

Alles

Der Traum von Vollständigkeit in der Biologie

Wissenschaft ist eine komplexe gesellschaftliche Praxis. Sie fördert nicht vorbestehende, ewige Grundwahrheiten (oder gar eine Grundwahrheit) aus den Phänomenen, sondern lässt sich allenfalls als mehrdimensionales Geschehen beschreiben, in dem Individuen Tätigkeiten nachgehen, die durch Institutionen, Werte, Rollenmodelle, Traditionen und innerwissenschaftliche wie öffentliche Diskurse mehr oder weniger stark reguliert und koordiniert werden. Die Wissenschaftstheorie, -geschichte und -soziologie der letzten Jahrzehnte hat die Vorstellung einer vollständig rational agierenden, einheitlichen und nach logischen Prinzipien agierenden Wissenschaft ad absurdum geführt.¹

Wichtig scheint, dass dies nicht zu Beliebigkeit führt, so wie es das berühmte ›anything goes‹ Paul Feyerabends anzudeuten scheint. Gerade dieses Zitat wird oft fälschlich für einen Fatalismus herangezogen, der das Besondere des wissenschaftlichen Denkens und Diskurses dem Zufall und der Macht des Faktischen preisgibt. Dabei ging es Feyerabend lediglich um die Abwehr eines wissenschaftstheoretisch begründeten Realismus als Grundlage eines autoritär vertretenen Wahrheitsanspruchs.² Zur Unterstützung seiner These, dass es kein starres axiomatisch begründetes Regelwerk für wissenschaftliche Arbeit gibt, zieht er zahlreiche historische Beispiele heran, die den Anspruch von Rationalität, stringenter Logik und einer klar identifizierbaren Trajektorie des Fortschritts widerlegen – ein wissenschaftshistorischer und soziologischer Ansatz, der spätestens seit Thomas Kuhn fest etabliert ist. Trotz dieser außerwissenschaftlichen und scheinbar irrationalen sozialen Wirkfaktoren im Wissenschaftsbetrieb ist dort kein Raum für Beliebigkeit. Wohin die Preissgabe von Vernunft und Wahrheitsanspruch führt, hat sich deutlich in irrationalen, wenn nicht anti-rationalistischen Parolen während der Corona-Pandemie gezeigt. Umgekehrt belegt die beispiellos schnelle Entwicklung hochwirksamer Impfstoffe das enorme technische, aber auch humane Potential einer konsequent vorangetriebenen Forschung. Ohne sie hätten wir

1 THOMAS KUHN, *The Structure of Scientific Revolutions*, London 1962.

2 PAUL K. FEYERABEND, *Der wissenschaftstheoretische Realismus und die Autorität der Wissenschaften*, Berlin, Heidelberg und New York 1978.

heute wohl viele Millionen zusätzlicher Toter zu beklagen, und wir würden den künftig erwartbaren Pandemien hilflos entgegensehen.

Wenn Wissenschaft als gesellschaftliche Praxis verstanden wird, die nicht einem vorgegebenen und streng logisch ableitbaren Programm folgt, eröffnen sich Freiräume für unterschiedliche Fragestellungen, Interpretationen, Ziele, Schwerpunktsetzungen und methodische Zugänge. Damit gehen auch verschiedene Wissenschaftskulturen einher, die sich in ihren Regeln, Diskursformen, Karrierewegen, und auch in ihren Erkenntnisansprüchen radikal unterscheiden.³ Noch mehr: Sie sind sogar innerhalb der jeweiligen Fachgemeinschaften nicht invariant, sondern unterliegen aufgrund inner- wie außerfachlicher Prozesse einem stetigen Wandel. Wichtige Veränderungen im 20. Jahrhundert waren unter anderem die Herausbildung des Berufs des Wissenschaftlers (wenn man die Erweiterung des Fokus auf Wissenschaftlerinnen überwiegend dem 21. Jahrhundert zurechnet) und die Sensibilisierung für die Risiken und Gefahren technischer Anwendungen wissenschaftlicher Erkenntnisse.⁴ In den ersten Jahrzehnten des gegenwärtigen Jahrhunderts stehen, soweit absehbar, die Nutzung und Auswirkungen der »künstlichen Intelligenz« sowie die weltweite Vernetzung und Nutzung von sehr großen Datensammlungen im Vordergrund. Damit einhergehend zeichnet sich eine Veränderung der wissenschaftlichen Praxis im Sinne einer Industrialisierung der Wissensproduktion ab und damit zugleich einer Entindividualisierung.⁵

Die Folgen der aktuellen Entwicklungen für die Inhalte, Konzepte, Leitideen, Interpretationen und Anwendungen wissenschaftlicher Erkenntnisse sind noch weitgehend unklar. Die Fluidität der Bedingungen, unter denen Wissenschaft stattfindet, sollte daher Anlass für einen intensiven innerwissenschaftlichen und gesellschaftlichen Diskurs sein, der die Entwicklung reflektiert, bewertet, kommentiert und womöglich auch beeinflusst. Ob dieser Diskurs, insbesondere innerhalb der einzelnen wissenschaftlichen Fächer und Gemeinschaften, ausreichend stattfindet und in der Praxis wirksam wird, ist zu bezweifeln. Vielmehr scheinen wir uns in einem gewaltigen Strom zu befinden, der Fachgemeinschaften und hunderttausende einzelne Akteure vorantreibt, ohne dass viel über das Wohin geredet würde.

3 KARIN KNORR-CETINA, *Epistemic Cultures: How the Sciences Make Knowledge*, Cambridge, MA und London 1999.

4 Siehe hierzu z. B. MAX WEBER, »Wissenschaft als Beruf«, in *Max Weber-Gesamtausgabe*, hg. von Wolfgang J. Mommsen, Wolfgang Schluchter und Birgitt Morgenbrod, Bd. I/17, Tübingen 2019; CARL F. FREIHERR VON WEIZSÄCKER, *Die Tragweite der Wissenschaft*, Stuttgart 1964.

5 KNORR-CETINA, *Epistemic Cultures*; HENRY MARKRAM, »Bioinformatics: Industrializing Neuroscience«, *Nature* 445 (2017): 160–161.

Eine der unzureichend reflektierten neuen Entwicklungen innerhalb der biologischen und medizinischen Forschung soll hier näher illustriert werden: Vollständigkeit. Zum ersten Mal scheint es möglich, die Vielfalt biologischer Phänomene so umfassend zu messen, zu speichern und zu analysieren, dass eine mehr oder weniger vollständige Rekonstruktion einzelner Objekte oder Objektbereiche gelingt. Die Idee der Vollständigkeit beinhaltet die Konnotation einer modernen, datengetriebenen Form von Wissenschaft, in der exemplarisches, perspektivisch geprägtes und zugespitztes Wissen gegenüber dem systematischen Sammeln und Aufbereiten massiver Datensätze zurücktritt. *Vollständigkeit* als Ziel biologischer Forschung ist konzeptuell nicht neu. Bereits das in der Mitte des 18. Jahrhunderts entstandene *Systema naturae* Carl von Linnés sollte alle bekannten und – prinzipiell – auch die noch unentdeckten Arten in einer einheitlichen Systematik und Nomenklatur einschließen. Bis heute lässt sich jeder Organismus dieser Systematik zuordnen, auch wenn sie inzwischen natürlich im Licht neueren Wissens, vor allem aus Evolutionstheorie und molekularer Biologie, stark verändert wurde. Dieser Wandel der Ordnungsprinzipien und Erfassungsmethoden bei gleichbleibendem Gegenstand (also den Organismen) wirft bereits ein Licht auf Begrenzungen des Ideals von Vollständigkeit. Die Methoden, Datenformate und Leitideen vollständiger Sammlungen sind eben nicht invariant, und damit natürlich auch Teil des dynamischen, von Theorien, Hypothesen, Perspektiven und Schwerpunktsetzungen geprägten Prozesses der Wissenschaft. Wenn dies so bleibt, sind auch aus großen Datensammlungen keine ewigen Wahrheiten zu erwarten (oder, aus Sicht eines offenen Verständnisses von Wissenschaft, zu befürchten).

Auf abstrakterer, nicht von der Vollständigkeit des Materials abhängiger Ebene kann man natürlich auch große Leitideen wie die Evolutionstheorie oder die Molekulargenetik als »vollständig« betrachten. Auch sie subsumieren alle Lebensphänomene unter ein Prinzip, aber eben als System, und nicht als vollständige Sammlungen oder Rekonstruktionen. Beide Theorien sind ebenfalls in die wissenschaftliche Dynamik eingebunden, also keineswegs endgültig. So bezieht die jüngere, erweiterte Synthese der Evolutionstheorie ökologische und entwicklungsbiologische Aspekte ein, und die ebenfalls noch junge Epigenetik zeigt molekulare Mechanismen auf, mit denen erbliche Eigenschaften durch individuelle Erfahrungen verändert werden. Fazit: Sowohl große Materialsammlungen wie auch umfassende vereinheitlichende Theorien gab es in den Biowissenschaften schon seit Langem.

Was ist also neu? Die biomedizinische Forschung hat in den letzten Jahrzehnten den methodischen und organisatorischen Ansatz der Großforschung übernommen. Paradigmatisch steht dafür die Entschlüsselung

(»Totalsequenzierung«) des menschlichen Genoms im *human genome project* von 1990 bis circa 2003. Das Projekt wurde von weit über 1000 Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen in zwei großen konkurrierenden Konsortien durchgeführt. Derartige Unternehmungen der *big science* waren zuvor lediglich aus physik- und techniknahen Gebieten wie der Elementarteilchenphysik und der Weltraumforschung bekannt, während in den Biowissenschaften eine viel kleinteiligere Organisation von Wissenschaft vorherrschte. In dieser, hier summarisch als »Einzelforschung« bezeichneten Arbeitsweise entwickeln einzelne Personen oder sehr kleine Gruppen aus dem je eigenen Verständnis des Forschungsstandes Fragestellungen, Hypothesen und Zielsetzungen, denen sie dann systematisch nachgehen. Individuen nehmen also starken Einfluss auf die Formulierung der Fragestellung, die Forschungsstrategie und die Interpretation der Resultate. Ihr Handeln ist dabei divers, aber keineswegs beliebig, sondern bleibt in einen weltweiten wissenschaftlichen Diskurs eingebunden, der sich in Lehrbüchern, Kongressen, Kooperationen, Projektanträgen und Fachpublikationen manifestiert. Erfolgreich Forschende entwickeln innerhalb ihrer *community* ein eigenes Profil, das sie in einem engeren oder weiteren wissenschaftlichen Kreis identifizierbar macht.

Ganz anders die Großforschung. Hier wird ein übergeordnetes Ziel definiert, das hunderte oder tausende Arbeitskräfte bindet, und dessen Erreichen kritisch vom synergistischen Einsatz der materiellen und personellen Resourcen abhängt. Die Realisierung solcher Projekte erfordert die Beschaffung großer Geldsummen, in der Regel aus Mitteln der öffentlichen Hand (das *human genome project* war zunächst rein öffentlich finanziert, bevor mit der Firma Celera ein privatwirtschaftliches Konkurrenzunternehmen entstand). Zur Mobilisierung der erforderlichen Mittel bedarf es politischer Überzeugungsarbeit, an deren Ende ein öffentliches Interesse an der Durchführung genau dieses Projekts stehen muss. Oft geht dies mit Versprechen einher, große Probleme der Menschheit zu lösen oder das eigene Land (manchmal den ganzen Kontinent) im internationalen Wettbewerb voranzubringen. Die wissenschaftlichen und politischen Protagonisten des *human genome project* sprachen öffentlich vom heiligen Gral, dem Buch des Lebens, das es zu entschlüsseln gälte. Sie versprachen, dass unsere Enkel Krebs nur noch als Sternbild kennen würden – die offiziellen Verlautbarungen nutzten also eine ausgesprochen sakrale Sprache, in der das Genom zur erlösenden Erkenntnis hypostasiert wird.⁶ Ähnliches gilt übrigens für die Suche nach den letzten Geheimissen der

6 MARCELO LEITE, *Promessas Do Genoma*, São Paulo 2007; REDAKTION BBC NEWS, »Leaders' Genetic Code Warning«, in *BBC News*, 26.06.2000, http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/politics/806819.stm, abgerufen am 28.05.2025.

Materie wie dem »Gottesteilchen« (Higgs-Boson) an Großforschungseinrichtungen wir dem CERN in Genf.

Als prägende Eigenschaften von *big science* können wir also festhalten: Sie definiert sich über große Versprechungen, sie betont den Nutzen künftiger Anwendungen, und sie verlangt eine umfangreiche und hierarchische Organisation. Damit geht in dieser Forschung zumindest auf Ebene der Durchführung die Bedeutung des Individuums zurück, ja, Individualität ist in den hochgradig normierten Prozessen sogar kontraproduktiv. Die eigentlichen Protagonisten solcher Großprojekte sind Visionäre und Manager, ganz anders als in kleinteiligen Forschungsprojekten. Die Karriere der angestellten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler hängt davon ab, dass sie die Prozesse effizient implementieren, reibungslos durchführen und selbst Organisations- und Leistungsverantwortung übernehmen.⁷ Neue Berufsfelder der Wissenschaftsadministration, -kommunikation oder des Datenmanagements entstehen und gewinnen rapide an Bedeutung.

Erst in dieser neuartigen Form von Forschung erscheint es möglich, biologische Objekte im Wortsinn vollständig zu erfassen. In den traditionellen Biowissenschaften war Vollständigkeit – mit den oben genannten Einschränkungen – kein dominantes Ziel. Vielmehr wurden zum Studium von biologischen Prinzipien geeignete Modellsysteme herangezogen, an denen sich die jeweilige Hypothese beispielhaft untersuchen ließ. Das entsprechende Präparat stand also *paris pro toto* für die Überprüfung einer Theorie oder Hypothese, die erst in der Folge an weiteren Organismen, Zellen usw. auf ihre Generalisierbarkeit überprüft (und im Ergebnis oft modifiziert) wurde. So gelangten Präparate in den Fokus der Biologie, für die sich niemand um ihrer selbst willen interessierte: Amphieneier und -embryonen (frühe Embryonalentwicklung); Nervenfasern von Tintenfischen (elektrische Erregung von Neuronen), die marine Nacktschnecke *Aplysia californica* (synaptische Plastizität und elementare Lernvorgänge) und so weiter.

In der neuen Forschung geht es hingegen um die lückenlose Dokumentation und Rekonstruktion des Ganzen: Das gesamte menschliche Genom, die Expressionsmuster aller Gene im Organismus und so weiter. Mit dem Fortschritt der Methoden diffundieren diese Datensammlungen typischerweise nach und nach in den wissenschaftlichen Alltag, indem sie öffentlich zugänglich gemacht und weltweit breit genutzt werden oder indem sie in kleinskalige und billige Massenverfahren übergehen. Ein menschliches Genom zu sequenzieren kostet heute weit unter 1000 €, und viele biologische Labore beteiligen sich an »-omics Studien«, in denen sie in Eigenarbeit oder mit Hilfe

⁷ KNORR-CETINA, *Epistemic Cultures*.

lokaler Servicelabore Datenmengen generieren, die noch vor wenigen Jahren großen Konsortien vorbehalten waren. So werden aus einzelnen Zellen oder Gewebeproben Informationen entnommen wie das gesamte zur Expression gebrachte Genmaterial (Transkriptom), alle im Material vorkommenden Proteine (Proteom), Stoffwechselprodukte (Metabolom) und so weiter. Im Bereich der Neurowissenschaften befindet sich die Forschung zum Konnektom, also der Kartierung sämtlicher Verbindungen in neuronalen Netzwerken, an der Schwelle zur Großforschung. Viele Projekte in diesem Bereich können nur noch in Kooperationen von Spitzenlabors durchgeführt werden. Eine kürzlich erschienene Publikation beschreibt eine höchstgradig aufgelöste Darstellung aller Zelltypen und Verbindungen eines Kubikmillimeters des menschlichen Gehirns, wobei die elektronenmikroskopischen Daten von mehreren Trillionen (10^{18}) Volumenelementen einschließlich der Analyseinstrumente in einem öffentlich zugänglichen Repozitorium abgelegt wurden.⁸ Diese Studie hat »nur« 31 Autoren und Autorinnen aus 11 Forschungseinrichtungen, eine für *big science* eher geringe Zahl. Unter den beteiligten Akteuren sind allerdings mit dem *Allen Brain Institute* und *Google* zwei Institutionen, die auf höchstem technischen Niveau großskalige, datengetriebene Forschungsprozesse durchführen können.

Das amerikanische *Allen Institute*, eine private Stiftung, hat sich *big science* ebenso wie *open science* auf die Fahnen geschrieben und arbeitet an verschiedenen großen Datensätzen, die sämtlich öffentlich zugängig sind. Dazu gehören elektronisch kodierte Atlanten, die die Expression aller bekannten Gene in allen Regionen des Gehirns von Menschen und von Mäusen illustrieren, ebenso umfangreiche molekularbiologische Datensätze zur Sub-Typisierung der vielfältigen Zellen in den verschiedenen Regionen des Gehirns, Daten zur *connectomics* menschlicher und verschiedener tierischer Gehirne, Datensätze aus den Gehirnen erkrankter Personen und vieles mehr. Die Inhalte dürften dem Erkenntniszuwachs durch zehntausende, wenn nicht hunderttausende von Doktorarbeiten entsprechen – sie wurden aber nicht in händischer Laborarbeit von Einzelnen generiert, sondern in hochstandardisierten, industrieartigen Prozessen, die von der Koordination und Normierung der Arbeit zahlreicher Akteure leben. Damit sind sie auch in neuartiger Weise nutzbar, denn sie sind qualitätsgesichert (übrigens ein Begriff aus der Frühzeit der industriellen Massenproduktion von Konsumgütern). So eignen sie sich für systematische und vergleichende Analysen und werden weltweit als Standard betrachtet und genutzt.

⁸ ALEXANDER SHAPSON-COE u. a., »A Petavoxel Fragment of Human Cerebral Cortex Reconstructed at Nanoscale Resolution«, in *Science* 384,6696 (2024): eadk4858.

Auch andere nationale und internationale Forschungsverbünde zielen auf die Sammlung und Nutzung weltweit gesammelter Daten. Dazu bedarf es der Standardisierung von Datenformaten, der Einigung darüber, welche *Metadaten* (unter anderen Versuchsbedingungen, technische Parameter, Informationen über Patienten) gesammelt werden müssen, der Bündelung und Kuratierung der Daten in zentralen Repositoryn und schließlich der Entwicklung von analytischen Werkzeugen, mit denen verlässliche Aussagen aus den *big data* gewonnen werden können. So ist das vollständig neue und zukunftsträchtige Berufsfeld des Datenmanagements entstanden. Bund und Länder haben diesem Umstand 2020 mit der Gründung der Nationalen Forschungsdateninfrastruktur (NFDI) Rechnung getragen, die entsprechende Aktivitäten in verschiedensten Wissenschaftsfeldern fördert, bündelt und koordiniert. Dabei zeigen sich in den einzelnen Fachkulturen unterschiedliche Grade der Digitalisierung, unterschiedliche Anforderungen an Zentralisierung, Normierung und Koordination der Prozesse, und teilweise auch eine gewisse Reserve gegenüber einer datengetriebenen (im Gegensatz zu einer hypothesengetriebenen, aber daten-gestützten) Forschung. Allen Akteuren gemeinsam ist jedoch die Erkenntnis, dass die aktuelle Entwicklung nicht reversibel ist. Wie wir mit der Polarität aus hypothesengetriebener Einzel- und datengetriebener Verbundforschung umgehen, ist eine wichtige Frage. Dass künftig beides zugleich bedacht werden muss, ist eine Tatsache.

Vollständigkeit kann also durch Akkumulation und professionelle Kuratierung bisher unerreichbarer Datenmengen erzielt oder, genauer, es kann sich ihr angenähert werden. Der Anspruch vollständiger Rekonstruktionen realer Objekte geht aber potentiell deutlich weiter, wie an einem Beispiel aus der Hirnforschung demonstriert werden soll. In einem europäischen *flagship project* ist ein konzeptuell neuer Begriff von Vollständigkeit entstanden, dessen Konsequenzen bisher unklar sind: Mit dem *human brain project* (HBP) wurde von 2013 bis 2023 der Versuch gefördert, mit ca. 1 Milliarde € in einem Verbund von 122 Laboren aus 17 Ländern das gesamte menschliche Gehirn in einem Computermodell zu rekonstruieren.

Dabei ging es nicht um ein einfaches makro-anatomisches Modell, sondern um eine vollständige Repräsentation aller Strukturen, die auf der feinsten denkbaren Ebene beginnt und das ganze Gehirn schließlich von »first principles« ausgehend aufbaut. Es sollten also alle Signalmoleküle, subzelluläre Strukturen wie Synapsen, weiterhin alle einzelnen Nerven- und Gliazellen, deren Verbindungen und in aufsteigender Reihe schließlich das gesamte Gehirn rekonstruiert werden. Neben den Strukturen sollten auch deren physiologische Funktionen in das Modell eingehen, also etwa die elektrischen Ströme und Spannungen, mit denen die Nervenzellen kommunizieren. Dieses

Computermodell würde schließlich aus sich selbst heraus die Funktion des Gehirns nachbilden, so dass man mit seiner Hilfe die Entstehung »biologischer Intelligenz« nachvollziehen, Fehlfunktionen, etwa bei Autismus oder Schizophrenie, verstehen und neue Therapieverfahren in Computersimulationen erproben könnte.

An diesem Programm entzündete sich schon früh Kritik, die sich auf zwei wesentliche Argumente stützte:⁹

(1) Die Komplexität der einzelnen Elemente ist so unfassbar groß, dass Vollständigkeit auch mit den modernsten Methoden nicht erreichbar ist. Tatsächlich erleben wir – auch mit Hilfe der großen Datensätze des *Allen-Instituts* – derzeit eine explosionsartige Vermehrung der unterscheidbaren Typen von Nervenzellen und ihrer Verbindungen. Ähnliche Komplexitäten lassen sich auf jeder Ebene finden – auf sub-zellulärem Niveau zeigt sich zum Beispiel eine extrem komplexe und heterogene Protein-Ausstattung und Funktion einzelner synaptischer Vesikel (der Speicherorganellen für Neurotransmitter). Allein diese wenige hunderttausendstel Millimeter kleinen Organellen sind so komplex und divers, dass sie ein eigenes, umfassendes Forschungsgebiet darstellen, welches weit von einem vollständigen Verständnis entfernt ist.

Überraschungen bietet auch die Rekonstruktion einfacher neuronaler Netzwerke wie des stomatogastrischen Ganglions des Flusskrebses, das mit gut 20 Nervenzellen die Magenbewegungen dieser Tiere steuert. Forschende erleben bis heute in ihren Experimenten an diesem Mikro-Netzwerk Überraschungen, etwa wenn eine modulatorisch wirkende Substanz plötzlich unerwartete Aktivitätsmuster auslöst. Von solchen Schwierigkeiten und Heterogenitäten der Detailforschung bis hin zur vollständigen Rekonstruktion der neuronalen Netzwerke, mit deren Hilfe wir diesen Artikel schreiben, lesen und diskutieren können, ist es ein weiter Weg. Ob er je real gegangen werden kann, ist auch nach Abschluss des Projekts unklar.

(2) Ebenso unklar ist, ob dieser Weg einer totalen Rekonstruktion überhaupt erprobt werden sollte und wohin er führt. Nehmen wir einmal an, ein Modell mit der angekündigten Tiefe und Genauigkeit würde gelingen (was der Autor dieses Artikels für unrealistisch hält). Man hätte dann also ein Computermodell, das alle Strukturen und Aktivitätsmuster eines Gehirns nachbilden

⁹ YVES FRÉGNAC und GILLES LAURENT, »Neuroscience: Where Is the Brain in the Human Brain Project?«, in *Nature* 513 (2014): 27–29; YVES FRÉGNAC, »Big Data and the Industrialization of Neuroscience: A Safe Roadmap for Understanding the Brain?«, in *Science* 358,6362 (2017): 470–477; JANOSCH DEEG, »Die Vision vom simulierten Gehirn«, in *Spektrum*, 15.09.2023, <https://www.spektrum.de/news/human-brain-project-die-vision-vom-simulierten-hirn/2177787>, abgerufen am 01.04.2025.

kann, allerdings ohne mit einem Körper und einer biologischen, psychologischen und sozialen Entwicklungsgeschichte ausgestattet zu sein. Es käme einer digitalen Simulation des isolierten Gehirns (*brain in a vat*) nahe. Nehmen wir weiter an, dass es gelänge, realistische Reizkonstellationen zu simulieren, indem man die sensorischen Netzwerke des Gehirns direkt anregt. Und dass das simulierte Gehirn dann Aktivitäten zeigen würde, die denen eines echten Gehirns, soweit bekannt, ähneln. Dann stünde man vor der überhaupt nicht trivialen Aufgabe, die Mechanismen dieser Reaktionen zu verstehen. In pathophysiologischen Computersimulationen psychischer Erkrankungen müsste man herausfinden, was genau denn nun das pathologische Prinzip ist. Kurz: Für alle realen Fragestellungen müsste man die Komplexität des Gesamtmodells wieder reduzieren und, hypothesengesteuert, essentielle Mechanismen und Prinzipien identifizieren und untersuchen. Genau dieses Vorgehen der Biologie, die Reduktion auf Wesentliches, kennen wir aber aus der traditionellen Modellbildung. Man kann sagen, dass ein Totalmodell diesen Schritt lediglich in die elektronische Kopie des Gehirns verschiebt, dafür aber ein milliardenschweres Forschungsprogramm mit allen Notwendigkeiten der Methodenentwicklung, Validierung durch Vergleich mit dem Original und so weiter in Kauf nimmt. Man hätte, salopp formuliert, ebenso gut bei der Hirnforschung am realen Objekt bleiben können. In den Worten von Rosenblueth und Wiener (1945): »The best material model of a cat is another, or preferably the same, cat.«¹⁰ Tatsächlich wurde das HBP nach vehementer Kritik aus Fachkreisen schließlich umgebaut und hat inzwischen wertvolle Erkenntnisse auf verschiedenen Ebenen generiert, sowie ebenso wertvolle Strukturen zur Datensammlung, -kuration und -nutzung geschaffen.¹¹ Der inhaltliche Vollständigkeitsanspruch einer Totalrekonstruktion aller physiologischen und kognitiven Prozesse wurde allerdings nicht aufrechterhalten.¹²

Interessant und für die biologische Forschung typisch ist, dass die Fragen zur Sinnhaftigkeit des Unternehmens erst relativ spät (nämlich nach seiner Bewilligung) kritisch diskutiert wurden und sich mehr auf das konkrete Projekt und sein Management bezogen wurde als auf die globalen Fragen, die es aufwirft.¹³ Die neurobiologische Großforschung blendet diese erkenntnis- und wissenschaftstheoretische Diskussion weitgehend aus, obwohl gerade hier

10 ARTURO ROSENBLUETH und NORBERT WIENER, »The Role of Models in Science«, in *Philosophy of Science* 12,4 (1945): 316–321, 320.

11 Vgl. z.B. die europäische Plattform EBRAINS: <https://www.ebrains.eu/>, abgerufen am 01.04.2025.

12 DEEG, *Vision*.

13 FRÉGNAC und LAURENT, *Human Brain Project*.

kritische Fragen an die großen Versprechungen der Projekte zu stellen wären.¹⁴ Dies gilt auf methodischer wie auf inhaltlicher Ebene – beim Gehirn handelt es sich ja nicht um irgendein Organ, vielmehr ist es mit unserem Person-Sein viel direkter verbunden als beispielsweise das Kniegelenk (das man mit Bezug auf seine Rolle für den aufrechten Gang und damit die Hominiden-Entwicklung allerdings auch nicht unterschätzen sollte).

Dennoch wird in Fachkreisen die übergeordnete Bedeutung der eigenen Erkenntnisse allenfalls marginal angesprochen. Gerade der Übergang zur Großforschung und allumfassende Ansprüche wie die Propaganda rund um das HBP sollten dazu aber Anlass geben. Was wollen und können wir eigentlich erklären?¹⁵ Was bedeutet Kausalität in komplexen biologischen Systemen wie dem Gehirn?¹⁶ Wohin führen uns die neuen computationalen Methoden?¹⁷ Wie verhält sich die kognitive Neurowissenschaft zu anderen Humanwissenschaften und deren sprachlicher Konzeptualisierung von Denken und Bewusstsein?¹⁸ Was macht das Besondere des Gehirns im Vergleich zu anderen Organen eigentlich aus?¹⁹ Werden wir (bald) künstliche Gehirne haben und was könnten deren Eigenschaften sein?²⁰ Könnten sie Bewusstsein ausbilden?²¹

Solche Fragen werden im Alltag der Forschung kaum gestellt, auch nicht in stringenterer, wissenschaftlich operationalisierbarer Form. Dabei ist allein die mitvollziehende Verarbeitung der aktuellen Entwicklungen schon eine Herausforderung, die viele überfordert. Wir rennen gefühlt dem eigenen Fortschritt hinterher. Daher scheint es gerade in einer sich rapide wandelnden Wissenschaftslandschaft geboten, konzeptuelle und methodenkritische Diskussionen innerhalb der *community* zu verstärken. Die Neurowissenschaften berühren grundlegende Fragen mit engen sprachlichen und ideengeschichtlichen Beziehungen zu Philosophie, Psychologie, Pädagogik, Technik, Mathematik und Computerwissenschaften. Dies legt nahe, den Dialog

14 FRÉGNAC, *Big Data*.

15 CARL F. CRAVER, *Explaining the Brain: Mechanisms and the Mosaic Unity of Neuroscience*, Oxford 2007; BORIS KOTCHOUBEY u.a., »Methodological Problems on the Way to Integrative Human Neuroscience«, in *Frontiers in Integrative Neuroscience* 10,41 (2016), <https://doi.org/10.3389/fnint.2016.00041>.

16 SANDRA D. MITCHELL, *Unsimple Truths: Science, Complexity and Policy*, London 2009.

17 MARKRAM, *Bioinformatics*; FRÉGNAC, *Big Data*.

18 PETER JANICH, *Kein neues Menschenbild: Zur Sprache der Hirnforschung*, Frankfurt 2009.

19 THOMAS FUCHS, *Das Gehirn: Ein Beziehungsorgan*, Stuttgart 2021.

20 YUVAL N. HARARI, *Homo deus: Eine Geschichte von Morgen*, München 2017.

21 SUSAN BLACKMORE und EMILY T. TROSCIANKO, *Consciousness: An Introduction*, London und New York 2024.

über Forschungsstrategien, Erklärungsmuster und Geltungsansprüche ihrer Erkenntnisse stark interdisziplinär anzulegen.

Auf übergeordneter Ebene stellen sich ebenfalls drängende Fragen:²² Wie ändern sich Berufsbilder und Karrierewege durch die Großforschung? Welche Implikationen ergeben sich für die Publikationspraxis? Welche Bedeutung hat künftig Wissen? Ist das aus Großprojekten generierte Wissen etwas anderes als dasjenige, das sich aus hypothesesgetriebenen individuellen Projekten ergibt? Wie sollte die Wechselwirkung zwischen beiden Domänen gestaltet werden? Entstehen aus zentralen Institutionen oder Datenrepositorien neue, möglicherweise einengende Geltungs- oder Wahrheitsansprüche? Welche Chancen, aber auch welche Gefahren birgt die Konzentration der Wissensgenerierung in einzelnen Großprojekten?

Mit solchen Fragen soll und kann keine Lenkung des wissenschaftlichen Prozesses erfolgen – die Dystopie einer von Experten gelenkten Wissenschaft ist weder wünschenswert noch in dieser Form realistisch. Vielmehr sollte der Diskurs in einer sich als demokratisch verstehenden, historisch informierten und selbstkritischen Wissenschaft dazu dienen, die Suche nach Erkenntnis auch in einem hochtechnisierten Wissensmanagement als offenen Prozess zu gestalten, Reflektion zu ermöglichen und die Öffentlichkeit über Methoden und Dynamiken der Forschungspraxis zu informieren. Die offenen Fragen sind relevant und drängend.

ORCID®

Andreas Draguhn  <https://orcid.org/0000-0002-6243-5582>

22 Vgl. z. B. KNORR-CETINA, *Epistemic Cultures*.