren, muss der Drohende sich und sein Drohpotenzial zu erkennen geben.

Zur eigenen Identitätsverschleierung sind auch sogenannte „False-Flag“-Attacken oft das Mittel der Wahl: Die Verwendung von schädigender Software – sogenannter Malware –, die in der Vergangenheit überwiegend einem bestimmten anderen Cyberangreifer zugeordnet wurde, lenkt den Verdacht auf diesen und nicht auf den eigentlichen Täter. So agierte die russische Hackergruppierung „Turla“, die jahrelang Angriffssysteme und -infrastruktur der iranischen Gruppe „Oil Rig“ nutzte. Bleibt diese Fremdnutzung im Falle schwerwiegender Angriffe – etwa mit kinetischen Folgen – unerkannt, können entsprechende Fehlattraktionen verheerende Konsequenzen zeitigen: Denn je schwerwiegender der Angriff, desto stärker steht die jeweilige Regierung unter Druck, die Quelle unschädlich zu machen, Täter zu präsentieren und diese für ihr Handeln zu bestrafen. Eine inhaltlich falsche Attribution kann im schlimmsten Falle eine nicht beabsichtigte Potenzierung des Konflikts nach sich ziehen. Die ursprüngliche Konfliktpartei kann ungestört weiteragieren, während die neue ihrerseits genötigt wird, auf den „Vergeltungsangriff“ zu reagieren und damit möglicherweise einen neuen Konfliktzyklus in Gang zu setzen. Ein Überschwappen des Konfliktes in die „reale physische Welt“ lässt sich hierbei nicht ausschließen, wenn

sich eine der Konfliktparteien besser gewappnet fühlt, den Konflikt in dieser Welt fortzuführen – man spricht dann von einem Online-Offline-Spillover-Effekt.

## Die Rolle privater IT-Firmen

Unser Projekt geht zwar insbesondere der Frage nach, ob, wann und zu welchem Zweck Regierungen Proxys in Cyberkonflikten nutzen. Dabei darf jedoch das kommerzielle, kriminelle oder ideologische Eigeninteresse der Stellvertreter nicht vergessen werden. So produzieren in der Regel IT-Firmen Software und Codes, die dann anschließend von Staaten, von deren Proxys oder auch von autonom agierenden nichtstaatlichen Akteuren auf Sicherheitslücken – sogenannte Exploits – hin überprüft werden. War die Suche nach einem Exploit erfolgreich, kann der jeweilige Angreifer dieses schadhafte Codesegment in einer Attacke ausnutzen. Entsprechende Märkte versprechen – je nach „Güte“ der Malware – erhebliche Gewinne, abhängig von Reichweite und Wirkungsgrad der Exploits. Gleiches gilt aber auch für die Entwicklung von Schutzlösungen – unter anderem sogenannten Patches –, welche die Schadsoftware oder deren Wirkung neutralisieren. Kann ein Anbieter oder Softwareentwickler nun auf beiden Märkten Angebote unterbreiten, profitiert er zweimal: von der Entwicklung des Schwertes und der des zugehörigen Schildes. Eine Verlockung, die dazu führen könnte, dass die Märkte für Schad- und Schutzsoftware exponentiell wachsen, während zugleich innerhalb der Gesellschaft die potenziellen Angriffsflächen zunehmen, unter anderem,

weil das sogenannte Internet of Things (IOT) immer mehr „intelligente Alltagsobjekte“ miteinander vernetzt, etwa in einem per App oder Sprachbefehl steuerbaren „Smart Home“.

Politische Entscheider sind in solch dynamischen Situationen als „attribuierende Akteure“ auf möglichst vollständige Informationen angewiesen. Aufgrund der strukturellen Ungewissheiten im Cyberraum arbeiten sie indes häufig unter der Bedingung „begrenzter Rationalität“, das heißt, sie wägen die Kosten einer zusätzlichen Informationsbeschaffung gegenüber dem zu erwartenden Nutzen ab. Im Falle von politischen Zuschreibungen in Cyberkonflikten führt dies nun zu zwei Entwicklungsszenarien: Insbesondere demokratische Entscheider versuchen aufgrund der Attributionsproblematik sowie damit verbundener Eskalationsrisiken, mögliche öffentliche und direkte politische Verantwortungszuweisungen zu vermeiden. Sind die Anreize zu dieser Vermeidung für Entscheider hoch, dürfte eine hohe Dunkelziffer nicht (öffentlich) zugeschriebener Angriffe die Folge sein. Damit demokratische Gesellschaften sich hinreichend schützen, bedürfte es daher zusätzlicher Regeln, beispielsweise besonderer Meldepflichten, um das reale Ausmaß von Cyberangriffen besser zu erfassen. Im zweiten Szenario attribuieren Entscheider nur in solchen Fällen, in denen die Eskalationsrisiken und damit die potenziellen Reputationsverluste gering sind, das heißt, bei niedrigschwelligem Cyberangriffen. Sind die Forderungen nach einer starken Gegenreaktion verhalten, kann die Attribution ohne erkennbare politische Risiken erfolgen. Zum einen kann die öffentliche Zuschreibung den Angreifenden von weiteren Angriffen abschrecken, da er im Wiederholungsfall mit Sanktionen rechnen müsste. Zum anderen muss dieser Zuschreibung aber nicht zwingend eine konkrete Erwidmung, also ein Gegenangriff folgen, so dass das Eskalationsrisiko gering bleibt. Grundsätzlich gilt: Je größer in einer Gesellschaft das Verwundbarkeitspotenzial für Cyberangriffe relativ zum Potenzial des Angreifenden ist, desto zurückhaltender sollte die angegriffene Regierung sein, die Attacke zu erwidern. Die Folge einer relativ höheren Verwundbarkeit wäre dann eine Neigung zur Zurückhaltung, die besonders intensive Cyberkonflikte so lange unwahrscheinlich macht, wie diese Verwundbarkeit der meisten digitalisierten Gesellschaften wächst oder stabil hoch bleibt.

Die bundesdeutsche Debatte über den sogenannten Hack-Back, also gezielte Cybergewalt nach erfolgtem Angriff, spiegelt diesen Entwicklungstrend zumindest teilweise wider: Sollten Einheiten der Bundeswehr künftig nach Cyberangriffen auf deutsche Ziele mit digitalen Gegenschlägen antworten dürfen – und falls ja: Wie wäre deren Verhältnismäßigkeit sichergestellt? Die Debatte reicht aber auch über die Spezifika des Cyberraumes hinaus – denn käme es zu einer Legalisierung des sogenannten

#### Field of Focus 4: Selbstregulation und Regulation

Im Rahmen der Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder hat die Universität Heidelberg einen Großteil ihrer Forschung und Lehre unter dem Dach der großen Forschungsfelder themenbezogen zusammengeführt. Mit diesen vier „Fields of Focus“ (FoF) nutzt sie ihr Potenzial, durch Zusammenarbeit über die Grenzen der Disziplinen hinweg komplexe und für die Gestaltung von Zukunft zentrale Problemstellungen kompetent zu bearbeiten und damit gesellschaftliche Verantwortung zu übernehmen. FoF1 behandelt „Molekulare Grundlagen des Lebens, von Gesundheit und Krankheit“, FoF2 „Muster und Strukturen in Mathematik, Daten und in der materiellen Welt“, FoF3 „Kulturelle Dynamiken in globalisierten Welten“ und FoF4 „Selbstregulation und Regulation: Individuen und Gesellschaften“. Das zentrale Anliegen von FoF4 besteht darin, menschliche (Selbst-)Regulationsprozesse auf der Ebene von Individuen und Organisationen im interdisziplinären Dialog besser zu verstehen. An dieser Arbeit sind insbesondere Fächer der Fakultät für Verhaltens- und Empirische Kulturwissenschaften, der Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften sowie der Juristischen Fakultät beteiligt, daneben auch interdisziplinäre Forschungsverbünde, Forschungsstellen sowie außeruniversitäre Partner.

[www.uni-heidelberg.de/de/forschung/forschungsprofil](http://www.uni-heidelberg.de/de/forschung/forschungsprofil)

Hack-Back, dann müsste der Bundestag – im Sinne der dominanten Lehre der Parlamentarisierung des Streitkräfteeinsatzes – diese Einsätze in Art, Umfang, Ziel etc. mandatieren und wäre dabei an Artikel 87a des Grundgesetzes gebunden, welcher den Einsatz der Bundeswehr ausschließlich zur Landes- und Bündnisverteidigung oder im Rahmen kollektiver Zwangsmaßnahmen zulässt.

#### Erste empirische Befunde

Unsere ersten empirischen Befunde zeichnen folgendes Bild: Autokratien nutzen regelmäßig nichtstaatliche Proxys, um Attribution zu erschweren. Dabei rangieren Russland, Iran, Nordkorea und China ganz oben auf der Liste. Sie verwenden aber unterschiedliche Proxytypen für unterschiedliche Zwecke: Russland nutzt nichtstaatliche Hackergruppen mit Namen wie „Fancy Bear“, „Cozy Bear“, „Turla“ oder „Sandworm“ vorrangig, um mit disruptiven, das heißt zerstörerischen Angriffen oder Desinformationskampagnen (in Abgrenzung zur Cyberspionage) den gesellschaftlichen Zusammenhalt westlicher Demokratien zu unterminieren oder in konventionellen Konflikten, wie in der Ukraine, militärische Kontrahenten zu schwächen. Anders die Regierung Chinas: Die Volksrepublik nutzt für Hackerangriffe bislang oft spezialisierte Einheiten des

THE BLAME GAME IN CYBERSPACE

# INFORMATION TECHNOLOGY AS A WEAPON?

SEBASTIAN HARNISCH &amp; KERSTIN ZETTL

Academic and policy debates on the attribution of cyberattacks have yet to fully grasp the political dimension of this task. This article sets out some of the technical problems of identifying a perpetrator in cyberconflicts, but focuses mainly on the political dynamics of evading responsibility, and thereby blame, for cyberattacks. We have found that democratic and autocratic governments differ substantially in their conflict behaviour, for instance in their use of proxies.

Autocratic governments tend to use proxies to carry out offensive attacks on democratic states, whereas democratic governments, when attacked, try to avoid the costs of assigning political responsibility by having proxies attribute technical responsibility to an attacker. It follows that in democracies, the task of attributing cyberattacks to a perpetrator increasingly falls to private IT companies, a fact that could potentially undermine the principles of transparent and responsible government. Comparing autocratic systems, we also found that Russia uses non-state proxies for disruptive attacks in conventional conflicts, such as Ukraine, and to undermine the credibility of democratic institutions. In contrast, China uses state agencies mainly for cyber espionage to leapfrog military and economic competitors, in particular the United States.

Overall, our research suggests the utility of applying a comparative approach to informing the societal debate on cyberconflict and democratic governance: First, citizens should be aware that their governments are hesitant to name perpetrators because doing so might hurt their voters more than blurring responsibility. Second, stricter rules that obligate societal actors, such as companies, universities etc. to report attacks would help democratic societies to acknowledge their vulnerability and address it accordingly. Third, civil society may play a crucial role in pushing governments to strengthen international norm-building processes so as to prevent cyberconflict escalation in the first place. ●

PROF. DR SEBASTIAN HARNISCH has held the Chair of International Relations and Foreign Policy at Heidelberg University's Institute for Political Science since 2007. In the past, he worked at universities in Trier, Munich, Beijing (China), New York (USA), Seoul (South Korea) and Tokyo (Japan). His research projects and publications deal with comparative foreign and security policy, theories of international relations, non-proliferation, internet politics and climate change. Another research focus is the attribution of cyberattacks, a subject he has been investigating since 2019 within the framework of a research project funded by the German Foundation for Peace Research.

Contact: [sebastian.harnisch@ipw.uni-heidelberg.de](mailto:sebastian.harnisch@ipw.uni-heidelberg.de)

KERSTIN ZETTL (M.A.) is a research assistant and in 2019 joined a project on cyberconflicts that is funded by the German Foundation for Peace Research and headed by Sebastian Harnisch at Heidelberg University's Institute for Political Science. She is currently working on her doctoral thesis, a comparison of autocratic and democratic cyber proxy strategies. She studied political science, psychology and educational science at Heidelberg University.

Contact: [kerstin.zettl@ipw.uni-heidelberg.de](mailto:kerstin.zettl@ipw.uni-heidelberg.de)

**“A clear definition of red lines in the digital space, and of the sanctions that apply when these lines are crossed, is the only way of limiting cyberconflicts and ensuring cybersecurity for a maximum number of users.”**

Ministeriums für Staatssicherheit oder der Volksbefreiungsarmee, um mit dem Diebstahl geistigen Eigentums einen kommerziellen, politischen oder militärischen Vorteil zu erlangen. Die Neigung zur Cyberspionage kann dabei auch patriotische nichtstaatliche Hackergruppen miteinbeziehen, die gegnerische Regierungsnetzwerke oder kritische gesellschaftliche Akteure angreifen, beispielsweise im Konflikt über die rivalisierenden Territorialansprüche im Südchinesischen Meer. Im Falle Nordkoreas haben wir festgestellt, dass sich der Angriffsschwerpunkt über die Zeit deutlich verschob: Vor 2014 richteten sich die Attacken nordkoreanischer Proxys, zumeist stationiert in China und Indien, auf politische und militärische Einrichtungen im Rahmen des Systemwettbewerbs gegen Südkorea und die USA. Seither dienen die Angriffe spezialisierter nordkoreanischer Cyber-Einheiten vornehmlich der Cyberspionage und dem finanziellen Diebstahl zum Zwecke des Regimeerhalts.

Vergleicht man nun diese Befunde für Autokratien mit jenen für demokratische Regime, so ergibt sich folgendes Bild: Bis 2016 lässt sich nur eine geringe Anzahl offizieller Attributionen von Cyberangriffen durch demokratische Regierungen finden. Zudem nahmen IT-Firmen über den Zeitraum seit 2000 eine immer bedeutsamere Rolle im (technischen) Zuschreibungsprozess ein. Dabei attribuieren sie nicht nur immer häufiger und ausführlicher im Rahmen ihrer technischen Berichte, sondern sie unterstützen auch vermehrt demokratische Regierungen im Falle offiziell erfolgter politischer Verantwortungszuweisungen, wie beispielsweise im Fall des erwähnten „DNC-Hacks“ bei den US-Demokraten.

Mit dem Amtsantritt von Donald Trump hat sich die zurückhaltende Attributionspraxis indes stark verändert: Seit 2017 macht die US-Regierung häufiger direkt ein feindliches Regime für Cyberangriffe verantwortlich. Ob dieser Befund Bestand haben wird, das wird sich zeigen. Gleichzeitig deuten sich aber auch Veränderungen der US-Regierungspraxis in einem anderen Cybersicherheitsbereich an: der Hortung von Cyberschadsoftware, vor allem sogenannter „zero-day-exploits“. Dies sind Softwaresicherheitslücken, die ungehindert ausgenutzt werden können, da sie dem Softwarehersteller bislang noch nicht bekannt waren und daher auch noch nicht geschlossen werden konnten. So hat im Januar 2020 die National Security Agency (NSA), die selbst zuvor eine große Sammlung von Schadsoftware „erworben“ hatte, die dann von nordkoreanischen Hackern gestohlen und verwendet worden war, den US-Softwaregiganten Microsoft auf einen schadhafte Code aufmerksam gemacht, anstatt diese Angriffsmöglichkeiten selbst zu nutzen.

#### Politische und gesellschaftliche Implikationen

Die Attribution von Cyberangriffen ist also eine soziale Zuschreibung, die alles andere als trivial ist. Unsere empirischen

Ergebnisse zeigen, dass diese, je nach politischem Kontext, unterschiedlich erfolgt. Private Akteure mit eigenen kommerziellen, kriminellen oder ideellen Interessen ändern und prägen dabei die Deutungshoheit politischer Entscheidungsträger mit. Demokratische Regierungen können von der Funktionsübernahme des Privatsektors bei der Attribution profitieren. Tun sie es im Übermaß, so laufen sie Gefahr, ihrem eigentlichen Auftrag zuwiderzuhandeln, transparent und vor allem langfristig verantwortlich zu regieren.

Aus unserer Perspektive folgt hieraus dreierlei für die betroffenen demokratischen Gesellschaften: Erstens sollte ein hinreichendes Maß an politischer Transparenz im Zusammenhang mit der Attribution von Cyberattacken erreicht werden. Indem eine Regierung offen kommuniziert, warum sie in einem konkreten Fall einen bestimmten Täter oder Drahtzieher vermutet oder aber aufgrund technischer Widrigkeiten gar keine Attribution zu treffen vermag, kann sie die Legitimität ihres (Nicht-)Handelns wahren, ohne die Regierten bewusst im Unklaren zu lassen. Im Umkehrschluss: Je informierter eine Gesellschaft über die jeweilige Gefährdungslage im Netz ist, desto eher kann sie das notwendige Problembewusstsein entwickeln, um ihren Teil zum Schutz der digitalen Ziele beizutragen (Stichwort „Cyberhygiene“). Zweitens sollten demokratische Regierungen private Akteure, insbesondere Software- und Cybersicherheitsfirmen, stärker in die Pflicht nehmen, ihre Produkte umfassender gegen Manipulationen zu schützen sowie auch langfristig Softwareaktualisierungen für unterschiedlichste Endgeräte bereitzuhalten. Dies gilt vor allem für den Bereich der kritischen Infrastrukturen, denn in industriellen Anlagen im Bereich der Strom- oder Wasserversorgung werden oftmals veraltete Softwareversionen benutzt, weil die fortwährende Funktionserfüllung ein regelmäßiges Softwareupdate erschwert. Drittens sollten zivilgesellschaftliche Initiativen weiterhin die Normentwicklungsprozesse im Bereich der Cybersicherheit kritisch begleiten, um den nötigen öffentlichen Druck auf die nationalen Regierungen auszuüben. Denn nur wenn eindeutig definiert wird, welche roten Linien im digitalen Raum existieren und (in)wie(fern) deren Überschreiten sanktioniert werden kann und soll, lassen sich Cyberkonflikte begrenzen und Cybersicherheit für möglichst viele Anwender erreichen. ●

**FAHRERLOS**

FAHRERLOS

# AUTONOME VERKEHRSSYSTEME UND RECHT

STEFAN J. GEIBEL

**Ein denkbare Dilemma: Ein autonom gesteuertes Fahrzeug muss mitsamt seinen Insassen entweder gegen einen Baum oder in eine Menschenmenge fahren – wie kann das Fahrzeug für den Fall einer solchen Alternative programmiert werden? Diese und eine Fülle weiterer Fragen, etwa zur Einhaltung des Datenschutzes oder der Verteilung der Pflichten auf Halter, Hersteller und Fahrzeugpassagiere, spiegeln die teilweise hochkomplexen Herausforderungen, die auf ingenieurwissenschaftlicher, juristischer und ethischer Ebene bearbeitet werden müssen, bevor autonome Fahrzeuge für den öffentlichen Verkehr zugelassen werden können. Gemeinsam mit Karlsruher Ingenieurwissenschaftlern erarbeiten Heidelberger Rechtswissenschaftler Vorschläge für die entsprechenden notwendigen Gesetzesänderungen.**



Im Straßenverkehr wird sich in den nächsten Jahren ein Wandel vollziehen, bei dem die Maschine Fahrzeug immer mehr Aufgaben des Menschen übernimmt. Bereits jetzt werden auf öffentlichen Straßen teilautomatisierte und zum Teil schon hochautomatisierte Fahrsysteme eingesetzt. Sogar eine Vollautomatisierung verschiedenster Fahrzeuge ist technisch realisierbar – bis hin zu „autonomen“, das heißt fahrerlosen Fahrzeugsystemen, die aber entgegen der missverständlichen Bezeichnung nicht „frei“ oder „unabhängig“ sind, sondern

denen aus Gründen der Verkehrssicherheit Grenzen gesetzt sind und zu setzen sind. Die ingenieurwissenschaftlichen Vorstellungen einer Zukunft autonomer Mobilitätssysteme sind regelrecht aufgeblüht. Dass sich selbst gesteckte zeitliche Ziele der Unternehmen als zu ehrgeizig erwiesen und manche Testfahrt nicht glückte oder gar tödlich endete, wird jedoch mittlerweile als Zeichen für die Einkehr einer gewissen Nüchternheit interpretiert.

Viel schwerer wiegt allerdings, dass die verschiedenen begonnenen Diskurse zwischen den Ingenieurwissenschaften und den anderen, insbesondere rechts-, sozial- und verhaltenswissenschaftlichen Fachdisziplinen noch nicht zu Ergebnissen geführt haben – zumindest nicht zu solchen, die zu einem breiten politischen Konsens und zu einer tatsächlichen Umsetzung autonomer Fahrsysteme in der gesellschaftlichen Wirklichkeit taugen. Hiervon angesprochen ist vor allem die Rechtswissenschaft, weil die Umsetzung autonomer Fahrsysteme zentrale und sehr vielfältige Rechtsfragen aufwirft, insbesondere die Frage, ob und gegebenenfalls inwieweit die für automatisierte Fahrsysteme bereits geltenden Vorschriften ausreichen oder verändert werden müssen. Diesen Wechselbeziehungen zwischen soziotechnischen Fragestellungen einerseits und rechtswissenschaftlichen Fragestellungen andererseits ist ein Forschungsprojekt im Rahmen der Heidelberg Karlsruhe Strategic Partnership (HEiKA) zwischen der Universität Heidelberg und dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) gewidmet. Federführend sind dabei auf Heidelberger Seite das Institut für deutsches und europäisches Gesellschafts- und Wirtschaftsrecht und auf Karlsruher Seite das Institut für Produktentwicklung.

Für den Diskurs zwischen den in die Entwicklung des autonomen Fahrens involvierten ingenieurwissenschaftlichen Teildisziplinen einerseits und der Rechtswissenschaft andererseits empfiehlt sich ein „schaukelartiges“ Vorgehen und das Bewusstsein, dass sich Lösungen auf einer „höheren“ Ebene bewähren müssen. Die vorläufigen technischen Ergebnisse werden zunächst in die einzelnen rechtswissenschaftlichen Teildisziplinen getragen, wobei

### Heidelberg Karlsruhe Strategic Partnership

Die Heidelberg Karlsruhe Strategic Partnership (HEiKA) umfasst die bilateralen Aktivitäten der Universität Heidelberg und des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Die bereits 2011 institutionell verankerte Forschungspartnerschaft wurde 2018 mit einer entsprechenden Rahmenvereinbarung zu einer strategischen Partnerschaft erweitert, die nun auch die Bereiche Nachwuchsförderung, Lehre und Innovation umfasst. Die komplementäre Aufstellung beider Einrichtungen bietet optimale Voraussetzungen für diese Kooperation, in deren Folge im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder das gemeinsam getragene Exzellenzcluster „3D Matter Made to Order“ (3DMM2O) eingerichtet wurde, das Natur- und Ingenieurwissenschaften verbindet.

HEiKA fördert wissenschaftliche Kooperationen in sechs sogenannten „Forschungsbrücken“: Hoch entwickelte Bildgebungsplattform (Advanced Imaging Platform/AIP), Funktionale Materialien (Functional Materials/FM), Medizintechnik für die Gesundheit (Medical Technology for Health/MTH), Teilchenphysik, Astroteilchenphysik und Kosmologie (Particle Physics, Astroparticle Physics and Cosmology/PAC), Synthetische Biologie (Synthetic Biology/SB) und HEiKAexplore. HEiKA-Explore widmet sich 2019/2020 dem Thema „Autonome Systeme im Spannungsfeld von Recht, Ethik, Technik und Kultur“. Im Zentrum der Untersuchungen steht als ein maßgeblicher Themenschwerpunkt der Aspekt „Autonomes Fahren und Recht“ in interdisziplinärer Zusammenarbeit von Technik-, Rechts- und Sozialwissenschaft.

[www.heika-research.de](http://www.heika-research.de)

die Ingenieurwissenschaftler den Juristen „über die Schulter schauen“ sollen, damit das technische Wissen Eingang in die rechtliche Überprüfung findet. Die auf dieser Basis erarbeiteten rechtlichen

Vorschläge werden dann im Hinblick auf ihre technischen Umsetzungen und Auswirkungen in die Ingenieurwissenschaften zurückgespiegelt. Sämtliche Diskurse und Ergebnisse werden auf einer die Fachdisziplinen übergreifenden Syntheseebene in den Gesamtzusammenhang gerückt und insgesamt erörtert und gewogen.

### Sich verschränkende Fragen

Diese Vorgehensweise ist angesichts der sich verschränkenden Fragen geboten, die sich hinsichtlich autonomer Fahrsysteme stellen. Die Frage ihrer Zulassung zum Straßenverkehr hängt davon ab, wie und für welches Einsatzgebiet das jeweilige autonome Fahrsystem als Produkt gestaltet sein kann. Die Produktgestaltung wiederum wird entscheidend davon geprägt sein, was zugelassen werden soll und darf und welche weiteren rechtlichen Rahmenbedingungen gelten. Dabei stellt sich eine große Fülle von Fragen. Wird beispielsweise ein solches Fahrsystem nur für Lastkraftwagen und andere schwere Fahrzeuge auf Autobahnen und ausgewählten Schnellstrecken vorgesehen, um besonders gravierende Auffahrunfälle zu vermeiden, oder nur im öffentlichen Personennahverkehr? Oder soll es auch für sämtliche Fahrzeuge und auch für den „letzten Kilometer“ auf dem Weg zu jedem beliebigen Ziel in Ballungsräumen zum Einsatz kommen? Inwieweit kann die Entscheidung hierüber dem Markt überlassen werden? Kann es technisch einen „gemischten Verkehr“ mit autonomen Fahrsystemen einerseits und allen Arten nicht automatisierter und automatisierter Fahrzeuge andererseits geben und darf es ihn rechtlich nur unter bestimmten Voraussetzungen geben? Welche spezifischen Sicherheitsanforderungen sind an autonome Fahrsysteme zu stellen? Werden sich künftige Kunden für autonome Fahrsysteme entscheiden, insbesondere trotz der besonderen Sicherheitsalgorithmen, welche die Fahrweise autonomer Fahrzeuge möglicherweise als übervorsichtig erscheinen lassen? In welcher besonderen Weise müssen diese Kunden vor dem Kauf eines autonomen Fahrsystems aufgeklärt werden? Wie werden bei einem „gemischten Verkehr“ die Verkehrsteilnehmer mit nicht automatisierten oder automatisierten Fahrzeugen auf autonome Fahrzeugsysteme reagieren?



**PROF. DR. STEFAN J. GEIBEL** ist Direktor des Instituts für deutsches und europäisches Gesellschafts- und Wirtschaftsrecht (IGW) der Universität Heidelberg. Nach dem Studium der Rechtswissenschaft an den Universitäten Tübingen und Aix-en-Provence (Frankreich), einer Maitrise en droit international an der Universität Aix/Marseille III und dem Rechtsreferendariat in Baden-Württemberg war er drei Jahre im anwaltlichen Bereich in Berlin und Frankfurt/Main tätig, bevor er 2002 promoviert und 2006 habilitiert wurde. Nach Vertretungsprofessuren an der Ludwig-Maximilians-Universität München, den Universitäten Mainz und Konstanz und der TU Dresden hat er seit 2010 in Heidelberg die Professur für Bürgerliches Recht und Nebengebiete mit Spezialisierungen im Gesellschafts- und Wirtschaftsrecht, im Recht der Non-Profit-Organisationen und im Medizinzivilrecht inne. Er ist Mitglied der Ethikkommission II der Universität Heidelberg (Medizinische Fakultät Mannheim), des Beirats des Gemeinsamen Instituts für deutsches, europäisches und internationales Medizinrecht, Gesundheitsrecht und Bioethik (IMGB) der Universitäten Heidelberg und Mannheim und war von April 2019 bis März 2020 Fellow des Marsilius-Kollegs.

Kontakt: [stefan.geibel@igw.uni-heidelberg.de](mailto:stefan.geibel@igw.uni-heidelberg.de)

# „Ist ein interner, dem Betrieb des autonomen Fahrzeugs entstammender Unfallfaktor generell ein unabwendbares Ereignis für seinen Halter?“

Inwieweit dürfen die Daten dieser anderen Verkehrsteilnehmer von den autonomen Fahrzeugsystemen verarbeitet werden, und wie können sie gegebenenfalls sofort gelöscht werden? Können die für die Wahrnehmung der Umgebung autonomer Fahrsysteme notwendigen Daten (wie Verkehrsschilder oder Markierungen) oder kann die Wahrnehmung dieser Daten in dem Fahrzeug von außen zum Beispiel durch globale Positionsbestimmungssysteme manipuliert werden? Lässt sich die Manipulationsgefahr durch die technische Gestaltung des Produkts minimieren? Lässt sich eine Manipulation im Einzelfall beweisen, und wer haftet in doch auftretenden Manipulationsfällen?

## **Halter(haftung) für autonome Fahrzeuge?**

Das sind nur einige der zentralen Fragen, die sich stellen. In dem vorangehenden Katalog noch nicht genannt sind die zahlreichen Probleme rund um potenzielle Unfälle mit autonomen Fahrzeugen. Für die Frage des Haftungsadressaten wird es zunächst darauf ankommen, ob der Unfall auf externen Faktoren oder aber auf internen Faktoren beruht, die dem auto-

nomen Fahrzeug entstammen. Zudem muss geklärt werden, ob diese Faktoren beweisbar sind und ob gegebenenfalls die Beweislast zugunsten des Unfallgegners umgekehrt ist, ob Beweiserleichterungen greifen oder ob einen Beteiligten sogar eine Gefährdungshaftung trifft, die unabhängig vom Verschulden ist.

Nach dem geltenden Straßenverkehrsgesetz haftet der Halter eines Fahrzeugs für Schäden, die beim Betrieb des Fahrzeugs entstehen, und zwar unabhängig davon, ob er selbst Pflichten verletzt hat oder ihn ein Verschulden trifft. Diese Gefährdungshaftung des Halters entfällt neben den Fällen höherer Gewalt nur bei unabwendbaren Ereignissen. Ist nun ein interner, dem Betrieb des autonomen Fahrzeugs entstammender Unfallfaktor generell ein unabwendbares Ereignis für seinen Halter? Bislang wird dies in Fachkreisen für automatisierte Fahrsysteme fast einhellig verneint. Wenn dies auch für das fahrerlose Fahren richtig sein sollte, würde sich in besonders brisanter Weise folgende Vorfrage stellen: Kann für ein autonomes Fahrsystem mit seinen spezifischen Betriebsgefahren überhaupt ein

Halter fungieren, den die Verantwortung für die Abwendung interner Unfallfaktoren trafe, wenn dieser nicht zugleich der Hersteller ist? Immerhin trägt der Halter die Entscheidungsbefugnis für den Einsatz – das sogenannte Inverkehrbringen – des autonomen Fahrsystems, profitiert jedenfalls in genereller Weise von diesem Einsatz und hat die Möglichkeit, es warten oder reparieren zu lassen. Dem Halter müssten aber zumindest derartige Kenntnisse vermittelt werden, dass er die besonderen Betriebsrisiken eines autonomen Fahrzeugs erkennen und, soweit es geht, zur Gewährleistung der Verkehrssicherheit beeinflussen kann. Erst dann scheinen die den Halter treffenden Haftungsrisiken auch versicherbar. Die entsprechende Aufklärung kann nur der Hersteller des autonomen Fahrzeugs leisten, der den Algorithmus-Code geschrieben hat.

## **Die Rolle des Herstellers autonomer Fahrzeuge**

Teilweise wird sogar vorgeschlagen, dem Hersteller autonomer Fahrzeuge selbst die Haltereigenschaft gesetzlich zuzuweisen. Diese Rolle wäre für den Hersteller sicherlich kostenträchtig und müsste in

## „Bei einem ‚echten‘ autonomen Fahrzeug, bei dem es kein Lenkrad oder Ähnliches mehr gibt, wird der menschliche Fahrzeugführer durch die Maschine ersetzt – die Fahrzeuginsassen werden zu reinen Passagieren.“

Tochtergesellschaften organisiert werden, die sich allein mit den Halterpflichten für eine Flotte autonomer Fahrzeugsysteme befassen. Ob sich dieser Vorschlag „de lege ferenda“ (im Wege der Gesetzesänderung) durchsetzen wird, scheint zweifelhaft. Noch weitergehend ist der Vorschlag, das autonome Fahrzeug gesetzlich zu einer „elektronischen Person“ zu deklarieren, die dann selbst haftbar gemacht werden könnte, wie beispielsweise das Europäische Parlament in einer Entschließung vom 16. Februar 2017 verlautbart hat. Dieser Vorschlag würde den Hersteller zwar entlasten und könnte damit potenziell innovationsfördernd wirken. Er birgt aber eine Reihe bislang unüberschaubarer Probleme, die mit der Flut an zusätzlichen Aufgaben für die Registergerichte, mit der Höhe der finanziellen Ausstattung solcher elektronischen Personen und mit den ungelösten Fragen ihrer Handlungsfähigkeit außerhalb des Straßenverkehrs nur grob umrissen sind.

Die Rechtslage für den Hersteller eines autonomen Fahrzeugs verändert sich vor allem wegen einer besonderen Eigenschaft aller autonomen Systeme, nämlich ihrer Fähigkeit, auf die verschiedenen Verkehrssituationen in den programmierten Grenzen mit einer Fortschreibung des eigenen Codes zu reagieren und sich dadurch gewissermaßen eigenständig weiterzuentwickeln, zu „lernen“. „Lernt“ das Fahrzeug etwas dazu, was einen Verkehrsteilnehmer schädigt und sich als Produktfehler erweist, wäre das Produkthaftungsgesetz nach der jetzigen Fassung nicht anwendbar, weil der Fehler zu dem Zeitpunkt, an dem das

Produkt in den Verkehr gebracht wurde, noch nicht erkennbar war. Diese rechtliche Lücke muss auf der Ebene der Produkthaftungsrichtlinie korrigiert werden. Auch der Inhalt der Verkehrspflichten, insbesondere zu Konstruktion und Produktbeobachtung, müsste an die Besonderheiten eines autonomen Systems angepasst werden. Zudem ist das Verhältnis der Produzentenhaftung nach Produkthaftungsgesetz und Bürgerlichem Gesetzbuch (BGB) zu einer fortbestehenden Halterhaftung zu überprüfen. Die Reichweite des urheber- und patentrechtlichen Schutzes der in autonomen Fahrzeugen zum Einsatz kommenden Software ist zu klären, um entscheiden zu können, ob etwaige Schutzlücken geschlossen werden müssen.

### Die Stellung des Fahrers und anderer Verkehrsteilnehmer

Bei einem „echten“ autonomen Fahrzeug, bei dem es kein Lenkrad, keine Pedale, keine Gangschaltung oder Ähnliches mehr gibt, wird der menschliche Fahrzeugführer durch die Maschine ersetzt. Die Fahrzeuginsassen werden zu reinen Passagieren. Demzufolge muss dann die auf menschliche Fahrer zugeschnittene Haftung für (vermutetes) Verschulden nach § 18 Abs. 1 Straßenverkehrsgesetz entfallen. Die erheblich schwierigeren Rechtsfragen stellen sich für Fahrzeugsysteme, die nur eine begrenzte Übertragung der Steuerung auf das Fahrzeug erlauben (zum Beispiel Stauhilfen mit Spurhalteassistenten), und für Fahrzeugsysteme, welche erkennen, dass ein Fahrzeugführer eingreifen muss, dies dem Fahrer mit ausreichender Zeitreserve für eine Reaktion anzeigen und ihn zum Eingreifen auffordern. Der Fahrer darf sich in diesen Fällen zwar vom Verkehrsgeschehen abwenden, wenn das Fahrzeug die Steuerung übernimmt, er muss aber wahrnehmungsbereit bleiben. Es liegt auf der Hand, dass dies für den Fahrer eine schmale Gratwanderung darstellt und er im Schadensfall kaum wird beweisen können, dass er wahrnehmungsbereit war und rechtzeitig eingegriffen hat. Zudem dürfte es in vielen Gefahrensituationen kaum noch eine hinreichende Zeitreserve für ein Eingreifen geben. Daher wird sich ein vorsichtiger Fahrer vom Verkehrsgeschehen nicht abwenden und den Vorteil

aus der Teil- oder Hochautomatisierung des Fahrzeugs kaum nutzen können. Einen echten Nutzen bringt erst das „echte“ autonome Fahrzeugsystem.

In den Fokus rücken ferner die Daten der Fahrzeuginsassen und der anderen Verkehrsteilnehmer oder von Dritten, deren Erfassung und Speicherung erst die Funktionsfähigkeit jedes automatisierten oder autonomen Fahrzeugsystems gewährleisten. Soweit es sich um personenbezogene Daten handelt, gelten im Anwendungsbereich der EU-Datenschutzgrundverordnung (DS-GVO) besondere Anforderungen an die Rechtmäßigkeit der Datenverarbeitung. Dass die Insassen und die anderen Verkehrsteilnehmer in die Datenverarbeitung durch das autonome Fahrzeugsystem oder dessen Halter generell einwilligen, kann kaum angenommen werden. Will man sich nicht auf die wenig Rechtssicherheit bietende sogenannte allgemeine Abwägungsklausel nach Art. 6 Abs. 1 S. 1 lit. f DS-GVO verlassen, die eine Verarbeitung der Daten zur Wahrung berechtigter Interessen des autonomen Fahrzeugs oder seines Halters erlauben könnte, bleibt die Möglichkeit, dass die vom autonomen Fahrzeugsystem erfassten und gespeicherten personenbezogenen Daten anonymisiert werden. Die Lösung der Frage, wie eine derartige Anonymisierung technisch so gelingen kann, dass die Unkenntlichmachung unumkehrbar ist (sogenanntes „blurring“), muss in die Ingenieurwissenschaft zurückgespielt werden.

### Das Dilemma-Problem und seine Lösung

Zum Schluss dieses notwendig unvollständig bleibenden Kurzbeitrags sei noch kurz auf das wohl am meisten erörterte rechtliche Problem des autonomen Fahrens eingegangen: das sogenannte Dilemma-Problem. Bereits Anfang der 1950er-Jahre wurde im Strafrecht der (konstruierte) Fall eines Weichenstellers diskutiert, der nur zwischen den beiden Optionen entscheiden konnte, einen heranrasenden Zug entweder auf das eine Gleis in eine Gruppe von Schienenarbeitern oder auf das andere Gleis in einen voll besetzten Personenzug hineinzulenken. Dilemma-Situationen sind in Gestalt des medizinischen „Triage“ in Katastrophen- und Pandemiesituationen

DRIVERLESS

# SELF-DRIVING VEHICLES AND THE LAW

STEFAN J. GEIBEL

In the quest to make autonomous driving safe and reliable and to create the necessary legal framework, researchers and developers must solve a number of problems relating to technical, legal and ethical issues in particular. The launch of “autonomous” vehicles raises various questions, e.g. with regard to liability, the duties of owners, producers and occupants of self-driving cars, compliance with data protection rules and the possible prioritisation of protecting the lives of third persons versus the lives of the car’s occupants. Researchers from Heidelberg University’s Faculty of Law and the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) will work together in a joint research project to develop interdisciplinary proposals. ●

PROF. DR STEFAN J. GEIBEL is the director of Heidelberg University's Institute of German and European Corporate and Economic Law (IGW). He studied law at the universities of Tübingen and Aix-en-Provence (France), obtained a "maîtrise en droit international" from the University of Aix/Marseille III and completed a legal traineeship in Baden-Württemberg. For the following three years, he worked as a lawyer in Berlin and Frankfurt/Main before earning his doctorate in 2002 and qualifying as a professor in 2006. After temporary positions as interim professor at LMU Munich, the universities of Mainz and Konstanz and TU Dresden, he transferred to Heidelberg in 2010, where he accepted the Chair of Civil Law and Ancillary Fields, specialising in corporate and economic law, the law of non-profit organisations and medical civil law. He is a member of the Ethical Review Committee II of Heidelberg University (Medical Faculty Mannheim), serves on the advisory board of the Institute for German, European and International Medical Law, Public Health Law and Bioethics (IMGB) of the universities of Heidelberg and Mannheim and was a Fellow of the Marsilius Kolleg from April 2019 to March 2020.

Contact: stefan.geibel@  
igw.uni-heidelberg.de

**“The realisation of self-driving vehicles raises a number of important legal questions, notably whether the regulations already in place for self-driving cars are sufficient or whether they need to be adapted.”**

**„Der Code eines autonomen Fahrzeugs darf keinen Algorithmus enthalten, der von vornherein gegen ein Menschenleben gerichtet ist – sonst würde sich kein Kunde beruhigt in ein solches Fahrzeug setzen.“**

derzeit besonders in der Diskussion. Sie werden wohl beim autonomen Fahren nur äußerst selten tatsächlich vorkommen. Die Problematik erhält hier nur deshalb eine besondere Brisanz, weil die Entscheidung, ob das Fahrzeug zum Beispiel entweder in eine Fußgängergruppe hineinfahren oder gegen einen Baum prallen und damit den oder die Insassen gefährden soll, in den Algorithmus-Code geschrieben werden müsste.

Auch für den Code muss gelten, dass Leben nicht quantifiziert werden darf, ein Mensch also genauso viel wert ist wie mehrere Menschen, und dass Leben nicht gegen Leben abgewogen werden darf. Im Rahmen dieser Prämisse muss in den Code zusätzlich eine Art „Bemühensmodus“ eingebaut werden, der in einer gegebenen Verkehrssituation im Wege der Annäherung möglichst den Weg wählt, der aus der Vorwärtsperspektive kein

einziges Menschenleben zu gefährden scheint. Die Frage, wie dies technisch zu lösen ist, muss in die Ingenieurwissenschaft zurückgespielt werden. Gewiss wird man auch in dieser Hinsicht von den Lernprozessen der autonomen Fahrzeugsysteme profitieren und den Code optimieren können. Jedenfalls darf der Code keinen Algorithmus enthalten, der von vornherein gegen ein Menschenleben gerichtet ist – sonst würde sich kein Kunde beruhigt in ein autonomes Fahrzeug setzen. ●

**Herausgeber**

Universität Heidelberg  
Der Rektor  
Kommunikation und Marketing

**Wissenschaftlicher Beirat**

Prof. Dr. Peter Comba (Vorsitz)  
Prof. Dr. Beatrix Busse  
Prof. Dr. Beate Ditzel  
Prof. Dr. Markus Hilgert  
Prof. Dr. Nikolas Jaspert  
Prof. Dr. Marcus A. Koch  
Prof. Dr. Carsten Könneker  
Prof. Dr. Alexander Marx  
Prof. Dr. h.c. Thomas Pfeiffer  
Prof. Dr. Joachim Wambsganß  
Prof. Dr. Reimut Zohlhörer

**Redaktion**

Marietta Fuhrmann-Koch  
(verantwortlich)  
Mirjam Mohr (Leitung)  
Claudia Eberhard-Metzger

**Layout**

KMS TEAM GmbH, München

**Druck**

ColorDruck Solutions GmbH, Leimen

**Auflage**

6.000 Exemplare

**ISSN**

0035-998 X

**Vertrieb**

Universität Heidelberg  
Kommunikation und Marketing  
Grabengasse 1, 69117 Heidelberg  
Tel.: +49 6221 54-19026  
ruca@uni-heidelberg.de

Das Magazin kann kostenlos unter oben genannter Adresse abonniert werden.

Im Internet ist es verfügbar unter:

<https://www.uni-heidelberg.de/de/presse-medien/publikationen/forschungsmagazin>

<http://heiu.uni-heidelberg.de/journals/index.php/ruptocarola>



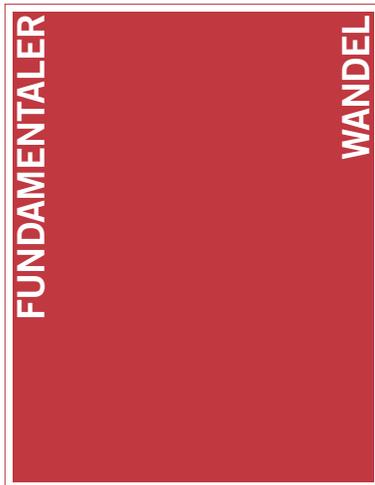
WIRTSCHAFTSKULTURGESCHICHTE  
**MODERN TIMES**  
IM TAKT DER MASCHINE  
GINA FUHRICH & KATJA PATZEL-MATTERN

**116**



WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN  
**DAS ENDE DER ARBEIT?**  
ZWISCHEN POTENZIAL UND RENTABILITÄT  
MELANIE ARNTZ

**126**



MITTELALTERLICHE GESCHICHTE  
**FUNDAMENTALER WANDEL**  
MASSENKOMMUNIKATION ALS MOTOR EINER NEUEN ZEIT  
BERND SCHNEIDMÜLLER & PAUL SCHWEITZER-MARTIN

**136**



FILMGESCHICHTE  
**FASZINIERENDE ZWITTER**  
MENSCH-MASCHINEN IM FILM  
HENRY KEAZOR

**144**

# KAPITEL

# W

# MODERN TIMES

MODERN TIMES

# IM TAKT DER MASCHINE

GINA FUHRICH & KATJA PATZEL-MATTERN

**Maschinen sind aus unserem Alltag nicht wegzudenken: Im Privaten erleichtern sie alltägliche Arbeiten, industriell sind sie die Grundlage der Massenproduktion, die unsere Versorgung mit Verbrauchs- und Konsumgütern sicherstellt. Doch wer dient wem – die Maschine dem Menschen oder der Mensch der Maschine? Ein Blick in die Geschichte zeigt, dass Maschinen zwar entwickelt werden, um Herausforderungen in Produktion und Wirtschaft kreativ zu begegnen, dass sie in ihrer Anwendung und der Interaktion mit den Menschen aber nicht nur Vorteile bringen, sondern auch zu Verwerfungen führen. Anhand zweier zentraler historischer Innovationskrisen in Deutschland nehmen Wirtschafts- und Sozialhistorikerinnen der Universität Heidelberg das Mensch-Maschine-Verhältnis genauer unter die Lupe.**

# D

Die Szene aus dem Film „Modern Times“ ist ikonisch: Charlie Chaplin alias Tramp steht mit zwei Schraubenschlüsseln am Fließband, wo es in großer Geschwindigkeit Muttern anzuziehen gilt. Das Besondere: Die Arbeit ist so monoton, dass der Körper selbst in den Arbeitspausen nicht zur Ruhe kommen kann. Die Arme zucken weiter in den immer gleichen Schraubbewegungen. Hinzu kommt der Takt der Maschine, der es unmöglich macht, sich zu kratzen oder eine Fliege zu verscheuchen. Stetig gesteigert führt er schließlich dazu, dass der Arbeiter ins Räderwerk der Maschine gesogen und von dieser „verschluckt“ wird.

Mit dieser Szene kommentiert der Film „Modern Times“ ironisch den „Taylorismus“ – die prozessgesteuerte Maschinenarbeit Mitte der 1930er-Jahre. Durch die Unterordnung unter die Maschine wird die Arbeit entmenschlicht, so die Kritik. Doch der Film kritisiert nicht nur die Zustände der New-Deal-Ära in den USA. Vielmehr adressiert er zugleich eine Frage, die Gesellschaften seit dem Beginn der Industrialisierung im späten 18. Jahrhundert beschäftigt: In welchem Verhältnis stehen Mensch und Maschine zueinander? Wer dient wem – der Mensch der Maschine oder die Maschine dem Menschen? Abhängig davon, wie die Antwort auf diese Frage ausfällt, erscheint das Verhältnis zwischen Menschen und Maschinen als Zumutung oder als Chance.

### **Wechselseitige Abhängigkeiten**

In krisenhaften Situationen, vor allem in Innovationskrisen, werden in Demokratien Aushandlungen des Mensch-Maschine-Verhältnisses evident und für Historikerinnen sichtbar. Wechselseitige Abhängigkeiten zeigen sich hier besonders deutlich: Maschinen werden entwickelt, um Herausforderungen in Produktion und Wirtschaft kreativ zu begegnen – in ihrer Anwendung und der Interaktion mit den Menschen bringen sie aber nicht nur Vorteile, sondern führen auch zu Verwerfungen. Aus diesem Grund erforschen wir im Bereich Wirtschafts- und Sozialgeschichte am Historischen Seminar der Universität Heidelberg zwei zentrale Innovationskrisen in Deutschland: jene in den späten 1910er- und frühen 1920er-Jahren sowie jene der 1970er-Jahre.

In den 1970er-Jahren wurde angesichts der ökonomischen Krise in der Bundesrepublik ein staatliches Reformprogramm



GINA FUHRICH ist seit 2014 wissenschaftliche Mitarbeiterin im Bereich Wirtschafts- und Sozialgeschichte am Historischen Seminar der Universität Heidelberg. Ihre Promotion zu Arbeitern als Akteuren im Bundesprogramm „Humanisierung des Arbeitslebens“ bei VW schloss sie im November 2019 ab. Zu ihren Forschungsschwerpunkten gehören Unternehmensgeschichte sowie die Geschichte der Arbeit und der Industrialisierung.

Kontakt: [gina.fuhrich@zegk.uni-heidelberg.de](mailto:gina.fuhrich@zegk.uni-heidelberg.de)

# „Eingeführt von Menschen als kreative Reaktion auf Herausforderungen der jeweiligen Zeit, bewirken Maschinen Veränderungen im wirtschaftlichen und sozialen Gefüge.“

mit sozialwissenschaftlicher Begleitforschung aufgelegt – das Programm „Humanisierung des Arbeitslebens“. Die Interviews, die im Rahmen der einzelnen Projekte der Begleitforschung durchgeführt wurden, machen die Stimmen von Arbeitern und einigen wenigen Arbeiterinnen hörbar – eine Seltenheit in der wirtschafts- und unternehmensgeschichtlichen Forschung. Auch der zeitlich frühere thematische Schwerpunkt ist mit einer Innovationskrise verbunden: der Krise der jungen Weimarer Republik. Damals galt es, sich nach Kriegsende in einer globalen Friedenswirtschaft zu positionieren und die ökonomische Grundlage für die junge Demokratie zu schaffen. Überliefert sind umfangreiche Untersuchungen im Bereich der Psychotechnik, einem Vorläufer der heutigen Arbeitspsychologie. Sie wurden durchgeführt, um die Abstimmung von Mensch und Maschine durch Eignungsfeststellungen und Arbeitsgestaltung zu optimieren und zugleich die Bedeutung des Menschen als Faktor maschineller Produktion im Kontext des Wirtschaftens in der Demokratie zu betonen.

## Zumutungen und Sabotageaktionen

Doch die Auseinandersetzung mit dem Mensch-Maschine-Verhältnis gab es bereits in Zeiten der Industrialisierung, als es erstmals zum umfassenden Einsatz von Maschinen in der Produktion kam. Mit ihrer Hilfe sollte eine wach-

sende Zahl von Menschen versorgt werden. Nur dank maschineller Produktion war es möglich, Güter in adäquaten Mengen zu kalkulierbaren Preisen zu produzieren. Das brachte Zumutungen für die Handwerker mit sich. Festpreise wurden abgeschafft und durch Marktpreise ersetzt, was größere Wirtschaftseinheiten bevorzugte. Sinkende Einnahmen und sozialer Statusverlust waren die Folge. Die betroffenen Berufsgruppen wehrten sich mit gezielten Sabotageaktionen. Mit dem britischen Historiker Eric Hobsbawm können wir sie als eine Form der kollektiven Verhandlung von Normen der Produktions- und Arbeitsbeziehungen in einer Zeit interpretieren, in der es noch keine gewerkschaftlichen Interessenvertretungen gab. Dass dieser Maschinensturm nicht zur gängigen Praxis in der Verhandlung von Mensch-Maschine-Verhältnissen wurde, lag nicht nur daran, dass er als Verbrechen verfolgt wurde, oder daran, dass sich im Laufe des 19. Jahrhunderts mit den Gewerkschaften Formen kollektiver Vertretung von Arbeiterinteressen etablierten. Vielmehr führte die Einführung von Maschinen mittelfristig zu einer Verbesserung von Lebens- und Arbeitsbedingungen vieler Menschen in den betroffenen Regionen.

Parallel zur Einführung der maschinengestützten Produktion fand auch eine „Erziehung“ der Menschen statt. Die Ausrichtung des Lebens auf den Takt der Maschinen

war aus vorindustrieller Zeit unbekannt. Fabrikordnungen zeigen, dass beispielsweise ein täglich einheitlicher Arbeitsbeginn und die dafür nötige Pünktlichkeit für Menschen, die zuvor entsprechend der Jahreszeiten und des eigenen Bedarfs gearbeitet hatten, keine Selbstverständlichkeit waren. Sie wurden unter Strafandrohung durchgesetzt, wie einer zeitgenössischen Vorschrift einer Fabrik zu entnehmen ist:

„Beim Zeichen mit der Fabrikpfeife muß jeder Arbeiter seine Arbeit beginnen. Zehn Minuten nach dem Signal wird Niemand in Fabrik hineingelassen. Wer innerhalb der 10 Minuten zu spät kommt, zahlt 1 S[ilber]gr[oschen] Strafe.“ (Maschinenfabrik Schichau, 1874)

Mit fortlaufendem Maschineneinsatz wurde ebenfalls deutlich, dass Menschen im Umgang mit den Maschinen eines Schutzes bedürfen, besonders Kinder. Die Arbeit in der Fabrik verlangte von ihnen häufig eine durchaus wörtlich zu verstehende Unterordnung unter die Maschine, wie in einem Reisebericht des Pädagogen Karl Friedrich August Grashof deutlich wird:

„Kinder von 6 Jahren werden bereits hinter die Maschinen gestellt, um dort selber zur Maschine zu werden. Sechs Tage lang in jeder Woche (...) und auch wohl bei dringender Arbeit – sieben Tage, und jeden Tag von früh morgens bis spät abends bewegt der Knabe in derselben Stellung dieselben Maschinen unaufhörlich zu demselben Geschäft.“ (Reisebericht von Karl Friedrich August Grashof, Direktor für öffentlichen Unterricht, Provinz Niederrhein, 1815)

Körperliche Belastungen, lange Arbeitszeiten, Emissionen und Lärm in den Fabrikhallen führten dazu, dass Kinder erkrankten und ihre Entwicklung gestört war. Um Lern- und Arbeitskraft zu erhalten, wurde deshalb ab den 1830er-Jahren in den sich industrialisierenden Regionen Europas die Kinderarbeit beschränkt. Ab Mitte des 19. Jahrhunderts – und im Deutschen Reich insbesondere mit dem Gewerbe-Unfallversicherungsgesetz von 1884 – folgte dann der Ausbau der Schutzgesetzgebung für Erwachsene.

#### Herausforderungen für die Weimarer Republik

Einen nächsten entscheidenden Schritt für die Organisation des Verhältnisses von Menschen und Maschinen stellt die Einführung der Demokratie in Deutschland nach dem Ende des Ersten Weltkriegs dar. Sozialer Ausgleich und Partizipation sollten die industriellen Beziehungen fortan prägen – so das Ideal. Dabei waren die Herausforderungen für die junge Weimarer Republik gewaltig. Im industriellen Bereich bedeuteten sie den Umbau der Kriegs- zur Friedenswirtschaft, nachholende Erneuerung der Produktionstechnologie und die Integration

von Kriegsversehrten. Die industrielle Psychotechnik versprach durch Beratung und Auswahl von Arbeitskräften hierbei Unterstützung. In einer ihrer Fachzeitschriften formulierte der Arbeitspsychologe Walther Moede 1924 als Ziel der Disziplin, „neben Sparsamkeit und Leistungssteigerung auch einen Beitrag zur Menschenwohlfahrt“ zu leisten, da sie „alle ihre Maßnahmen auf der Grundlage der Fähigkeiten, Anlagen und Verhaltensweisen des tätigen Menschen aufbaut“. Damit sind Mensch-Maschine-Verhältnisse implizit adressiert. Ausgehend vom Menschen und seinen spezifischen Fähigkeiten sollten industrielle Einsatzorte für die entsprechende Person gefunden werden. Tatsächlich aber kam es häufiger zur Anpassung des Menschen an die Maschine: Davon zeugen beispielsweise die Arbeitsarme – Prothesen für Kriegsversehrte, die den Einsatz verschiedener Werkzeuge je nach Produktionsanforderung ermöglichten. Zeitgenossen gehen davon aus, dass sie für die Betroffenen rein funktionalen Charakter hatten – das am Arbeitsarm befestigte Werkzeug war gewissermaßen der Maschinenadapter. Dementsprechend wurden Ingenieure mit der Entwicklung der Prothesen beauftragt. War die Reintegration der Kriegsversehrten in den Produktionsprozess alternativlos, sowohl, um ihnen ein eigenständiges Leben in der Arbeitsgesellschaft zu ermöglichen, als auch, um die Sozialkassen zu entlasten, fällt zugleich auf, dass hinter den Maßnahmen das Ideal einer passgenauen Kopplung von Mensch und Maschine stand. Literarisch überhöht wird dieses Ideal im Roman „Der wahre Mensch“ des sowjetischen Autors Boris Polewoi in der Zeit unmittelbar nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs:

„Er war mit seiner Maschine eins geworden, empfand sie wie eine Fortsetzung seines Körpers. Sogar die gefühllosen und unbeweglichen Prothesen standen diesem Einswerden nicht mehr entgegen. Alexej spürte in sich eine Welle anschwellender Freude [...]“

Nun läge es nahe, zu glauben, dass das Ideal einer Verschmelzung von Mensch und Maschine auch die Vorstellung in der Zeit des Nationalsozialismus prägte. Doch die Rassenideologie markierte in der Diktatur eine Trennlinie. Während in der Industrie die Maschinen den Takt vorgeben, um die Erträge der Kriegswirtschaft zu erhalten und zu steigern, mussten Zwangsarbeiterinnen und -arbeiter Handarbeit unter menschenunwürdigen Verhältnissen verrichten. Durch körperliche Arbeit sollte menschliches Leben vernichtet werden – als Konsequenz der Rassenideologie waren die Maschinen schützenswerter als ideologisch definierte Menschengruppen und wurden deshalb nicht zur Arbeitserleichterung eingesetzt.

#### Umfassende Automatisierung von Arbeitsschritten

Dieses Technikverständnis änderte sich grundlegend nach dem Ende der nationalsozialistischen Gewalt-



**PROF. DR. KATJA PATZEL-MATTERN** nahm 2009 den Ruf der Universität Heidelberg auf eine Professur für Wirtschafts- und Sozialgeschichte am Historischen Seminar der Universität Heidelberg an. Nach einem Studium in Barcelona (Spanien) und Münster, wo sie auch promoviert wurde, habilitierte sie sich 2008 an der Universität Konstanz. Die Historikerin ist Sprecherin des interdisziplinären Promotionskollegs „Kunst, Kultur und Märkte“. Zwei weitere Forschungsschwerpunkte prägen die Arbeit an ihrer Professur: industrielle Arbeitsbeziehungen und insbesondere ihre Gestaltung in der Reformperiode der 1970er-Jahre sowie Praktiken der Sorge in der frühen Kindheit.

Kontakt: [katja.patzel-mattern@zegk.uni-heidelberg.de](mailto:katja.patzel-mattern@zegk.uni-heidelberg.de)

herrschaft. In der DDR sollten die Produktivkräfte den Arbeitern und Arbeiterinnen dienen. Allerdings sah die Arbeitsrealität in den 1950er-Jahren meist anders aus: Durch Demontagen und Produktionsverlagerungen in die UdSSR verblieben in der DDR oft nur veraltete Maschinen, die anstrengende körperliche Arbeit erforderten. In der jungen Bundesrepublik fand hingegen eine umfassende Automatisierung von Arbeitsschritten statt, und der „Fordismus“ nach amerikanischem Vorbild setzte sich als Produktionsweise durch. Qualifizierte Fachkräfte wurden sukzessive durch angelernte Arbeiterinnen oder Arbeiter ersetzt und Arbeitsschritte vereinfacht. Die Fließbandarbeit ermöglichte eine Massenproduktion nicht gekannten Ausmaßes und steigerte Wohlstand und Konsummöglichkeiten. Doch die Fließbandproduktion hatte auch Schattenseiten: So wurden am Band häufig nur kleinteilige Arbeitsschritte mit monotonen Bewegungsabläufen verrichtet. Dies wirkte sich sowohl auf die psychische als auch auf die physische Gesundheit von Arbeiterinnen und Arbeitern aus. Auch nahm die Durchlässigkeit der betrieblichen Hierarchien ab. Komplexere Maschinen stellten höhere Anforderungen an die Qualifikation, die nicht mehr allein durch praktische Erfahrung, sondern nun vor allem durch gezielte Ausbildung erworben werden konnte.

Die körperlich fordernde Arbeit unter gesundheitsgefährdenden Umgebungseinflüssen und die niedrigen Löhne führten in den 1960er-Jahren zu einer Vielzahl gewerkschaftlicher Proteste und wilder Streiks. Die Beschäftigten forderten eine bessere Anpassung der Maschinen und Produktionsbedingungen an den Menschen. Die Bundesregierung reagierte 1974 mit dem Programm „Humanisierung des Arbeitslebens“: Es versuchte den Spagat zwischen der Verbesserung der Arbeitsbedingungen, etwa durch neue Arbeitsstrukturen oder schärfere Arbeitsschutzverordnungen, und gleichzeitig der Erhaltung sowie Steigerung der volkswirtschaftlichen Produktivität durch die Einführung neuer Arbeitstechnologien. Eine dieser neuen Technologien waren die Industrieroboter, die Lasten heben und einfache Arbeitsgänge übernehmen konnten. Für Politik und Wirtschaft waren sie eine menschengerechte Technologie, die schwere Arbeiten auch unter schwierigen Umgebungseinflüssen wie großer Hitze oder giftigen Dämpfen verrichten konnte und somit die Gesundheit von Arbeitern und Arbeiterinnen schützte.

#### **Soziale Isolation durch Maschinen**

Doch zugleich entfielen durch den Einsatz von Robotern Arbeitsplätze, und Beschäftigte, die den Robotern zuarbeiteten, erlebten häufig eine Dequalifikation. Außerdem verlangten die Roboter und Mikroprozessoren den Einsatz anders ausgebildeter Fachkräfte. Damit verringerte sich die Durchlässigkeit in den Produktionshierarchien

# „Totalitäre G nutzen Ma ideologisches

# gesellschaften Maschinen als Machtmittel.“

erneut drastisch. Wollten Arbeiter und Arbeiterinnen nun aufsteigen, mussten sie mehrere zertifizierte Weiterbildungen absolvieren, um die Position eines Vorarbeiters oder Meisters bekleiden zu können. Fehlten ihnen die entsprechenden Qualifikationen, konnten und durften sie bei Funktionsstörungen die Roboter nicht reparieren, sondern mussten auf das Fachpersonal warten. Die Folgen für die Arbeiterinnen und Arbeiter waren Leerlauf, die Rückkehr zur manuellen Produktion oder die Umsetzung an andere Arbeitsplätze. So resümierte ein Arbeiter bei VW die Robotereinführung 1977 wie folgt:

„In der ersten Zeit ist der Arm wohl viel gebrochen. Da war er wohl noch zu schwach. Außerdem wußten die Elektriker manchmal nicht weiter. Da mußten wir wieder mit der Hand fahren. Da waren wir im Endeffekt die Dummen.“

Die erhoffte Arbeitserleichterung hatte ihre Grenzen, überdies benötigten die Maschinen einen festgelegten Produktionsaufbau. Häufig standen Arbeiter nun allein an einer Maschine. Eine Kommunikation mit Kolleginnen war aufgrund des Lärms und des Abstandes zwischen den Maschinen kaum möglich. Insofern fand eine soziale Isolation durch die Maschinen statt. Das Programm „Humanisierung des Arbeitslebens“ versuchte dem mit neuen Arbeitsstrukturen, etwa der Gruppenarbeit, entgegenzuwirken. In der Gruppenarbeit sollten Arbeiter und Arbeiterinnen durch das Erlernen neuer Qualifikationen mehr Arbeitsschritte ausführen und diese innerhalb der Gruppe selbstständig einteilen können. Auch der Ausbau der Mitbestimmungsrechte der Arbeitnehmervertretungen war ein Mittel, um Betroffenen eine Stimme zu verleihen und ihre Interessen bei der Produktionsumstellung geltend zu machen. Rationalisierung und Humanisierung gingen Hand in Hand und prägten so die Gestaltung des Verhältnisses von Mensch und Maschine im Programm „Humanisierung des Arbeitslebens“.

Diese Forschungen zu Innovationskrisen, in deren Zentrum die Menschen, ihre Gestaltung und Angleichung industrieller Arbeitsbedingungen in Deutschland stehen, setzen wir aktuell mit dem größeren drittmittelfinanzierten Projekt „Aushandlung und Teilhabe im Programm ‚Humanisierung des Arbeitslebens‘“ fort. Auf der Grundlage unserer bisherigen Erkenntnisse untersuchen wir, wie sich die Maßnahmen auf die Arbeitssituation und die Beteiligung von Frauen und migrantischen Arbeitskräften sowie des mittleren Managements bei einem Maschinen- und Schraubenproduzenten auswirkten. Dahinter steht die Frage nach einer Demokratisierung von Arbeits- und Produktionsregimen im 20. Jahrhundert.

# „Angesichts selbstlernender KI steht die grundlegende Unterscheidung von Mensch und Maschine zur Disposition. Aus der Maschine, die bedient werden muss, wird ein Akteur, der eigenständig Entscheidungen fällt.“

## Neue Herausforderungen durch Künstliche Intelligenz

Mit der Nutzung Künstlicher Intelligenz (KI) stellen sich in unserer Gegenwart neue Herausforderungen. Pflegeroboter übernehmen einfache medizinische Maßnahmen wie Blutdruckmessen und sparen somit dem zu wenig vorhandenen und stark belasteten Pflegepersonal Zeit. Obwohl der Roboter einfache soziale Interaktionen nachahmen oder darauf reagieren kann, ersetzt er dennoch nicht die benötigte menschliche Zuwendung. Bestenfalls setzt die Maschine den Menschen in diesem Fall frei für zwischenmenschliche Interaktion, schlechtestenfalls entfällt diese, weil die gewonnene Zeit für andere Aufgaben beispielsweise in der Administration gebraucht wird. Bei den neu entwickelten Medizinrobotern stellt sich zudem die Frage, ob eine Maschine, obwohl sie hoch präzise ist, operieren oder eigenständig CT-Bilder und Befunde auswerten darf. Wer trägt bei Fehlern oder Fehldiagnosen die Verantwortung – der Arzt, der Hersteller oder die Maschine? Zukünftig steht angesichts selbstlernender KI

sogar die bisher grundlegende Unterscheidung von Mensch und Maschine zur Disposition: Aus der Maschine, die bedient werden muss, wird ein Akteur, der eigenständig Entscheidungen fällt. Das ist ein qualitativer Umbruch im Verhältnis von Mensch und Maschine, der möglicherweise das Ende der beschriebenen industriellen Interaktionen markiert.

Die Auseinandersetzung mit dem historischen Mensch-Maschine-Verhältnis macht sowohl Chancen als auch Risiken technologischer Wandlungsprozesse sichtbar. Sie vermittelt damit Orientierungswissen, das fruchtbar gemacht werden kann, um die Akzeptanz neuer Technologien in der Gegenwart zu stärken und Fehler der Vergangenheit bei ihrer Einführung zu vermeiden. Gezeigt wurde, dass das Verhältnis von Menschen und Maschinen seit der Industrialisierung ein umstrittenes ist. Eingeführt von Menschen als kreative Reaktion auf Herausforderungen der jeweiligen Zeit, bewirken Maschinen Veränderungen

MODERN TIMES

# KEEPING PACE WITH THE MACHINE

GINA FUHRICH &amp; KATJA PATZEL-MATTERN

Machines have become an integral part of our daily lives. In the private realm, they make routine tasks easier; in industry, they are the power driving mass production, which provides us with a steady supply of convenience and consumer goods. But the concept of machines serving humans and ensuring societal well-being does not tell the whole story. In fact, machines and their use also pose a challenge for humankind. They can destroy livelihoods by replacing human workers or make people ill by forcing them to perform monotonous or dangerous tasks.

As a result, the relationship between man and machine has been a controversial one since the age of industrialisation. At the centre of the debate is the question of whether humans should serve machines or vice versa. The answer determines whether man-machine interactions are perceived as an opportunity or an imposition.

Historical analysis shows that machines are powerful tools that have shaped societies for the better, but also for the worse. In the past, new technologies had a good chance of successful implementation if their usefulness was evident and if various societal stakeholders were able to participate in the discussion about their impact. Where such participation was denied, people found different, sometimes violent, ways of voicing their feelings, particularly their rejection. But whatever course of action they chose, they had to rely on their ability to distinguish between humans and machines – something that has become increasingly difficult since the advent of artificial intelligence. While it is true that a possible merging of man and machine has been regarded as an ideal that promises maximum efficiency since the early 20th century, it is only now, with the introduction of self-learning and decision-making systems, that the relationship between man and machine is reaching a critical turning point. Machines are evolving from tools into actors. ●

GINA FUHRICH joined Heidelberg University's Department of History in 2014 as a research assistant in the field of economic and social history. In November 2019 she completed her doctoral thesis on workers as actors in the federal programme "Humanisierung des Arbeitslebens" (humanisation of work) at Volkswagen. Her research interests include business history and the history of work and industrialisation.

Contact: gina.fuhrich@zegk.uni-heidelberg.de

PROF. DR KATJA PATZEL-MATTERN accepted the Chair of Economic and Social History at Heidelberg University's Department of History in 2009. She studied in Barcelona (Spain) and Münster, where she obtained her PhD, and completed her habilitation at the University of Konstanz in 2008. She is the speaker of the interdisciplinary research training group "Art, Culture and Markets". The two other primary fields of research of her chair are industrial work relations, particularly their organisation in the reform period of the 1970s, and practices of care in early childhood.

Contact: katja.patzel-mattern@zegk.uni-heidelberg.de

**“With new advances in the field of prosthetics during the First World War, the idea of a symbiosis between man and machine ceased being mere fiction and became an ideal to be realised.”**

im wirtschaftlichen und sozialen Gefüge. Jede Einführung neuer Techniken bringt, ebenso wie jede regulierende Intervention des Verhältnisses von Mensch und Maschine, Gewinner und Verlierer hervor. Wie die historischen Beispiele zeigen, ist es umso wichtiger, Verfahren zu gestalten, die möglichst alle gesellschaftlichen Gruppen an der Debatte über den Umgang mit den Technikfolgen beteiligen. Individuelle Partizipation und kollektive Mitbestimmung durch Interessenvertretungen tragen dazu bei, der Deprivation von Betroffenen – also deren Verlust von etwas Vertrautem oder ihrem Gefühl der Benachteiligung – entgegenzuwirken, Handlungsoptionen zu entwickeln und technologischen Wandel als auf die Zukunft gerichtete Gestaltung zu begreifen, die gesellschaftlich getragen wird. Während demokratische Gesellschaften zumindest diskursiv an dieser Stelle ansetzen, nutzen totalitäre Gesellschaften Maschinen als ideologisches Machtmittel. Die historische Untersuchung zeigt aber auch, dass die Idee einer Symbiose von Mensch und Maschine spätestens mit den Entwicklungen der Prothetik im Ersten Weltkrieg von einer Fiktion zu einem zu realisierenden Ideal wurde. Leitend ist dabei der Gedanke möglichst effizienter Nutzung körperlicher Ressourcen, auch wenn literarische Überhöhungen eine Erweiterung des menschlichen Erfahrungsraums suggerieren.

Maschinen, so die Schlussfolgerung, sind einerseits eine Antwort auf gesellschaftliche Problemlagen und evozieren andererseits individuelle Zumutungen. Die jeweilige historisch spezifische Gestaltung des Mensch-Maschine-Verhältnisses vermittelt uns Einsichten in herrschende Menschenbilder und Technikwahrnehmungen. ●

**„Die Idee einer Symbiose von Mensch und Maschine wurde spätestens mit den Entwicklungen der Prothetik im Ersten Weltkrieg von einer Fiktion zu einem zu realisierenden Ideal.“**

**DAS ENDE**

**DER**

**ARBEIT?**

DAS ENDE DER ARBEIT?

# ZWISCHEN POTENZIAL UND RENTABILITÄT

MELANIE ARNTZ

**Immer mehr bisher dem Menschen vorbehalten Tätigkeiten können dank rasant wachsender Rechenleistung auch von Maschinen übernommen werden. Durch Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen scheinen diesem Trend kaum noch Grenzen gesetzt zu sein, was Angst vor massiven Arbeitsplatzverlusten hervorruft. Doch wieso ist uns die Arbeit trotz der vermeintlich hohen Automatisierungspotenziale bislang nicht ausgegangen? Und was lässt sich daraus für die Zukunft der Arbeit lernen?**

## A

Angesichts der Fortschritte in Robotik, Sensorik und Künstlicher Intelligenz ist die Debatte um die Zukunft der Arbeit in den vergangenen Jahren voll entbrannt. Hiobsbotschaften, dass fast die Hälfte der Beschäftigten in den nächsten ein bis zwei Dekaden von Maschinen ersetzt werden könnte, schüren Ängste, die auch in der öffentlichen Debatte ihren Niederschlag finden: So titelte beispielsweise DER SPIEGEL im September 2016: „Sie sind entlassen! Wie uns Computer und Roboter die Arbeit wegnehmen – und welche Berufe morgen noch sicher sind“. Doch zu allen Zeiten hat technologischer Wandel nicht nur Hoffnungen auf mehr Wohlstand geweckt, sondern zugleich auch Befürchtungen geschürt, menschliche Arbeitskraft könnte überflüssig werden, was Arbeitslosigkeit und Armut nach sich zöge. Zuletzt wurde der ersten Welle der Computerisierung in den 1970er-Jahren eine derartige Wirkung zugeschrieben, wie die SPIEGEL-Schlagzeile „Die Computer-Revolution. Fortschritt macht arbeitslos“ aus dem Jahr 1978 verdeutlicht. Doch auch wenn frühere technologische Neuerungen letztlich keine Massenarbeitslosigkeit hervorbrachten und der Wohlstand stieg – könnte dieses Mal nicht doch alles anders sein?

Angesichts dieser verbreiteten Befürchtung stellt sich für Arbeitsmarktökonominnen die Frage, warum uns die Arbeit trotz der vermeintlich hohen Automatisierungspotenziale bislang nicht ausgegangen ist und was wir daraus für die Zukunft der Arbeit lernen können. Als Professorin am Alfred-Weber-Institut für Wirtschaftswissenschaften (AWI) der Universität Heidelberg und Arbeitsmarktökonomin am Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW) in Mannheim bin ich zusammen mit meinen ZEW-Kollegen Terry Gregory vom Institute of Labor Economics (IZA) und Ulrich Zierahn von der niederländischen Utrecht University diesen Fragen nachgegangen. Dieser Beitrag fasst die Kernergebnisse unserer gemeinsamen Forschung zusammen.

### Automatisierung erfasst immer mehr Aufgaben

Die Befürchtung, dass der aktuelle technologische Wandel im Unterschied zu vergleichbaren früheren Phasen doch zu Massenarbeitslosigkeit und Wohlstandsverlusten führen könnte, scheint zunächst einmal nicht unberechtigt zu sein. Denn die computergesteuerte Automatisierung beschränkt sich nicht mehr ausschließlich auf Routineauf-

gaben, die nach genau definierten Regeln ablaufen und sich somit in regelbasierte Algorithmen übersetzen lassen. Die Grenze des Machbaren verschiebt sich weiter durch maschinelles Lernen (ML), insbesondere durch das sogenannte „deep learning“, eine spezielle Methode der Informationsverarbeitung, die neuronale Netze und große Datenmengen nutzt. Mit maschinellem Lernen wird es möglich, Maschinen in der Ausführung von nicht regelbasierten Aufgaben zu trainieren, indem man ihnen geeignete Daten zur Verfügung stellt, um das menschliche Verhalten zu imitieren, ohne die zugrunde liegenden Regeln verstehen zu müssen. Die wachsende Verfügbarkeit von Trainingsdaten über menschliches Verhalten, die beispielsweise durch die Nutzung von Smartphones und Internetaktivitäten generiert werden, ermöglicht eine Verbreitung dieser Methoden in der realen Welt. Beispiele reichen von neuen Diagnosemöglichkeiten im Bereich der Medizin über eine ML-optimierte innerstädtische Verkehrsführung bis hin zu ML-basierten Möglichkeiten, Kreditkartenbetrug oder Ähnliches zu erkennen. Die Automatisierung erfasst somit immer mehr Aufgaben, was die Debatte über die Zukunft der Arbeit neu belebt hat – befeuert auch von Ergebnissen einer US-Studie, die konstatiert, dass etwa die Hälfte der US-Arbeitskräfte in den nächsten ein bis zwei Jahrzehnten „von der Automatisierung bedroht“ sei.

Die generelle wissenschaftliche Debatte zu den Auswirkungen der Digitalisierung auf die Arbeitswelt ist jedoch weit weniger alarmistisch. Die komplexen Wirkungszusammenhänge zu verstehen und damit die Diskussion auch für die politischen Entscheidungsträger zu versachlichen, ist ein Ziel unserer ZEW/AWI-Arbeitsgruppe. Denn es ist ein weiter Weg von einer technischen Neuerung bis zu daraus resultierenden Arbeitsplatzverlusten und negativen Beschäftigungswirkungen für die Gesamtwirtschaft – und überraschenderweise können sich solche Innovationen entgegen den weitverbreiteten Befürchtungen am Ende des Weges sogar beschäftigungsschaffend auswirken. Es lohnt sich daher, die Effekte neuer Technologien in der Wirtschaft genauer in den Blick zu nehmen.

### Überschätzung der Automatisierungspotenziale

Technische Neuerungen schaffen zunächst einmal nur ein Automatisierungspotenzial, also die technische Möglichkeit, eine bislang von Menschen ausgeführte Tätigkeit computergestützt automatisieren zu können. Bereits im Hinblick auf diese Automatisierungspotenziale gibt es eine lebhaft wissenschaftliche Debatte. Während Studien für die USA und einige europäische Industrieländer, die diese Potenziale für die verschiedenen Berufe auf der Basis von Experteneinschätzungen bewerten, etwa die Hälfte der Beschäftigten in technisch automatisierbaren Berufen verorten, kommen wir AWI-Forschende zu deutlich moderateren Einschätzungen: Im Unterschied zu den berufsorientierten Ansätzen nehmen wir nicht an, dass alle



**PROF. DR. MELANIE ARNTZ** ist seit Oktober 2018 Leibniz-Professorin für Arbeitsmarktökonomie am Alfred-Weber-Institut für Wirtschaftswissenschaften der Universität Heidelberg. Seit 2009 ist sie stellvertretende Leiterin des Forschungsbereichs „Arbeitsmärkte und Personalmanagement“ am Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW) in Mannheim. Im selben Jahr wurde sie auf eine Juniorprofessur für Arbeitsmärkte an der Universität Heidelberg berufen, an die ihre aktuelle Professur anknüpft, die im Leibniz-Professorinnenprogramm gefördert wird. Mit ihrer ZEW-Arbeitsgruppe „Digitalisierung und internationale Arbeitsteilung“ beschäftigt sie sich unter anderem mit den Auswirkungen der Digitalisierung auf Arbeitsmärkte und Arbeitskräfte. Vor ihrer Promotion in VWL an der TU Darmstadt (2007) studierte Melanie Arntz Diplom-Geographie an der Universität Bonn und der University of Minnesota (USA) mit einem fachlichen Schwerpunkt im Bereich der Wirtschafts- und Arbeitsmarktgeographie und absolvierte ein volkswirtschaftliches Zweitstudium.

Kontakt: [melanie.arntz@zew.de](mailto:melanie.arntz@zew.de)

# „In deutschen Betrieben gewinnen ‚4.0-Technologien‘ zwar an Bedeutung, jedoch auf einem niedrigen Niveau.“

Beschäftigten eines Berufes exakt dieselben Tätigkeiten ausführen, sondern stützen uns auf Daten, die für Beschäftigte in OECD-Ländern die tatsächlichen Tätigkeiten am Arbeitsplatz erfassen. Demnach weisen Beschäftigte auch innerhalb eines Berufes ganz unterschiedliche Tätigkeitsprofile auf. Berücksichtigt man dieses gesamte Spektrum an Tätigkeitsprofilen, arbeiten nur etwa zehn Prozent der Beschäftigten in Jobs, die ein hohes technisches Automatisierungspotenzial aufweisen.

Daten und Methodik erklären dabei nur einen kleinen Teil der Unterschiede zwischen dem berufsbezogenen und dem jobbasierten Ansatz. Ein Großteil des Unterschieds basiert hingegen darauf, dass Arbeitnehmer in scheinbar automatisierbaren Berufen auch Aufgaben ausführen, die schwer automatisierbar, jedoch nicht unter allen Beschäftigten des Berufsfeldes verbreitet sind. Mit anderen Worten, Arbeitnehmer eines Berufes spezialisieren sich auf unterschiedliche Aufgabenfelder, die jedoch weniger automatisierbar sind als die Aufgabenfelder des durchschnittlichen Beschäftigten in diesem Beruf. Berufsbezogene Ansätze überschätzen somit die Automatisierungspotenziale neuer Technologien, was mittlerweile auch mit weiteren Studien bestätigt werden konnte. Wenn das Automatisierungspotenzial eher bei zehn Prozent als bei 50 Prozent liegt, so kommt weiter hinzu, dass es sich zunächst nur um ein technisches Potenzial handelt, über dessen tatsächliche Umsetzung die betriebliche Praxis entscheidet.

Genau diesen betrieblichen Ansatz nahm unsere Arbeitsgruppe im Rahmen der „IAB-ZEW-Arbeitswelt-4.0-Umfrage“ in den Blick, die das ZEW zusammen mit dem Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB) zu

den Konsequenzen einer zunehmend automatisierten und digitalisierten Arbeitswelt („Arbeitswelt 4.0“) in deutschen Betrieben durchführte. Die Ergebnisse dieser Umfrage zeigen, dass die Diffusion neuer Technologien derzeit tatsächlich nur moderat voranzuschreiten scheint. So gewinnen „4.0-Technologien“, die eine direkte und automatisierte Kommunikation zwischen verschiedenen Teilen der Wertschöpfungskette ermöglichen, im Vergleich zu älteren Technologien in deutschen Betrieben zwar an Bedeutung, jedoch auf einem niedrigen Niveau: Laut Einschätzungen der Betriebe beruhen im Jahr 2016 lediglich etwa zehn Prozent der Büro- und Kommunikationsmittel und etwa fünf Prozent der Produktionsmittel auf 4.0-Technologien. Viele Betriebe investieren nach wie vor in den Ausbau älterer, computergestützter Technologien, die eher der dritten industriellen Revolution zuzurechnen sind.

## **Rentabilität und ethische Bedenken**

Ein Grund für die moderate Verbreitung digitaler Technologien könnte sein, dass nicht jedes technische Potenzial auch betriebswirtschaftlich rentabel ist. Denn es kommt nicht darauf an, wie viel theoretisch automatisiert werden kann, sondern ob die Maschine eine bestimmte Aufgabe zu niedrigeren Kosten ausführen kann als der Mensch. Die eher moderate Lohnentwicklung in Deutschland in den letzten zwei Dekaden hat Automatisierungsanreize daher vermutlich gesenkt. Darüber hinaus sind zur Implementierung neuer Technologien oft zusätzliche Investitionen nötig, zum Beispiel organisatorische Umstrukturierungen oder der Erwerb neuer Kompetenzen durch Weiterbildung und Neueinstellungen. Der auch demographiebedingte Mangel an Fachkräften kann die Einführung neuer Technologien daher zusätzlich verlangsamen.

Zudem kann es ethische oder rechtliche Bedenken geben. Gut veranschaulichen lassen sich die künftigen Herausfor-

#### Kooperation in der Wirtschaftsforschung

In den Wirtschaftswissenschaften kooperiert die Universität Heidelberg seit vielen Jahren mit dem Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW) in Mannheim. Nach vielen gemeinsamen Forschungsprojekten wurde die Zusammenarbeit im Jahr 2004 durch die Berufung von Prof. Dr. Christoph Böhringer, damals Leiter des Forschungsbereichs Umwelt am ZEW, auf eine Professur an der Universität Heidelberg verstärkt. Seitdem erfolgte die Besetzung der Leitungsposition des Forschungsbereichs „Umwelt- und Ressourcenökonomik, Umweltmanagement“ am ZEW wiederholt im Rahmen gemeinsamer Berufungsverfahren. 2009 unterzeichneten beide Institutionen eine Vereinbarung zur gemeinsamen Berufung von Juniorprofessorinnen und -professoren. Zudem ist der Leiter des Forschungsbereichs „Unternehmensbesteuerung und Öffentliche Finanzwirtschaft“, Prof. Dr. Friedrich Heinemann, außerplanmäßiger Professor für Volkswirtschaftslehre an der Universität Heidelberg.

Das ZEW, das Mitglied der Leibniz-Gesellschaft ist, wurde 1990 auf Initiative der baden-württembergischen Landesregierung, der Wirtschaft des Landes und der Universität Mannheim gegründet und hat sich seit Aufnahme seiner Arbeit im April 1991 als eines der führenden deutschen Wirtschaftsforschungsinstitute mit hoher europäischer Reputation etabliert. Im Mittelpunkt der Forschung stehen die ökonomische Analyse und das Design funktionstüchtiger Märkte und Institutionen in Europa mit einem deutlichen Schwerpunkt auf der mikroökonomischen und mikroökonomischen Forschung.

[www.zew.de](http://www.zew.de)

derungen beim Einsatz Künstlicher Intelligenz am Beispiel des autonomen Fahrens: Hier stellen sich etwa Fragen hinsichtlich der Haftung bei einem Unfall oder der Problematik, wie sich ein Algorithmus bei einem unvermeidbaren Unfall zwischen dem Zusammenstoß mit einem Kind oder einem Erwachsenen entscheiden soll. Im Bereich der Arbeitswelt könnten ethische Bedenken beispielsweise in der Kranken- und Altenpflege die Einführung neuer Technologien beschränken: So kann es dort zum Beispiel starke Präferenzen dafür geben, bestimmte Aufgaben auch zukünftig nicht von einer maschinellen Arbeitskraft, sondern nur von Menschen ausführen zu lassen.

Bei Weitem nicht jedes technische Potenzial wird somit in absehbarer Zeit auch in die betriebliche Praxis einziehen – und selbst wenn das geschieht, muss ein Job noch lange nicht als Ganzes wegfallen, nur weil ein bestimmter Teil der Aufgaben automatisiert werden kann. Ob ein Unternehmen mit der Einführung neuer Technologien Arbeitsplätze abbaut, hängt auch davon ab, ob die Beschäftigten in der Lage sind, neue Aufgabenfelder zu übernehmen, die das Aufgabenspektrum der Technologien ergänzen. Beispielsweise nahm die Zahl der Bankangestellten nach Einführung des Geldautomaten zu, weil Bankangestellte sich nun mehr der Kundenberatung widmen konnten, nachdem die Geldautomaten typische Kassiereraufgaben übernommen hatten.

Die Neuausrichtung des Aufgabenspektrums in einem Beruf scheint insgesamt ein recht effektiver Anpassungsmechanismus zu sein. So ging die Computerisierung zwar in der Tat mit einem deutlichen Rückgang automatisierbarer Routineaufgaben einher. Allerdings ging nur ein sehr kleiner Teil dieses Rückgangs mit dem Wegfall von Arbeitsplätzen mit vorwiegend automatisierbaren Routineaufgaben einher. Der größte Teil erfolgt durch die Anpassung des Aufgabenspektrums innerhalb der Berufe, das heißt, Beschäftigte in fast allen Berufen reduzieren Routineaufgaben zugunsten nicht automatisierbarer Tätigkeiten. Solange die Kompetenzen der Beschäftigten

**„Nicht jedes technische Automatisierungspotenzial ist auch betriebswirtschaftlich rentabel.“**

**„Ein Job muss nicht  
als Ganzes  
wegfallen, nur weil  
ein bestimmter  
Teil der Aufgaben  
automatisiert  
werden kann.“**

# „Neue Technologien schaffen eine Nachfrage nach gänzlich neuen, die Technik ergänzenden Tätigkeiten und Berufsbildern.“

mit den sich verändernden Anforderungen Schritt halten, führen neue Technologien somit nicht zwingend zu Arbeitsplatzverlusten.

## Zwei entgegenwirkende Mechanismen

Trotz dieser Anpassungsmechanismen ersetzt die Einführung von Automatisierungstechnologien in gewissem Maße Arbeitskräfte. Diesem Verdrängungseffekt wirken allerdings zwei Mechanismen entgegen: So steigern technologische Innovationen zum einen die Produktivität der Unternehmen, indem sie Kosten und Preise senken, was die Produktnachfrage erhöht. Darüber hinaus kann die Automatisierung neuartige oder qualitativ verbesserte Produkte und Dienstleistungen hervorbringen und somit nachfragesteigernd wirken. Die so erzielten zusätzlichen Einkommen erhöhen zudem die Nachfrage nach Arbeitskräften auch in Sektoren, die keine oder nur in geringem Maße neue Technik einsetzen, wie zum Beispiel haushaltsnahe Dienstleistungen, Gastgewerbe oder Gesundheitsdienstleistungen. Zweitens schaffen neue Technologien eine Nachfrage nach gänzlich neuen, die Technik ergänzenden Tätigkeiten und Berufsbildern. Ob der Nettoeffekt neuer Automatisierungstechnologien auf die Beschäftigung positiv oder negativ ausfällt, ist somit letztlich eine empirische Frage. Entsprechende Studien zu den Beschäftigungswirkungen des jüngeren technologischen Wandels

zeichnen ein gemischtes Bild, zeigen aber, dass diese Technologien zumeist keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtbeschäftigung haben.

So scheint die Einführung einer neuen Technologie in den investierenden Unternehmen keine Beschäftigungswirkungen zu entfalten, obgleich sich die Beschäftigtenstruktur in den Unternehmen verändert. Studien auf Unternehmensebene können jedoch keinen Aufschluss darüber geben, ob Unternehmen, die in neue Technologien investieren, andere Unternehmen verdrängen. Doch auch Studien auf der Branchenebene zeigen für OECD-Länder keine negativen Beschäftigungswirkungen. So bleibt das Beschäftigungsvolumen in Branchen, die vermehrt in Robotertechnologien investiert haben, unverändert. Leicht negative Beschäftigungseffekte finden sich jedoch für Geringqualifizierte.

Doch auch Branchenstudien sind in ihrer Aussagekraft beschränkt. Um aggregierte Beschäftigungseffekte sichtbar zu machen, die darüber hinaus auch die Umverteilung von Beschäftigung zwischen innovativen und nicht innovativen Branchen berücksichtigen, stützen sich andere Untersuchungen auf Regionen als kleine Volkswirtschaften. Entsprechende Studien bezüglich der Wirkungen der Robotertechnologie kommen für die USA zu leicht negativen Beschäftigungswirkungen, während eine vergleichbare Studie für Deutschland positive Gesamteffekte findet. Betrachtet man die Computerisierung beziehungsweise Digitalisierung im Allgemeinen und nicht speziell die Wirkungen der Robotertechnologien, finden Studien für die USA keine Nettobeschäftigungseffekte und für die EU sogar positive Beschäftigungseffekte, was vor allem auf die Produktivitätswirkungen der Technologien zurückgeführt werden kann. Und auch eine Analyse der ZEW/AWI-Arbeitsgruppe für Deutschland, die auf der IAB-ZEW-Arbeitswelt-4.0-Erhebung aufbaut und die Beschäftigungswirkungen anhand eines makroökonomischen Modells abschätzt, kommt zu dem Ergebnis, dass Investitionen in moderne digitale Technologien zwischen 2011 und 2016 zum Aufbau von Beschäftigung in Deutschland beigetragen haben: So wuchs die Gesamtbeschäftigung in diesem Fünf-Jahres-Zeitraum aufgrund der Technologieinvestitionen um knapp zwei Prozent.

## Bedeutung der Rahmenbedingungen

Insgesamt zeigen empirische Studien somit, dass neue Automatisierungstechnologien oftmals keinen signifikanten Effekt auf die Gesamtbeschäftigung haben, wobei je nach Länderkontext auch positive oder leicht negative Wirkungen berichtet werden. Dies lenkt den Blick auf die Bedeutung der Rahmenbedingungen, unter denen die Digitalisierung abläuft. Je besser Anpassungsmechanismen zum Beispiel durch ein entsprechend gutes System der beruflichen Weiterbildung greifen, je stärker

THE END OF WORK?

# BETWEEN POTENTIAL AND PROFITABILITY

MELANIE ARNTZ

As a result of the rapid growth of computing power and advances in machine learning, more and more activities that seemed to be reserved for humans can now be automated using machines and algorithms. This technological change has sparked a public debate about possible job losses and the threat of mass unemployment. Researchers at the Alfred Weber Institute (AWI) and the Centre for European Economic Research (ZEW) aim to advance this debate and help policy makers to better understand the actual consequences of the ongoing technological transformation.

For instance, the technological potential for automating jobs is often exaggerated, owing to the assumption that all workers of a certain occupation perform the same tasks and are hence equally affected by technological change. AWI/ZEW researchers demonstrate that relaxing this assumption yields a much more moderate assessment of automation potentials. In addition, the practical application of these technological possibilities takes more time than is usually believed, as shown by a survey conducted by AWI/ZEW researchers on the use of such technologies in German businesses. And finally, the consequences of replacing a human worker by a machine are not as clear as they may seem, since induced productivity effects and the induced demand for new and complementary tasks may more than compensate for the initial job losses.

Hence, in line with much of the literature, AWI researchers found evidence for a mildly positive effect of recent technology investments on aggregate employment in Germany. Still, the corresponding structural shifts and increasing skill requirements pose a challenge for workers. Ongoing research at AWI/ZEW thus aims at contributing to a better understanding of the heterogeneous impact of technological change on different types of workers in order to provide guidelines for policies that help workers adjust to these changing requirements. ●

PROF. DR MELANIE ARNTZ is a Leibniz Professor of Labour Economics at Heidelberg University's Alfred Weber Institute for Economics, a position she has held since October 2018. In 2009 she became the deputy head of the research unit "Labour Markets and Human Resources" at the Leibniz Centre for European Economic Research (ZEW) in Mannheim. That same year she accepted a junior professorship for labour markets at Heidelberg University; this evolved into her current professorship, which is funded by the Leibniz Programme for Women Professors. With her ZEW research group "Digitalisation and International Labour Division", she investigates topics such as the effects of digitalisation on workers and labour markets. Before she obtained her PhD in economics from TU Darmstadt (2007), Melanie Arntz studied geography at the University of Bonn and the University of Minnesota (USA), specialising in economic and labour market geography, and earned a second degree in economics.

Contact: [melanie.arntz@zew.de](mailto:melanie.arntz@zew.de)

**“The real challenge is not an impending end to work itself, but a profound structural transformation that leads to a sharp rise in skill requirements and will thus be hardest on those who lack the necessary competences.”**

# „Die eigentliche Herausforderung ist nicht ein drohendes Ende der Arbeit, sondern ein tief greifender Strukturwandel, der mit stark steigenden Anforderungen einhergeht und somit vor allem diejenigen hart trifft, die nicht die notwendigen Kompetenzen aufweisen.“

Produktivitätseffekte ausfallen und je flexibler ein Arbeitsmarkt das Entstehen neuer Aufgabenbereiche und Berufsbilder ermöglicht, umso positiver fallen die Beschäftigungswirkungen aus.

Die eigentliche Herausforderung ist somit nicht etwa ein drohendes Ende der Arbeit, sondern vielmehr ein tief greifender Strukturwandel, der mit stark steigenden Anforderungen in vielen Berufen einhergeht und somit vor allem diejenigen hart trifft, die nicht die notwendigen Kompetenzen aufweisen. Für die Forschung ergeben sich damit weitere Fragen, denen sich auch die Forschenden am AWI und am ZEW widmen. So wurde in Kooperation mit dem IAB, der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) und dem Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB) jüngst eine Beschäftigtenbefragung durchgeführt, um auch die heterogenen Auswirkungen auf die Arbeitskräfte im Hinblick auf Beschäftigungs- und Einkommenschancen, Arbeitsorganisation, Weiterbildungsaktivitäten sowie gesundheitliche Folgen betrachten zu können. Analysen zu diesen individuellen Auswirkungen können wichtige Anhaltspunkte liefern, welche Arbeitskräfte

welche Form der Unterstützung benötigen, um sich für den Arbeitsmarkt der Zukunft zu wappnen. Dazu können neben passgenauen Qualifizierungs- und Weiterbildungsprogrammen auch veränderte Arbeitsschutzmaßnahmen zählen. Zudem muss die Politik auch diejenigen in den Blick nehmen, die auch durch gezielte Ausbildungs- und Qualifizierungsmaßnahmen nicht in der Lage sind, sich den steigenden Anforderungen anzupassen. Die Forschung am AWI trägt dazu bei, Antworten auf diese drängenden Fragen zu entwickeln. ●

**FUNDAMENTALER**

**WANDEL**

FUNDAMENTALER WANDEL

# MASSENKOMMUNIKATION ALS MOTOR EINER NEUEN ZEIT

BERND SCHNEIDMÜLLER & PAUL SCHWEITZER-MARTIN

Die Digitalisierung hat einen grundlegenden Umbruch in den Schreib- und Lesegewohnheiten der Menschen ausgelöst. Eine vergleichbare Kommunikationsrevolution ereignete sich bereits im Spätmittelalter, als die „papierene Umwälzung“ und die Erfindung des Buchdrucks zu einer zunehmenden Entfaltung von Schriftlichkeit führten. Die erstmals möglich gewordene Massenvervielfältigung von Texten sorgte in der Folge auch für eine Massenverbreitung von Inhalten und Ideen, was wiederum eine Veränderung von Kultur und Gesellschaft nach sich zog. Mit diesen fundamentalen medialen Wandlungsprozessen beschäftigen sich Heidelberger Historikerinnen und Historiker im Rahmen des Sonderforschungsbereichs „Materiale Textkulturen“.

# M

Menschen machen Dinge. Und die Dinge machen etwas mit den Menschen. Über Jahrzehnte ließen die Geistes- und Kulturwissenschaften die Welt und ihre Wahrnehmung nur aus den Köpfen der Menschen entstehen. Dieser Konstruktivismus weicht in einer Zeit wegbrechender Machbarkeitsphantasien neuen Einsichten in die Handlungskraft menschlicher Artefakte. Als Geschaffenes wirken sie in vielfältiger Weise auf ihre Schöpfer zurück. Der französische Soziologe Bruno Latour sprach vom „Parlament der Dinge“ und brachte Artefakte zum Reden und Handeln. Der Zauber, der von qualitätvollen mittelalterlichen Handschriften auf Betrachterinnen und Betrachter ausgeht, lässt sich nicht exakt erfassen. Aber er wirkt. Das lässt sich eindrucksvoll in Handschriftenabteilungen oder in prächtigen Mittelalerausstellungen erleben, in haptischen oder visuellen Begegnungen. Ein prachtvoll geschriebenes und gemaltes Buch wie der Codex Manesse oder das Evangeliar Heinrichs des Löwen und Mathildes von England ragt aus der vielfältigen Massenproduktion heraus und begeistert die Menschen seit Jahrhunderten.

## Beschreibstoffe und Buchwelten

Aber nicht nur die Bilder und Texte finden größte Aufmerksamkeit, sondern auch das Material, auf dem sie gezeichnet oder geschrieben sind. Beim Blättern fühlt man die Beschaffenheit der alten Beschreibstoffe mit Händen. Das im Mittelalter über lange Zeit vorherrschende Pergament wurde in aufwändigen Fertigungsprozessen aus Tierhäuten hergestellt und zeichnete sich durch besondere

# „Erst das Papier als Massenprodukt erlaubte die zunehmende Entfaltung von Schriftlichkeit.“

Dauerhaftigkeit aus. Für kostbare Bücher ließen ganze Viehherden ihr Leben. Besonders hochgeschätzte Texte sollten auf makellosen Seiten geschrieben werden. Auch die spätere Papierherstellung verlangte spezialisierte Fertigkeiten des Papierschöpfens und -aufbereitens. Diese Techniken waren schon vor Jahrhunderten in Ostasien entwickelt worden und drangen in der zweiten Hälfte des Mittelalters über den Mittelmeerraum ins lateinische Europa vor. Dort wurden sie weiterentwickelt und professionalisiert.

Spätmittelalterliche Papiere erwiesen sich durchaus als robust und standen in ihrer Haltbarkeit dem Pergament nicht viel nach. Trotzdem galt dem Pergament einst die besondere Wertschätzung: Texte von großer Wichtigkeit und Geltung für lange Dauer sollten – so legten es mittelalterliche Vorschriften fest – auf Pergament geschrieben werden. Doch erst das Papier als Massenprodukt erlaubte die zunehmende Entfaltung von Schriftlichkeit. Im 14. und 15. Jahrhundert wurden die Pergamente in Verwaltung, Wirtschaft oder Lehre zunehmend durch Papiere ersetzt. Unerlässlich wurde Papier dann für die Vervielfältigung von Texten durch den Buchdruck seit der Mitte des 15. Jahrhunderts. Auch er war längst in Ostasien entwickelt worden. Doch erst die von Johannes Gutenberg praktizierte Verwendung beweglicher Lettern eröffnete der neuen Technik seit der Mitte des 15. Jahrhunderts ihren Siegeszug im lateinischen Europa und später über die ganze Welt.

## Die papierene Umwälzung

Unser Forschungsprojekt „Die papierene Umwälzung im spätmittelalterlichen Europa. Vergleichende Untersuchungen zum Wandel von Technik und Kultur im ‚sozialen Raum‘“ im Heidelberger Sonderforschungsbereich 933 „Materiale Textkulturen“ behandelt diese fundamentalen medialen Wandlungsprozesse: den Wechsel der Beschreibstoffe in der „papierenen Umwälzung“ sowie ihre Wirkungen auf die Etablierung des Buchdrucks. Geschärft wird unser Interesse durch aktuelle Erfahrungen der Digitalisierung, die derzeit zu einem ähnlich fundamentalen Umbruch in menschlichen Schreib- und Lesegewohnheiten führt.

Manche der im Erstantrag des Projekts von 2011 formulierten Hypothesen ließen sich in den empirischen Studien von Carla Meyer-Schlenkrich, Sandra Schultz und Charlotte Kempf im Rahmen ihrer Habilitationsschrift beziehungsweise Doktorarbeiten erhärten. Nicht wenige Vorannahmen mussten freilich revidiert werden – hier rückte die Empirie ältere Modelle zurecht. Wir wissen nach acht Jahren SFB-Forschung jetzt mehr über die Ausbreitung der Techniken zur Papierherstellung und den damit einhergehenden sozialen wie ökonomischen Wandel, mehr über den Zusammenhang von Papierherstellung und Buchdruck, mehr über das spätmittelalterliche Wissen zum Wert von Pergament und Papier, mehr über die Akteure des Buchdrucks und ihre Wanderungen im lateinischen Europa des 15. Jahrhunderts. Überraschend war etwa die Erkenntnis, dass die Verdrängung des Pergaments durch das Papier langsamer erfolgte als erwartet. In exklusiven Feldern von Schriftlichkeit erhielt sich das Pergament über die Jahrhunderte. Auch die Buchdrucker des ausgehenden Mittelalters benutzten das hochgeschätzte Pergament noch für besondere Bücher, vor allem im liturgischen Gebrauch der Kirchen. Der Medienwechsel vollzog sich an der Wende vom Mittelalter zur Neuzeit – so ließen sich die neueren Einsichten zusammenfassen – zufälliger und weniger zielgerichtet als vermutet. Die Menschen und ihre Dinge sind eben doch komplizierter, als es einfache Fortschrittsmodelle nahelegen wollen.

In der aktuellen dritten Förderperiode des Sonderforschungsbereichs wird der Fokus deutlicher auf den frühen Buchdruck und seinen Papiergebrauch gelegt. Neue Einsichten lieferte bereits die 2018 abgeschlossene Dissertation von Charlotte Kempf über „Deutsche Erstdrucker im französischsprachigen Raum bis 1500“: Darin werden Lebenswege, Druckprofile und Techniken deutschsprachiger Drucker analysiert, die als „Arbeitsmigranten“ Richtung Westen und Südwesten zogen und in französischsprachigen Städten erstmals eine Druckerpresse einrichteten. So beginnen die gedruckten Bücher durch ihre Texte, Drucktypen oder Holzstöcke, deren Abzüge zur Illustration genutzt wurden, neu zu sprechen.

Während die Impulse der in Deutschland entwickelten Drucktechniken auf Italien bereits bekannt waren, kann jetzt auch die Wirkungsgeschichte deutscher Erstdrucker im Westen genauer bestimmt werden – auf sie gingen etwa ein Viertel aller vor 1500 gegründeten Erstdruckereien im französischsprachigen Raum zurück.

Die Forschungen von Paul Schweitzer-Martin konzentrieren sich auf Buchdrucker, ihr Buchprogramm und ihre Märkte im deutschen Raum. Hier tritt das Verhältnis von Mensch und Maschine deutlicher in den Blick. Die Druckerpressen veränderten im ausgehenden 15. Jahrhundert Kultur und Gesellschaft und brachten eine „Kommunikationsrevolution“ als wesentliche Voraussetzung für die Verbreitung von Humanismus oder Reformation. Solche Weiterungen können nicht mehr von einem Teilprojekt allein ausgelotet werden. Deshalb nimmt ein kleiner interdisziplinärer Forschungsverbund innerhalb des SFB den Übergang von non-typografischen zu typografischen Gesellschaften im 15. bis 17. Jahrhundert kulturvergleichend in den Blick. Die Bedeutung des frühen Buchdrucks im 15. Jahrhundert werden wir nun skizzieren.

#### **Inkunabeln – An der Wiege des Buchdrucks**

Wir finden heute in Bibliotheken und öffentlichen Einrichtungen um die 500.000 Inkunabeln. Unter Inkunabeln (von lateinisch „incunabula“ – Wiege) versteht man frühe Drucke, die etwa in der Zeit von der Fertigstellung der Gutenberg-Bibel um 1454 bis zum Jahr 1500 mit beweg-

lichen Lettern gedruckt wurden. Darunter fällt eine Vielzahl an Drucken – von einer einseitigen „Einladung zum Armbrustschießen“ bis zur umfangreichen Predigtsammlung. Dieser Überlieferungsbestand repräsentiert aber nur einen Bruchteil der angenommenen 13 bis 17 Millionen tatsächlich gedruckten Stücke. Die dargelegten Zahlen sind in der Forschung gängig und beruhen auf Katalogisierungsprojekten der Inkunabeln wie dem Gesamtkatalog der Wiegendrucke. Entsprechende Analysen haben ergeben, dass man von ungefähr 26.000 unterschiedlichen Titeln ausgehen kann.

Auf den ersten Blick erscheint diese Zahl an Büchern, die in weniger als 50 Jahren hergestellt wurden, überraschend hoch. Doch mit etwas Abstand betrachtet, lässt sich im Spätmittelalter in verschiedenen Bereichen der Gesellschaft eine zunehmende Schriftlichkeit beobachten. Das hing mit dem Wechsel vom Pergament zum Papier zusammen. Der Schriftträger Pergament musste in aufwändiger Herstellung gefertigt werden und blieb als Rohstoff begrenzt. Auch das mittelalterliche Papier, das aus Fasern von verfaulten und zerkleinerten Lumpen alter Kleider hergestellt wurde, erforderte durchaus eine aufwändige Produktion. Die Lumpen mussten gesammelt werden, Fasern aufbereitet, jeder Bogen einzeln geschöpft, geglättet und geleimt werden. Zusätzlich war die Papierherstellung im Gegensatz zur Pergamentherstellung nicht standortunabhängig, da man zur Zerkleinerung der Lumpen auf Wasserkraft zurückgreifen musste.

**„Die Digitalisierung führt derzeit zu einem ähnlich fundamentalen Umbruch in menschlichen Schreib- und Lesegewohnheiten wie die ‚papierene Umwälzung‘.“**



**PROF. DR. BERND SCHNEIDMÜLLER** ist Mediävist und seit April 2020 als Seniorprofessor an der Universität Heidelberg tätig. Bis März 2020 lehrte er als Universitätsprofessor für Mittelalterliche Geschichte (Schwerpunkt Spätes Mittelalter) und war Direktor des Marsilius-Kollegs der Universität. Er ist Ordentliches Mitglied der Heidelberger Akademie der Wissenschaften. Im SFB 933 „Materiale Textkulturen“ leitet Bernd Schneidmüller das Teilprojekt „Die papierene Umwälzung im spätmittelalterlichen Europa. Vergleichende Untersuchungen zum Wandel von Technik und Kultur im sozialen Raum“ (2011–2023).

Kontakt: [bernd.schneidmueller@zegk.uni-heidelberg.de](mailto:bernd.schneidmueller@zegk.uni-heidelberg.de)

Dennoch hatte das Papier klare Vorteile gegenüber dem Pergament: Es konnte in fast jeder beliebigen Größe geschöpft werden und war als Ressource weniger begrenzt. Sandra Schultz wurde 2016 mit einer Arbeit zu Papiermühlen und -herstellung im deutschen Südwesten promoviert. Sie konnte durch die Erfassung der Erstbelege für Papiermühlen im Reich nördlich der Alpen zeigen, dass sich die Zahl der Nennungen von der ersten zur zweiten Hälfte des 15. Jahrhunderts etwa verdoppelt. Es handelt sich hierbei wie bei urkundlichen Ersterwähnungen von Städten nicht um das Gründungsdatum, sondern den ersten Quellenbeleg. Dennoch ist die Verdichtung der Überlieferung in der zweiten Hälfte des 15. Jahrhunderts auffällig, zumal die ersten Papiermühlen nördlich der Alpen Ende des 14. Jahrhunderts eingerichtet wurden.

#### Technische Innovationen

Die Zunahme der belegten Mühlen lässt sich zum einen auf die Zunahme der Schriftlichkeit zurückführen. Papier wurde für das Verfassen von Codices verwendet, und auch viele Verwaltungen nutzten Papier, wie Carla Meyer-Schlenkrich in ihrer 2018 angenommenen Habilitationsschrift „Wann beginnt die Papierzeit? Zur Wissensgeschichte eines hoch- und spätmittelalterlichen Beschreibstoffs“ herausarbeitete. In der zweiten Hälfte des 15. Jahrhunderts schlug aber zusätzlich die Erfindung der Druckerpresse zu Buche. Um das Jahr 1454 wurde von Johannes Gutenberg in Mainz die erste umfangreichere Inkunabel fertiggestellt. Es handelt sich dabei um den Bibeldruck, der meist als Gutenberg-Bibel bezeichnet wird. Die Exemplare der Gutenberg-Bibel lassen sich auf den ersten Blick nicht von Handschriften der Zeit unterscheiden.

Doch etwas Entscheidendes hatte sich verändert: Während in den vorangegangenen Jahrhunderten Bücher Seite für Seite mühselig handschriftlich kopiert werden mussten und dies auch massenweise praktiziert wurde, konnten durch den Buchdruck mit beweglichen Lettern Bücher identisch in hoher Auflage schneller reproduziert werden als durch Kopisten in Schreibstuben. Sowohl die Papierherstellung als auch der Druck mit beweglichen Lettern beruhen auf technischen Innovationen: Bei der Papierherstellung sind Stampfhämmer, die durch ein Mühlrad betrieben werden, für die Aufbereitung der Fasern entscheidend. Beim Buchdruck ermöglicht die Presse ein schnelles, sauberes und beidseitiges Bedrucken, was wiederum bei Abreibeverfahren wie bei den Blockbüchern nicht möglich ist. Unter Blockbüchern versteht man Drucke aus dem 15. und frühen 16. Jahrhundert, deren Seiten als Ganze aus Holztafeln geschnitten wurden. In der Regel waren sie umfangreich bebildert. Statt mit einer Presse wurden die Stücke auf den Bedruckstoff durch Abreiben übertragen, weshalb das Papier bei Blockbüchern in der Regel nur einseitig bedruckt wurde.

#### Sonderforschungsbereich „Materiale Textkulturen“

Der Sonderforschungsbereich „Materiale Textkulturen. Materialität und Präsenz des Geschriebenen in non-typographischen Gesellschaften“ (SFB 933) analysiert schrifttragende Artefakte aus Gesellschaften, in denen es keine Verfahren der massenhaften Produktion von Geschriebenem gab. Hierzu gehören beispielsweise religiöse Texte auf Rezipitationsrollen im Alten Ägypten, in Keilschrift beschriebene Tontafeln aus Mesopotamien oder Schriftzeichen an mittelalterlichen Bauwerken. Ziel ist es, neue interpretatorische Zugänge zu antiken und mittelalterlichen Texten zu entwickeln.

Die Schriftstücke werden vor allem auf ihre materiale Präsenz in einem bestimmten Raum- und Handlungszusammenhang hin untersucht: Wo war Geschriebenes in welcher Form vorhanden und wer hatte Zugang dazu? Wie wurde an, mit oder infolge des Geschriebenen gehandelt und inwieweit waren die Praktiken der Rezeption durch die „Materialität“ und „Präsenz“ der schrifttragenden Artefakte beeinflusst? Mit der Beantwortung dieser Fragen wollen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des SFB die Bedeutungen entschlüsseln, die zeitgenössische Rezipienten dem Geschriebenen in vergangenen „non-typographischen“ Gesellschaften beigemessen haben.

Der Sonderforschungsbereich wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft seit 2011 gefördert, im Mai 2019 wurde eine dritte Förderperiode bis 2023 in Höhe von rund 11,7 Millionen Euro bewilligt. Sprecher ist der Mediävist Prof. Dr. Ludger Lieb vom Germanistischen Seminar der Universität Heidelberg. An dem Verbund sind zurzeit rund 70 Forscherinnen und Forscher aus 18 geisteswissenschaftlichen Disziplinen der Universität Heidelberg und der Hochschule für Jüdische Studien Heidelberg beteiligt.

[www.materiale-textkulturen.de](http://www.materiale-textkulturen.de)

Die Kombination der beweglichen Lettern, die sich immer wieder zu neuen Texten zusammenführen lassen, und der Druckerpresse bot für Bücher, die in hohen Auflagen nachgefragt wurden, entscheidende Vorteile gegenüber handschriftlichen Kopien. Gerade Bischöfe und kirchliche Orden machten sich die Möglichkeit der identischen Reproduktion für liturgische Schriften und Gebetbücher zunutze. Aber auch formelhafte Texte wie Ablassbriefe wurden in hoher Auflage gefertigt. Bedingt durch den Buchdruck stieg der Gesamtbedarf an Papier massiv an. Teilweise wurde zwar auch auf Pergament gedruckt, der Löwenanteil der Inkunabeln nutzte aber Papier. Zusätzlich muss

A FUNDAMENTAL CHANGE

# MASS COMMUNICATION AS THE DRIVER OF A NEW ERA

BERND SCHNEIDMÜLLER &amp; PAUL SCHWEITZER-MARTIN

This article examines the historically important change of technology and culture in late medieval Europe caused by the introduction of paper. This research is part of CRC 933 “Material Text Cultures”, which is being funded by the DFG from 2011 to 2023.

The material turn changed the perspective on objects in the humanities. This, for instance, concerns the study of illuminated manuscripts, which have fascinated viewers and readers ever since they were first created. Today, not only the impressive and colourful artisanship of these texts capture the attention of scholars, but also the writing material itself has become increasingly important to scholarship. For most of the Middle Ages, the main writing material was parchment, and this was only gradually replaced by paper. By investigating the development, proliferation and differentiation of paper use, the project could show that the “paper revolution” was more complex than presumed and how gradually the transition to paper took place.

Increased availability of paper also allowed for higher book production rates in late medieval Europe. This becomes especially apparent when studying the relationship between early printing and paper production. Currently the project is focusing on the city of Speyer as a case study for extensive paper use. The analysis of account books and the examination of the papers used show that the print workshops in Speyer acquired paper not just from local manufacturers, but also from a number of different regions, including Italy. The incunabula were then distributed and sold all over Europe. ●

PROF. DR BERND SCHNEIDMÜLLER is a medievalist and has held the position of Senior Professor at Heidelberg University since April 2020. Until March 2020, he was a professor of medieval history (with a focus on the late Middle Ages) and director of the university's Marsilius Kolleg. He is a fellow of the Heidelberg Academy of Sciences and Humanities. Prof. Schneidmüller heads the subproject "The Paper Revolution in Late Mediaeval Europe. Comparative Investigations into Changing Technologies and Culture in 'Social Space'" (2011–2023) within CRC 933 "Material Text Cultures".

Contact: bernd.schneidmueller@zegk.uni-heidelberg.de

PAUL SCHWEITZER-MARTIN has been a research associate since June 2018 and in October 2019 joined the board of CRC 933 "Material Text Cultures" in Heidelberg. His doctoral project in medieval history deals with the printing of incunabula in Speyer as a case study for extensive paper use in the late Middle Ages. He has a degree in history and Protestant theology from Heidelberg University and in 2017 completed a three-month internship at the German Historical Institute in Washington D.C. (USA).

Contact: paul.schweitzer-martin@zegk.uni-heidelberg.de

**“At the end of the 15th century, printing presses changed European culture and society: the ‘communication revolution’ they inspired was an essential requirement for the spread of humanism and the Reformation.”**

# „Über die Inkunabelzeit hinweg waren rund 200 Druckereien aktiv, jedoch nicht gleichzeitig. Die Massenvervielfältigung von Texten, Inhalten und Ideen hatte begonnen.“

davon ausgegangen werden, dass die Buchherstellung auch unabhängig von den Drucken vom 14. zum 15. Jahrhundert stark anstieg. Und auch nach der Erfindung des Buchdrucks mit beweglichen Lettern wurden Einzelkopien von Texten nach wie vor handschriftlich angefertigt. Ohne die Einführung des Papiers, das wiederum auf der Technik der Mühlen beruhte, wäre der Erfolg des Buchdrucks mit beweglichen Lettern kaum zu denken.

## Speyer als Fallstudie

Um eine solche Operation wie den Buchdruck zu betreiben, ist viel Kapital und Voraussicht notwendig. Bücher werden Seite für Seite gesetzt und gedruckt. Erst wenn ein ganzes Buch fertig war, in manchen Fällen also erst, wenn mehrere Hundert Seiten gedruckt waren, konnte der Verkauf beginnen. In unserem Teilprojekt wird derzeit Speyer als Fallstudie für massenhaften Papiergebrauch im Spätmittelalter untersucht. In Speyer waren in der Inkunabelzeit insgesamt vier Druckereien tätig, zwei davon jedoch nur kurz. An der Offizin Drach - der Druckwerkstatt der Familie Drach, die zugleich auch als Verlag und Buchhandlung fungierte - wird aufgrund einer guten Quellenüberlieferung deutlich, dass eine komplexe Operation hinter der Druckerpresse steht: zum einen musste die Druckerei mit Papier versorgt werden, und zum anderen überschritten die produzierten Auflagenhöhen oftmals das, was in Speyer abgesetzt werden konnte.

Die Offizin Drach musste zunächst in Vorleistung gehen, um die Inkunabeln zu produzieren und sie dann zum



**PAUL SCHWEITZER-MARTIN** ist seit Juni 2018 akademischer Mitarbeiter und seit Oktober 2019 Vorstandsmitglied des Heidelberger SFB 933 „Materiale Textkulturen“. Sein Dissertationsprojekt im Fach Mittelalterliche Geschichte widmet sich dem Speyerer Inkunabeldruck als Fallstudie für massenhaften Papiergebrauch im Spätmittelalter. Er schloss davor in Heidelberg sein Studium in Geschichte und evangelischer Theologie mit dem ersten Staatsexamen ab. 2017 absolvierte er ein dreimonatiges Praktikum am Deutschen Historischen Institut in Washington, D.C. (USA).

Kontakt: paul.schweitzer-martin@zegk.uni-heidelberg.de

einen vor Ort und zum anderen über die Messen in Frankfurt und Leipzig sowie über eine Vielzahl sogenannter Buchführer zu verkaufen. Diese Vorgänge lassen sich einerseits am Rechnungsbuch Peter Drachs und zum anderen durch die Provenienzzgeschichte einzelner Exemplare belegen. Auf ähnliche Weise lässt sich auch das genutzte Papier untersuchen: zum einen können Einkäufe im Rechnungsbuch erfasst und zum anderen die Wasserzeichen in den verwendeten Papieren untersucht werden. Auch hier lässt sich nachverfolgen, dass die Papiere teils weite Wege nahmen und beispielsweise aus Italien stammten. Anhand des Beispiels wird deutlich, dass die Offizin mit ihrer Druckerpresse zu einem Sammelpunkt wurde. Die Papiere kamen von unterschiedlichen Orten, und die fertig gedruckten Bücher wurden in Mitteleuropa vom Bodensee bis zur Ostsee und von den Niederer Landen bis nach Prag ausgeliefert, doch sie wurden aufgrund der Druckerpresse und der Expertise der Drucker in Speyer verarbeitet. Speyer ist dabei kein Einzelfall: Über die Inkunabelzeit hinweg waren rund 200 Druckereien aktiv, jedoch nicht gleichzeitig. Die Massenvervielfältigung von Texten, Inhalten und Ideen hatte begonnen. Diese Papiere veränderten die Menschen und die Kulturen, zuerst im lateinischen Europa und später auf allen Kontinenten. ●

**FASZI**

**NIERENDE**

**ZWITTEK**

FASZINIERENDE ZWITTER

# MENSCH- MASCHINEN IM FILM

HENRY KEAZOR

**Schon in den Zeiten des Stummfilms tauchen die ersten filmischen „Mensch-Maschinen“ auf, die eine eigentümliche Zwitterrolle einnehmen: Die künstlichen Gestalten erscheinen einerseits als faszinierende Wesen, sind andererseits aber zugleich auch Auslöser von Ängsten und pendeln so immer wieder zwischen Menschennähe und Bedrohung. Eine Reise durch die Filmgeschichte von „Metropolis“ bis zu „Star Wars“.**



Im Mai 1978 veröffentlichte die deutsche Elektropop-Band „Kraftwerk“ ein Album mit dem Titel „Die Mensch-Maschine“. Das in roten und schwarzen Farben gehaltene Cover zeigt die vier Musiker in roten Hemden sowie schwarzen Krawatten hintereinander „weggestaffelt“ auf einer Treppe mit rotem Handlauf und schwarzem Gitter. Rot und Schwarz prägen auch die Gesichter der Band-Mitglieder: Ihre Haare sind schwarz, ihre Lippen rot geschminkt. Hinter einer solchen Gestaltung steht eine ganze Reihe von Vorbildern: Die Typografie, in der der Name der Band und der Albumtitel gehalten sind, sowie der Umstand, dass dieser auch auf Russisch übersetzt angegeben wird, verweisen zum Beispiel auf die ab 1913 etablierte Kunstrichtung des sowjetischen Konstruktivismus. Dieser moderne und zukunftsoptimistische, mit

# „In Fritz Langs Opus ‚Metropolis‘ wird das spannungsvolle Verhältnis von Mensch und Maschine angesichts des technologischen Fortschritts auf eindruckliche Weise verhandelt.“

abstrakt-geometrischen Gestaltungsformen arbeitende Stil wird auf der Rückseite des Covers auch explizit in Text und Bild als Vorlage ausgewiesen: Zum einen gibt der Gestalter der Plattenhülle, Karl Klefisch, an, dass deren Erscheinungsbild von den Werken des russischen Avantgarde-Künstlers El Lissitzky „inspiriert“ sei, der insbesondere ab 1917 tätig war. Zudem ziert den Albumrücken aber auch ein grafisches Zitat aus dem Kinderbuch „Die Geschichte von den zwei Quadraten“, das El Lissitzky 1920 vorlegte.

Neben diesen Verweisen auf den technizistisch geprägten Konstruktivismus spielt die von Günther Fröhling geschaffene Cover-Fotografie zugleich auf einen Film an, nach dem auch eines der Stücke des Albums benannt ist: „Metropolis“. Denn das strenge Make-up der vier „Kraftwerk“-Mitglieder weist starke Parallelen zur Ästhetik des Stummfilms auf – darüber hinaus nimmt es ihnen ein Stück weit auch ihre Individualität, da sie nicht nur alle gleich gekleidet, sondern zudem gleich geschminkt erscheinen. Im Verbund mit der ausdruckslosen Mimik der vier Musiker lässt sie dieses Szenario wie eben jene „Roboter“ erscheinen, als die sie sich im ersten Lied des Albums präsentieren beziehungsweise eben als jene im letzten Stück besungene titelgebende „Mensch-Maschine“. Tatsächlich gaben die Band-Mitglieder lebensgroße Puppen-Ebenbilder in Auftrag, von denen sie sich bei Foto-Preseterminen augenzwinkernd vertreten ließen, und auch bei Konzertauftritten ersetzten zum Teil entsprechend gestaltete Roboter die Musiker.

## **Spannungsvolles Verhältnis von Mensch und Maschine**

Damit ist auch inhaltlich wiederum der Bogen zu „Metropolis“ geschlagen, jenem monumentalen Science-Fiction-Stummfilm Fritz Langs, der 1927 in die Kinos kam. Denn in dem Opus wird das spannungsvolle Verhältnis von Mensch und Maschine angesichts des technologischen Fortschritts auf eindruckliche Weise verhandelt: Metropolis ist der Name einer hierarchisch geschichteten Stadt, in der die Reichen hoch oben in Wolkenkratzern und Türmen residieren und die Segnungen der Technik genießen, während tief unter der Erde wie Sklaven gehaltene Menschen die Grundlage für diesen Wohlstand erarbeiten, ohne daran Anteil haben zu dürfen. Wenn die Massen dieser Arbeiter zu Beginn des Films die Schichtablösung vollziehen und sich in gleichmäßig schwankendem Schritt durch unterirdische Gänge bewegen, wirken sie fast wie die Maschinen, die sie sodann bedienen müssen.

In einer Szene des Films wird eindrucklich gezeigt, wie sehr eben diese Geräte geradezu die Verschmelzung des Menschen mit ihnen fordern, wenn ein Arbeiter bis zur Erschöpfung hektisch den von einer Anzeige gemeldeten Leuchtkontakten folgen muss, um eine Überhitzung des Hauptkraftwerks zu verhindern. Triumphiert hier die Maschine über den Menschen, so entspinnt der Film innerhalb dieses Settings sodann eine Handlung, in der es zudem darum geht, den Menschen durch die Maschine zu ersetzen: Der Herr über Metropolis, Joh Fredersen, hatte Hel, die Geliebte des Erfinders Rotwang, umworben,

# „Die in Kino und Fernsehen anzutreffenden künstlichen Wesen pendeln immer wieder zwischen Menschennähe und Bedrohung.“



**PROF. DR. HENRY KEAZOR** ist seit Herbst 2012 Professor für Neuere und Neueste Kunstgeschichte an der Universität Heidelberg. Zuvor war er von 2008 bis 2012 Inhaber des Lehrstuhls für Kunstgeschichte an der Universität des Saarlandes. Seine Forschungsgebiete sind die französische und italienische Malerei des 17. Jahrhunderts, die zeitgenössische Architektur, Kunstfälschungen, Musikvideos sowie das Verhältnis von Kunst und Medien. Von April 2018 bis April 2020 war Henry Keazor Geschäftsführender Direktor des Zentrums für Europäische Geschichts- und Kulturwissenschaften (ZEGK) der Universität Heidelberg.

Kontakt: h.keazor@zegk.uni-heidelberg.de

sie ihm abspenstig gemacht und geheiratet. Hel starb bei der Geburt von Johs Sohn Freder. Rotwang schuf daraufhin einen künstlichen Menschen, dem er die Züge der Geliebten geben wollte, um so den Verlust zu kompensieren.

Aber Rotwang kommt nicht mehr dazu, die von ihm geschaffene Mensch-Maschine für ihren ursprünglichen Zweck einzusetzen: Die Arbeiter von Metropolis sind dabei, sich – angestachelt durch eine junge Frau namens Maria – gegen ihre Unterdrücker zu erheben. Um wieder die Kontrolle über die Aufständischen zu gewinnen, zwingt Fredersen Rotwang, dem Roboter die Züge der jungen Frau zu geben und diese so zu ersetzen. Der Erfinder verfolgt allerdings eigene Rachepläne in Bezug auf Fredersen und befiehlt der Roboter-Maria tatsächlich, sowohl die Arbeiter als auch die Elite der Stadt dazu aufzuhetzen, Metropolis und damit den Lebensinhalt Fredersens zu zerstören. Der Maschinenmensch folgt der Anordnung und gerät dabei mehr und mehr außer Kontrolle.

## Stetige latente Gefahr

Fritz Langs Film ist immer wieder für seine Inkonsequenz getadelt worden, denn parallel zu der gezeigten Zukunftswelt spuken auch wiederholt scheinbare Reminiszenzen an den deutschen Gruselfilm durch „Metropolis“: so beispielsweise, wenn mitten in der futuristischen Stadt plötzlich eine gotische Kathedrale aufragt beziehungsweise wenn Rotwang an den unheimlich-wahnsinnigen Wissenschaftler „Dr. Caligari“ aus Robert Wienes 1920 veröffentlichtem

Stummfilmklassiker erinnert. Allerdings ergeben solche Verweise insofern durchaus Sinn, als sich in dem Motiv des künstlichen Menschen in Langs „Metropolis“ auch die Thematik eines anderen, früheren Stummfilm-Meisterwerks spiegelt: Ab 1914 drehte der Schauspieler und Regisseur Paul Wegener eine Serie von drei Filmen, die heute als Ahnen des Horrorfilm-Genres gewürdigt werden. In ihnen wird die Geschichte des der jüdischen Literatur und Mystik entstammenden Golem erzählt, jenes aus Lehm geformten, stummen menschenartigen Wesens, das mithilfe von Zauberei belebt und mit gewaltiger Kraft versehen wird. Seinen besonderen Reiz bekommt der als Diener verwendete Golem dadurch, dass von seiner mächtigen Größe und Kraft stets eine latente Gefahr ausgeht. Diese konkretisiert sich in den drei Filmen immer wieder dadurch, dass der Golem – wie der Maria-Roboter in „Metropolis“ – schließlich außer Kontrolle gerät, sei es durch die Schuld ihn missbrauchender Menschen oder aber durch in ihm aufbrechende Gefühle, denen gegenüber er sich hilflos und alleingelassen findet.

Mit der damit angedeuteten Tragik eines künstlichen Menschen, der aus Unverständnis Verbrechen verübt, ist auch die Brücke zu der diesbezüglichen Urgeschichte geschlagen – zu Mary Shelleys „Frankenstein oder Der moderne Prometheus“ aus dem Jahr 1818. Denn der zahllose Male filmisch adaptierte Roman erzählt von dem jungen Schweizer Viktor Frankenstein, der einen künstlichen Menschen erschafft, diesen aber aus Entsetzen über die eigene Tat

und dessen Aussehen im Labor zurücklässt. Das Wesen ermordet daraufhin aus Rache für die erfahrene Zurückweisung eine Reihe von Menschen, die Frankenstein nahe stehen, bis dieser selbst auf der Jagd nach dem Monster erschöpft und schwer krank stirbt. Erst im Angesicht seines toten Schöpfers erkennt das Wesen die eigenen Verfehlungen und zieht sich zurück, um sich selbst zu richten.

### Eigentümliche Zwitterrolle

In all diesen Erzählungen nehmen die Mensch-Maschinen eine eigentümliche Zwitterrolle ein: Sie erscheinen einerseits als faszinierende Wesen, zugleich jedoch sind sie Auslöser von Ängsten, da der mit ihnen verbundene drohende Kontrollverlust wie eine Bestrafung für die von dem Menschen begangene Hybris erscheint, sich selbst zum Schöpfer aufgeschwungen und Leben geschaffen zu haben.

Bezeichnenderweise pendeln die in Kino- wie Fernsehproduktionen anzutreffenden künstlichen Wesen dann auch immer wieder zwischen Menschennähe und Bedrohung. Diese Ambivalenz artikuliert sich im Fall von „Metropolis“ schon an der Doppelgestalt des Roboters, der unmittelbar nach seiner Schöpfung und im Moment seiner Zerstörung als metallisches Maschinenkonstrukt erscheint, bei seinem Einsatz aber, wie Frankensteins Monster und der Golem, menschliche Züge trägt und in diesem Fall von der echten Maria nicht zu unterscheiden ist. Film-Androiden und -Cyborgs, also Mischwesen aus Mensch und Maschine, leben nun häufig von der oszillierenden Spannung zwischen diesen sie konstituierenden Polen: So zählt der unheimliche außerirdische Roboter Gort aus dem 1951 von Robert Wise gedrehten Film „Der Tag, an dem die Erde stillstand“ zur Klasse metallischer Gestalten – wie der Golem ist er groß und dank einer unheimlichen Strahlenwaffe mächtig. Er entstammt einer Roboter-Rasse, die von einer

„interplanetarischen Konföderation“ erschaffen wurde, um den Frieden im Weltall dadurch zu sichern, dass allen aggressiven Zivilisationen die Vernichtung angedroht wird – passend zum seinerzeit zwischen den USA und der Sowjetunion herrschenden Kalten Krieg repräsentierte Gort also einen Frieden durch Abschreckung.

Fast 50 Jahre später persiflierten die Macher des Animationsfilms „Der Gigant aus dem All“ (1999) eben die hinter diesem Konzept stehende gesellschaftlich-politische Stimmung in den USA, indem sie die Geschichte eines riesigen, auf der Erde gelandeten Roboters erzählten, der dort trotz seiner friedlichen Absichten vom Militär verfolgt wird und von einem kleinen Jungen, mit dem er sich angefreundet hat, unterstützt wird. Das Motiv einer solchen Freundschaft zwischen einem menschlichen Kind und einer Menschenmaschine geht wiederum auf die zwischen 1965 und 1968 produzierte amerikanische Fernsehserie „Verschollen zwischen fremden Welten“ („Lost in Space“) zurück. Dort legt der ebenfalls mit übermenschlichen Kräften und Waffen ausgestattete Roboter „M3-B9 G.U.N.T.E.R.“ nicht nur menschliche Gefühlsäußerungen wie Gelächter, Traurigkeit und Humor an den Tag, sondern fungiert ebenfalls als Freund und Beschützer des kleinen Will Robinson, den er stets mit der Redewendung „Danger, Will Robinson!“ vor Bedrohungen warnt. In der seit 2018 auf Netflix laufenden Neuauflage der Serie ist aus diesem hilfsbereiten Androiden bezeichnenderweise ein außerirdisches künstliches Wesen geworden, dessen Loyalität unberechenbar ist.

### Metamorphose von der Unterhaltung zur Gefahr

Eine vergleichbare Metamorphose von ursprünglich zu Hilfs- beziehungsweise Unterhaltungszwecken erbauten Maschinen-Existenzen hin zu einer unkontrollierbaren Gefahr erfahren Roboter in den Filmen der 1970er-Jahre: In Michael Crichtons 1973 in die Kinos gekommenem und seit 2016 im Rahmen der gleichnamigen Netflix-Serie neu interpretiertem Film „Westworld“ rebellieren die für einen riesigen Vergnügungspark geschaffenen Wesen sowohl gegen ihre Schöpfer als auch gegen die Besucher der Einrichtung. Besondere Gefahr geht von ihnen insofern aus, als sie äußerlich nicht von Menschen unterschieden werden können – wie der Maria-Roboter in „Metropolis“, die „Replikanten“ aus Ridley Scotts 1982 in die Kinos gekommenem „Blade Runner“ oder der von Arnold Schwarzenegger verkörperte Killer-Android in James Camerons Film „Terminator“ aus dem Jahr 1984. Bereits der kristalline Cyborg Box in Michael Andersons 1976 produziertem Film „Flucht ins 23. Jahrhundert“ („Logan's Run“) wurde eigentlich zur Unterstützung der Menschen geschaffen, indem er für sie Nahrung jagen und bereitstellen sollte – durch einen Programmierfehler verkehrt er seinen Auftrag jedoch dahin gehend, dass er nun Menschen jagt und in Kältekammern einfriert.

### Geschichte und Kultur Europas und der Neuen Welt

Das 2005 gegründete Zentrum für Europäische Geschichts- und Kulturwissenschaften (ZEGK) ist ein Zusammenschluss von fünf Heidelberger Instituten: dem Historischen Seminar, dem Institut für Fränkisch-Pfälzische Geschichte und Landeskunde, dem Institut für Europäische Kunstgeschichte, dem Institut für Religionswissenschaft sowie dem Musikwissenschaftlichen Seminar. Ziel der Wissenschaftler am Zentrum ist es, die Geschichte und die kulturellen Errungenschaften Europas und der Neuen Welt vom Frühmittelalter bis in die heutige Zeit zu erforschen. Durch die Allianz im ZEGK verstärken sie dabei ihre Kooperationen, nutzen Synergieeffekte und gewinnen in Lehre und Forschung an interdisziplinärer Kompetenz.

[www.uni-heidelberg.de/fakultaeten/philosophie/zegk](http://www.uni-heidelberg.de/fakultaeten/philosophie/zegk)

**„Der mit den Mensch-Maschinen  
einhergehende drohende  
Kontrollverlust erscheint wie  
eine Bestrafung für  
die vom Menschen begangene  
Hybris, sich selbst zum  
Schöpfer aufgeschwungen zu haben.“**

**„In den Filmen der  
1970er-Jahre erfahren  
Roboter eine  
Metamorphose von  
ursprünglich  
zu Hilfs- oder  
Unterhaltungszwecken  
erbauten  
Maschinen-Existenzen  
hin zu einer  
unkontrollierbaren  
Gefahr.“**

Ein Jahr nach dem Start dieses Films wendete sich jedoch der cineastische Blick auf Roboter noch einmal: Mit George Lucas' „Krieg der Sterne“ („Star Wars“) wurden nun zwei Maschinenwesen vorgeführt, die zwar von ihrem Erscheinungsbild her an die hier besprochene Auswahl an Beispielen anknüpfen, diese jedoch zugleich hinsichtlich der ihnen zugewiesenen Funktionen erweiterten. Denn während der kleine piepsende tonnenförmige Roboter R2-D2 etwas an M3-B9 G.U.N.T.E.R. erinnert und sein Gefährte, der plappernde Android C-3PO, von seinem goldenen Metallkörper her offensichtlich an den „Metropolis“-Roboter angelehnt ist, weisen die beiden eine Rollenkonstellation auf, die ursprünglich aus dem Slapstick-Film stammt: Wie das amerikanische Komiker-Duo Stan Laurel und Oliver Hardy zanken sich die beiden Maschinenwesen permanent, während sie zugleich weitestgehend unbeschadet durch die gefährlichsten Situationen hindurchfinden. Dabei stehen sie ihren menschlichen Gefährten hilfreich und treu zur Seite.

Es ist wahrscheinlich dieser wieder eher positive Blick auf die „Mensch-Maschine“, der auch hinter dem eingangs besprochenen Cover des „Kraftwerk“-Albums steht, das ein Jahr nach „Star Wars“ veröffentlicht wurde. Wie jedoch die immer wieder gegebenen Hinweise auf aktuelle Remakes und Neu-Interpretationen von in den 1960er- und 1970er-Jahren erzählten Geschichten zeigen, die von einem für Menschen gefährlichen Androiden handeln, behält das Thema seine spannungsvolle Ambivalenz: Im Film können Maschinenmenschen weiterhin stets Faszinosum wie Bedrohung zugleich sein. ●

FASCINATING HYBRIDS

# MAN-MACHINES IN FILM

HENRY KEAZOR

While science fiction films are usually set in the future, they are also invariably a reflection of the hopes and fears that characterise a society in the present. The “man-machine” has been a recurring motif of this genre since its beginnings in the silent film era – and one that alternately inspires fascination and a sense of menace.

The central driver of these ambivalent feelings is the prospect of merging and/or replacing humans with machines and the resulting fear of losing control, that is: of no longer being able to distinguish between man and machine or maintain dominance over the latter.

A cursory examination of the history of science fiction to the present day shows that here remakes frequently re-write or re-interpret certain aspects: for instance, androids that were portrayed in an entirely positive way in the earlier films are now endowed with much more unpredictable, even sinister characteristics. That, too, says a great deal about the changing fears and hopes that define societies over time. ●

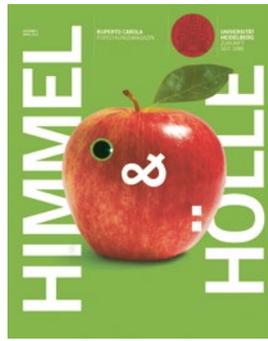
PROF. DR HENRY KEAZOR joined Heidelberg University in 2012 as a professor of modern and contemporary art. He previously held the Chair of Art History at Saarland University from 2008 to 2012. His research interests are 17th-century French and Italian painting, contemporary architecture, art forgery, music videos and the relationship between art and the media. From April 2018 to April 2020, Henry Keazor was Managing Director of the Centre for European Historical and Cultural Studies (ZEGK) of Heidelberg University.

Contact: h.keazor@zegk.uni-heidelberg.de

**“The loss of control that is frequently associated with man-machines is depicted as punishment for man’s hubris in assuming the role of creator.”**



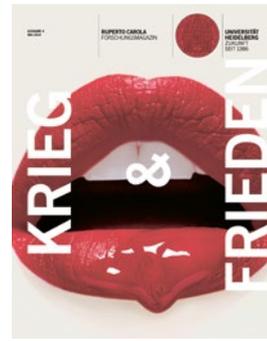
**ALT & JUNG**  
AUSGABE 1  
OKTOBER 2012



**HIMMEL & HÖLLE**  
AUSGABE 2  
APRIL 2013



**ORDNUNG & CHAOS**  
AUSGABE 3  
NOVEMBER 2013



**KRIEG & FRIEDEN**  
AUSGABE 4  
MAI 2014



**DRAUSSEN & DRINNEN**  
AUSGABE 5  
NOVEMBER 2014



**GESUND & KRANK**  
AUSGABE 6  
JUNI 2015



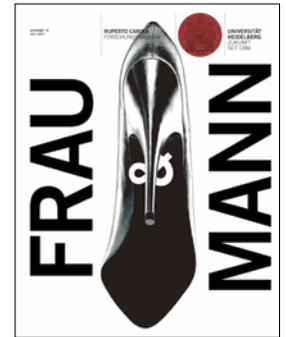
**SCHATTEN & LICHT**  
AUSGABE 7  
DEZEMBER 2015



**NORD & SÜD**  
AUSGABE 8  
JULI 2016



**STOP & GO**  
AUSGABE 9  
DEZEMBER 2016



**FRAU & MANN**  
AUSGABE 10  
JULI 2017



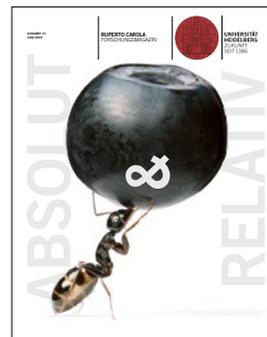
**SCHEIN & SEIN**  
AUSGABE 11  
DEZEMBER 2017



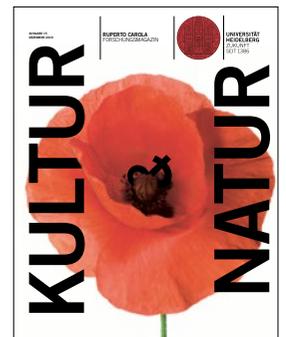
**STADT & LAND**  
AUSGABE 12  
JUNI 2018



**HEISS & KALT**  
AUSGABE 13  
DEZEMBER 2018



**ABSOLUT & RELATIV**  
AUSGABE 14  
JUNI 2019



**KULTUR & NATUR**  
AUSGABE 15  
DEZEMBER 2019



**MASCHINE & MENSCH**  
AUSGABE 16  
JULI 2020