

Gabriele Gramelsberger,
Peter Bexte, Werner Kogge (Hg.)

Synthesi s

Zur Konjunktur eines
philosophischen Begriffs in
Wissenschaft und Technik

Gabriele Gramelsberger, Peter Bexte, Werner Kogge (Hg.)
Synthesis

Verkörperungen/MatteRealities
Perspektiven empirischer Wissenschaftsforschung

Band 20

Editorial

Die neuere empirische Wissenschaftsforschung hat sich seit den späten 1970er Jahren international zu einem der wichtigsten Forschungszweige im Schnittfeld von Wissenschaft, Technologie und Gesellschaft entwickelt. Durch die Zusammenführung kulturanthropologischer, soziologischer, sprachwissenschaftlicher und historischer Theorie- und Methodenrepertoires gelingen ihr detaillierte Analysen wissenschaftlicher Praxis und epistemischer Kulturen. Im Vordergrund steht dabei die Sichtbarmachung spezifischer Konfigurationen und ihrer epistemologischen sowie sozialen Konsequenzen – für gesellschaftliche Diskurse, aber auch das Alltagsleben. Jenseits einer reinen Dekonstruktion wird daher auch immer wieder der Dialog mit den beobachteten Feldern gesucht.

Ziel dieser Reihe ist es, Wissenschaftler/-innen ein deutsch- und englischsprachiges Forum anzubieten, das

- inter- und transdisziplinäre Wissensbestände in den Feldern Medizin und Lebenswissenschaften entwickelt und national sowie international präsent macht;
- den Nachwuchs fördert, indem es ein neues Feld quer zu bestehenden disziplinären Strukturen eröffnet;
- zur Tandembildung durch Ko-Autorschaften ermutigt und
- damit vor allem die Zusammenarbeit mit Kollegen und Kolleginnen aus den Natur- und Technikwissenschaften unterstützt, kompetent begutachtet und kommentiert.

Die Reihe wendet sich an Studierende und Wissenschaftler/-innen der empirischen Wissenschafts- und Sozialforschung sowie an Forscher/-innen aus den Naturwissenschaften und der Medizin.

Die Reihe wird herausgegeben von Martin Döring und Jörg Niewöhner.

Wissenschaftlicher Beirat: Regine Kollek (Universität Hamburg, GER), Brigitte Nerlich (University of Nottingham, GBR), Stefan Beck (Humboldt Universität, GER), John Law (University of Lancaster, GBR), Thomas Lemke (Universität Frankfurt, GER), Paul Martin (University of Nottingham, GBR) und Allan Young (McGill University Montreal, CAN).

GABRIELE GRAMELSBERGER, PETER BEXTE, WERNER KOGGE (Hg.)

Synthesis

**Zur Konjunktur eines philosophischen Begriffs
in Wissenschaft und Technik**

[transcript]

Die vorliegende Publikation wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 01UB0925A und 01UB0925B im Rahmen der BMBF-Förderinitiative »Übersetzungsfunktion der Geisteswissenschaften« gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Die freie Verfügbarkeit der E-Book-Ausgabe dieser Publikation wurde ermöglicht durch den Fachinformationsdienst Philosophie.



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.



Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0 Lizenz (BY-NC-ND). Diese Lizenz erlaubt die private Nutzung, gestattet aber keine Bearbeitung und keine kommerzielle Nutzung. Weitere Informationen finden Sie unter <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>

Um Genehmigungen für Adaptionen, Übersetzungen, Derivate oder Wiederverwendung zu kommerziellen Zwecken einzuholen, wenden Sie sich bitte an rights@transcript-publishing.com

Die Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen (gekennzeichnet mit Quellenangabe) wie z.B. Schaubilder, Abbildungen, Fotos und Textauszüge erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

Erschienen 2014 im transcript Verlag, Bielefeld

© **Gabriele Gramelsberger, Peter Bexte, Werner Kogge (Hg.)**

Umschlagkonzept: Kordula Röckenhaus, Bielefeld

Satz: Justine Haida, Bielefeld

Druck: Majuskel Medienproduktion GmbH, Wetzlar

Print-ISBN 978-3-8376-2239-3

PDF-ISBN 978-3-8394-2239-7

<https://doi.org/10.14361/transcript.9783839422397>

Buchreihen-ISSN: 2751-2878

Buchreihen-eISSN: 2751-2886

Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier mit chlorfrei gebleichtem Zellstoff.

Inhalt

Vorwort | 7

1. Einleitung – Synthesis. Neue Logik der Forschung?

Gabriele Gramelsberger | 9

MÖGLICHKEITSRÄUME DES SYNTHETISCHEN

2. »und«. Bruchstellen im Synthetischen

Peter Bexte | 25

3. Mathematik als Phänomentechnik der Synthese

Gabriele Gramelsberger | 41

4. Die synthetische Kraft der Mathematik

Merleau-Pontys existenziale Philosophie der Mathematik

Jan Wöpping | 61

5. Synthese in der Philosophie der Wahrnehmung

Stephan Günzel | 77

6. Synthese als Vermittlung

Innere Berührung und exzentrische Empfindung

Karin Harrasser | 93

HYBRIDRÄUME DER KONVERGENZ

7. ›Design‹ in der chemischen Synthese – eine Fiktion?

Martin Jansen und J. Christian Schön | 107

8. Unverfügbarkeit in der Synthese

Untersuchungen zu Chemie und Biotechnologie im Zusammenspiel naturwissenschaftlicher und philosophischer Perspektiven

Werner Kogge und Michael Richter | 121

9. Keine Synthese, kein Bauplan

Leben und (bio)technische Objekte in Simondons irreduktionistischer Philosophie der Individuation als Operation der Information

Michael Cuntz | 147

10. Synthese von Maschine und Leben

Organische Maschinen und die Mechanisierung des Lebens

Georg Trogemann | 171

11. ›Synthesis Candidates‹

Spielen mit Zweck in der Molekularbiologie

Kathrin Friedrich | 193

12. Converging Technologies

Christopher Coenen | 209

Bildnachweise | 231

Autorinnen und Autoren | 233

Vorwort

Die Konzepte und Visionen einer neuen, mit Informationstechnologien überlagerten Biowissenschaft sind in ein avanciertes Stadium getreten, das noch weitgehend unbegriffen ist. Dabei markiert die Überlagerung von Bio- und Informationstechnologien einen der Konvergenzpunkte für die sogenannten *Converging Technologies*. Ihr erklärtes Ziel ist es, Bio- und Informationstechnologie mit Kognitionswissenschaften und Nanotechnologie zu verbinden. Die Debatte zu diesem technowissenschaftlichen Paradigma entbrannte 2002 mit einem Bericht der US-amerikanischen National Science Foundation (NSF): *Converging Technologies for Improving Human Performance*. Wenig später, 2004, folgte der EU-Bericht *Converging Technologies – Shaping the Future of European Societies*. Die Auseinandersetzung wurde vor allem auf wissenschaftspolitischer Ebene geführt. Dabei kamen nicht nur neue Forschungsstrategien und Budgets zur Sprache, sondern auch grundlegende Themen des Mensch-Technik-Verhältnisses, und zwar bis hin zu transhumanen Ideen. Die Frage aber, ob hier überhaupt etwas konvergiert und wenn ja: was, schien in keiner Weise geklärt. Obwohl in den Diskursen immer wieder Anwendungsbeispiele auftauchen, lässt sich bei der Lektüre bemerken, dass die gesamte Debatte vor allem auf Visionen, Metaphern und Science-Fiction beruht. Da es, wie der Untertitel des NSF Reports betont, um die Verbesserung der menschlichen Fähigkeiten geht, ist eine kritische Lektüre, Analyse und Diskussion dieses propagierten Paradigmas dringend erforderlich.

Vor diesem Hintergrund entstand der Forschungsfokus des Verbundes: *Verkörpernte Information: ›Lebendige‹ Algorithmen & Zelluläre ›Maschinen‹ – Konzepte und Bilder der ›Converging Technologies‹*. Er wurde von 2009 bis 2012 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert und verband Teams der Freien Universität Berlin und der Kunsthochschule für Medien Köln, in Kooperation mit ForscherInnen des Centre for Economic and Social Aspects of Genomics der Universität Lancaster und des Philosophieinstituts der Universität Helsinki. Aus Perspektive der Technikphilosophie, der Wissenschafts- und Technikforschung sowie der Bildwissenschaften sollten die begrifflichen und bildlichen Schemata erkundet werden, welche die Diskurse um Konvergenz prägen. Ein besonderes Augenmerk galt den Informations- und Biowissenschaften. Dabei gingen wir da-

von aus, dass die in diesen Diskursen geläufigen Selbstbeschreibungen die aktuelle technologische Entwicklung nur unzureichend charakterisieren. Der weitläufige Rekurs auf eine ›Unity of Nature‹ als Erklärungsgrund für Konvergenz bleibt unbefriedigend. Dem gegenüber gingen wir von der Hypothese aus, dass sich gegenwärtig ein technologischer Paradigmenwechsel dadurch vollzieht, dass Information, Materie und Aktion auf neue Weise zu Einheiten verkörperter Information gefügt werden. Technische Agenzien synthetisieren Information, Materie und Aktion in neuer Weise und versprechen neue Eigenschaften. In der Vielfalt der Anwendungsfelder kristallisierte sich die Synthetische Biologie als ein interessanter Bereich ›lebendiger‹ Algorithmen und zellulärer ›Maschinen‹ heraus und die Forschungsfrage verschob sich von der Konvergenz auf die Synthese.¹ Der Titel unserer Abschlusstagung im Juni 2012 an der Freien Universität Berlin lautete deshalb: *Synthesis. Grenzen und Perspektiven technologischer Erzeugung*. In drei Panels wurden Konzepte von Synthesis als einem neuen Paradigma in Philosophie, Wissenschaft und Technik diskutiert. Der vorliegende Band versammelt die Ergebnisse der Tagung (nahezu komplett), ergänzt durch weitere Texte.

Mit diesem Buch endet der Forschungsverbund *Verkörpernte Information: ›Lebendige‹ Algorithmen & Zelluläre ›Maschinen‹ – Konzepte und Bilder der ›Converging Technologies‹*. Wir möchten allen assoziierten Forscherinnen und Forschern für ihre aktive Mitarbeit danken, insbesondere Prof. Dr. Georg Trogemann (KHM Köln), Dr. Karin Harrasser (KHM Köln), Dr. Adrian Mackenzie (ESRC Lancaster) und Dr. Tarja Knuuttila (Universität Helsinki). Des weiteren möchten wir den Forschern und Forscherinnen des Scientific Board für ihre Unterstützung danken, insbesondere Prof. Dr. Marie-Luise Angerer (KHM Köln), Dr. Christopher Coenen (ITAS Karlsruhe), Prof. Dr. Petra Gehring (TU Darmstadt), Dr. Axel Gelfert (NU Singapur), Prof. Dr. Michael Hagner (ETH Zürich), Prof. Dr. Ursula Klein (MPI für Wissenschaftsgeschichte Berlin), Prof. Dr. Sybille Krämer (FU Berlin), Dr. Erika Mansnerus (LSE London), Prof. Dr. Alfred Nordmann (TU Darmstadt), Prof. em. Dr. Hans Poser (TU Berlin), Prof. Dr. Paul Rabinow (UC Berkeley) und Dr. Petra Schaper-Rinkel (Austrian Institute of Technology Wien).

Berlin, im September 2013

Gabriele Gramelsberger, Peter Bexte, Werner Kogge

1 | Siehe auch Special Issue ›Philosophical Perspectives on Synthetic Biology‹ (herausgegeben von Gabriele Gramelsberger, Tarja Knuuttila und Axel Gelfert) der Zeitschrift *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44(2), 2013.

1. Einleitung – Synthesis.

Neue Logik der Forschung?

Gabriele Gramelsberger

1.1 AKTUELLE ENTWICKLUNGEN

Aktuelle Entwicklungen werfen die Frage auf, ob sich in Wissenschaft und Technik die Etablierung einer neuen Forschungslogik abzeichnet. War die bisherige Forschungslogik durch die analytische Methode geprägt, so mehrten sich die Anzeichen für eine zunehmende Fokussierung auf synthetische Methoden. Nicht nur das vermehrte Auftreten des Adjektivs ›synthetisch‹ in Bezug auf Wissenschaftsdisziplinen wie der ›Synthetischen Chemie‹, der ›Synthetischen Biologie‹ oder der ›Synthetischen Materialwissenschaft‹ deuten auf einen Paradigmenwechsel hin, sondern die aktuellen Forschungsprogramme der ›Converging Technologies‹,¹ der ›Technowissenschaften‹² oder der ›Living Technologies‹³ zeugen von einem verstärkten Bemühen, Konglomerate und Hybride in den Fokus der

1 | Zu den Converging Technologies vgl. Mihail C. Roco, William S. Bainbridge (Hg.): *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology, and Cognitive Science*, Arlington: National Science Foundation 2002; Alfred Nordmann (als Rapporteur für die EU High Level Expert Group Foresighting the New Technology Wave): *Converging Technologies: Shaping the Future of European Societies*, Luxemburg: European Communities 2004; Christopher Coenen: *Konvergierende Technologien und Wissenschaften. Der Stand der Debatte und politischen Aktivitäten zu ›Converging Technologies‹*, (TAB-Hintergrundpapier 16), Karlsruhe: ITAS 2008, vgl. auch in diesem Band Kapitel 12 Converging Technologies.

2 | Zur Technowissenschaft vgl. Jutta Weber: *Umkämpfte Bedeutungen: Natur im Zeitalter der Technoscience*, Frankfurt a.M.: Campus 2003; Alfred Nordmann: Of Landscapes and Caves and the Collapse of Distance in the Technosciences, in: *Danish Yearbook of Philosophy*, 41, 2006, 62-73.

3 | Zu den Living Technologies vgl. Mark A. Bedau: Living technology today and tomorrow, in: *Technoetic Arts*, 7(2), 2009, 199-206; Mark A. Bedau, P.G. Hansen, E. Parke, S. Rasmussen: *Living Technology: 5 Questions*, Automatic Press Publishing 2010.

Forschung zu nehmen. Dabei spielt einerseits die Verschränkung von Technologien eine treibende Rolle, andererseits werden Design und Engineering als neue Formen der Erkenntnisproduktion genutzt. Charakteristisch für diese neue Forschungslogik ist, dass sie den Bestand des in der Welt Existierenden – Moleküle, Materialien, Mikroorganismen – überschreitet und neue synthetisierte Entitäten hinzufügt. In dieser Überschreitungsfunction liegt die genuin neue Möglichkeit der Synthese im Unterschied zu klassischen Analyse/Synthese-Modellen.

Ein aktuelles Beispiel für diese Entwicklung gibt die Synthetische Biologie, die Informations- und Biotechnologie miteinander verbindet und sich als ›Engineering of Biology‹ versteht. Dabei folgt die Forschungslogik der Synthetischen Biologie dem Muster von Analyse/Synthese, indem sie komplexe biologische Einheiten in einzelne ›Biobricks‹ zerlegt, diese mit Hilfe im Labor synthetisierter DNA neu rekonstruiert, um sie dann zu ›Parts‹, ›Devices‹ und schließlich ›Systems‹ zusammenzusetzen.⁴ Der Grund für dieses Vorgehen liegt in der Vielfältigkeit biologischer Systeme, die zu komplex sind, als dass sie der Zweckdienlichkeit industrieller Anwendungen unterworfen werden könnten. Daher sollen konstruierte biologische Einheiten in Zukunft als ›lebende Fabriken‹ fungieren und so auf Protein-Basis neue Stoffe und Medikamente produzieren. Noch ist allerdings nicht entschieden, ob sich Mikroorganismen auf diese Weise in Biofabriken transformieren lassen.⁵

Weitere Felder dieser neuen Forschungslogik finden sich unter den sogenannten ›Living Technologies‹. Diese Technologien imitieren »powerful properties of living systems include their abilities to autonomously act in their own interests, proliferate exponentially, and evolve and adapt on their own«.⁶ Beispiele hierfür sind intelligente Materialien und Sensoren, Neuroprothesen oder Robotertechnologien. Die Verschränkung findet dabei zwischen Informationstechnologie und Materialwissenschaft statt – teils auf Nano-, teils auf Mikroebene. Dabei wird den Materialien nicht nur eine Steuerung via Computerchip beigelegt, sondern das Ziel ist es, Materialien so zu zerlegen und umzuformatieren, dass sie eigenständig zu informationsverarbeitenden Prozessen fähig sind, um dann aus ihnen verkörperte Informationseinheiten, die Soft- und Hardware in sich vereinen, zu konstruieren. Als solche verkörperten Informationseinheiten sollen sie Aufgaben

4 | Vgl. Drew Endy: Foundations for engineering biology, in: *Nature*, 438, 2005, 449-453; Kathrin Friedrich, Gabriele Gramelsberger: Techniken der Überschreitung. Fertigungsmechanismen ›verlässlich lebensfähiger‹ biologischer Entitäten, in: *Zeitschrift für Medienwissenschaft*, 4(1), 2011, (Special Issue ›Menschen & Andere‹), 15-21.

5 | Das Konzept des ›engineering of biology‹ ist kritisch zu hinterfragen. Vgl. beispielsweise Werner Kogge, Michael Richter: Synthetic Biology and its alternatives. Descartes, Kant and the idea of engineering biological machines, in: *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44(2), 2013, 181-189.

6 | Bedau, Living technology today and tomorrow, 2009, S. 200.

selbstständig und adaptiv übernehmen, wie das Regeln von Prozessen oder die Generierung von Zustandsdaten.

Die Beispiele zeigen, dass die ›Synthetischen Wissenschaften‹ einer neuen Forschungslogik folgen. Diese ist allerdings nur vor dem Hintergrund von mehr als vierhundert Jahren analytischer Wissenschaftstradition denkbar. Tatsächlich ist es das Ziel jeder Analyse, die gewonnenen Grundbausteine irgendwann neu zusammenzusetzen. Bereits Rene Descartes formulierte dieses Ziel 1637 in seinen Regeln zur Ausrichtung der Vernunft.⁷ Zum einen sollte jedes Problem so lange zerlegt werden, bis man zu den klarsten und einfachsten Elementen gelangte; zum anderen sollte von diesen Elementen eine vollständige Auflistung möglich sein, um dann von dieser zu neuen Zusammensetzungen zu gelangen. Diese Methode der Analyse und Zusammensetzung prägte maßgeblich das Entstehen der neuzeitlichen Wissenschaft, indem sie Phänomene und Prozesse durch Beobachtung und vor allem Experimente in ihre Bestandteile zerlegte, um diese dann systematisch zu Theorien und im Labor zu neuen Objekten zusammenzufügen. Allerdings war die neuzeitliche Wissenschaft lange damit beschäftigt, erst einmal »einen großen Bestand von gut begründeten Beobachtungen und Tatsachen« zu sammeln, wie dies Bernard de Fontenelle 1709 im Programm der Pariser Académie des Science forderte, ehe dieser Bestand an Einzelfakten »eines Tages die Grundlage für ein System sein« sollte.⁸ Denn erst wenn der Bestand an Daten groß genug sei, so de Fontenelle, könne die Wissenschaft systematisch ihre weitere Forschung vorantreiben. Aus heutiger Perspektive ließe sich zum systematischen Vorgehen noch ›synthetisch‹ hinzufügen.

1.2 ANALYTISCH/SYNTHETISCH

Die Erkenntnismodi des Analytischen respektive des Synthetischen sind so alt wie die abendländische Mathematik- und Philosophiegeschichte und leiten sich aus der geometrischen Analyse komplexer Figuren auf einfache Elemente und deren Zusammensetzung zu neuen Figuren ab. Aristoteles übertrug die Erkenntnismodi der geometrischen Analyse und Synthese auf seine Beweis- und Wissenschaftslehre, indem er unter wissenschaftlicher Analyse die Rückführung von Wissen auf die logischen Formen der Syllogismen verstand. Durch diese Rückführung sollte die Schlüssigkeit des Wissens garantiert werden. Dabei lässt sich die Analyse der Folgerichtigkeit der Schlussformen selbst (›Analysis consequen-

7 | Vgl. René Descartes: *Von der Methode des richtigen Vernunftgebrauchs und der wissenschaftlichen Forschung* (1637), Hamburg: Meiner 1960.

8 | Fontenelle übersetzt in Gernot Böhme, W. van den Daele, W. Krohn: *Erfahrung als Programm*, in: Dies. (Hg.): *Experimentelle Philosophie, Ursprünge autonomer Wissenschaftsentwicklung*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1977, 183-236, S. 190.

tiae»⁹ von der Analyse der Folgerungen aus den Schlüssen unterscheiden (»Analysis consequentis«).¹⁰ Letztere beinhaltet den eigentlichen wissenschaftlichen Gehalt, insofern die als wahr angenommenen Sätze als Folgerungen ihrer Prämissen aufgewiesen werden. Dabei gilt es zu unterscheiden, ob diese Prämissen wie in der Geometrie als wahr gegeben oder erst durch die »judikative Analysis« bezüglich ihres Wahrheitsgehalts zu beurteilen sind. Von dieser logischen Analyse unterscheidet Aristoteles die »reale Analysis« (»naturalis resolutio«), welche Objekte und Bereiche nach Gattungen und Arten differenziert und die Grundlage klassifikatorischer Systeme der Naturwissenschaften wie der Biologie oder der Chemie bildet.¹¹

In seiner *Studie zur Entwicklung philosophischer Analysiskonzepte* identifiziert Hans-Jürgen Engfer vier Analyse/Synthese Modelle, die paradigmatisch für die Wissenschaftsentwicklung waren und teilweise noch sind.¹² Die ersten beiden Modelle basieren auf der bereits erwähnten mathematisch-geometrischen Methode, die von Euklid prototypisch in den *Elementen* entwickelt und von Aristoteles in der *Analytica posteriora* übernommen wurde.¹³ »Eine Analysis«, schreibt Euklid, »ist die Zugrundelegung des Gesuchten als anerkannt um seiner auf anerkannt Wahres führenden Folgerungen willen. Eine Synthesis ist die Zugrundelegung des Anerkannten um seiner auf Vollendung oder Ergreifung des Gesuchten führenden Folgerungen willen.«¹⁴ Je nach Interpretation liegt der Schwerpunkt der Euklidischen Methode mehr auf dem Synthetischen oder dem Analytischen. Durch die Aristotelische Wissenschaftslehre und die Auslegung Euklids durch Proklos dominierte bis weit ins Mittelalter hinein die geometrische Methode als Ableitung wahrer Konklusionen aus den Definitionen, Postulate und Axiome mittels der Syllogismen und damit als synthetisch-konstruierende Methode. Die Vorrangstellung spielte nicht nur für die Entstehung der Naturwissenschaft im 16. und 17. Jahrhundert eine wichtige Rolle, sie prägte mit der *Logik von Port Royal* maßgeblich die Logik der Neuzeit.¹⁵ Entsprechend unterscheidet Engfer als zweites Analyse/Synthese-Modell die analytische Auslegung der antiken Geometrie,

9 | Vgl. Aristoteles: *Lehre vom Schluss oder Erste Analytik*, Hamburg: Meiner 1976.

10 | Vgl. Aristoteles: *Lehre vom Beweis oder Zweite Analytik*, Hamburg: Meiner 1976.

11 | Vgl. Ludger Oenig-Hanhoff: *Analyse/Synthese*, in: *Historisches Wörterbuch der Philosophie*, Basel: Schwabe 1971, 232-248.

12 | Hans-Jürgen Engfer: *Studien zur Entwicklung philosophischer Analysiskonzepte unter dem Einfluß mathematischer Methodenmodelle im 17. und frühen 18. Jahrhundert*, Stuttgart-Bad Cannstatt: Frommann-Holzboog 1982.

13 | Vgl. Euklid: *Die Elemente: Buch I – XIII*, (übersetzt und herausgegeben von Clemens Thaer), Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1971.

14 | Euklid, *Elemente XIII*, zitiert nach Engfer, *Entwicklung philosophischer Analysiskonzepte*, 1982, S. 75, Fn. 24.

15 | Vgl. Antoine Arnauld, Nicole Pierre: *Die Logik oder die Kunst des Denkens* (1662), Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 2005.

die sich bei Pappos von Alexandrien findet. Die Analyse bezieht sich bei Pappos auf das, woraus sich das Gesuchte ergibt, als das »was jedem vorangeht, bis wir bei diesem Zurückschreiten auf etwas treffen, das schon erkannt worden ist oder den Rang eines Prinzips hat.«¹⁶ Das Entscheidende bei beiden Analyse/Synthese-Modellen ist, dass das Gesuchte bereits als Bekanntes vorausgesetzt ist.

Genau an diesem Punkt wird sich die neuzeitliche Wissenschaft von der antiken und scholastischen Wissenschaftslehre unterscheiden, indem sie das Unbekannte selbst in den Fokus nimmt. Dies führt zum dritten Analyse/Synthese-Modell, dem Regressus-Modell der empirischen Naturwissenschaften. »Dieses Methodenmodell bildet sich heraus,« so Engfer,

»wenn die für die Naturwissenschaften ursprünglich angenommene Methodenvielfalt auf die beiden bei Aristoteles unterschiedenen Beweisgänge der *demonstratio quia* [...] und der *demonstratio propter quid* [...] reduziert wird, und wenn diese beiden Beweisgänge mit den ersten beiden der von Galen angegebenen Lehrarten identifiziert und als *doctrina resolutive* und *doctrina compositiva* bezeichnet werden.«¹⁷

Dieses Analyse/Synthese-Modell dominiert bereits im 13. Jahrhundert die Oxfordschule (u.a. Robert Grosseteste) und im 15. und 16. Jahrhundert die Schule von Padua (u.a. Iacobus Zabarella, Galileo Galilei) bis es bei Isaac Newton zum vorherrschenden Programm der neuzeitlichen Wissenschaft avanciert. Als resolute Methode und »*Demonstratio ab effectu*« macht vor allem Zabarella deutlich, worin der Regress dieses Analyse/Synthese-Modells und damit der empirischen Naturforschung besteht. Dieser basiert darauf, dass von bekannten Wirkungen auf unbekannte Ursachen geschlossen wird und aus den nun bekannten Ursachen die zu beweisenden Wirkungen abgeleitet werden (»*Demonstratio ab effectu*«). Der Regress werde vermieden, so Zabarella, wenn die unterschiedlichen Erkenntnisarten desselben Objekts berücksichtigt werden, nämlich indem man die undeutliche von der deutlichen Erkenntnis unterscheidet. Das bedeutet, der Regress wird mit dem Doppelschritt – »*Metodo resolutivo*« und »*Metodo compositivo*« – positiv als Klärung von Erkenntnis gewendet und konstituiert damit das neue Wissenschaftsideal. Galileo Galilei definiert dann den vagen Prozess der Klärung der Erkenntnis genauer als Gewinnung von Daten aus Beobachtung und Experiment, als Aufstellung von Hypothesen, als mathematische Beschreibung sowie Beweis der Hypothesen und schließlich als Ableitung von Vorhersagen, die sich dann wieder an der Beobachtung überprüfen lassen.¹⁸ Nur durch die Mathematisierung kann das Regressus-Modell seine Wirkung entfalten, da erst mit

16 | Pappos zitiert nach Engfer, *Entwicklung philosophischer Analysiskonzepte*, 1982, S. 80.

17 | Engfer, *Entwicklung philosophischer Analysiskonzepte*, 1982, S. 89.

18 | Vgl. Ernst Cassirer: *Das Erkenntnisproblem in der Philosophie und Wissenschaft der neueren Zeit* (1906), Bd. 1, Berlin: Verlag Bruno Cassirer 1911, S. 136ff.

Hilfe mathematisch formulierter Gesetzmäßigkeiten die unzähligen einzelnen Beobachtungsdaten integrierbar werden. Dabei geht die Analyse des Zusammengesetzten durch Experiment und Beobachtung der mathematischen Synthese in der Theorie voran. Wie Newton in seiner *Opticks* von 1704 schreibt:

»By this way of Analysis we may proceed from Compounds to Ingredients, and from Motions to the Forces producing them; and in general, from Effects to their Causes, and from particular Causes to more general ones, till the Argument ends in the most general. This is the Method of Analysis: And the Synthesis consists in assuming the Causes discover'd, and establish'd as Principles, and by them explaining the Phenomena proceeding from them, and proving the Explanations.«¹⁹

Mit dieser Wende der neuzeitlichen Forschung rückt nicht nur die Analyse an zentrale Stelle, sondern nur durch die Nutzung der Mathematik als maßgeblichem Instrument kann das Regressus-Modell der empirischen Naturwissenschaft positiv als Klärung von Erkenntnis gewendet werden. Die Mathematik liefert die notwendige Erkenntnisgewissheit, die allein durch empirische Induktion nicht gewonnen werden kann. Dies erfordert jedoch, so Engfer, ein viertes Analyse/Synthese-Modell und zwar das der Mathematik. Nicht die (Euklidische) Geometrie mit ihrem Primat der synthetisch-konstruierenden Methode, sondern die sich entwickelnde Algebra mit ihrem operativen Symbolismus ist damit gemeint. Diese gewinnt mit ihrer analytischen Methode im 17. und 18. Jahrhundert die Vorherrschaft.²⁰ Deutlich wird dies bei René Descartes, der das von Galilei über die Erkenntnisgewissheit der Mathematik in die Naturforschung eingeführte Kriterium der Notwendigkeit genauer untersuchen und allgemeiner fassen möchte. Seine Suche nach der ausgezeichneten *Methode des richtigen Vernunftgebrauchs* führt ihn zur »Mathesis universalis«, deren Aufgabe die Analyse unbekannter Größen ist.²¹ Der Kunstgriff, den Descartes dabei anwendet, besteht darin, das gesuchte Unbekannte durch symbolische Explizierung anhand beliebiger algebraischer Zeichen einer mathematischen Analyse zugänglich zu machen.²² Inbegriff dieser symbolischen Explizierung ist die mathematische Gleichung, »in der explizit festgestellt wird, daß das Gesuchte »gleich irgendeinem Gegebenen«

19 | Isaac Newton: *Opticks or a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light* (1703), London: William Innys 1730, S. 404, 405; vgl. Engfer, *Entwicklung philosophischer Analysiskonzepte*, 1982, S. 101ff.

20 | Vgl. Sybille Krämer: *Berechenbare Vernunft. Kalkül und Rationalisierung im 17. Jahrhundert*, Berlin, New York: de Gruyter 1991; siehe auch in diesem Band Kapitel 3 Mathematik als Phänomenotechnik der Synthese.

21 | Vgl. Descartes, *Von der Methode des richtigen Vernunftgebrauchs und der wissenschaftlichen Forschung*, 1960.

22 | Vgl. René Descartes: *Regeln zur Ausrichtung der Erkenntniskraft* (1619ff), Hamburg: Meiner 1972, Regel XVII.

ist.«²³ Damit gibt Descartes ein formales Verfahren an, wie die komplizierten Verhältnisse der ›Ingredients‹, ›Forces‹ und ›Causes‹ untereinander explizierbar und Unbekanntes analysierbar wird. Diese Wende wurde später von Immanuel Kant als Revolution der Denkart betitelt.²⁴

1.3 TECHNISCHE BEDINGUNG MÖGLICHER SYNTHESEN

Neben den epistemischen Analyse/Synthese-Modellen der Wissenschaft und dem Kunstgriff des Formalen durch die Mathematisierung ist die technische Verfasstheit der weitere wesentliche Aspekt der Wende der neuzeitlichen Forschung, um den Regress positiv als Klärung zu manifestieren. Diese technische Verfasstheit zeigt sich im »spezifisch technologischen Charakter der Darstellungsräume« der neuzeitlichen Wissenschaft, insbesondere ihrer Experimentalsysteme und Labore,²⁵ und in der technischen Erzeugung wissenschaftlicher Objekte und Produkte, inklusive der in den Experimentierstuben und Laboren verwendeten Instrumente. Dazu gehören so einfache Objekte wie schiefe Ebenen und Kugeln, aber auch immer komplexer werdende Experimentier- und Messinstrumente.²⁶ Erst durch diese technisch hergestellten Objekte, Produkte und Instrumente ist die neuzeitliche Version der empirischen Induktion denkbar, die sich eben nicht mehr dem Aristotelischen Diktum des allgemein Erfassbaren und für jedermann Sichtbaren begnügt.²⁷ Evidenz wird zum technisch hergestellten und im Experiment oder der Messung aufzuweisenden Moment von Forschung, das die unmittelbare sinnliche Gegebenheit abstreift. Das Resultat sind stetig wachsende Mengen an Daten, die der systematischen Substitution unter die Gesetzmäßigkeit von Theorien bedarf, wie dies de Fontenelle 1709 für die zukünftige Wissenschaft auf

23 | Engfer, *Studien zur Entwicklung philosophischer Analysiskonzepte*, 1982, S. 142.

24 | Vgl. Immanuel Kant: *Kritik der reinen Vernunft* (1781/1787), Hamburg: Meiner 1993, Vorrede B XII.

25 | Hans-Jörg Rheinberger: *Experimentalsysteme und epistemische Dinge. Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas*, Wallenstein: Göttingen 2002, S. 244. »Die Kräfte und die Art von Überlegungen, die sie freisetzen, ebenso wie die Regeln, denen sie gehorchen, sind weniger die von cartesischen Subjekten als vielmehr die von technologisch-epistemischen Texturen.« Ebd., S. 244.

26 | Vgl. beispielsweise Domenico Bertoloni: *Thinking with Objects. The Transformation of Mechanics in the Seventeenth Century*, Baltimore: John Hopkins University Press 2006; Hasok Chang: *Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress*, Oxford: Oxford University Press 2004.

27 | Vgl. Lorraine Daston: *Wunder, Beweise und Tatsachen. Zur Geschichte der Rationalität*, Fischer: Frankfurt a.M. 2003.

Basis ausreichender Datenmengen ankündigte.²⁸ Auf Basis empirisch gut fundierter Theorien lassen sich dann neue Entitäten technisch herstellen.

Dieser technowissenschaftliche Charakter der neuzeitlichen Wissenschaft verstärkt sich nicht nur enorm in der modernen Wissenschaft – wie von Gaston Bachelard ausführlich dargestellt²⁹ –, sondern charakterisiert die Synthetischen Wissenschaften in spezifischer Weise. Er ist die technische Bedingung der Möglichkeit der neuen Forschungslogik der Synthese zur Herstellung neuer Entitäten, die den Bestand des Existierenden überschreiten. Denn er lässt sich als ein umfangreiches Projekt der Rekontextualisierung von ›Natur‹ in den wissenschaftlichen Laboren verstehen. Die Spezifität zeigt sich dabei für die Synthetischen Wissenschaften als ›Collapse of Distance‹³⁰ respektive als ›ontological Indifference‹.³¹ Denn: »In technoscientific research, the business of theoretical representation cannot be dissociated, even in principle, from the material conditions of knowledge production and thus from the interventions that are required to make and stabilize the phenomena. In other words, technoscience knows only one way of gaining new knowledge and that is by first making a new world.«³² Diese theoretisch-technische Hybridität zeigt sich in unterschiedlicher Weise. In der Synthetischen Chemie eröffnet sich durch die computerbasierte Analyse und Rekombination der Theorie eine neue, technisch herstellbare Welt von nie dagewesenen Molekülen. Verstehen erfolgt hier ›by first making a new [digital] world‹. In der Synthetischen Biologie kehrt sich das Verhältnis um: Nicht die mit Computern durchforstete Theorie ist die Bedingung neuer technischer Konstrukte, sondern technische Konstrukte ermöglichen neue Theorien und wissenschaftliche Objekte. Verstehen erfolgt hier ›by first making a new [real] world‹, denn die

28 | Die Lust seiner Zeitgenossen an der spekulativen Interpretationen magerer, experimenteller Befunde und Daten kritisierte schon Robert Boyle 1661 und forderte »that men, in the first place, would forbear to establish any theory, till they have consulted with [...] a considerable number of experiments, in proportion to the comprehensiveness of the theory to be erected on them. And, in the next place, I would have such kind of superstructures looked upon only as temporary ones.« Robert Boyle: *Certain Physiological Essays* (1661), in: Alistair C. Crombie: *Styles of Scientific Thinking in the European Tradition. The history of argument and explanation especially in the mathematical and biomedical sciences and arts*, 2. Bde., Duckworth: London 1994, Bd. 2, 947-979, S. 948.

29 | Vgl. Gaston Bachelard: *Der neue wissenschaftliche Geist* (1934), Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1988; Gaston Bachelard: *Die Bildung des wissenschaftlichen Geistes. Beitrag zu einer Psychoanalyse der objektiven Erkenntnis* (1938), Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1987.

30 | Vgl. Alfred Nordmann: *Of Landscapes and Caves and the Collapse of Distance in the Technosciences*, in: *Danish Yearbook of Philosophy*, 41, 2006, 62-73.

31 | Vgl. Peter Galison: *The Pyramid and the Ring*, Lecture at the conference of the Gesellschaft für analytische Philosophie (GAP), Berlin 2006.

32 | Nordmann, *Of Landscapes and Caves and the Collapse of Distance in the Technosciences*, 2006, S. 63.

Komplexität biologischer Organismen überfordert die Theorie noch und bedarf der experimentellen Reduktion.

1.4 SYNTHESIS ALS NEUE FORSCHUNGSLOGIK

Vor diesem Hintergrund sind die aktuellen Entwicklungen der Synthetischen Wissenschaften verortet. Dominierte seit Galilei, Newton und Descartes die Analyse, um das Unbekannte durch empirische wie mathematische Analyse aufzuspüren, sichtbar und explizierbar zu machen, um es dann in einer Theorie zu synthetisieren – Synthese ist hier als Zusammenfassung verstanden; so gibt nun der gigantische Bestand an Einzelfakten und gut bestätigter Theorien den Anlass, die Synthese neu zu gestalten. In anderen Worten: Das sich aktuell ankündende Primat des Synthetischen ist ein neues, das über die bloße Zusammenfassung im Sinne des ›unter eine Gesetzlichkeit bringen‹ hinausgeht. Doch worin besteht das Neue genau?

Es generiert sich aus der Umkehrung dessen, was als Unbekanntes in den Fokus der Forschung gerät. Nicht mehr das Unbekannte als empirisch Gegebenes im Sinne eines noch nicht Entdeckten, das durch Analyse erschlossen wird, steht im Mittelpunkt, sondern das Unbekannte als das zu Synthetisierende. Zum einen als kombinatorische Extrapolation aus der Gesetzlichkeit der Theorie: Auf Basis des über die letzten Jahrhunderte kompilierten theoretischen Wissens, inklusive seines mittlerweile gigantischen Bestandes an integrierten Einzelfakten, wird das Unbekannte durch Analyse, Rekombination und Synthese digital ›entdeckt‹ wie real erzeugt. Die Resultate dieser aktuellen Version der ›Doctrina compositiva‹ sind neue Materialien und chemische Substanzen. Für diese neuen Entitäten durchforstet die Wissenschaft ihren gigantischen Bestand an theoretischem Wissen und Einzelfakten nach optimalen Kombinationsmöglichkeiten. Dass dies nur automatisiert mit Computern möglich ist, zeigen die Chemie, Biologie und Materialwissenschaften eindrucksvoll. In der Chemie wird der Bestand im Computer designter Moleküle auf rund siebzehn Millionen berechneter und in Datenbanken abgespeicherter Molekülverbindungen geschätzt, Tendenz steigend. Insgesamt sind 10^{100} Moleküle denkbar.³³ In der Biologie wird geschätzt, dass es 10^{31} mikrobische Genome auf der Welt gibt und dass seit 4×10^9 Jahren Mikroorganismen jährlich 10^4 Generationen durchlaufen. Aus diesen Schätzungen lässt sich errechnen, dass es im Prinzip 10^{45} DNA-Genome geben müsste, die

33 | Vgl. Frank Öllien: *Algorithmen und Applikationen zur interaktiven Visualisierung und Analyse chemiespezifischer Datensätze*, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2002; siehe auch in diesem Band Kapitel 7 ›Design‹ in der chemischen Synthese – eine Fiktion?

sich nun nach und nach im Computer und Labor synthetisch herstellen lassen.³⁴ Dies lässt sich durch die Synthese künstlicher Bausteine zur Xeno-Biodiversität erweitern. Die 20 natürlich vorkommenden Aminosäuren wurden bisher um weitere 40 »komplementiert«,³⁵ aber auch die vier Basen (A, G, C, T) der DNA werden durch die Substitution mit neuen Bausteinen variabel (DNX).³⁶ Für die Materialwissenschaft beschreibt Gregory B. Olson die neuen Möglichkeiten wie folgt:

»The new design capabilities [computational material design] will also help realize the dream of biomimetic materials, which emulate the complex adaptive microstructures of the living world that are beyond the reach of traditional empirical development. [...] Here the growing philosophy of predictive materials design is now combining the electrical engineer's realm of perfection-driven, artificially structured microcircuits with the materials traditions of self-assembly and defect tolerance.«³⁷

Dies zeigt, dass Synthesis als Forschungslogik aufgrund der Unmengen an Daten und Kombinationsmöglichkeiten prinzipiell mit der Nutzung von Computern einhergeht, die dem Experimentallabor vorgeschaltet sind.³⁸ Der Lohn ist das »mit der Natur über die Natur hinaus[gehen]«, allerdings ist der Begriff der »Natur« hier mit Vorsicht zu genießen, wie die technische Verfasstheit der neuzeitlichen Wissenschaft nahelegt.³⁹

34 | Vgl. Philippe Marliere: The farther, the safer: a manifesto for securely navigating synthetic species away from the old living world, in: *Systems and Synthetic Biology*, 3, 2009, 77-84; siehe auch in diesem Band Kapitel 8 Unverfügbarkeit in der Synthese sowie Kapitel 11 »Synthesis Candidates« Spielen mit Zweck in der Molekularbiologie.

35 | Vgl. Qiaoyan Wang, A.R. Parrish, L. Wang: Expanding the genetic code for biological studies, in: *Chemistry & Biology*, 16(3), 2009, 323-336.

36 | Vgl. Philippe Marliere, J. Patrouix, V. Döring, et al.: Chemical Evolution of a Bacterium's Genom, in: *Angewandte Chemie*, (Int. Edition), 50, 2011, 7109-7114.

37 | Gregory B. Olson: Designing a New Material World, in: *Science*, 288(5468), 2000, 993-998, S. 995.

38 | Vgl. Gabriele Gramelsberger: *Computerexperimente. Zum Wandel der Wissenschaft im Zeitalter des Computers*, Bielefeld: transcript 2010.

39 | Alfred Nordmann: Mit der Natur über die Natur hinaus?, in: Kristian Köchy, M. Norwig, G. Hofmeister (Hg.): *Nanobiotechnologien: Philosophische, anthropologische und ethische Fragen*, München: Karl Alber 2009, 131-147, S. 131. »Hiernach ist die Natur ein technisches System, ein Prozeß- und Eigenschaftszusammenhang, der wie alle technischen Systeme extrapolierbar und steigerungsfähig ist, und zwar nicht im Sinne der biologischen Evolution mit ihrem gradualistischen Mechanismus der Selektion und der Anpassung, sondern im Sinne von Algorithmen und Verfahren, die zur Steigerung des Systems Natur mobilisiert werden können. Die zweifache Erscheinung des Wortes »Natur« bezieht sich in diesem Fall auf die zwei Erscheinungen des einen Prozesses.« Ebd., S. 136.

Zum zweiten zeigt sich das Unbekannte als das im Labor künstlich Synthetisierte als Voraussetzung neuer Theorien. Hier kommt der Begriff des Designs oder des Engineering zum Tragen, wie anhand des ersten, im Labor designten biomolekularen Netzwerks (»Repressilator«) der Synthetischen Biologie deutlich wird. Der »Repressilator« ist ein Device, das einen Oszillator imitiert: »The »design« principles underlying the functioning of such intracellular networks remain poorly understood [... Therefore] we present a complementary approach to this problem: the design and construction of a synthetic network [of the repressilator] to implement a particular function.«⁴⁰ Ähnliches gilt für den »Genetic Toggle Switch« oder die »Counting Gene Networks«.⁴¹ Mittlerweile versammelt die Registry of Standard Biological Parts des Massachusetts Institute of Technology mehr als 18.000 »Biobricks«, darunter »Regulatoren«, »Terminatoren«, »Inverter«, »Reporter«, »Generater« und »Chassis«.⁴²

Das »unter eine Gesetzlichkeit bringen« des Empirischen der neuzeitlichen Forschung wird nun zu einem »aus der Gesetzlichkeit bringen« als kombinatorische Extrapolation respektive »in eine neue Gesetzlichkeit bringen« durch Synthese. Das Unbekannte und damit das Neue wird nicht mehr durch Analyse »entdeckt«, sondern durch Synthese erzeugt. Damit erweitert sich der Bereich des Empirischen um das potenziell generierbare Empirische im Labor – dem »Wetlab« des Experimentallabors wie dem »Drylab« des Computerlabors.⁴³ Es ist dieser Überschreitungscharakter, der die Synthetischen Wissenschaften auszeichnet.

1.5 BEITRÄGE DES VORLIEGENDEN BANDES

Wie die Forschungslogik der Synthetischen Wissenschaften im Detail aussieht, wird durch die Wissenschaftsforschung in naher Zukunft genauer zu untersuchen sein. Was sich jedoch heute schon klären lässt, ist die Verwendung dieses philosophisch-mathematischen Konzepts in Wissenschaft und Technik. Genau dies soll das vorliegende Buch leisten. Dabei zeigt sich, dass die Verwendung des Begriffs der Synthese so unterschiedlich ist wie die einzelnen Disziplinen und Anwendungen, die ihn nutzen. Die Vielfalt der untersuchten Fallbeispiele und Anwendungen in diesem Band gibt einen Einblick in die verschiedenen Interpre-

40 | Michael B. Elowitz, S. Leibler: A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators, in: *Nature*, 403, 2000, 335-338, S. 335.

41 | Vgl. Timothy S. Gardner, C.R. Cantor, J.J. Collins: Construction of a genetic toggle switch in *Escherichia coli*, in: *Nature* 403, 2000, 339-342; Ari E. Friedland, T.K. Lu, X. Wang, et al.: Synthetic gene networks that count, in: *Science*, 324, 2009, 1199-1202.

42 | Vgl. Registry of Standard Biological Parts. URL: <http://partsregistry.org/>.

43 | Vgl. zum Drylab Martina Merz: Locating the Dry Lab on the Lab Map, in: Johannes Lenhard, G. Küppers, T. Shinn (Hg.): *Simulation: Pragmatic Construction of Reality*, (Sociology of the Sciences 25), Dordrecht u.a.: Springer 2007, 155-172.

tationen. Teil eins des Buches zeigt die Möglichkeitsräume des Synthetischen in der Diskussion des Begriffs auf, Teil zwei untersucht konkrete Umsetzungen des Synthetischen in Wissenschaft und Technik in Form der verschiedenen Hybridräume der Konvergenz.

Möglichkeitsräume des Synthetischen

Peter Bexte (2) fragt nach der Kopula ›und‹ als Bruchstelle im Synthetischen. Jeder Synthesis liegt ein Akt des Verbindens von mindestens zweierlei zu Grunde: das Eine und das Andere. Das ›und‹ rührt an die grundlegende Tätigkeit des Trennens und Verbindens. Kurt Schwitters hat es im Hinblick auf eine ästhetische Synthesis befragt (*Unbild*, 1919). Franz Rosenzweig sowie Deleuze/Guattari haben das Wort philosophisch thematisiert. Auch die Synthetische Biologie stößt erneut auf das ›und‹, sofern sie sich als ›biology and engineering‹ versteht.

Die Bedingung der (3) *Mathematik als Phänomentechnik der Synthese* analysiert Gabriele Gramelsberger in ihrem Beitrag. Basierend auf Gaston Bachelards Konzept der Phänomentechnik und der synthetischen Verwendung der Mathematik in der modernen Wissenschaft wird deutlich, dass die Mathematisierung die wesentliche Bedingung der Synthetischen Wissenschaften ist. Sie ermöglicht es erst, durch die technischen Realisierungen im Experiment Anwendungsbedingungen zu verwirklichen, die die Wirklichkeit nicht zustande gebracht hat. Damit wendet sich Bachelard gegen die analytische Logik des ›und‹ der Cartesischen Epistemologie.

Diese (4) *Synthetische Kraft der Mathematik* untersucht auch Jan Wöpping anhand der Überlegungen von Maurice Merleau-Ponty. Für Merleau-Ponty ist die Mathematik keine rein abstrakte, sondern eine menschliche, existenzielle Tätigkeit, die sich aus der Anschauung ergibt. Damit greift er Immanuel Kants Konzeption mathematischer Urteile als synthetisch apriorische auf. Für Merleau-Ponty ist es gerade die Leiblichkeit, die der Mathematik als menschliche, existenzielle Tätigkeit ihren synthetischen Charakter und ihre Kreativität garantiert.

Es ist Kants transzendente Philosophie, die der Synthese eine prominente Rolle als philosophischen Begriff – über das Aposteriorische der Empiristen hinaus – eingeräumt hat. Dieser Konjunktur des Synthesis-Begriffes geht Stephan Günzel in seinem Beitrag zur (5) *Synthese in der Philosophie der Wahrnehmung* von Immanuel Kant und Edmund Husserl nach. Dabei analysiert er detailliert die Rolle der Synthesis in diesen beiden Philosophien und lotet deren Relevanz für technische Medien aus. Denn der entscheidende Aspekt ist die inhärente Zeitlichkeit, die mit dem Begriff der Synthesis in der Wahrnehmungsphilosophie konzeptuell erfasst werden soll. Es ist kein Zufall, dass die Wahrnehmungsphilosophie auf Darstellungsmöglichkeiten zurückgreift, um prozessuale Synthesen zu visualisieren, wie dies Stephan Günzel am Beispiel von Edmund Husserls ›Diagramm der Zeit‹ illustriert.

Die Konzeptualisierung der Synthesis in der Physiologie untersucht Karin Harrasser in ihrem Beitrag zur (6) *Synthese als Vermittlung. Innere Berührung und exzentrische Empfindung*. Im Kontext der Prothesenforschung und -entwicklung zu Beginn des 20. Jahrhunderts, aber auch bereits in der aufkommenden Psychophysik des 19. Jahrhunderts, gewinnt der Tastsinn eine entscheidende Rolle als exzentrische Empfindung. Dabei erweist sich der synthetische Charakter des Tastsinns in seiner Doppelfunktion des Innen/Außen als provokativ für seine konzeptuelle Erfassung wie auch für seine prothetische Umsetzung.

Hybridräume der Konvergenz

Die Grenzen der Synthetischen Wissenschaften in atomaren Dimensionen loten Martin Jansen und J. Christian Schön in ihrem Beitrag zum (7) *›Design‹ in der chemischen Synthese – eine Fiktion?* aus. Die Rede vom ›Design‹ in chemischen Synthese, die mit der Zerlegung in Komponenten (›Bricks‹) und der Zusammensetzung der Komponenten zu ›neuen Entitäten‹ einhergeht, ist mit Vorsicht zu genießen. Die tatsächliche Synthese neuer chemischer Verbindungen ist an naturgesetzliche Bedingungen geknüpft, die ein ›Design‹ – im Sinne beliebiger Gestaltungsfähigkeit – nicht zulässt. Dennoch ist die chemische Synthese ein kreativer Akt, insofern aus der Menge des Möglichen ausgewählt wird, und die Kenntnis des Möglichen hat sich mit der Computerchemie erheblich erweitert.

In ähnlich kritischer Weise argumentieren Werner Kogge und Michael Richter bezüglich der Biosynthese in ihrem Beitrag zur (8) *Unverfügbarkeit in der Synthese. Untersuchungen zu Chemie und Biotechnologie im Zusammenspiel naturwissenschaftlicher und philosophischer Perspektiven*. Im Rückgang auf Aristoteles, Euklid und die Anfänge der chemischen Synthese untersuchen sie die Voraussetzung der Redeweise vom Synthetischen als Assoziation mit unbeschränkten schöpferischen Möglichkeiten, die neben der Chemie nun auch in der Molekularbiologie – vor allem in der Synthetischen Biologie – zum Tragen kommt. Die Identifizierung von Leben und Information, wie sie für die Molekularbiologie konstitutiv ist, erweist sich hier als besonders irreführend.

Vom philosophischen Standpunkt Gilbert Simondons nimmt Michael Cuntz die Synthetische Biologie in seinem Beitrag (9) *Keine Synthese, kein Bauplan. Leben und (bio)technische Objekte in Simondons irreduktionistischer Philosophie der Individuation als Operation der Information* in den Blick. Im Zentrum von Simondons Philosophie zum Verhältnis lebendiger Organismen und technischer Objekte steht der Informationsbegriff, dessen Ursprung in der Kybernetik wie der Molekularbiologie allerdings eine reduktionistische Umsetzung darstellt. Aus dieser Kritik resultiert Simondons Ablehnung der Möglichkeit einer Synthese von Unbelebtem und Belebtem, wie es das technische Paradigma der Synthetischen Biologie voraussetzt.

Genau dieses technische Paradigma zeigt sich in Georg Trogemanns Beitrag zu (10) *Synthese von Maschine und Leben. Organische Maschinen und die Mechani-*

sierung des Lebens. Aus Perspektive der Informatik wird die Rolle des Informationsparadigmas – als Trennung von formaler Funktion und materieller Realisierung – auch für die Biologie untersucht. Es ist festzustellen, dass die Begriffe Maschine und Organismus sich in ihren jeweiligen Charakteristiken wechselseitig annähern. Am Ende des Beitrags wird die Frage nach der Technisierung des Lebens umgekehrt, indem Georg Trogemann fragt, ob es noch ausreicht, biologische Maschinen und künstliche Lebewesen als technische Objekte zu behandeln? Oder ob ihnen subjektive Qualitäten zugeschrieben werden müssen. Denn ein verändertes Informationsparadigma, das auch dem Material Rechnung trägt, nähert sich dem Biologischen an.

In etwas anderer Weise nutzen Computerspiele der Molekularbiologie ›biologische Organismen‹ (User), um das rigide Berechnungsparadigma der Maschinen zu überwinden. In ihrem Beitrag (11) ›*Synthesis Candidates*.‹ *Spiele mit Zweck in der Molekularbiologie* untersucht Kathrin Friedrich das spielebasierte ›Crowdsourcing‹ als neue Wissensressource der Biologie. Spiele wie *Foldit* oder *EteRNA* nutzen die Motivation des Lösens von Puzzeln, um Mitspieler für die Optimierung und Konstruktion von synthetischer RNA zu gewinnen. Dabei geht es um die menschliche Fähigkeit, gestalterisch sinnvolle Kombinationen erkennen zu können, die der Maschine fehlt. Welche Rolle dieses Spielen mit Zweck in Zukunft für die Synthetische Biologie haben wird, muss sich erst noch zeigen.

Der abschließende Beitrag von Christopher Coenen stellt die Debatte zu den (12) *Converging Technologies* dar. Dieses sehr ambitionierte technowissenschaftliche Forschungsprogramm, das auch einen Rahmen für die Synthetischen Wissenschaften anbietet, interpretiert die Hybridräume der Konvergenz material. Nano (Atome), Bio (Gene), Info (Bits) und Cognito (Neuronen), also die sogenannten NBIC-Felder, sollen in Zukunft konvergieren und so neue Anwendungen ermöglichen. Die NBIC-Debatte wird jedoch stark durch weitreichende, zum Teil phantastisch anmutende Zukunftsvisionen geprägt. Daher ist eine detaillierte Analyse in Hinblick auf das tatsächliche Potenzial der Synthetischen Wissenschaften gefragt.

So verschieden die Beiträge in diesem Band sein mögen, so zieht sich das Für und Wider des ›und‹ – als rhizomatische Logik gefeiert, als Cartesische Epistemologie oder als Brickfication kritisiert – als Basis respektive Entgegensetzung des Synthetischen und seiner Konvergenzformen wie ein roter Faden durch die Beiträge. Es scheint so, als ob sich am ›und‹ die Zukunft von Wissenschaft und Technik entscheiden wird.

Möglichkeitsräume des Synthetischen

2. ›und‹. Bruchstellen im Synthetischen

Peter Bexte

»Das 20. Jahrhundert steht unter dem Zeichen ›und‹.«
WASSILY KANDINSKY, 1927¹

Der Begriff der Synthese hat eine lange Überlieferungsgeschichte mit vielen Schwankungen und Konjunkturen. Er mag der Philosophie entstammen, hat dort jedoch an Bedeutung verloren.² Dagegen spielt er auf anderen Terrains eine immer größere Rolle, etwa in der Musik (›Synthesizer‹) oder in der Chemie.³ 1912 hat Stéphane Leduc den Ausdruck *La Biologie Synthétique* in einem gleichnamigen Buch geprägt. Der Terminus ist zunächst in Vergessenheit geraten, wurde aber 2004 quasi neu erfunden und bezeichnet seitdem einen boomhaft wachsenden Wissenschaftsbereich.

1 | Wassily Kandinsky: ›und‹. Einiges über synthetische Kunst (1927), in: Ders.: *Essays über Kunst und Künstler*, (hg. von Max Bill), Bern: Benteli 1973, S. 99.

2 | Vgl. Hansgeorg Hoppe: Synthesis, in: Joachim Ritter u.a. (Hg.): *Historisches Wörterbuch der Philosophie*, Bd. 10, Basel: Schwab 1998, 818-823. Hoppe konstatiert einen Niedergang des Begriffs Synthesis in der Philosophie des 20. Jahrhunderts: »Überhaupt findet der Ausdruck Synthesis außerhalb bewußtseinsphilosophischer Ansätze keine Anwendung mehr. Obwohl systematisch dieselben Probleme und Fragen wie bei Kant und Husserl behandelt werden, wird der Ausdruck in handlungstheoretischen, pragmatistischen und systemtheoretischen Ansätzen vermieden.« Hoppe hat nicht hinzugefügt, was in diese Leerstelle eintritt. Wir meinen, dass es das Wort ›und‹ sein kann.

3 | Das berühmte Beispiel ist Friedrich Wöhlers synthetische Herstellung des Harnstoffs. Am 22.1.1828 schrieb er an seinen Gönner Berzelius: »[...] ich kann, so zu sagen, mein chemisches Wasser nicht halten und muss Ihnen sagen, dass ich Harnstoff machen kann, ohne dazu Nieren oder überhaupt ein Thier, sey es Mensch oder Hund, nöthig zu haben.« Otto Wallach (Hg.): *Briefwechsel zwischen J. Berzelius und F. Wöhler im Auftrage der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, (2 Bde.), Bd. 1, Leipzig: Engelmann 1901, S. 206. Goethe hat im *Faust II* mit der Gestalt des Homunculus darauf reagiert. Vgl. Johann Wolfgang von Goethe: *Faust. Der Tragödie erster und zweiter Teil*, (hg. Von Erich Trunz), München: Beck 1972, S. 210, V 6838f.

Es handelt sich bei dem Terminus ›Synthese‹ also um einen ebenso häufig wie divergierend aufgerufenen Begriff. Um ihn zu befragen, soll er zunächst in einer historischen Konstellation und sodann gleichsam von der Seite betrachtet werden: durch Reflexionen zu dem Wort ›und‹. Jede Synthese setzt voraus, dass zumindest zweierlei zusammenkommt: das Eine und das Andere. Was aber heißt ›und‹? Was macht ›und‹ in den diversen Modalitäten des Verbindens?

2.1 SYNTHESIS OF BEAUTY

Im Jahre 1753 veröffentlichte der Künstler William Hogarth eine Schrift mit dem Titel: *The Analysis of Beauty*. Ihre Pointe bestand darin, Schönheit als Funktion einer geometrischen Linie zu bestimmen, und zwar der barocken Schlangenlinie, aus der Hogarth alle schönen Körper zu generieren gedachte. Auf zwei beigefügten Kupferstichen demonstrierte er, wie dies gemeint war: Am Rand des Bildes werden in einer rahmenden Leiste diverse Formen einfacher Linien angeboten, die im Bildinneren zu Gebilden zusammentreten: zu Tanzbeinen, Stühlen, Kleidern, Frisuren, Statuen, Maschinen usw. Der Übergang von analytisch gewonnenen Elementen zur synthetischen Zusammensetzung schien derart einfach zu sein, dass man im Rückblick staunend auf eben diese Selbstverständlichkeit blickt. Denn sie kann heute nicht mehr vorausgesetzt werden, und zwar nirgends, weder in den Künsten noch in den Wissenschaften. Das tradierte Gefüge von Analyse und Synthese hat sich radikal verschoben und ist nicht mehr selbstverständlich, sondern problematisch. Eben davon sprechen die Beiträge im vorliegenden Buch.

Wenn Hogarth ›Analysis‹ sagte, so stand er damit zum einen in einer geometrischen Tradition, wie sie seit Euklids Elementen bekannt war. Zum anderen aber wurde diese Tradition von der neuzeitlichen Anatomie überlagert. Bezeichnenderweise finden sich auf den genannten Kupferstichen Hogarth' nicht nur geometrische Elemente, sondern auch zerlegte Leichenteile. Analyse meint hier das Sezieren von Lebewesen, wie es seit der Renaissance zur künstlerischen Ausbildung zählte. Nicht von ungefähr trug die erste deutschsprachige Fassung der *Analysis of Beauty* den Titel: *Zergliederung des Schönen*. Das anatomische Modell eines Zerschneidens von Gliedmaßen ist beim Begriff der Analyse mitzudenken. Dabei wird sogleich ein Problem deutlich. Denn es ist evident, dass man aus zergliederten Leichenteilen nicht umstandslos ein lebendiges Wesen neu zusammensetzen kann. Dies kann allenfalls in einer ästhetischen Synthesis gelingen, in Bildern des Körpers, für die seit Leonardo da Vinci auf anatomisches Wissen zurückgegriffen wurde. Eine biologische Synthesis aus Leichenteilen aber wäre etwas völlig Anderes und wird gemeinhin mit dem Namen ›Frankenstein‹ assoziiert. In der Überlagerung von geometrischem und anatomischem Analyse-Begriff ist eine Vielzahl möglicher Missverständnisse angelegt. Die enharmonische Verwechslung einer ästhetischen Synthesis mit einer biologischen Synthesis tut ein Weiteres hinzu. Weil aber die biologischen Wissenschaften selbst in hohem

Maße von Graphical User Interfaces und mithin von Bildern abhängig wurden, ist eine Besinnung auf Fragen ästhetischer Synthesis unabdingbar. Die Künste des 20. Jahrhunderts haben einiges dazu zu sagen. Denn das Problem der Synthesis ist ihnen ›ex negativo‹ in Form des Zerfalls eingeschrieben: als Sprachzerfall, Klangzerfall, Bildzerfall.⁴

Auch ein bodenloser Zerfall kann analytisch aufgefasst werden und etwas sichtbar machen. Dabei ist nicht nur an elementare ›Bausteine‹ zu denken, sondern die Entdeckung kann auf anderer Ebene spielen, wo es weniger um das zu Verbindende geht als vielmehr um das Verbinden als solches. Dabei wird die Kopula bedeutsam und tritt ein Wort in Erscheinung, das in der Geschichte philosophischer Begriffe einen schweren Stand hat. Denn es ist ein solch unscheinbares kleines Wort, der Wortart nach nicht einmal ein Substantiv, also völlig untauglich zu einem Begriff zu werden und in die Begriffsgeschichte einzugehen. Begriffe nämlich pflegen Substantive zu sein, andere Wortarten kommen hier nicht vor. Die folgenden Überlegungen aber zielen auf eine bloße Konjunktion. Es geht um das Wort ›und‹.

Die Konjunktion ›und‹ dient sprachlich dazu, zweierlei zu verbinden: das Eine und das Andere. Jede Synthese setzt voraus, dass mehr als nur Eins gegeben ist. Es wäre völlig sinnlos, ein einziges Element mit sich selbst synthetisieren zu wollen. Man braucht zumindest zweierlei: eins und eins. Betrachten wir den Ausdruck ›eins und eins‹ genauer, so springt das Wörtchen ›und‹ hervor: keine Synthese ohne ein Und. Das Und hat also immer schon darin gesteckt, doch blieb es gleichsam unbeachtet und erst in der Philosophie des 20. Jahrhunderts ist es aus dem Dornröschenschlaf erwacht. In dieser Wendung steckt möglicherweise eine Lehre für die neuen Synthetischen Wissenschaften.

2.2 DAS UND IN DEN KÜNSTEN: KURT SCHWITTERS UNDBILD

In den Jahren 1918/19 entwickelte der Künstler Kurt Schwitters ein Verfahren der Bildproduktion, für das prinzipiell jedes Material zugelassen sein sollte: Zeitungsausschnitte, Müll, Maschinenteile usw. Er sprach von MERZkunst und MERZ-

4 | Als Kronzeuge mag hier Samuel Beckett dienen, der an entscheidender Stelle ein Wort des Apostel Paulus aufrief: »Es ist das paulinische cupio dissolvi.« Samuel Beckett: *Traum von mehr bis minder schönen Frauen*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1996, S. 184. Der paulinische Wunsch nach Auflösung hat eine lange christliche Wirkungsgeschichte. Erst im 20. Jahrhundert aber ist ein ästhetisches Programm daraus geworden. Bemerkenswerterweise steht im griechischen Urtext an Stelle des lateinischen ›dissolvi‹ der Ausdruck: τὸ ἀναλῦσαι – womit wir erneut beim Wort ›Analyse‹ wären (Paulus an die Philipper 1,23). Paulus hat den griechischen Analyse-Begriff christlich umgedeutet. In diesem neuen Sinn führt er nicht mehr auf letzte Elemente, sondern in einen gewollten regressus ad infinitum, von dem die nachfolgende Mystik handeln sollte.

bildern: »Sie werden verstehen, daß ich ein Bild mit dem Wort MERZ das MERZ-bild nannte, wie ich ein Bild mit ›und‹ das und-Bild [...] nannte.«⁵

Aus der Serie der MERZbilder sticht das Undbild heraus. Wie gestaltet man ›und‹? Weil eben dies unmöglich ist, war Schwitters von dem Wort entzückt: »Den Ausdruck des Wortes ›und‹ kann man nicht malen.«⁶ Tatsächlich drückt das Und nichts aus, es ist nicht expressiv, und bietet eben deshalb einen eleganten Ausstieg aus dem Expressionismus, dem der junge Künstler nahe gestanden hatte. Die Konjunktion verbindet allenfalls Expressionen, allein genommen aber steht die bloße Kopula für gar nichts – es sei denn, für ein Verbinden als solches, ohne dass deren Modalität schon geklärt wäre.

Das *Undbild* kann als visuelle Entfaltung weitgehender Reflexionen zu der besagten Konjunktion verstanden werden. Tatsächlich hat sich Schwitters mehrfach mit dem Und beschäftigt. 1925 notierte er einen Prosatext mit dem lapidaren Titel *und*.⁷ 1930 schuf er zwei Variationen auf das *Undbild* von 1919.⁸ Eine erste Vermutung könnte lauten, dass die Beschäftigung mit dem Und auf ein internes Problem künstlerischer Collagen und Assemblagen antwortet: Wie sind Zufallsfunde zu verbinden? Wie kommen das eine und das andere zusammen: das Holzstück und die Fahrkarte und der Knopf und die blaue Pappe usw.? Darüber hinaus hat Hanne Bergius auf einen weitergehenden Kontext verwiesen, wie er in einem Aphorismus von Franz Werfel ausgesprochen wurde. Dieser Text erschien im Dezember 1914 in der Zeitschrift *Die Aktion*; Schwitters könnte ihn gekannt haben.⁹ Werfel thematisierte den Zerfall gesellschaftlicher Bindungen durch den Krieg: »[...] wir stehen machtlos der Einzelheit gegenüber, die keine Ordnung zur Einheit macht, es scheint, das ›Und‹ zwischen den Dingen ist rebellisch geworden, alles liegt unverbindbar auf

5 | Kurt Schwitters: *Merz 20. Katalog*, Hannover, 1927, S. 100. Die Schreibweise des Bildtitels ist Schwankungen unterworfen. Schwitters schreibt an der genannten Stelle ›und-Bild‹. Auf der Rückseite des Bildes aber liest man (laut *Catalogue Raisonné*): ›Undbild‹; vgl. Kurt Schwitters: *Catalogue raisonné 1905-1948*, (hg. von Karin Orchard und Isabel Schulz), Bd. 1 (1905-1922), Ostfildern: Hatje Cantz 2000-2006, S. 224f., Nr. 447. Auch die Staatsgalerie Stuttgart schreibt ›Undbild‹. Wir schließen uns dem an.

6 | »Den Ausdruck des Wortes ›und‹ kann man nicht malen, stellte Schwitters fest.« Website der Staatsgalerie Stuttgart, dort ohne weiteren Nachweis: www.staatsgalerie.de/digitalerkatalog/ (Abruf 1.11.2012).

7 | Vgl. Kurt Schwitters: *Und* (1925), in: Ders.: *Das literarische Werk. Prosa 1918-30* (hg. von F. Lach), Gesamtausgabe Bd. 2, München: dtv 2005, 242-244.

8 | Kurt Schwitters: *Catalogue raisonné 1905-1948*, (hg. von Karin Orchard und Isabel Schulz), Bd. 2 (1923-1936), Ostfildern: Hatje Cantz 2000-2006, S.336 Nr. 1709, S. 338 Nr. 1716.

9 | Hanne Bergius: Kurt Schwitters' ›Créer du nouveau à partir de débris‹, in: *Kurt Schwitters*, (Katalog) Centre Georges Pompidou, Paris 1994, 38-45, S. 38.

dem Haufen, und eine neue entsetzliche Einsamkeit macht das Leben stumm.«¹⁰ Die dadaistische Collage kann als Antwort auf diesen Befund verstanden werden. Wo Werfel eine Tragödie sah, hat der Dadaismus eine Komödie entfesselt. Beides aber kristallisiert sich um eine fundamental gestellte Frage nach dem Wort ›und‹.



Abbildung 2.1: Kurt Schwitters: *Das Unbild* (1919). 35,8 x 28 cm, Collage aus diversen Materialien, Gouache auf Pappe. Bildnachweis: Staatsgalerie Stuttgart.

Schwitters' *Unbild* ist von geringer Größe: 35,8 x 28 cm ergeben keine ausladende Bildfläche. Dennoch findet sich ein großer Reichtum an Details, ein komplexes Gefüge von Materialien, die in wechselseitige Verhältnisse gerückt sind. Was sogleich ins Auge fällt, ist ein blaues Dreieck im rechten Mittelraum, leicht

10 | Franz Werfel: Aphorismus zu diesem Jahr, in: Franz Pfemfert (Hg.): *Die Aktion*, 4(48/49), 1914, Sp. 902-905, Sp. 903.

vom Zentrum weggerückt. Um dieses Dreieck hat sich das Weitere gleichsam kristallisiert. Es waltet in dieser Collage ein durchaus konstruktiver Bildaufbau, dessen geometrische Elemente ahnen lassen, warum sich Kurt Schwitters später tief beeindruckt von Mondrians rechtwinkligen Farbflächen zeigte. Der Zufall hat in Schwitters Arbeiten niemals die Bedeutung gehabt, die er für andere Dadaisten hatte.¹¹ Auch das Wort ›und‹ ist keineswegs zufällig ins Bild gehoben worden. Vielmehr findet es sich an signifikanter Stelle in dem Beziehungsgefüge des Ganzen, schräg über dem blauen Dreieck. Es handelt sich um einen Schablonendruck, der qua Schablone weit entfernt von aller Handschrift ist, wie sie unten links in der Signatur erscheint.

Das Und im *Undbild* ist nicht allein namensgebend, sondern auch formgebend: Es eröffnet die Form der Collage/Assemblage, in der Hölzer und Knöpfe und Eintrittskarten und Drahtgeflecht und Zahnräder und Lederstücke und Nägel usw. zusammengefügt sind. Schwitters hat die Materialien bei Spaziergängen gesammelt, daheim gewaschen (auch das ist wichtig!) und sodann geklebt oder genagelt.¹² Ein Versuch, vor dem Bild stehend die Nägel zu zählen, ergab eine Zahl von ca. 52. (Manches Nagelbild von Günther Uecker hat nicht viel mehr zu bieten.)

Neben diesen Nägeln finden sich weitere Materialien, die das Thema des Verbindens aufrufen: Kleidungsknöpfe, zwei Zahnräder; auch eine Metallklammer zur Verbindung zweier Flächen. Das Und wirkt motivierend im mehrfachen Sinne des Wortes: Es mag für den Künstler psychologisch motivierend gewesen sein, zugleich aber verwandelt es die genannten Materialien in Bildmotive. Ihr Erscheinen im Bild folgt einem Grundton, den das Wort ›und‹ angeschlagen hat, sodass es zu gleitenden Übergängen kommt zwischen Material, Thema, Motiv. Was sich darin ankündigt, ist der durchaus nicht selbstverständliche Übergang von einer bloß additiven Logik des Und in Formen einer weitergehenden ästhetischen Synthesis.

Schwitters selbst hat diesen Übergang gewollt und hat ihn ausdrücklich mit chemischen Synthesen verglichen: »Das Kunstwerk ist wie jede Einheit nicht Summe, sondern Zustand, wie ein chemischer Stoff nicht die Summe seiner Elemente ist.«¹³ In der Tat ist es chemisches Grundwissen, dass z.B. die Synthese von Natrium und Chlor einen Stoff namens Kochsalz generiert, der gegenüber seinen

11 | In diesem Sinne äußerte sich Hannah Hoeh über Kurt Schwitters: »Dem Zufall überließ er nichts.« Hannah Hoeh: *Aller Anfang ist Dada*, (Katalog) Berlinische Galerie, (Hg. von Ralf Burmeister), Ostfildern: Hatje Cantz 2007, S. 168. Zur enormen Bedeutung von Zufallsprozessen bei anderen Dadaisten vgl. Hans Richter: *Dada – Kunst und Antikunst*, Köln: DuMont 1978, 51-65.

12 | Zu der Frage von Schwitters' Müllwaschungen vgl. Monika Wagner: *Das Material der Kunst. Eine andere Geschichte der Moderne*, München: Beck 2001, S. 61 sowie S. 304f., Endnote 15. Die Frage lautet, ob es hierbei nur um Hygiene ging oder darüber hinaus um ein ästhetisches Moment: die Gewinnung von Patina und von gedämpften Farben.

13 | Kurt Schwitters: Ich und meine Ziele, in: Ders.: *MERZ 21. Erstes Veilchenheft*, Hannover 1931, S. 114.

Ausgangsstoffen völlig neue Eigenschaften bietet. Vergleichbares hat Schwitters für seine Collagen reklamiert: Auch das *Undbild* zielt auf eine Synthesis. Es ist höchst bemerkenswert, dass dieser Künstler seine Arbeiten nie im Sinne einer Logik des Zerfalls beschrieben hat. Damit enttäuscht er postmoderne Erwartungen. Es wäre allerdings zu fragen, ob diese Intention sich durchhalten kann.¹⁴ Als bildliches Element tritt das Wort ›und‹ aus der linearen Ordnung der Schrift heraus und streut die Anschlusselemente im Raum. Es erscheint als Hybrid aus Konstruktion und Zerfall zugleich.

In Schwitters' *Undbild* werden diverse Formen eines künstlerischen Verkopplens und Hinzufügens, mithin des Übergangs vom Und zur Synthese erprobt. Dabei erweist das Und seine Brüchigkeit. Man beachte den Schriftzug unten links: »Sökeland & Söhne«. Auf English nennt man diese Kopula ein ›ampersand‹, ein Kaufmanns-Und. Es verbindet Vater und Sohn zu einem Geschäftsmodell, in dem Verschiedenes steckt: eine Genealogie, eine Ökonomie, eine Hierarchie, eine ödipale Psychologie – mithin vier Weisen des Verbundenseins. Keineswegs handelt es sich um einen bloß logischen Operator, wie man ihn aus formalen Sprachen im Sinne einer Booleschen Algebra kennt. Vielmehr lässt sich bemerken, dass das Zeichen ›&‹ im Ausdruck ›Sökeland & Söhne‹ eine geradezu paradoxe Funktion hat: Es verbindet zwei Seiten zu einem Familienunternehmen, zugleich aber differenziert es die Voraussetzungen. Kurz: Es handelt sich um eine disjunktive Konjunktion.¹⁵

Das Und gleicht dem Chamäleon. Sein unscheinbarer Text kann je nach Kontext vielerlei Tönungen annehmen und allerlei Anschlussmöglichkeiten bieten, die seine Bedeutung allererst herstellen. Nach antiker Lehre nennt man solche

14 | Die Frage stellt sich vor allem für Schwitters' Merzbau, der sich in endlosen Wucherungen verlor. Steckt in der Wucherung dasselbe ›und‹ wie in der Synthese? Zum Merzbau vgl. Gwendolin Webster: Der Merzbau und sein Publikum, in: *Merzgebiete. Kurt Schwitters und seine Freunde*, (Katalog) Sprengel Museum Hannover, (hg. von Karin Orchard und Isabel Schulz), Köln: DuMont 2006, 156-163.

15 | Der Begriff der disjunktiven Konjunktion entstammt der Grammatik. Er findet sich bereits in den spätantiken *Institutiones Grammaticae* des Priscian von Caesarea (um 500 n. Chr.). Priscian unterschied 17 Arten (species) der Konjunktionen, darunter die kopulativen und die disjunktiven. Sein Beispiel für die disjunktive Konjunktion ist das ›oder‹: »vel dies est vel nox (= Entweder ist es Tag oder Nacht)«. Vgl. Axel Schönberger: *Priscians Darstellung der lateinischen Konjunktionen: lateinischer Text und kommentierte deutsche Übersetzung des 16. Buches der Institutiones Grammaticae*, Frankfurt a.M.: Valentina 2010, S. 30, 31. Priscian lehrte, dass das ›oder‹ zwei Wörter verbindet, deren Sinn es jedoch trennt. Damit war das Problem auf zwei Ebenen verlagert und das Paradox entschärft. Wohl gemerkt: Priscian hat diese Frage nur an Hand des ›oder‹ diskutiert. Die Übertragung des Begriffs ›disjunktive Konjunktion‹ auf das ›und‹ bedeutet dem gegenüber eine moderne Zuspitzung. Das Problem der disjunktiven Konjunktionen ist in jüngerer Zeit von Gilles Deleuze und Jean-Luc Nancy thematisiert worden.

Wörter Synkategoremata.¹⁶ Sie lenken die Aufmerksamkeit auf die prinzipiell ungesicherten, weil kontextabhängigen Bedeutungen von Verbindungsstücken, Klammerungen, Koppelungen usw. Was sich in der Betonung dieser Elemente ankündigt, ist ein Shiften der Aufmerksamkeit von semantischen zu syntaktischen Elementen. Die Verbindungsstücke werden bedeutsam und problematisch zugleich. Eine solche Verschiebung der Aufmerksamkeit ist für wesentliche Positionen des 20. Jahrhunderts bezeichnend: sowohl in den Künsten als auch in den Philosophien.

2.3 DAS UND IN DER PHILOSOPHIE: ROSENZWEIG UND DELEUZE/GUATTARI

Grundwort aller Erfahrung

Kurz nach dem Ende des 1. Weltkriegs erschien ein philosophisches Buch, das auf Überlegungen zum Und hinführte. Der Autor war Franz Rosenzweig. Man kennt ihn als ersten Herausgeber des sogenannten *Ältesten Systemprogramm des deutschen Idealismus*. Ferner kennt man Rosenzweig als Übersetzer, der sich gemeinsam mit Martin Buber an eine Neuübertragung der Bibel machte, durchaus in der Absicht, Judentum und deutsche Sprache neu miteinander zu verbinden; jenem Synthese-Traum des assimilierten Judentums, dem Hitler ein Ende machte. Franz Rosenzweig hatte als Soldat im Ersten Weltkrieg dienen müssen. Danach hat er nicht mehr an die Universitäten zurückkehren mögen, sondern hat als dezidiert außerakademischer Philosoph sein Hauptwerk verfasst: *Der Stern der Erlösung*. Das Buch entsprang einer Erschütterung des geschichtlichen Bewusstseins.¹⁷ In einer nachträglichen Bemerkung hat Rosenzweig das dort verhandelte Problem mit dem Wort ›und‹ angesprochen. Er nennt es das Grundwort aller Erfahrung:

»In ein Erkennen, bei dem etwas herauskommt, ist genau wie bei einem Kuchen auch etwas hineingetan. Hineingetan ist in den *Stern der Erlösung* zu Beginn die Erfahrung der Tatsächlichkeit vor allen Tatsachen der wirklichen Erfahrung. Der Tatsächlichkeit, die dem Denken statt seines Lieblingswortes Eigentlich das seiner Zunge ungewohnte Grundwort aller Er-

16 | Vgl. Stephan Meier-Oeser: Synkategorem; synkategorematisch; synsemantisch, in: Joachim Ritter u.a. (Hg.): *Historisches Wörterbuch der Philosophie*, Bd. 10, Basel: Schwab, Sp. 787-799.

17 | Vgl. Bernhard Casper: Transzendente Phänomenalität und ereignetes Ereignis. Der Sprung in ein hermeneutisches Denken im Leben und Werk Franz Rosenzweigs, in: Paola-Ludovika Coriando: *Vom Rätsel des Begriffs. Festschrift für Friedrich-Wilhelm von Herrmann*, Berlin: Duncker & Humblot 1999, 357-367. Der Text ebenfalls als Einleitung zu der digitalisierten Ausgabe von Rosenzweigs Buch: www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/310/pdf/derstern.pdf (Abruf 10.11.2012).

fahrung, das Wörtchen Und, aufzwingt. Gott und die Welt und der Mensch. Dieses Und war das erste der Erfahrung; so muss es auch im Letzten der Wahrheit wiederkehren. Noch in der Wahrheit selber, der letzten, die nur eine sein kann, muß ein Und stecken [...].¹⁸

Rosenzweigs Überlegung führt auf ein kategorisches Und: Es muss in aller Erfahrung stecken. Insofern ist es ›Grundwort aller Erfahrung‹ (mithin auch aller Erfahrungswissenschaft – wir kommen darauf zurück). Die religionsphilosophische Wendung aber, die Rosenzweig suchte, führt auf einen schwankenden Gebrauch des Wortes ›und‹ in der Wendung: »Gott und die Welt und der Mensch«. Ob Gott einer Ergänzung bedarf, obwohl er Inbegriff von Allem sein soll, dies war ein altes Mystikerproblem gewesen (etwa bei Angelus Silesius). Mathematisch gesprochen: Unendlich plus eins ist wiederum unendlich. Was also heißt da ›und‹? Es kann sich keineswegs um eine bloß äußerliche Hinzufügung handeln, vielmehr um eine interne Differenzierung, in der Einheit und Differenz zugleich gedacht sind. Genau dieses Problem findet sich in Rosenzweigs seltsam paradox anmutenden Schlussgedanken. Paradox wirkt er insofern, als er die eine Wahrheit postuliert, »die nur eine sein kann«, zugleich aber ein Und enthält.

Oben hatten wir gesagt, dass jedes Und auf zweierlei verweist: das Eine und das Andere. Wenn aber das Andere dasselbe ist wie das Eine (Gott und die Welt; Unendlich und eins), was heißt dann Und? Näher betrachtet verstört das Wörtchen den Gedanken einer Einheit. Es scheint allemal auf Zweiheit zu rekurrieren. Der gesplante Huf des Teufels steckt in seiner Verbindung. In der Tat hat das Wort ›und‹ dem Autor Rosenzweig einige Anstrengung abverlangt. Die Konjunktion markierte eine Bruchstelle in eben jenem Fundament, das sie als Grundwort legen sollen.

Rhizomatische Logik des Und

Der Übergang vom Denken der Synthesis zur Logik des Und ist ein halbes Jahrhundert nach Rosenzweigs Überlegungen philosophisch radikalisiert worden, und zwar zu einer Logik des Zerfalls. Dabei gewann die Konjunktion ihr Janusköpfiges zurück, ihr Doppelbödiges aus Verknüpfung und Unterminierung zugleich, anders gesprochen: als Element der Dekonstruktion. Der Schauplatz dieses Denkens war Paris.

1980 publizierten Gilles Deleuze und Félix Guattari ihr Buch mit dem Titel *Mille Plateaux*. Es sollte ein Klassiker des Poststrukturalismus werden, nicht zuletzt durch das Bild des Rhizoms. Die Autoren dachten an das wuchernde Wurzelwerk von Knollengewächsen, wie es sich unstrukturiert verbreiten würde. Wucherndes Wurzelwerk auf vielen Ebenen wurde zum Vorbild ihres eigenen

18 | Franz Rosenzweig: Das Neue Denken. Einige nachträgliche Bemerkungen zum ›Stern der Erlösung‹ (1925), in: Ders.: *Die Schrift. Aufsätze, Übertragungen und Briefe*, (hg. von Karl Thieme), Königstein Athenäum: Jüdischer Verlag 1976, 186-211, S. 208.

Schreibens und Denkens erklärt. Die Pointe richtete sich nicht nur gegen logische Ableitungsverfahren, sondern auch gegen den Strukturbegriff des klassischen Strukturalismus. Dem rhizomatischen Denken wurden viele Eigenschaften zugesprochen, von denen eine für unseren Zusammenhang wichtig ist. Es geht um das Wort ›und‹: »Der Baum braucht das Verb ›sein‹, doch das Rhizom findet seinen Zusammenhalt in der Konjunktion ›und... und... und...‹. In dieser Konjunktion liegt genug Kraft, um das Verb ›sein‹ zu erschüttern und zu entwurzeln.«¹⁹

›und... und... und...‹/›et... et... et...‹: Im Französischen wird das Wort nicht nur dreifach geschrieben, sondern sechsfach gesprochen. In jedem französischen Und (›et‹) steckt nämlich ein Doppelsinn. Es kommt klanglich mit der 3. Person Singular des Verbs ›être‹ (sein) überein. Die Überlagerung von ›et‹ und ›est‹ ergibt ein geradezu dadaistisches Wortspiel, das im Deutschen leider verloren geht. Der ontologische Wortschatz wird gleichsam aus der Tiefe in die Ausdehnung geholt und in die serielle Wiederholung geschickt. Der Sinn von Sein besteht demnach darin eine Kopula zu sein: ›est/et‹. Die mehrfache Wiederholung des Worts deutet eine Fluchtung auf der Ebene des Zeichens an, die unendlich weitergehen könnte. Denn wo für jedes n gilt: ›n becomes (n+1)‹, da ist die Zeichenreihe prinzipiell unendlich. Die Autoren sprechen ausdrücklich von einer Logik des Und, die als Gegenlogik zur klassischen Ontologie aufgemacht wird: »[...] wie man sich zwischen den Dingen bewegt, wie man eine Logik des UND entwickelt, die Ontologie umkehrt, die Grundlagen außer Kraft setzt, Anfang und Ende annulliert.«²⁰

Die hier gemeinte Logik des Und wurde von den Autoren als dreifacher Ausweg gekennzeichnet: Ausweg aus logischen Baumdiagrammen, aus dem klassischen Strukturalismus sowie aus der europäischen Ontologie. So aber hatte ein Franz Rosenzweig es nicht gemeint, als er das Und zum Grundwort erklärte. Rosenzweig hatte es in die Spannung einer religionsphilosophisch gedachten Einheit eingesetzt, die im Durchgang durch das Und immer wieder sich herstellt. Dem gegenüber haben Deleuze/Guattari das Wörtchen ›und‹ radikalisiert, und zwar in der dezidierten Absicht, jedes Denken von Einheit zu sprengen. Es fragt sich allerdings, ob diese Wendung nicht allzu triumphal daher kam. Denn jede Logik des Zerfalls ist dicht an der Paulinischen Umdeutung des griechischen Analysis-Begriffes zu jenem ›cupio dissolvi‹, das ein Samuel Beckett sich zu eigen machte (s.o.).

Wir sagten oben, das Und sei notwendiger Bestandteil von Synthese, insofern immer Zwei zusammenkommen müssen, wenn anders nicht sinnvoll von Synthese gesprochen werden kann. Das Und gehört ins synthetische Denken notwendig hinein, zugleich aber scheint es darin zu verschwinden. Denn jede Synthese beansprucht mehr zu sein als eine bloß äußerliche Verknüpfung. Die verschwindende Spur des Und markiert eine Sollbruchstelle im Synthetischen.

19 | Gilles Deleuze, Félix Guattari: *Tausend Plateaus* (1980), Berlin: Merve 1992, S. 41.

20 | Deleuze, Guattari, *Tausend Plateaus*, 1992, S. 41. Die postulierte Annullierung von Anfang und Ende bringt eine systematische Nähe zu dem Werk von Samuel Beckett, das den späten Deleuze beschäftigte.

2.4 DAS UND IN DER SYNTHETISCHEN BIOLOGIE

Die Biologie ist eine Erfahrungswissenschaft. Wenn aber das Und als Grundwort aller Erfahrung erscheint, so ist es auch hier zu erwarten. In der Tat soll es im Folgenden auf zwei Ebenen betrachtet werden: auf Ebene der Praxis wie auf Ebene der Darstellungsweisen, insbesondere der diagrammatischen Darstellungen.

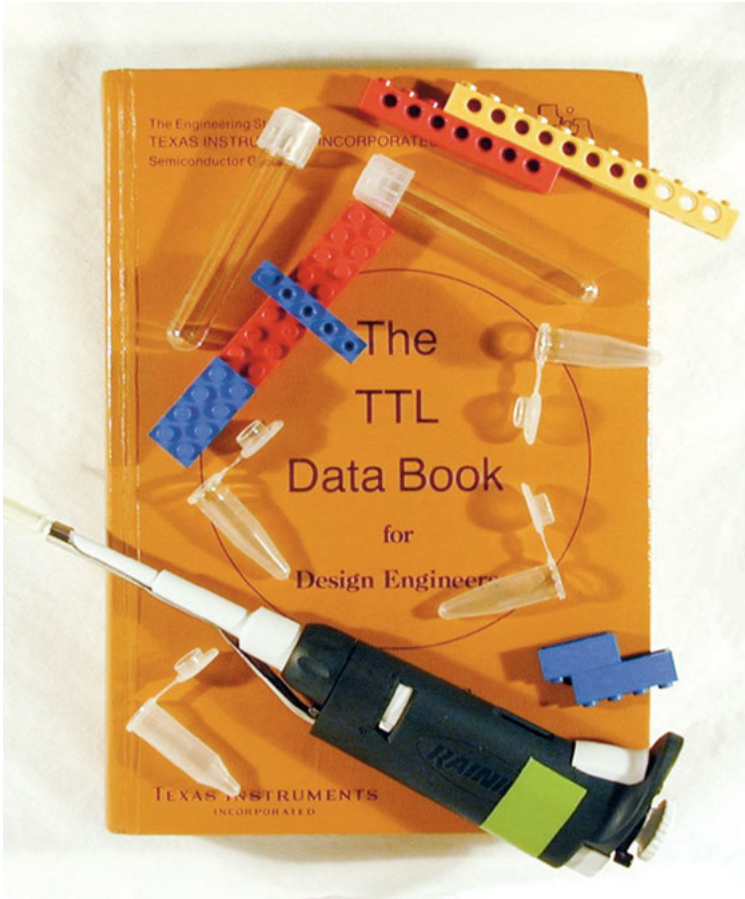


Abbildung 2.2: Titelbild von Tom Knight: *Idempotent Vector Design for the Standard Assembly of Biobricks*, MIT Artificial Intelligence Laboratory, MIT Department of Biology, MIT Division of Biological Engineering, 2003. Bildnachweis: <http://web.mit.edu/synbio/release/docs/biobricks.pdf>.

Das Und in der Praxis Synthetischer Biologie

Im Jahre 2003 veröffentlichte Tom Knight ein wegweisendes Manifest.²¹ Es formulierte das Konzept der Biobricks und hat damit in hohem Maße die weitere Entwicklung der Synthetischen Biologie beeinflusst. Bemerkenswerterweise entstand das Papier nicht etwa im Kontext eines biologischen Labors, sondern im MIT Artificial Intelligence Laboratory, das zur MIT School of Engineering zählt. Tom Knight ist von Haus aus Informatiker. Seine Grundidee bestand darin, Prinzipien eines informationstechnischen Ingenieursdenkens auf biologische Fragen zu übertragen. Dies wurde schon im Titelblatt des Papiers von 2003 deutlich gemacht.

Das Cover zeigt eine Collage aus diversen Elementen. Gewiss verfolgt es keine dadaistischen Intentionen, trotzdem kann es als ein zweites *Unbild* angesprochen werden. Man sieht verstreute Gegenstände: Pipetten neben Behältern für Wetware, wie sie in biologischen Labors benutzt werden. Zudem sind Legosteine in den drei Grundfarben rot, gelb, blau zu bemerken. All diese Dinge liegen vereint auf dem Cover eines Buchs mit dem Titel *TTL Data Book for Design Engineers*. Man sieht: Die seltsame Vereinigung von Dingen aus Labor und Kinderzimmer beruht auf Ingenieurskunst. Deren Handbuch bildet das Fundament für ein Projekt mit Namen ›biobricks‹, als den standardisierten Bausteinen Synthetischer Biologie. Die Legosteine sind ihr Sinnbild: Sie versprechen die Synthese von Ingenieurwissen und Biologie.

Am Anfang der Synthetischen Biologie steht die Synthesis verschiedener Wissenskulturen. Auf Ebene einer vorgängigen Praxis muss bereits Verschiedenes zusammenkommen, um das hervorzubringen, was anschließend als Synthetische Biologie auftritt. Die Pragmatogenese des Faches impliziert ein Und: Biologie und Engineering.²² Forscherteams der Synthetischen Biologie bestehen eben nicht nur aus Biologen, vielmehr müssen verschiedene Wissenskulturen vereinigt werden, bevor an eine Synthetische Biologie überhaupt zu denken ist. In Projekten dieser Art gibt es naturgemäß Übertragungsschwierigkeiten, wenn etwa Physiker die Messungen übernehmen und angefallene Daten so visualisieren, wie sie glauben, dass Biologen es am besten verstehen würden.²³ An diesen internen Übergangsstellen spielen computertechnische Modellierungen und Darstellungsweisen eine große Rolle.

21 | Tom Knight: *Idempotent Vector Design for Standard Assembly of Biobricks* (2003), <http://web.mit.edu/synbio/release/docs/biobricks.pdf> (Abruf 20.11.2012).

22 | Vgl. Matthias Heinemann, S. Panke: Synthetic biology: putting engineering into biology, in: *Bioinformatics*, 22, 2006, 2790-2799.

23 | Ein Beispiel dafür bei Nina Samuel: Images as Tools. On visual epistemic practices in the biological sciences, in: *Studies in History and Philosophy of Science*, 44(2), 2013, 225-236.

Auf der Ebene der Praxis also sind Synthesisleistungen schon verlangt, bevor überhaupt an die Synthetisierung von Stoffen, Genen oder Biobricks gegangen werden kann. Diese systematische Voraussetzung ist ebenso oft ausgesprochen wie übersprungen worden, nicht selten mittels einer blendenden Rhetorik der Weltveränderung (›to change the world‹).²⁴ Es gilt das implizite Und jedoch festzuhalten, denn es markiert ein Problem.

Das Und in den Darstellungsweisen Synthetischer Biologie

Die oben skizzierte Frage zeigt sich noch an anderer Stelle, nämlich überall dort, wo Darstellungsweisen aus den Ingenieurwissenschaften eingesetzt wurden, um graphische Darstellungsweisen der Biologie zu standardisieren. Die ›Systems Biology Graphical Notation‹ setzt diagrammatische Standards aus der Informatik voraus. Ein solcher Modelltransfer ist allemal aufschlussreich. Frei nach Marshall McLuhan lässt sich sagen: Der Inhalt eines Standards ist ein anderer Standard.

Bei diesem Transfer aus der Informatik in die Biologie sind Probleme aufgetreten. Denn die eingesetzten visuellen Mittel erwiesen sich als uneindeutig, sodass Missverständnisse entstanden. Es hat sich beispielsweise gezeigt, dass ein Pfeil allzu viel Verschiedenes bedeuten kann. 2009 beschrieb eine Arbeitsgruppe genau dieses Problem graphischer Notationen. Ihrer Beobachtung nach konnte ein Pfeil in einem biologischen Diagramm acht verschiedene Bedeutungen annehmen: »is transformed into«, »translocates«, »is degraded into«, »associates into«, »disassociates into«, »stimulates the activity of«, »stimulates the expression of«, »catalyses the formation of«.²⁵ Wenn man zwei Elemente X und Y mit einem Pfeil verbindet, so ist also keineswegs eine eindeutige Beziehung geschaffen.²⁶ Vielmehr kann allerlei gemeint sein: das Eine und das Andere. Auch auf dieser Ebene des Zeichens begegnen wir erneut dem Und. Es führt auf eine Serienbildung missverständlicher Bedeutungsmöglichkeiten, zu deren Beendigung erhebliche Anstrengungen unternommen werden. Seit der genannten Publikation von 2009 wird daran gearbeitet, eine möglichst eindeutige ›Systems Biology Graphical Notation‹ zu schaffen. In dem zugehörigen *User Manual* vom Oktober 2012 wurde der Anspruch wie folgt formuliert »Activities like synthetic biology, that

24 | Vgl. die Titelformulierung von James Collins: Bits and pieces come to life. Scientists are combining biology and engineering to change the world, in: *Nature*, 483, 2012, 8-10.

25 | Nicolas Le Novère, M. Hucka, et al.: The systems biology graphical notation, in: *Nature Biotechnology*, 27, 2009, 735-741, S. 736.

26 | Vgl. Kathrin Friedrich: Faces of Synthetic Biology, in: *Studies in History and Philosophy of Science, Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44(2), 2013, 217-224.

reconstruct biological systems, need to exchange their descriptions unambiguously, as engineers exchange circuit diagrams.«²⁷

Bei dem Versuch, die Logik von Schaltdiagrammen auf die Biologie zu übertragen, kam es zu aufschlussreichen Problemen, die von den Autoren sehr bewusst angesprochen werden. Das genannte *User Manual* beginnt zunächst mit dem Anspruch, sachliche Gegebenheiten zu repräsentieren. Diese Logik der Repräsentation wird im Bild der Karte ausgesprochen: Vordergründig geht es um ›maps‹. Bemerkenswerterweise jedoch entwickeln diese ›maps‹ ein Eigenleben, das heißt: Sie werden selbstbezüglich. An diversen Stellen rekurren die Autoren nicht mehr auf sachliche Probleme sondern auf »the needs of a map, without direct biological equivalent«.²⁸ Hierzu gehören etwa »sources and sinks«: »conceptually outside of the scope of the map.«²⁹ Ferner könnte es geschehen, dass ein allzu großer Detailreichtum, die Karte unlesbar machen würde: »The resulting graph is so tightly connected that the map becomes unreadable.«³⁰ Um dieses Problem zu vermeiden, gibt es die Klasse der »omitted processes: processes that are known to exist, but are omitted from the map for the sake of clarity or parsimony.«³¹ Zudem ist es prinzipiell möglich, ein jedes System auf verschiedene Weisen darzustellen:

»It is important to realize that there are in general more than one way to represent a system in SBGN Process Description. The choice of concepts and symbols often depend on the granularity of information available, and the message the authors of the map wish to convey to the readers of the map.«³²

Ein solches Diagramm ist also keineswegs selbsterklärend, sondern kontextabhängig. Die sogenannte Karte repräsentiert nicht nur biologische Gegebenheiten, sondern auch Intentionen eines Autors, eine Datenlage und nicht zuletzt »the needs of a map, without direct biological equivalent«.

Es zeigt sich also, dass die ›Systems Biology Graphical Notation‹ in ihrem Versuch, Mehrdeutigkeiten auszutreiben, neue Mehrdeutigkeiten produzieren muss. Es bleibt eine Pluralität, wie sie sich im Und ausspricht: ›biology and engineering‹. Die Pluralisierung auf verschiedenen Ebenen markiert die Brüchigkeiten der Ausgangssituation. Im Fundament der Synthesis verbirgt sich ein vieldeuti-

27 | SBGN Systems Biology Graphical Notation: *Process Description language Level 1*, October 7, 2012. *User Manual*, S. 1. http://sbgn.svn.sourceforge.net/viewvc/sbgn/ProcessDiagram/trunk/UserManual/sbgn_PD-level1-user-public.pdf (Abruf 26.11.2012).

28 | SBGN, *User Manual* 2012, S. 4.

29 | SBGN, *User Manual* 2012, S. 8.

30 | SBGN, *User Manual* 2012, S. 10.

31 | SBGN, *User Manual* 2012, S. 15.

32 | SBGN, *User Manual* 2012, S. 26.

ges Wort: Es ist das Und. Indem es auf interne Differenzen der Synthetischen Biologie verweist, eröffnet es die Möglichkeit von Science and Technology Studies.

2.5 FAZIT

Zum Ende wollen wir einen Schritt zurücktreten und Abstand nehmen. Wir haben nach dem Und gefragt, wie es auf der Schwelle zwischen Zerfall und Synthesis erscheint. Die unscheinbare Frage rührt an etwas Fundamentales: an die grundlegende Tätigkeit des Trennens und Verbindens. Kein Geringerer als Claude Lévi-Strauss hat darin den Kern dessen gesehen, was Kulturen leisten: Sie regeln das Trennen und Verbinden.³³ In diesem Sinne hat die strukturelle Anthropologie sich mit Heiratsregeln, Formen des Gütertausches, des Kochens, des Verkehrs mit den Toten usw. befasst. In einer Wissenskultur wird man andere Bereiche befragen. Man wird wissen wollen, was eine Trennung oder Verbindung von Maschinen, Informationen, Praktiken und Stoffen bewirken mag. Kein Labor dieser Welt tut etwas Anderes. Seine Gegenstandsbereiche mögen sich von denen der Ethnologie unterscheiden, das Thema aber ist noch immer dasselbe: Trennen und Verbinden.

In der wissenschaftstheoretischen Beobachtung dieser Verhältnisse sind in den vergangenen Jahren die Maschinenparks moderner Wissenschaft, ihre Informationstechniken und Laborpraktiken vielfach diskutiert worden. Es scheint an der Zeit, die vierte der genannten Komponenten hervorzuheben: die Stoffe, insbesondere in ihrer biologischen Gestalt. Mit der Entwicklung der Gentechnik stellt sich die alte Frage nach den Verhältnissen der Stoffe untereinander auf neue Weise, denn nun ist die Informationsverarbeitung immer schon mit im Spiel. In der Tat haben Debatten um das Verhältnis von Code und Material das Forschungsprojekt begleitet, das der vorliegenden Publikation vorausging.³⁴ Das Und in der Formulierung ›Code und Material‹ impliziert die Frage nach der jeweiligen Modalität dieser Verbindung. Handelt es sich um eine lose Koppelung oder eine Verschmelzung? Entstehen Stoffe mit neuen Qualitäten? Auf welchen Ebenen spielt die Synthesis einer sich synthetisch nennenden Biologie, in der Verbindun-

33 | Claude Lévi-Strauss, Michel Serres u.a.: Diskussion (1977), in: Jean-Marie Benoist (Hg.): *Identität. Ein interdisziplinäres Seminar unter Leitung von Claude Lévi-Strauss*, Stuttgart: Klett 1980, 37- 47, S. 37.

34 | Forschungsverbund *Verkörpernte Information: ›Lebendige‹ Algorithmen & Zelluläre ›Maschinen‹ – Konzepte und Bilder der ›Converging Technologies‹*. Er wurde von 2009 bis 2012 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert und verband Teams der Freien Universität Berlin und der Kunsthochschule für Medien Köln, in Kooperation mit ForscherInnen des Centre for Economic and Social Aspects of Genomics der Universität Lancaster und des philosophischen Instituts der Universität Helsinki. www.fu-berlin.de/embodyedinformation.

gen/Trennungen von Maschinen, Codes und Praktiken immer schon vorausgesetzt sind?

Die Selbstbeschreibungen der Wissenskulturen differieren. Nach langen Phasen eines analytischen Selbstverständnisses scheint zu Beginn des 21. Jahrhunderts ein Wechsel stattzufinden: vom Analytischen zum Synthetischen. An eben dieser Stelle tritt das irrlichternde Wort ›und‹ in Erscheinung. Keine Synthese ohne ein Und. Das Wort markiert die Brüchigkeiten in dem Übergang zu jenem Neuen, das die Synthetische Wissenschaft verspricht.

3. Mathematik als Phänomentechnik der Synthese

Gabriele Gramelsberger

3.1 EINLEITUNG

Interpretiert man die Synthese als Überschreitung des Bestehenden, indem neue Kombinationen und Rekonfigurationen von theoretischen Konzepten erforscht und im Labor synthetisiert werden, dann lassen sich die aktuellen Entwicklungen in Biologie, Chemie und Materialwissenschaften als Praktiken der Wirklichkeitserzeugung verstehen. Diese Praktiken der Wirklichkeitserzeugung zeigen sich materiell im Entstehen zuvor nicht existierender Materialien, Moleküle und Mikroorganismen.¹ Neben den technowissenschaftlichen Konzepten der heutigen Wissenschaftsphilosophie hat bereits Anfang des 20. Jahrhunderts Gaston Bachelard eine Philosophie formuliert, die als erste der wissenschaftlichen Wirklichkeitserzeugung und dem technisch-konstruktiven Charakter der Wissenschaft Rechnung trägt.² Denn für Bachelard sucht die Wissenschaft

»im Experiment [...] nach Möglichkeiten, das Konzept zu komplizieren, es gegen den Widerstand des Konzeptes anzuwenden, um so die Anwendungsbedingungen zu verwirklichen, die die Wirklichkeit nicht zustande gebracht hat. An diesem Punkt merkt man, daß die Wissenschaft ihre Objekte verwirklicht, ohne sie jemals ganz fertig vorzufinden. Die Phänome-

1 | Zwar erzeugt Technik per se neue Entitäten, doch zeichnen sich die neuen Syntheseentitäten durch eine andere Forschungslogik aus. Vgl. in diesem Band Kapitel 1 Einleitung – Synthesis. Neue Logik der Forschung sowie Abschnitt 3.4.

2 | Vgl. Gaston Bachelard: *Der neue wissenschaftliche Geist* (1934), Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1988; Gaston Bachelard: *Die Bildung des wissenschaftlichen Geistes. Beitrag zu einer Psychoanalyse der objektiven Erkenntnis* (1938), Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1987; Gaston Bachelard: *Die Philosophie des Nein. Versuch einer Philosophie des neuen wissenschaftlichen Geistes* (1940), Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1978.

notechnik erweitert die Phänomenologie. Ein Konzept wird in dem Maße wissenschaftlich, wie es technisch wird, wie mit ihm eine Technik der Verwirklichung einhergeht.«³

Experimente in diesem Sinne verstanden sind ›realisierte Theorien‹ und die daraus resultierenden Phänomene tragen die ›Prägemale‹ der Theorie in sich.⁴ Die Bestandssphäre der Phänomenotechnik der Wissenschaft charakterisiert sich durch diese Prägemale und deren rationale und ›surrational‹ Verfassung.⁵ Schon Immanuel Kant beschrieb diesen technischen Konstruktivismus der Wissenschaft als Nötigungscharakter. Etwa, wenn »Galilei seine Kugel die schiefe Fläche mit einer von ihm selbst gewählten Schwere herabrollen, oder Toreicelli die Luft ein Gewicht, was er sich zum voraus dem einer ihm bekannten Wassersäule gleich gedacht hatte, tragen ließ«.⁶ Dabei wurde den Naturforschern, so Kant, klar, dass die »Vernunft nur das einsieht, was sie selbst nach ihrem Entwurf hervorbringt,« und dem Philosophen wird klar, »daß sie [Naturforscher] mit Prinzipien ihrer Urteile nach beständigen Gesetzen vorgehen und die Natur nötigen müsse[n] auf ihre Fragen zu antworten«.⁷

Ein aktuelles Beispiel des phänomenotechnischen Potenzials der Wirklichkeitserzeugung geben die Materialwissenschaftler Martin Jansen und J. Christian Schön in diesem Band.⁸ »Grundlage unseres Ansatzes«, schreiben sie, »ist die Projektion der gesamten Welt der bekannten und der noch nicht hergestellten, aber existenzfähigen chemischen Verbindungen auf eine Energielandschaft.«⁹ Diese im Computer als Konfigurationsraum realisierte Energielandschaft ordnet jedem Punkt eine Atomkonfiguration zu, »und alle Atomkonfigurationen, die gemeinsam eine lokal ergodische Region auf der Beobachtungszeitskala bilden, stellen in ihrer Gesamtheit eine existenzfähige (meta)stabile chemische Verbindung auf dieser Zeitskala dar.«¹⁰ Nicht jede potenziell mögliche Atomkonfiguration ist tatsächlich realisierbar. Die Idee dieses neuen, da deduktiven Paradigmas der bisher empirisch orientierten Synthetischen Chemie und Materialwissenschaft ist die ›Herstellungsgleichung‹, dass jedem Minimum der Energielandschaft eine

3 | Bachelard, *Die Bildung des wissenschaftlichen Geistes*, 1987, S. 111.

4 | Vgl. Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 18.

5 | Zum Begriff der Surrationalität vgl. Abschnitt 3.3.

6 | Immanuel Kant: *Kritik der reinen Vernunft* (1781, 1787), (herausgegeben von Raymond Schmidt), Hamburg: Meiner 1993, Vorrede B XII.

7 | Kant, *Kritik der reinen Vernunft*, 1993, Vorrede B XIII.

8 | Vgl. in diesem Band den Beitrag Jansen, Schön, ›Design‹ in der chemischen Synthese – eine Fiktion?, 2013.

9 | Jansen, Schön, ›Design‹ in der chemischen Synthese – eine Fiktion?, in diesem Band Kapitel 7, S. 110.

10 | Jansen, Schön, ›Design‹ in der chemischen Synthese – eine Fiktion?, in diesem Band Kapitel 7, S. 110.

existenzfähige Verbindung entspricht.¹¹ »Insbesondere bei tiefen Temperaturen entspricht der Bereich um jedes Minimum der potenziellen Energie einer existenzfähigen Verbindung.«¹² Dies deckt sich mit der in der Einleitung beschriebenen Forschungslogik der Synthetischen Wissenschaften als »Analyse, Rekombination und Synthese« von Theorie, die zur Extrapolation von neuen Entitäten führt. Diese werden im Laufe der Forschung zu empirischen Entitäten mit neuen Eigenschaften, wenn sie sich im Labor synthetisieren lassen.

Die Fragen, die sich im Folgenden stellen, sind: Deckt sich das Potenzial der Wirklichkeitserzeugung der Synthetischen Wissenschaften tatsächlich mit Bachelards Phänomenotechnik? Welche Rolle kommt der Mathematik dabei zu? Lässt sich die Mathematik als Phänomenotechnik des Synthetischen verstehen, insbesondere im Zeitalter der Computereperimente?¹³ Wenn ja, wie weit trägt die Mathematik über das Empirische hinaus? Oder, mit Kant gesprochen, wie weit kann sie die »Natur« zu Antworten nötigen?

3.2 PHÄNOMENOTECHNIK(EN)

Für Bachelard ist der Charakter der Wissenschaft ein technischer, in dem Sinne als der »Modus operandi« der Wissenschaft – das Experimentieren, das Beobachten, das Messen – instrumental verfasst ist und in der Erzeugung, nicht Entdeckung von Phänomenen besteht. »Die wahre wissenschaftliche Phänomenologie,« so Bachelard, »ist daher ihrem Wesen nach Phänomenotechnik. Sie verstärkt das, was hinter dem Erscheinenden durchscheint. Sie lernt aus dem, was sie konstruiert.«¹⁴ Diese Betrachtungsweise hat verschiedene Implikationen zur Folge. Es wird deutlich, dass wissenschaftliche Objekte oder Phänomene nicht wie die der Alltagserfahrung unmittelbar gegeben, sondern instrumentell hergestellt sind. Dieser technische Realismus ist ein »Realismus zweiter Ordnung« und eine charakteristische »Eigentümlichkeit des heutigen wissenschaftlichen Denkens« mit einem »ganz anderen noumenalen Reichtum« als die Lebens-

11 | »Die einzig notwendige Voraussetzung für die Herstellbarkeit einer Verbindung ist, dass sie einem lokalen Minimum zuzuordnen ist, also mindestens kinetisch stabil ist. [...] Synthesechemie zu betreiben heißt in unserem Bild, die Landschaft der freien Enthalpie zu erkunden, was in der Vergangenheit überwiegend experimentell durch den präparativ arbeitenden Chemiker betrieben wurde.« Jansen, Schön, »Design« in der chemischen Synthese – eine Fiktion?, in diesem Band Kapitel 7, S. 111.

12 | Jansen, Schön, »Design« in der chemischen Synthese – eine Fiktion?, in diesem Band Kapitel 7, S. 110.

13 | Vgl. Gabriele Gramelsberger: *Computereperimente. Zum Wandel der Wissenschaft im Zeitalter des Computers*, Bielefeld: transcript 2010.

14 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 18.

welt.¹⁵ Der technische Realismus – als ein permanenter Prozess der Realisierung wissenschaftlicher Objekte und Phänomene verstanden – »deformiert« das (Aristotelische) Allgemeinverständliche der Lebenswelt und führt notwendigerweise zu einem epistemologischen Bruch mit der Alltagserfahrung.¹⁶ Die Deformation oder Transformation eines Objektes in ein wissenschaftliches Objekt durch seine »Problematisierung« hat Hans-Jörg Rheinberger wie folgt beschrieben:

»What is achieved in this [epistemological] act is the transformation of something that had been taken as given into a problem. A scientific object is a phenomenon that has been drawn into a cycle of rectification; it is not constituted once for ever, but it remains a scientific object only through its being constantly reconstituted and rectified. The epistemological rupture serves to mark the transition from everyday knowledge to the act of scientific thinking, while at the same time it inscribes itself into this very act and thus becomes an intrinsic hallmark of a continued scientific engagement with the world.«¹⁷

Dieser Prozess der Transformation ist kein einheitlicher, sondern implementiert unterschiedliche epistemologische Bedingungen. Dies ist sowohl zeitlich-historisch als auch methodologisch zu verstehen. Wissenschaft fragmentiert sich in epistemologische Regionen und Zeitlichkeiten. »The »electrical reality« of the nineteenth century is quite different from the electrical reality« of the eighteenth century.«¹⁸ Das hat zur Folge, dass Wissenschaftsphilosophie diesem Pluralismus Rechnung tragen und die jeweiligen epistemologischen Regionen einzeln untersuchen muss.¹⁹ Bachelard selbst versteht seinen Ansatz als »angewandten

15 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 11. »Während das Ding an sich aufgrund des Ausschlusses allen Phänomenalen ein Noumenon darstellt, scheint uns die wissenschaftliche Wirklichkeit aus einer noumenalen Struktur zu bestehen, welche die Achsen des Experimentierens zu kennzeichnen vermag. Wissenschaftliche Erfahrung ist solcherart als bestätigte Vernunft zu begreifen.« Ebd., S. 11.

16 | Vgl. Bachelard, *Die Bildung des wissenschaftlichen Geistes*, 1987, insb. Kapitel II. Das erste Hindernis: Die erste Erfahrung, S. 59ff; Bernhard Waldenfels: *Bruchlinien der Erfahrung: Phänomenologie, Psychoanalyse, Phänomenotechnik*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 2002.

17 | Hans-Jörg Rheinberger: Gaston Bachelard and the Notion of »Phenomenotechnique«, in: *Perspectives on Science*, 13(3), 2005, 313-328, S. 320.

18 | Bachelard zitiert in Rheinberger, Gaston Bachelard and the Notion of »Phenomenotechnique«, 2005, S. 326. Vgl. auch ebd., S. 316 bzgl. der epistemologischen Fragmentierung der Wissenschaft.

19 | Bachelard formuliert damit etwa zur selben Zeit wie Ludwik Fleck die Forderung nach Laborforschung. »He even went so far as to postulate that each interesting problem, each experiment, or even each equation required a philosophical reflection of its own.« Rheinberger, Gaston Bachelard and the Notion of »Phenomenotechnique«, 2005, S. 117. Darüberhinaus, muss »eine Philosophie der Naturwissenschaften, die nicht utopisch sein will,

Rationalismus«, der eine Synthese von Realismus und Rationalismus, von Erfahrung und Vernunft versucht. Da diese Synthesen je nach den epistemologischen Bedingungen veränderlich sind, sind sie nicht einfach philosophisch zu fassen.²⁰ Dennoch ist die Erfassung des Hybriden notwendig, da »der Geist der Synthese, [...] die moderne Wissenschaft beseelt« und dieser Geist besitzt »eine ganz andere Tiefe und eine größere Freiheit [...] als die cartesische Zusammensetzung.«²¹ Daher fordert Bachelard eine »nicht-Cartesianische Epistemologie«, die die Reduktion der Methode Descartes' überwindet und in der Erfassung der »Komplizierung« wissenschaftlicher Objekte und Phänomene besteht. Diese Komplizierung ist die eigentliche Aufgabe der Wissenschaft. Analog zu Ernst Cassirer sieht Bachelard die Charakteristik der modernen wissenschaftlichen Konzepte in ihrer Relationalität und Funktionalität.²² Doch die Relationalität erschöpft sich nicht im Zusammensetzen einfacher Elemente als »eins und eins« wie dies die Cartesische Epistemologie auszeichnet.²³ Vielmehr gilt es, den »Realismus des Zusammengesetzten und die Kraft der Emergenz zu beachten«, denn die moderne Naturwissenschaft »legt ihre Klarheit ins epistemologische Kombinieren und nicht in die gesonderte Betrachtung kombinierter Objekte.«²⁴

Die Tendenz zur Komplizierung zeigt sich an den reichhaltigeren Konzepten der modernen Naturwissenschaft und ihrer Logik der »Vervollständigung«, die in der »sukzessiven Approximation« der Erfahrung besteht. Moderne wissenschaftliche Begriffe sind nicht nur vollständiger, sondern allgemeiner als neuzeitliche Begriffe, denn sie umfassen mehr Anwendungsfälle und Realisierungsmöglichkeiten. Bachelard expliziert dies an verschiedenen Beispielen: an der modernen Geometrie, die einen umfassenderen Gruppenbegriff als den der Verschiebungen (Euklidische Geometrie) entwickelt, ohne den die moderne Physik nicht denkbar

[...] versuchen eine Synthese dieser drei Charakteristika [rationale, technische und soziale Objektivität] zu formulieren.« Gaston Bachelard: *Epistemologie. Ausgewählte Texte*, Frankfurt a.M.: Ullstein 1974, S. 155. Vgl. Ludwik Fleck: *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache. Einführung in die Lehre vom Denkstil und Denkkollektiv*, (1935), Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1994.

20 | Letztendlich bedarf dies einem »philosophischen Pluralismus« beziehungsweise einer »differentiellen wissenschaftlichen Philosophie [...] als Gegenstück zur integralen Philosophie der Philosophen«. Bachelard, *Die Philosophie des Nein*, 1987, S. 26 und 28.

21 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 22, 23.

22 | Vgl. Ernst Cassirer: *Substanzbegriff und Funktionsbegriff. Untersuchungen über die Grundfragen der Erkenntniskritik*, Berlin: Verlag Bruno Cassirer 1910. Vgl. auch Hans Jörg Sandkühler: *Kritik der Gewißheit. Zeitgenossenschaft – Ernst Cassirers Philosophie der symbolischen Formen und Gaston Bachelards Épistémologie*, in: Birgit Recki (Hg.): *Philosophie der Kultur – Kultur des Philosophierens: Ernst Cassirer im 20. und 21. Jahrhundert*, Hamburg: Meiner 2012, 203-232.

23 | Vgl. in diesem Band Beitrag 2 »und«. Bruchstellen im Synthetischen.

24 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 142, 143.

wäre; an der nicht-Newtonschen Mechanik, in der die Masse kein einfacher Begriff mehr ist, sondern eine Funktion der Geschwindigkeit; usf.²⁵ Entscheidend dabei ist, dass die modernen Grundbegriffe der Wissenschaft realisierte rationale Begriffe sind, abhängig vom Experiment und den verwendeten Instrumenten, die selbst ›realisierte Theorie‹ sind und den wissenschaftlichen Objekten und Phänomenen ihre ›Prägemale‹ aufdrücken.²⁶ Historisch betrachtet resultiert dies in verschiedene Stadien der Wissenschaftsentwicklung, die Bachelard von einem naiven Realismus über einen klassischen Rationalismus bis hin zum diskursiven Rationalismus der modernen Wissenschaft unterscheidet.²⁷

3.3 DIE ROLLE DER MATHEMATIK IN DEN MODERNEN WISSENSCHAFTEN

Die Arbeitsweise des ›Modus operandi‹ der Naturwissenschaften (Experimentieren, Beobachten, Messen) ist in den letzten Jahrzehnten von der Wissenschaftsforschung ausgiebig untersucht worden.²⁸ Was jedoch selten Berücksichtigung findet, ist die prinzipiell mathematische Verfasstheit der modernen Wissenschaft. Bachelard ist neben Cassirer einer der wenigen Wissenschaftsphilosophen, der die Rolle der Mathematik ausreichend würdigt. Seine *Philosophie des Nein* ist eine Philosophie der angewandten Mathematik und *Der neue wissenschaftliche Geist* ist ein mathematischer. Ziel letzteren Buches ist es aufzuzeigen, »was wir unter der Realisierung des Rationalen oder allgemeiner unter der Realisierung des Ma-

25 | Vgl. Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, insb. erstes bis viertes Kapitel; Hans Wußnig: *Die Genesis des abstrakten Gruppenbegriffes. Ein Beitrag zur Entstehung der abstrakten Gruppentheorie*, Ost-Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1969.

26 | Dies gilt aber im Grunde schon für die neuzeitliche Physik, wie von Kant als Nütigungscharakter beschrieben, doch sind die Instrumente einfacher und noch im Bereich des Anschaulichen verhaftet. Vgl. Domenico Bertoloni: *Thinking with Objects. The Transformation of Mechanics in the Seventeenth Century*, Baltimore: John Hopkins University Press 2006.

27 | Vgl. Bachelard, *Die Philosophie des Nein*, 1987, S. 55ff; Ernst Cassirer: *Philosophie der Symbolischen Formen* (1923, 1924, 1929), 3 Bde., Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1988, 1987, 1990.

28 | Vgl. beispielsweise Bruno Latour: *Science in Action*, Cambridge: Harvard University Press 1987; Hans-Jörg Rheinberger: *Experimentalsysteme und epistemische Dinge. Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas*, Göttingen: Wallenstein 2001; Karin Knorr Cetina: *Die Fabrikation von Erkenntnis. Zur Anthropologie der Naturwissenschaft*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 2002 sowie die zahlreichen Fallstudien der Science and Technology Studies (STS).

thematischen verstehen.«²⁹ Und das Ziel der *Philosophie des Nein* ist es, die Vervollständigung der modernen Wissenschaftskonzepte durch ihre Komplementierung als prinzipiell mathematische zu rekonstruieren. Es ist die Diskursivität des ›diskursiven Rationalismus‹ der modernen Wissenschaft, die aus der Mathematik resultiert. Bachelard selbst hat die Unterschätzung der Rolle der Mathematik für die moderne Wissenschaft seitens der Philosophie kritisiert. »Immer wieder ist gesagt worden«, schreibt er 1934,

»die Mathematik sei eine Sprache, ein bloßes Ausdrucksmittel. Man hat sich daran gewöhnt, in ihr ein Werkzeug zu erblicken, ein Werkzeug im Dienste einer ihr selbst bewußten, mit vormathematischer Klarheit ausgestatteten, über reine Ideen gebietende Vernunft. Eine solche Segmentierung mag an den Ursprüngen des wissenschaftlichen Geistes sinnvoll gewesen sein, als die ersten anschaulichen Bilder noch suggestive Kraft hatten und zum Aufbau von Theorien beitrugen. [...] In den neuen Doktrinen dagegen hat der wissenschaftliche Geist, indem er sich von den naiven Bildern entfernt, in gewisser Weise größere Homogenität erlangt; hier ist er gänzlich präsent in seiner mathematischen Aktivität. Oder genauer noch: Die mathematische Aktivität ist die eigentliche Achse der Entdeckung; nur der mathematische Ausdruck ermöglicht es, das Phänomen zu denken.«³⁰

Präziser kann die Rolle der Mathematik für die moderne Forschung nicht beschrieben werden. Die Frage nun ist, wie die mathematische Aktivität im Prozess der wissenschaftlichen Realisierung genau zu verstehen ist? Bachelard hat dies anhand zahlreicher Beispiele verdeutlicht. Am eindrucksvollsten ist vielleicht seine Darstellung der Mechanik von Paul Dirac und dessen Begriff der negativen Masse, der die Physik komplementär vollendet. Dieser Begriff, so Bachelard, wäre für die Physiker des 19. Jahrhunderts undenkbar gewesen. Anders die Physik des 20. Jahrhunderts, die der Logik des ›warum nicht‹ folgt und nach der Möglichkeit der Legitimierung eines solchen Begriffs im Experiment fragt und damit der Realisierung den Vorrang vor der Realität gibt. Dies gilt auch für den Begriff der negativen Energie.³¹ Was hier durch das mathematische Konzept negativer Größen in der Wissenschaft zum Ausdruck kommt – und das ist nur ein Beispiel, wenn auch ein sehr eingängiges – ist die Dialektik des diskursiven Rationalismus, der als ›Surrationalismus‹ über den klassischen Rationalismus hinausführt, indem er seinen ›anagogischen Träumen‹ nachgeht. Denn

29 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 10.

30 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 57.

31 | Vgl. Bachelard, *Die Philosophie des Nein*, 1987, S. 48ff. »Seine [Diracs] ingeniose Interpretation [der negativen Energie] konnte zunächst als rein geistige Konstruktion erscheinen. Aber die experimentelle Entdeckung des positiven Elektrons durch Blackett und Occialini brachte schon bald eine unerwartete Bestätigung der Auffassung Diracs.« Ebd., S. 51.

»das anagogische Träumen ist in seinem gegenwärtigen wissenschaftlichen Elan nach unserer Auffassung ganz wesentlich von der Mathematik bestimmt. Es strebt nach mehr Mathematik, nach komplexeren, zahlreicheren mathematischen Funktionen. Verfolgt man die Bemühungen des zeitgenössischen Denkens um ein Verständnis des Atoms, dann hat man den Eindruck, als bestände die Hauptrolle des Atoms darin, die Menschen zu zwingen, Mathematik zu treiben.«³²

Die vormals durch anschauliche Bilder transportierte Klarheit der Cartesischen Epistemologie wird in der modernen Wissenschaft durch die »operative Klarheit« der Mathematik ersetzt. In der Sprache Cassirers: »Das axiomatische Denken der Mathematik ist es, das selbst erst die möglichen Subjekte« der modernen Forschung setzt.³³

Ein weiteres Beispiel Bachelards ist die durch die Tensorrechnung ermöglichte Allgemeinheit der Physik.³⁴ So wie das Mikroskop die Mikrobiologie hervorbrachte, so bringt die Tensorrechnung erst die moderne Physik hervor.³⁵ Das entscheidend Neue dabei ist, dass die Tensorrechnung nicht einfach nur ein neues Darstellungsmittel ist, sondern als solches eine völlig neue Generalisierungsfähigkeit ermöglicht und damit eben eine neue Physik. Diente die Generalisierung bislang der Zusammenfassung der empirischen Induktion, so bezeichnet in der »neuen relativistischen Wissenschaft [...] ein einziges mathematisches Symbol mit mannigfaltiger Bedeutung die tausend Merkmale einer verborgenen Realität; das Denken ist [keine Zusammenfassung abgeschlossener Erfahrung mehr, sondern] ein

32 | Bachelard, *Die Philosophie des Nein*, 1987, S. 53.

33 | Ernst Cassirer: *Philosophie der Symbolischen Formen: Phänomenologie der Erkenntnis* (1929), 3. Bd., Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1990, S. 471. Ganz ähnlich argumentiert Bachelard, beispielsweise wenn er schreibt, dass die Quantentheorie »diese Debatte [des Entdeckens der Grundbegriffe] übrigens auf unerwartete Weise beenden [könnte], indem sie ganz neue Prinzipien für die mathematische Definition von Erfahrungsbegriffen bereitstellt.« Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 161.

34 | Ein Tensor lässt sich als eine mehrdimensionale Matrix vorstellen. Eine Zahl ist ein Tensor 0-ter Stufe, Vektoren sind Tensoren erster Stufe und eine Matrix ist ein Tensor 2-ter Stufe. Beispielsweise ist der mechanische Spannungstensor ein Tensor 2-ter Stufe (Stärke der Spannung). 1890 entwickeln Gregorio Ricci-Curbastro und Tullio Levi-Civita die Tensorrechnung für Riemannsche Mannigfaltigkeiten, auf die später Albert Einstein zur Formulierung seiner allgemeinen Relativitätstheorie zurückgreift. Vgl. Adalbert Duschek: Der Tensorbegriff und seine Bedeutung für die Physik: Die geometrischen Grundlagen, in: *Physikalische Blätter*, 10(9), 1954, 389-395; Adalbert Duschek: Der Tensorbegriff und seine Bedeutung für die Physik: Tensoralgebra, in: *Physikalische Blätter*, 10(10), 1954, 436-444; Adalbert Duschek: Der Tensorbegriff und seine Bedeutung für die Physik: Tensoranalysis, in: *Physikalische Blätter*, 11(5), 1955, 203-215.

35 | Vgl. Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 57f.

Programm zur Realisierung von Erfahrung.«³⁶ Die mathematische Möglichkeit ist den Phänomenen nicht beigelegt, sondern konstituiert diese und gehört für Bachelard deshalb zum realen Phänomen, selbst wenn dies der unmittelbaren Erfahrung widerspricht. Ohne die mathematische Möglichkeit wären die empirischen Erkenntnisse nur in einem ungeordneten Nebeneinander denkbar. Es sind nicht die empirischen Erkenntnisse selbst, die mathematisch sind, sondern ihre rationale Zusammenstellung, die eben auch dem dialektischen ›warum nicht‹ folgen kann. Moderne Wissenschaft, so Bachelard, geht über einen naiven Realismus hinaus, weil sie dank der Mathematik alle ›Erfahrungsmöglichkeiten‹ denkt und in experimentelle Möglichkeiten umsetzt. Dies gilt umso mehr für die Bereiche der modernen Forschung, die einer direkten Erfahrbarkeit nicht mehr zugänglich sind. Das

»Mögliche [ist] gleichsam an das Reale herangerückt, hat einen Ort und eine Funktion in der Organisation von Erfahrung erlangt. [...] Von dieser mathematischen Organisation der experimentellen Möglichkeiten kehrt man auf sehr viel geraderen Wegen zur Erfahrung zurück. Und die Realität findet sich als Spezialfall des Möglichen wieder.«³⁷

Was Bachelard hier beschreibt, ist der Umkehrprozess, der sich in der modernen Wissenschaft und ihrer hypothetisch-deduktiven Forschungslogik vollzieht. Dieser Umkehrprozess lässt sich nicht als kontinuierliche Entwicklung von der Newtonschen zur relativistischen Physik verstehen, sondern stellt einen Bruch dar.³⁸

Wie sich das Wechselspiel zwischen mathematischer Erfahrungsmöglichkeit und wissenschaftlicher Realisierung vollzieht und dass die mathematischen Erfahrungsmöglichkeiten nicht beliebig oder fiktiv sind, sondern letztendlich immer die experimentellen Umsetzungen organisieren, zeigt die Debatte um die beobachtbaren Größen zu Beginn der Quantentheorie. Es ist Werner Heisenberg, der 1925 formuliert, dass

»die formalen Regeln, die allgemein in der Quantentheorie zur Berechnung beobachtbarer Größen (z.B. der Energie im Wasserstoffatom) benutzt werden [...] Beziehungen enthalten zwischen Größen, die scheinbar prinzipiell nicht beobachtet werden können (wie z.B. Ort, Umlaufzeit des Elektrons), daß also jenen Regeln offenbar jedes anschauliche physikalische Fundament mangelt, wenn man nicht immer noch an der Hoffnung festhalten will, daß

36 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 59. »Die Tensorrechnung verlangt, daß wir nichts vergessen [...] Wir haben es hier mit einer rationalen Erweiterung des cartesischen Verfahrens mnemotechnischer Aufzählung zu tun.« Ebd., S. 59.

37 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 61.

38 | Allerdings unterschätzt Bachelard die konstruktive Rolle der Mathematik in der neuzeitlichen Physik. Vgl. Immanuel Kant: *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft* (1786), (hg. von Wilhelm Weischedel), Meiner: Hamburg 1983; Peter Dear: *Disciplines & Experience. The Mathematical Way in the Scientific Revolution*, Chicago: Chicago University Press 1995.

jene bis jetzt unbeobachtbaren Größen später vielleicht experimentell zugänglich gemacht [...] als Abweichungen von der klassischen Mechanik«

interpretiert werden können.³⁹ Sein Vorschlag ist es daher, jede Hoffnung auf zukünftig mögliche Beobachtbarkeit fallen zu lassen und stattdessen eine quantentheoretische Mechanik mathematisch zu formulieren, die nur die beobachtbaren Größen enthält.⁴⁰ Er reformuliert die klassische Darstellungsweise durch eine quantentheoretische, die dann von Max Born und Pascual Jordan mathematisch ausformuliert wird. Born und Jordan beschreiben Heisenbergs Ansatz wie folgt:

»Sie bedeuten einen Versuch, den neuen Tatsachen – statt durch mehr oder weniger künstliche und gezwungene Anpassung an alte gewohnte Begriffe – durch die Schaffung eines neuen, wirklich angemessenen Begriffssystems gerecht zu werden. Heisenberg hat die physikalischen Gedanken, die ihn dabei geleitet haben, in so klarer Weise ausgesprochen, daß jede ergänzende Bemerkung überflüssig erscheint. Aber in formaler, mathematischer Hinsicht sind seine Betrachtungen, wie er selbst betont, erst im Anfangsstadium.«⁴¹

Ihre mathematische Formulierung nun besteht in der Ausgestaltung eines neuen Formalismus für die Physik, insofern sie das von Heisenberg formulierte Multiplikationsgesetz quantentheoretischer Größen als »den Mathematikern wohlbekanntes Gesetz der Multiplikation von Matrizen« erkennen und die Matrize als »Repräsentant einer physikalischen Größe [interpretieren], die in der klassischen Theorie als Funktion der Zeit angegeben wird.«⁴² Denn genau dieser funktionelle Zusammenhang mit der Zeit lässt sich in der Quantentheorie nicht mehr beobachten. Die klassische Mathematik, die sich mit Isaac Newtons und Wilhelm Leibniz' Infinitesimalkalkül und später mit Leonard Eulers Differenzialrechnung zum Darstellungsinstrument physikalischer Prozesse veränderlicher Größen par excellence entwickelt hat, versagt angesichts der nicht gleichzeitigen Beobachtbarkeit von Ort und Bewegung in der Quantenphysik. Wie Heisenberg darlegt, ist dies keine Schwäche der wissenschaftlichen Realisierung im Experiment, sondern eine prinzipielle Grenze wissenschaftlicher Beobachtung. Mehr noch, der stetige Charakter klassischer physikalischer Prozesse, der sich anschaulich in Kurvenverläufen von

39 | Werner Heisenberg: Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen (1925), in: Max Born, Werner Heisenberg, Pascual Jordan: *Zur Begründung der Matrizenrechnung*, (hg. von Armin Hermann), Stuttgart: Battenberg 1962, 31-45, S. 31.

40 | Das Erkenntnisparadigma, dass alle Größen einer Theorie beobachtbar sein müssen, wurde von Albert Einstein 1905 eingeführt. Vgl. Peter Mittelstaedt: *Philosophische Probleme der modernen Physik*, Mannheim u.a.: Bibliographisches Institut 1981, insb. Kap. II.

41 | Max Born, Pascual Jordan: *Zur Quantenmechanik* (1925), in: Born, Heisenberg, Jordan, *Zur Begründung der Matrizenrechnung*, 1962, 46-76, S. 46.

42 | Born, Jordan, *Zur Quantenmechanik*, 1962, S. 47.

zeitabhängigen Funktionen zeigt – und eben die mathematische Meisterung des stetig Krummlinigen als Bahn oder Trajektorie in der Zeit war der Verdienst des Infinitesimalkalküls von Newton und Leibniz –, wird durch die Quantensprünge ausgehebelt.⁴³ Heisenbergs Verdienst ist es, »die Idee von Elektronenbahnen mit bestimmten Radien und Umlaufperioden« zu verbannen, »weil diese Größen nicht beobachtbar« sind.⁴⁴ Statt Bewegung als Zeitfunktion bedarf es der mathematischen Beschreibung eines durch die Multiplikationsregel gewonnenen quadratischen Schemas von Übergangsamplituden. Dies bedarf aber eines diskreten Formalismus, der die Wahrscheinlichkeit der Übergänge von einem Zustand in den nächsten darstellbar macht. Die mathematische Erfahrungsmöglichkeit der Quantenmechanik fordert die »Benutzung einer Matrizenanalyse an Stelle der gewöhnlichen Zahlenanalyse,« wobei die »Quadrate der Beträge der Elemente der das elektrische Moment eines Atoms darstellenden Matrix das Maß [...] für die Übergangswahrscheinlichkeit« sind.⁴⁵ Der neue Formalismus ermöglicht nicht nur die Erklärung zahlreicher experimenteller Befunde, sondern eröffnet neue experimentelle Realisierungen. Eines der Resultate der ausformulierten Theorie ist, dass Verbote der bisherigen Theorie bezüglich einzelner stationärer Zustände des Wasserstoffs, damit Kern und Elektron nicht zusammenstoßen, nicht mehr nötig sind.⁴⁶ D.h. die neue Theorie ist vollständiger als die alte.

Das Interessante an der frühen Phase der Quantentheorie Mitte der 1920er Jahre ist, dass binnen eines Jahres drei konkurrierende mathematische Forma-

43 | Nils Bohr zollte der Stetigkeit der klassischen Mechanik mit seinem Korrespondenzprinzip Rechnung, indem er für große Quantenzahlen und geringfügige Energieänderungen diese als kontinuierlich begriff, um damit die klassische Mechanik als Approximation beibehalten zu können. Da aber Schwingung neben der Frequenz auch Intensität hat, d.h. die stationären Zustände entsprechen einer charakteristische Frequenz und aus dieser lässt sich die Intensität »erraten«, versagt hier, wie Einstein zeigte, Bohrs Korrespondenzprinzip und damit die Analogie zur klassischen Mechanik und ihrer Mathematik. Denn Einstein konnte »durch eine neue Ableitung der Planckschen Strahlungsformel« zeigen, »dass man den klassischen Begriff der Intensität der Ausstrahlung durch den statistischen Begriff der Übergangswahrscheinlichkeit ersetzen muss: zu jedem Platz in unserem Schema [Energiestufen der stationären Zustände der Elektronen] gehört (neben der Frequenz $\nu_{mn} = (E_u - E_m)/h$) eine bestimmte Wahrscheinlichkeit für den Übergang unter Ausstrahlung oder Einstrahlung.« Max Born: Die statistische Deutung der Quantenmechanik (Nobelvortrag gehalten am 11.12.1954), in: Born, Heisenberg, Jordan, *Zur Begründung der Matrizenrechnung*, 1962, 1-12, S. 3.

44 | Born, Die statistische Deutung der Quantenmechanik, 1962, S. 4.

45 | Born, Jordan, *Zur Quantenmechanik*, 1962, S. 47 und 48.

46 | Vgl. Max Born, Werner Heisenberg, Pascual Jordan: *Zur Quantenmechanik II* (1925), in: Born, Heisenberg, Jordan, *Zur Begründung der Matrizenrechnung*, 1962, 77-135, S. 120; Werner Heisenberg: Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik, in: *Zeitschrift für Physik*, 43, 1927, 172-198.

lisierungen auftreten. Die Matrizenrechnung von Heisenberg, Born und Pascal, Paul Diracs Formalismus nicht-kommutativer Symbole sowie Erwin Schrödingers Wellenfunktion, der damit einen Anschluss an die klassische Mechanik versucht und zeigt, dass Matrizen- und Wellenmechanik äquivalent sind. Es ist Heisenbergs statistische Deutung von Schrödingers Wellenfunktion von 1927, die seine Ungenauigkeitsrelation enthält, die der neuen Quantentheorie schließlich zum Durchbruch verhilft.⁴⁷ Aus dieser Erfahrung des Bruches mit der klassischen Mechanik gewinnt Born 1954 in seinem Nobelvortrag die Einsicht für die neu entstehende Elementarteilchenphysik, »dass vermutlich Verfeinerung der mathematischen Methoden nicht ausreichen wird, [...] sondern dass irgendwo in unserer Lehre ein durch keine Erfahrung gerechtfertigter Begriff steckt, den wir eliminieren müssen, um freie Bahn zu gewinnen.«⁴⁸ Das Spiel zwischen mathematischer und experimenteller Realisierung eröffnet sich also auf ein Neues. Dies bestätigt Bachelards ›differenzielle Philosophie‹ des epistemologischen Bruchs sowie der epistemologischen und historischen Regionen. Es zeigt aber auch, dass mathematische und wissenschaftliche Realisierung nicht unabhängig voneinander sind, sondern sich gegenseitig bedingen: Die mathematische Aktivität als die ›eigentliche Achse der Entdeckung‹ muss sich ändern, wenn dies die wissenschaftliche Realisierung durch das Experiment erfordert; hat die mathematische Aktivität ›freie Bahn‹ ermöglicht sie eine Vielzahl von Entdeckungen durch die neue Organisation der experimentellen Realisierung.

3.4 MATHEMATIK ALS PHÄNOMENOTECHNIK DES SYNTHETISCHEN

Grundsätzlich versteht Bachelard die Rolle der Mathematik in der modernen Wissenschaft als synthetische. Damit stellt er sich gegen die gängige Meinung der Philosophie, die mit der Formalisierung, Logisierung und Axiomatisierung der Mathematik den analytischen Charakter der Mathematik bestätigt sieht – allen voran Gottlob Frege.⁴⁹ Die Favorisierung des synthetischen Charakters der Mathematik generiert sich aus Bachelards nicht-Cartesischer Epistemologie, die eben nicht im logischen Zusammenfügen von einfachen Elementen besteht, sondern in der Vervollständigungstendenz der Begriffe als komplementäre, die der Logik des ›warum nicht‹ folgen. Diese modernen, da komplementären Begriffe lassen sich nur aus der mathematischen Beschreibung generieren, aus welcher sich die Relationalität der wissenschaftlichen Phänomene wie die Organisation ihrer experimentellen Realisierung ableiten. Dabei verdankt »die mathematische Beschreibung [...] ihre Klarheit nicht ihren Elementen, sondern ihrem Abschluß

⁴⁷ | Vgl. Born, Die statistische Deutung der Quantenmechanik, 1962, S. 5ff.

⁴⁸ | Born, Die statistische Deutung der Quantenmechanik, 1962, S. 12.

⁴⁹ | Vgl. Gottlob Frege: *Die Grundlagen der Arithmetik. Eine logisch mathematische Untersuchung über den Begriff der Zahl* (1884), (hg. von Christian Thiel), Hamburg: Meiner 1988.

in einer Art Wissen um ihren synthetischen Wert.«⁵⁰ Generiert sich der Wert der Analytik Descartes aus der Abstraktion und damit aus der Entfernung von den Objekten, so zeigt sich der neue wissenschaftliche Geist in der »geistigen Modifikation, die aus den sukzessiven Approximationen der Erfahrung resultiert, insbesondere wenn solche Approximationen in fortgeschrittenen Stadien einen Reichtum offenbaren, der aus der ersten Information nicht zu ersehen war. Das gilt zum Beispiel für die Einsteinsche Konzeption, deren Reichtum und Komplexität mit einem Male die Armut der Newtonschen Auffassung hervortreten lässt.«⁵¹ Dies lässt sich schriftbildlich an den wesentlich komplexer aussehenden mathematischen Gleichungen der modernen Wissenschaft erkennen, aber auch inhaltlich an den Operatoren, die sie enthalten und die mögliche Übergangsprozesse von Anfangs- zu Endzuständen unter Berücksichtigung zahlreicher Faktoren formulieren.⁵² Im Unterschied dazu beschreibt die klassische Physik in der Tradition des Newtonschen Determinismus »metaphysisch« wie mathematisch einen eindeutig festgelegten Übergangsprozess von einem absolut bestimmbarsten Anfangsstand ausgehend – eine experimentell nicht realisierbare Annahme – in einen dadurch determinierten Endzustand.⁵³ Die Form deterministischer Gleichungen generiert sich dabei aus der Anschauung der stetigen Linie der Euklidischen Geometrie.⁵⁴

50 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 141.

51 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 141, 142.

52 | Vgl. Jun John Sakurai: *Modern Quantum Mechanics*, Boston: Addison-Wesley 1993.

53 | Born hat dies in seinem Nobelvortrag treffend zum Ausdruck gebracht: »Die Newtonsche Mechanik ist deterministisch in folgendem Sinne: Wenn der Anfangszustand (Lagen und Geschwindigkeit aller Teilchen) eines Systems genau gegeben sind, so lässt sich aus den mechanischen Gesetzen der Zustand zu jeder anderen Zeit (früher oder später) berechnen. Nach diesem Vorbild sind alle anderen Zweige der klassischen Physik aufgebaut worden.« Dies erfordert aber »die Möglichkeit absolut exakter Messung« des Anfangszustandes, um den Endzustand exakt vorherzusagen. »Hat es aber einen Sinn, ich meine: einen physikalischen, nicht metaphysischen Sinn, von absoluten Angaben zu sprechen?« Wohl kaum, d.h. »man muss auch die gewöhnliche Mechanik statistisch formulieren. [...] Der Determinismus der klassischen Physik erweist sich als Trugbild.« Born, *Die statistische Deutung der Quantenmechanik*, 1962, S. 9 und 10.

54 | Die Form deterministischer Gleichungen generiert sich aus der geometrischen Anschauung. Bachelard hat dies an der klassischen Darstellung der Streuung von Licht an Teilchen deutlich gemacht, die als Spiegelung interpretiert zu Lord Rayleighs Streuungsgleichung von 1897 führte. Analog »spiegelt« sich dies in der Gleichung wider: Licht »prallt« von einem Gasmolekül, das als elastisch schwingender Körper interpretiert wird, in Form einer Kugelwelle in alle Richtungen zurück. Vgl. Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 73ff. Im Unterschied dazu ist eine erste quantentheoretische Interpretation, »nicht an die Anwesenheit von elastisch schwingenden Elektronen geknüpft, sondern an Übergänge von einem stationären Zustand nach einem anderen.« Hendrik Kramers, Werner Heisenberg:

Folgt man also Bachelards Auffassung vom Synthesecharakter der Mathematik für die moderne Wissenschaft, dann ist die Mathematik die Phänomentechnik der Synthese par excellence. Sie erst bringt neue Möglichkeiten der wissenschaftlichen Realisierung hervor. Die Charakteristik dieser Hervorbringung ist ihre prospektive Verfassung. Nicht die retrospektive Interpretation und Cartesische Abstraktion des empirisch Gegebenen, sondern die prospektive Hervorbringung des empirisch Konstruierten ist ihre Leistung. Deutlich wird dies an den Prognosen von Elementarteilchen allein auf Basis mathematisch-symmetrischer Vorhersagen der Gruppentheorie, aber besonders eindrucksvoll belegt sich diese Leistung aktuell in den Synthetischen Wissenschaften. Ähnlich wie die modernen quantenmechanischen Operatoren die Spektren möglicher Übergangsprozesse von Anfangs- zu Endzuständen zusammenfassen, birgt das Beispiel der Energielandschaft der Synthetischen Chemie die vollständige Formulierung der noch nicht hergestellten, aber existenzfähigen chemischen Verbindungen in sich. Und ähnlich wie in der Quantenmechanik sind die mathematischen Erfahrungsmöglichkeiten chemischer Verbindungen nicht beliebig oder fiktiv.⁵⁵

Selbiges gilt auch für die Synthetische Biologie, die die Prozesse biomolekularer Netzwerke designt, auch wenn die Bezeichnung dieser synthetischen Netzwerke als »Biobricks« oder »Device« einen objekthaften Charakter unterstellt. Das als erstes synthetisches Design der Synthetischen Biologie gewertete Device des »Repressilator« imitiert einen Oszillator.⁵⁶ Möglich ist dies, da Zellen in ihrem Verhalten durch Rückkopplungsprozesse organisiert und die Designprinzipien von Oszillatoren (negative und positive Rückkopplungen) seit dem 17. Jahrhundert bekannt sind.⁵⁷ Daher liegt es für die Synthetische Biologie nahe, Biobricks und Devices zu konstruieren, die sich an physikalisch-mathematischen Modellen von Feedbackmechanismen orientieren. Denn, »the »design principles« underlying the functioning of such [natural] intracellular networks remain poorly understood [... Therefore] we present a complementary approach to this problem: the design and construction of a synthetic network [repressilator] to implement a particular function.«⁵⁸ Der Rückkopplungsprozess des Repressilator basiert dabei auf der zeitlichen Oszillation in der Konzentration von drei Repressorproteinen:

Über die Streuung von Strahlung durch Atome, in: *Zeitschrift für Physik A*, 31(1), 1924, 681-708, S. 682.

55 | Vgl. dazu Abschnitt 3.5.

56 | Vgl. Michael B. Elowitz, S. Leibler: A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators, in: *Nature*, 403, 2000, 335-338.

57 | Vgl. Albert Goldbeter: Mechanism for oscillatory synthesis of cyclic AMP in Dictyostelium discoideum, in: *Nature*, 253, 1975, 540-542; Rene Thomas, R. D'Ari: *Biological Feedback*, Boca Raton, Florida: CRC Press 1990.

58 | Elowitz, Leibler, A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators, 2000, S. 335.

»The first repressor protein, LacI from E.coli, inhibits the transcription of the second repressor gene, tetR from the tetracycline-resistance transposon Tn10, whose protein product in turn inhibits the expression of a third gene, cI from λ phage. Finally, CI inhibits lacI expression, completing the cycle.«⁵⁹

Um ein solches oszillierendes, biomolekulares Netzwerk im Labor zu synthetisieren, ist jedoch die mathematische Modellierung unabdingbar, um eine Analyse und Prognose des geeigneten Parameterbereichs durchführen zu können.⁶⁰ Denn Oszillation als Verhalten stellt sich nur unter spezifischen Bedingungen ein. Die Erkundung der mathematischen Erfahrungsmöglichkeiten im Computermodell, um eine Realisierung im Labor wahrscheinlich werden zu lassen, ist daher die Voraussetzung für die Synthese eines solchen artifiziell organisierten Netzwerkes. Durch die mathematische Analyse wissen die Forscher, was im Labor zu tun ist: »to increase the chances that the artificial network would function in the oscillatory regime two alterations to »natural components« were made.«⁶¹ Diese beiden Modifikationen bestehen in der Verwendung eines »Promoters«, ein Biobrick, das die Transkription bestimmter Gene initiiert. Dieser Promoter, bereits 1997 konstruiert, beschleunigt die Gentranskription enorm.⁶² Des Weiteren bedarf es der Einfügung eines »Tags« in das Design, um die Lebenszeit eines Proteins näher an die von mRNA anzugleichen, indem diese von Stunden auf 2 Minuten reduziert wird. »With these considerations in mind, we used standard molecular biology techniques to construct a low-copy plasmid encoding the repressilator.«⁶³ Tatsächlich zeigten 40 Prozent der Zellen so etwas wie ein Oszillationsverhalten, das sich aber nach einer Weile auflöste.

Dies ist nur eines von vielen Beispielen der mathematischen Ermöglichung neuer Designs. Die technischen Modifikationen lebender Zellen sind offensichtlich. Dabei ist die Grundannahme, dass Rückkopplungsprozesse in Organismen wie Oszillatoren funktionieren bereits eine mathematische, denn kaum ein Prozess ist mathematisch besser handhabbar als ein Oszillator. Tatsächlich lässt sich der Oszillator als universelles mathematisches Realisierungsmotiv auffassen, das seit der klassischen Mechanik über die Elektrodynamik bis hin zur Quantentheo-

59 | Elowitz, Leibler, A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators, 2000, S. 335.

60 | Die Oszillation hängt von bestimmten Raten der Transkription der Repressorprotein-Konzentration, der Translationsrate sowie der Abnahmerate der Proteine und der mRNA ab.

61 | Elowitz, Leibler, A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators, 2000, S. 335.

62 | Vgl. Rolf Lutz, H. Bujard: Independent and tight regulation of transcriptional units in Escherichia coli via the LacR/O, the TetR/O and AraC/I1-I2 regulatory elements, in: *Nucleic Acids Research*, 25, 1997, 1203-1210.

63 | Elowitz, Leibler, A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators, 2000, S. 335.

rie – die quantenmechanische Orientierung am Modell des harmonischen Oszillators generiert sich dabei aus dem »Umstand, daß die elektromagnetischen Grundgleichungen linear sind (Superpositionsprinzip)«⁶⁴ – die Wissenschaft beherrscht. Für die experimentelle wie computersimulierte Realisierung hat der Oszillator den entscheidenden Vorteil einer eindeutig identifizierbaren Phänomenologie, die den »Bildvergleich« – besser Kurvenvergleich – ermöglicht. Die Sichtbarmachung des oszillierenden Verhaltens, wie eben auf biomolekularer Ebene, ermöglicht es, den experimentellen Erfolg zu bestätigen und zu kontrollieren. Vergleicht man jedoch die Kurvenbilder der Oszillation des mathematischen Modells des Repressilators mit den experimentellen Daten des im Labor synthetisierten Repressilator, dann ist eine Oszillation für letztere nur mit viel gutwilliger Phantasie erkennbar.⁶⁵ Dies zeigt, dass der Prozess der wissenschaftlichen Realisierung in diesem Fall erst am Anfang steht. Um diesen Prozess zu beschleunigen, hat sich in den letzten Jahren eine »fast-track synthetic biology« entwickelt, die verstärkt auf die Rationalisierung und damit Mathematisierung der experimentellen Bedingungen setzt.⁶⁶ Der Begriff des »rationalen Designs« spiegelt dies wider:

»If synthetic biology is to advance, it is essential to identify techniques that increase the predictability of gene network engineering and decrease the amount of hands-on molecular biology required to get a functional network up and running. [...] Our strategy effectively moves component »tweaking« [in the laboratory] to the frontend of gene network engineering [with computers]. This arrangement is instinctively more rational than network retrofitting and is made feasible by the coupling with mathematical modeling.«⁶⁷

Umgesetzt bedeutet dies, durch mathematische Modellierung und Vorhersage eine Verbesserung der Biobricks zu erhalten. So wurden austauschbare »Timer« mathematisch modelliert und im Labor synthetisiert, die sich ähnlich technischen Komponenten nur in einem Parameterbereich voneinander unterscheiden, der Stärke des Promotors, der die Logik des Gennetzwerkes kontrolliert. Die Timer basieren dabei auf dem genetischen Netzwerkmotiv des 2000 synthetisier-

64 | Born, Jordan, *Zur Quantenmechanik*, 1962, S. 72.

65 | Vgl. Elowitz, Leibler, *A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators*, 2000, S. 336f.

66 | Tom Ellis, X. Wang, J. Collins: Diversity-based, model-guided construction of synthetic gene networks with predicted functions, in: *Nature Biotechnology*, 27(5), 2009, 465-471, S. 465. Die Synthetische Biologie wird in der Wissenschaftsphilosophie als rein empirische Wissenschaft verstanden, die im Labor »herum probiert«. Vgl. beispielsweise Maureen O'Malley: Exploration, iterativity and kludging in synthetic biology, in: *Comptes Rendus Chimie*, 14, 2011, 406-412. Doch dieses Verständnis ist nicht haltbar.

67 | Ellis, Wang, Collins, *Diversity-based, model-guided construction of synthetic gene networks with predicted functions*, 2009, S. 465 und 470.

ten ›Genetic Toggle Switch‹.⁶⁸ Das Ziel ist, »that we can quickly apply predictable networks built with our approach to control an industrially relevant phenotype. Such accurate control of flocculation timing provides a wide window of opportunity to harvest fermentation product from cells and could be applied to improve biomass recycling in the biofuels industry.«⁶⁹ Auf diese Weise soll das ›Engineering of Biology‹ praktikabler werden.⁷⁰

3.5 DESIGN ALS NÖTIGUNG?

Die abschließende Frage ist die nach den Grenzen der mathematischen Erfahrungsmöglichkeiten als Bedingungen der wissenschaftlichen Realisierung. Die Erfolge der Synthetischen Biologie haben die Rede vom Design in die Wissenschaft eingeführt; insbesondere vor dem Hintergrund einer eigenartig zirkulären Verkehrung der Blickrichtung:

»It is possible that the designs of natural biological systems are not optimized by evolution for the purposes of human understanding and engineering. [...] Briefly, for biologists, the ability to design and construct synthetic biological systems provides a direct and compelling method for testing our current understanding of natural biological systems.«⁷¹

Dies entspricht der Forschungslogik der Technowissenschaften wie von Alfred Nordmann beschrieben: »Technoscience knows only one way of gaining new knowledge and that is by first making a new world.«⁷² Doch wie weit geht die Kreation neuer Welten und geben sie tatsächlich Aufschluss über ›natürliche‹ Phänomene? Folgt man Bachelard, so ist eine solche Idee naiv, denn moderne Wissenschaft kreiert schon immer ihre eigenen (Labor-)Realitäten. Dennoch scheint es ›natürliche‹ Grenzen der Nötigung durch Design zu geben. So kritisieren Jansen und Schön die Rede vom Design in der Synthetischen Chemie, da die eingangs beschriebene ›Herstellungsgleichung‹ naturgesetzlich motiviert ist. Zwar

68 | Vgl. Timothy S. Gardner, C.R. Cantor, J.J. Collins: Construction of a genetic toggle switch in *Escherichia coli*, in: *Nature* 403, 2000, 339-342.

69 | Ellis, Wang, Collins, Diversity-based, model-guided construction of synthetic gene networks with predicted functions, 2009, S. 469.

70 | Für eine detaillierte Darstellung vgl. Gabriele Gramelsberger: The Simulation Approach in Synthetic Biology, in: *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44(2), 2013, 150-157 sowie in diesem Band Kapitel 8 Unverfügbarkeit in der Synthese.

71 | Drew Endy: Foundations for engineering biology, in: *Nature*, 438, 2005, 449-453, S. 449.

72 | Alfred Nordmann: Of Landscapes and Caves and the Collapse of Distance in the Technosciences, in: *Danish Yearbook of Philosophy*, 41, 2006, 62-73, S. 63.

eröffnet sich durch die mathematisch berechnete Energielandschaft eine Vielzahl neuer, existenzfähiger chemischer Verbindungen und ein ›Random Walker‹ Programm kann stellvertretend für die Forscher die mathematische Landschaft danach durchforsten; doch dabei kann allenfalls etwas im Möglichkeitsraum entdeckt werden, so Jansen und Schön, nicht designt. Es sei die ›kombinatorische Explosion‹ der Computerchemie, die diesen falschen Eindruck der Designmöglichkeiten vermittele.⁷³

»Als besonders riskant sehen wir Vergleiche zwischen der Syntheseplanung in atomaren Dimensionen und Entwürfen und Realisierungen in der makroskopischen Welt an, wie sie gelegentlich herangezogen werden, um die Verwendung des Ausdrucks ›Design‹ in der Chemie zu veranschaulichen oder gar zu rechtfertigen. Aus Ziegelsteinen gemauerte Gebäude als Modelle für aus Strukturinkrementen aufgebaute dreidimensionale Festkörper wecken wenigstens in zweierlei Hinsicht falsche Assoziationen. Ziegelsteine sind in ihren Abmessungen über weite Bereiche, gemessen an der angestrebten Funktion, kontinuierlich durchstimmbare, die chemischen Strukturinkremente sind dies nicht. Sie sind zwar variabel, aber dies ist nicht durch den Chemiker beeinflussbar. Auch beim Zusammenfügen der makroskopischen Bausteine gibt es einen weiten, kontinuierlich nutzbaren Spielraum, die chemischen Strukturinkremente hingegen lassen sich nur in einer für eine bestimmte Kombination jeweils festgelegten und durch den Menschen unveränderbaren Weise miteinander verbinden.«⁷⁴

Diese Kritik richtet sich gegen die Grenzen der Technisierung wissenschaftlicher Objekte als ›einfache Elemente‹, die so einfach nicht sind. Das Abstraktionsziel der einfachen Wesenheiten hat schon Bachelard an Descartes Analytik als Entfernung von den realen Objekten und Phänomenen kritisiert, doch die Idee hält sich hartnäckig. Nicht zuletzt verdankt die Synthetische Biologie ihre Motivation dem erfolgreichen Marketing der Ziegelsteinmetapher (›Brickfication‹):⁷⁵ »One powerful technology for managing complexity is abstraction. [...] the parts and devices that comprise engineered biological systems should probably be redesigned and

73 | Vgl. auch Martin Jansen: Ein Konzept zur Syntheseplanung in der Festkörperchemie, in: *Angewandte Chemie*, 114, 2002, 3896-3917.

74 | Jansen, Schön, ›Design‹ in der chemischen Synthese – eine Fiktion?, in diesem Band Kapitel 7, S. 117.

75 | Der Begriff ›Biobrick‹ ist mittlerweile ein eingetragenes Markenzeichen und das Titelbild von *Science* im September 2011 zielt ein Lego-Bakterium mit dem Hinweis: »Bacteria constructed from toy bricks represent the potential of synthetic biology to design and construct genetic modules that can be used to introduce new functions into existing organisms or even to engineer new biological systems.« *Science*, 333(6047), 2011, S. 1235. Vgl. Tarja Knuuttila, A. Loettgers: Basic science through engineering? Synthetic modeling and the idea of biology-inspired engineering, in: *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44(2), 2013, 158-169.

built anew so that they are simpler to model and easier to use in combination.«⁷⁶ Doch auch hier stellt sich die Frage nach den falschen Assoziationen, nach den Grenzen sowie danach, wie weit Organismen passend gemacht werden können. Wie das Beispiel des Repressilator andeutet, ist das Re-Design im Laboralltag nicht so einfach umsetzbar. Folgt man der Logik der wissenschaftlichen Phänomenotechnik Bachelards, so liegt es auf der Hand, dass die Synthetischen Wissenschaften weniger eine Vereinfachung als eine Komplizierung der Konzepte zum Ziel haben. Die scheinbare Einfachheit der Biobricks entpuppt sich als kompliziert; anders kompliziert als die »natürlichen« Komponenten, da technisch kompliziert. Und eben in dieser technischen Komplizierung folgen die Synthetischen Wissenschaften dem Nötigungscharakter der neuzeitlichen Wissenschaft, indem ihnen klar wird, dass die »Vernunft nur das einsieht, was sie selbst nach ihrem Entwurf hervorbringt.«⁷⁷

76 | Endy, *Foundations for engineering biology*, 2005, S. 451, 452.

77 | Kant, *Kritik der reinen Vernunft*, 1993, Vorrede B XIII.

4. Die synthetische Kraft der Mathematik

Merleau-Pontys existenziale Philosophie der Mathematik

Jan Wöpping

4.1 EINLEITUNG

Merleau-Pontys übersehene Philosophie der Mathematik

In diesem Artikel wird das zentrale Argument von Maurice Merleau-Pontys Philosophie der Mathematik rekonstruiert und diskutiert. Dass es diese Philosophie der Mathematik bei Merleau-Ponty überhaupt gibt, ist dabei bereits die erste These. Denn die Überlegungen zur Mathematik gehören zu den am wenigsten diskutierten Stellen in seinen Arbeiten.¹ Bei Merleau-Ponty und Mathematik denkt man zunächst an die vehemente Ablehnung geometrischer Auffassungen von Wahrnehmung. Doch diese Sicht greift zu kurz. Denn neben der (allzu) bekannten Kritik an Euklidischer Geometrie (als Modell für Wahrnehmung) gibt es faszinierende und produktive Überlegungen zu mathematischer Erkenntnis und Beweis-

1 | Exemplarische Ausnahmen sind: Soraya de Chadarevian: *Zwischen den Diskursen. Maurice Merleau-Ponty und die Wissenschaften*, Würzburg: Königshausen und Neumann 1990, insb. S. 153-157; Jean-Toussant Desanti: Der Leib der idealen Objekte. Nebengedanken zu ›Das Sichtbare und das Unsichtbare‹, in: Alexandre Métraux, B. Waldenfels (Hg.): *Leibhaftige Vernunft. Spuren von Merleau-Pontys Denken*, München: Fink 1986, 37-47; Joseph Rouse: Merleau-Ponty's Existential Conception of Science, in: Taylor Carman, M.N.B. Hansen (Hg.): *The Cambridge Companion to Merleau-Ponty*, Cambridge: Cambridge University Press, 2005, 265-290; Marjorie Hass, L. Hass: Merleau-Ponty and the Origin of Geometry, in: Fred Evans, L. Lawlor (Hg.): *Chiasms. Merleau-Ponty's notion of flesh*, Albany: SUNY Press 2000, 177-187. Vgl. auch Brian Rotman: *Becoming beside ourselves: the alphabet, ghosts, and distributed human being*, Stanford: Stanford University Press 2008, insb. S. 34-36 erwähnt Merleau-Pontys Philosophie der Mathematik, ebenso wie Emmanuel Alloa: *Das Durchscheinende Bild, Konturen einer medialen Phänomenologie*, Berlin/Zürich: diaphanes 2011, 230-231.

arbeit.² Diese finden sich besonders in *Prosa der Welt* und in der *Phänomenologie der Wahrnehmung*. Erstere behandelt elementare diskrete Mathematik (konkret die Gaußsche Formel zur Berechnung der Summe der natürlichen Zahlen), letztere Euklidische Geometrie. Zugegeben: Merleau-Ponty stellt in beiden Fällen keine im Detail ausgearbeitete, umfassende Theorie mathematischer Erkenntnis vor. Was sich finden lässt, bleibt Skizze, Stückwerk, Sammlung von Ideen.

Dennoch verdienen diese Ideen eine genauere Betrachtung – schon allein deshalb, weil Merleau-Ponty selbst die erfolgreiche Erklärung mathematischen Erkennens als kritischen Test für das ganze phänomenologische Projekt ansieht. Solange es der Phänomenologie nicht gelinge, die Königsdisziplin des Wissens und der Erkenntnis, das Musterbeispiel von Strenge, Notwendigkeit und vermeintlicher Anschauungsferne, die Mathematik, positiv zu integrieren, solange bleibe sie ein unabgeschlossenes Vorhaben, eine bloße Ergänzung zu klassischer Philosophie, keine Alternative zu ihr. Kann er hier keine überzeugende Erklärung anbieten, so befürchtet Merleau-Ponty, »fände sich alles bisher Gesagte wieder in Frage gestellt: so wenig erschiene das Denken als eine Weise des Existierens, daß vielleicht mehr doch unser Sein selber sich gänzlich als Denken erwiese.«³ Seine Ausführungen lassen sich hier durchaus als Antwort auf eine Frage lesen, die ihm während seiner Promotionsverteidigung von einem Philosophiehistoriker gestellt wurde: »Glauben Sie, daß die Griechen die deduktive Geometrie hätten erfinden können, wenn sie Ihre Vorstellung des Urgrundes der Erfahrung geteilt hätten? Meinen Sie nicht, daß sie viel eher in diesem Urboden stecken geblieben wären?«⁴

Anders gesagt: Eine leibliche, situative, existenzausgerichtete Klärung mathematischen Erkennens muss möglich sein, soll das Projekt der Phänomenologie als Ganzes Erfolg haben. Mathematik gerät hier zum radikalen, denkbar härtesten Testfall für phänomenologische Philosophie.⁵ Vor diesem Hintergrund ist es beinahe verwunderlich, wie wenig er über Mathematik schreibt.

Die globale Idee

Trotz ihrer Knappheit sind seine Überlegungen wertvoll, wenn auch seine Detailbeobachtungen mitunter genauere Kenntnisse des Gegenstands vermissen lassen.⁶ Genauer sind seine Bemerkungen deshalb wertvoll, weil sie tatsächlich

2 | Vgl. etwa: »Die Natur ist nicht an ihr selbst geometrisch, sie scheint es nur einem distanzierten Beobachter, der sich an makroskopische Gegebenheiten hält.« Maurice Merleau-Ponty: *Phänomenologie der Wahrnehmung*, Berlin: de Gruyter 1965, S. 80.

3 | Merleau-Ponty, *Phänomenologie der Wahrnehmung*, 1965, S. 437.

4 | Die Frage ist bei Desanti, *Der Leib der idealen Objekte*, 1986, S. 42 zu finden.

5 | Vgl. Maurice Merleau-Ponty: *Die Prosa der Welt*, München: Fink 1984, S. 136.

6 | Vgl. Merleau-Ponty, *Die Prosa der Welt*, 1984, S. 140 nennt er z.B. den Sachverhalt, dass alle Radien eines Kreises gleich lang sind und den Sachverhalt, dass die Innenwinkel-

das zu leisten versuchen, was Merleau-Ponty möchte: Zu zeigen, dass eine Philosophie der Mathematik aus phänomenologischer Perspektive möglich ist, und zwar, das ist entscheidend, ›ohne‹ Abstriche bei der Strenge und Objektivität mathematischer Sätze zu machen. Was er nicht zeigen will: dass Mathematik ›trotz‹ der Leiblichkeit und Existenzialität des Menschen möglich ist, dass es etwas gibt, was diese Leiblichkeit transzendiert. Man könnte dies die ›Wundertheorie‹ mathematischer Erkenntnis nennen: Wie kann es überhaupt unendlich genaue und objektive Mathematik geben, angesichts der Endlichkeit und Subjektivität des Menschen? Die Wundertheorie findet üblicherweise ihr Gegenstück in einer Überschreitungserklärung: Es gibt etwas, das die Endlichkeit überschreitet, eine unmenschliche Fähigkeit im Menschen. In dieser Perspektive ist der Mensch grundsätzlich qua Leiblichkeit defizitär, zumindest in mathematischen Dingen. Dieses Defizit gilt es entsprechend zu kompensieren. Merleau-Ponty behauptet die Antithese: Mathematik ist nicht möglich ›trotz‹ der Endlichkeit und Leiblichkeit, sondern einzig ›aufgrund‹ ihrer. Nur ›weil‹ der Mensch in der Welt verankert ist, nur weil er als existenziales Wesen Interessen hat, Werte kennt, nur deshalb ist er in der Lage zu mathematischer Erkenntnis. Die Endlichkeit ist daher nicht negativ als Defizit, sondern positiv als Ermöglichungsbedingung zu verstehen.

Vorgehensweise

Im Folgenden stelle ich zunächst Merleau-Pontys zentrales Argument dar. Ich begreife es als Lösungsvorschlag für die von Kant hinterlassende Frage nach der Kombinierbarkeit von strenger Regelmäßigkeit einerseits und genuiner Kreativität in der Mathematik andererseits. Merleau-Pontys Beschreibung der Kreativität von Beweisen in Geometrie und diskreter Mathematik kreist um die Fähigkeit einer Transformation mathematischer Strukturen, von einem Sinn zu einem anderen. Die Fähigkeit, überhaupt verschiedene Perspektiven auf eine mathematische Struktur werfen und miteinander in Beziehung setzen zu können, resultiert für Merleau-Ponty wiederum aus der Existenzialität und Leiblichkeit des Menschen. Diese zeigt sich erstens in dem Versuch einer Rückführung mathematischer Sinngebung auf primär-leibliche Erfahrung und zweitens in der prinzipiellen Offenheit mathematischer Strukturen für neue Auffassungen und Perspektiven. In der Konklusion arbeite ich zentrale Defizite der Ausführungen Merleau-Pontys heraus, argumentiere aber gleichzeitig für die Relevanz und Anschlussfähigkeit der Ideen.

summe eines euklidischen Dreiecks 180° beträgt als ›Eigenschaften‹, die die Geometrie entbirgt. Das stimmt zwar im Falle des Innenwinkelsummensatzes, doch im Falle der gleichen Länge aller Kreisradien handelt es sich schlicht um Definitionen (Def. 15 und 16) der *Elemente*. Vgl. Euklid: *Die Elemente: Buch I – XIII*, (übersetzt und hg. von Clemens Thaer), Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1971.

4.2 DAS ARGUMENT

Die Kantische Frage

Merleau-Ponty sucht eine Frage zu beantworten, die Kant der Mathematikphilosophie als brisantes Erbe hinterlassen hat: Welche Rolle spielt sinnliche Anschauung für mathematische Erkenntnis? Kant diskutiert dies unter dem Stichwort der Synthetizität mathematischer Urteile. Synthetisch sind mathematische Sätze, insofern sie echte Erkenntnisse produzieren, die über das in ihren begrifflichen Voraussetzungen Enthaltene hinausgehen. Man lernt in ihnen etwas Neues. Kant fasst es so:

»Denn ich soll nicht auf dasjenige sehen, was ich in meinem Begriffe vom Triangel wirklich denke, (dieses ist nichts weiter, als die bloße Definition), vielmehr soll ich über ihn zu Eigenschaften, die in diesem Begriffe nicht liegen, aber doch zu ihm gehören, hinausgehen.«⁷

Die Synthetizität der Urteile erklärt Kant mit ihrer Anschauungsbasiertheit. Erst die ›Konstruktion‹ eines Dreiecks in einer partikularen Anschauung erlaubt es, die neuen Eigenschaften herauszuarbeiten:

»Man gebe einem Philosophen den Begriff eines Triangels, und lasse ihn nach seiner Art ausfündig machen, wie sich wohl die Summe seiner Winkel zum rechten verhalten möge. Er hat nun nichts als den Begriff von einer Figur, die in drei geraden Linien eingeschlossen ist, und an ihr den Begriff von eben so viel Winkeln. Nun mag er diesem Begriffe nachdenken, so lange er will, er wird nichts Neues herausbringen. Er kann den Begriff der geraden Linie, oder eines Winkels, oder der Zahl drei, zergliedern und deutlich machen, aber nicht auf andere Eigenschaften kommen, die in diesen Begriffen gar nicht liegen. Allein der Geometer nehme diese Frage vor. Er fängt sofort davon an, einen Triangel zu konstruieren. Weil er weiß, daß zwei rechte Winkel zusammen gerade so viel austragen, als alle berührende Winkel, die aus einem Punkte auf einer geraden Linie gezogen werden können, zusammen, so verlängert er eine Seite seines Triangels, und bekommt zwei berührende Winkel, die zweien rechten zusammen gleich sind. Nun teilet er den äußeren von diesen Winkeln, indem er eine Linie mit der gegenüberstehenden Seite des Triangels parallel zieht, und sieht, daß hier ein äußerer berührender Winkel entspringe, der einem inneren gleich sei usw. Er gelangt auf solche Weise durch eine Kette von Schlüssen, immer von der Anschauung geleitet, zur völlig einleuchtenden und zugleich allgemeinen Auflösung der Frage.«⁸

Schwierigkeit und Faszinosum der Kantischen Ausführungen gründen in dem Versuch, die Anschauungsbasiertheit von Mathematik mit ihrer strengen Notwendigkeit in Einklang zu bringen. Mathematische Sätze sind eben nicht nur

7 | Immanuel Kant: *Kritik der reinen Vernunft* (1781, 1787), Hamburg: Meiner 1993, A 718.

8 | Kant, *Kritik der reinen Vernunft*, 1993, A 716-717.

synthetisch, sondern auch apriorisch – in sie darf nichts allein aufgrund empirischer Umstände eingehen, sondern alles muss regelgeleitet geschehen. Mathematische Erkenntnis verbindet darin, was entweder zusammenzupassen scheint oder tatsächlich nicht zusammenpasst.

Das Problem: Regelhaftigkeit und Kreativität

Merleau-Pontys Überlegungen können demnach als Versuch gelesen, ein klassisches Problem der Mathematikphilosophie auf neue Weise zu lösen: Das Problem, wie Mathematik einerseits kreativ und andererseits regelbasiert sein kann. Wie Kant versucht er, die Kreativität der Mathematik über ihre Anschauungsbasiertheit zu lösen. Die Pointe Merleau-Pontys ist, dass nicht ›trotz‹, sondern ›aufgrund‹ ihrer Anschaulichkeit Mathematik überhaupt genuine Erkenntnisse produzieren kann. Allerdings ist dabei Anschaulichkeit sehr weit gefasst zu verstehen, genauer als Behauptung der menschlichen Existenzialität überhaupt.

Buchstabieren wir die beiden Seiten des Dilemmas genauer aus. Zunächst zur Regelbasiertheit: Wir haben es laut Merleau-Ponty nur dort mit Mathematik zu tun, wo »sich die Sprache verpflichtet, nur das auszusagen, was willentlich und genau festgelegt worden ist, wo sie nichts anderes bezeichnet als das, worüber sie schön verfügt«.⁹ Merleau-Ponty spricht hier von der Sprache als einem ›Algorithmus‹. Merleau-Ponty diskutiert leider nicht genauer, wie diese Algorithmizität der mathematischen Sprache zu denken ist: Müssen die Regeln etwa stets explizit angegeben (etwa als Axiome gesetzt) oder können sie auch in einer impliziten, aber in einer Gemeinschaft verbindlichen Praxis bestehen? Handelt es sich stets um syntaktische Regeln zur Ersetzung einzelner Ausdrücke oder auch um Meta-Regeln? Festzuhalten bleibt dennoch seine Intention, die Kreativität der gerade nicht mit einem Verzicht auf Strenge oder Eindeutigkeit zu begründen. Es ist keine Abkehr von dem, was seit Euklid als methodisches Ideal der Mathematik überhaupt erscheint: ein strenges axiomatisch-deduktives Vorgehen, in dem nur solche Ableitungen erlaubt sind, die im Einklang mit vorher festgelegten, eindeutigen Regeln stehen.¹⁰

Doch die Algorithmizität ihrer Sprache hindert Mathematik nicht daran, genuin ›neue‹ Erkenntnisse zu produzieren. Merleau-Ponty betont mehrfach, dass die Sätze der Mathematik nicht durch das System ihrer Regeln im Voraus bestimmt sind. »Zunächst steht fest, daß die ›Eigenschaften‹ der Reihe der ganzen

9 | Merleau-Ponty, *Die Prosa der Welt*, 1984, S. 136.

10 | Tatsächlich ist die Frage, was es heißt, dass sich etwas unstrittig im Einklang mit einer Regel befindet, recht kompliziert (Wittgensteins umfangreiche Überlegungen zur Mathematik kreisen darum). In jedem Fall müsste die Gemeinschaft mit einbezogen werden, wo öffentlich – durch eine grundlegend kompetente Gemeinschaft – und unstrittig aufzeigbar ist, nach welchen Regeln Ableitungen getroffen werden.

Zahlen nicht in dieser Reihe ›enthalten‹ sind.«¹¹ Mathematik ist »das Ganze der Relationen, die im Hinblick auf sie festgelegt worden sind, *zuzüglich eines offenen Horizontes zu bildender Beziehungen*.«¹² Das Paradox, das Merleau-Ponty klären will, lautet in den Worten Jean-Toussaint Desanti: Wie kann Mathematik zugleich »mit einem offenen Horizont ausgestattet und durch Normen abgeschlossen« sein?¹³ Doch was soll dieser offene Horizont sein?

Es ist an dieser Stelle hilfreich, Merleau-Pontys Erklärung mit einer jüngeren These Jody Azzounis zur Erklärung zum Überraschenden von Mathematik zu vergleichen. Azzounis Idee lautet, dass die Fähigkeit der Mathematik, uns zu überraschen, auf der Differenz von normativer Transparenz und epistemischer Opazität basiere. Ihm zufolge sind mathematische Spiele (wie etwa Geometrie) zwar hinsichtlich ihrer Regeln transparent. So sind etwa die Regeln der euklidischen Geometrie an sich durchsichtig und leicht anzuwenden. Doch die Folgen aus der wiederholten und kombinierten Anwendung dieser Regeln sind sehr schnell nicht mehr vorherzusehen. Azzouni bezeichnet dies als ›epistemische Opazität‹.¹⁴ Deswegen können uns Sachverhalte durchaus und sogar vehement überraschen, obwohl sie auf nichts weiter beruhen als der Kombination von Regeln, die isoliert betrachtet, völlig einleuchtend sind. Azzounis These bietet eine ›mechanische‹ oder ›quantitative‹ Erklärung von Kreativität an. Merleau-Pontys Erklärung (besser: Skizze einer Erklärung) scheint mir hingegen eher ›qualitativ‹ Art zu sein.

Dabei ist seine Erklärung eigentlich ein ganzes Bündel an Erklärungsversatzstücken, die nur bedingt in einer konsistenten Systematik verbunden werden können. Ich konzentriere mich auf das, was mir das Kernargument scheint. Dieses hat zwei, durch eine quasi-transzendente Beziehung verschränkte Teile.

1. Erstens behauptet Merleau-Ponty, dass mathematische Beweise kritisch auf der Fähigkeit basieren, in einer gegebenen mathematischen Struktur andere Konfigurationen ausfindig machen zu können. Diese Restrukturierungen finden unter Wahrung der normativen Bedingungen statt, d.h. die Feststellung der jeweiligen Strukturen muss im Einklang mit den Regeln stehen.

11 | Merleau-Ponty, *Die Prosa der Welt*, 1984, S. 142. Er wendet sich ferner gegen die Vorstellungen einer »Präexistenz des Wahren« oder eines »in sich selbst abgeschlossenen mathematischen Seins«. Ebd., S. 140. Man kann für ihn nicht sagen, »die neuen Beziehungen seien wahr gewesen vor ihrer Enthüllung, und die ersten Beziehungen, die wir aufstellen, verhelfen auch den daraus folgenden zu ihrer Existenz.« Ebd., S. 142.

12 | Merleau-Ponty, *Die Prosa der Welt*, 1984, S. 142.

13 | Desanti, *Der Leib der idealen Objekte*, 1986, S. 46.

14 | Vgl. Jody Azzouni: Proof and Ontology in Euclidean Mathematics, in: Tinne Hoff Kjeldsen, Stig Andur Pedersen, Lise Mariane Sonne-Hansen (Hg.): *New Trends in the History and Philosophy of Mathematics*, Odense: Syddansk Universitetsforlag 2004, 117-133, S. 119.

2. Er macht, kantisch gesprochen, eine Bedingung der Möglichkeit für diese Fähigkeit der Re- und Dekonfiguration aus. Diese Bedingung ist das ›Engagement‹ des Mathematikers in die Struktur, die Repräsentation. Und Engagement natürlich ist eine Weise, in der sich die fundamentale Leiblichkeit des Menschen äußert.

Geometrische Konstruktionen

Betrachten wir zunächst Merleau-Pontys Analyse in der Phänomenologie der Wahrnehmung. Hier konzentriert er sich auf den berühmten euklidischen Beweis des Innenwinkelsummensatzes,¹⁵ demzufolge die Summe der Innenwinkel eines jeden Dreiecks 180° beträgt. Merleau-Ponty selbst gibt ihn so wieder:

»Ich denke ein Dreieck, den dreidimensionalen Raum, dem es zugehören soll, eine Verlängerung einer der Seiten des Dreiecks, eine Parallele zu einer der Seiten gezogen durch den ihr gegenüberliegenden Eckpunkt, und ich sehe, daß die von diesem Punkt ausgehenden Linien eine zwei rechten Winkeln gleiche Winkelsumme bilden, die andererseits der Summe der Winkel des Dreiecks gleich ist.«¹⁶

Das ist eine stark verkürzte, aber durchaus adäquate Wiedergabe des euklidischen Beweises, an dem entlang schon Kant, wie oben gesehen, seine Argumentation aufbaut. Bemerkenswert ist, dass Merleau-Pontys Diskussion sich in Aufbau und sogar Wortwahl mitunter durchaus eng an Kants wirkmächtige Analyse in der Kritik der reinen Vernunft anlehnt. Wie Kant geht er dabei von einem real angeschauten Dreieck aus. Und wie Kant betont auch Merleau-Ponty nachdrücklich die Regelhaftigkeit der im geometrischen Beweis verwendeten Zeichnung: »[I]ch konstruiere nach Regeln, ich lasse in der Figur *Eigenschaften* des Dreiecks hervortreten, d.h. Beziehungen, die zum Wesen des Dreiecks gehören, nicht wie das zeichnende Kind überhaupt all solche, wie die faktisch auf dem Papier stehende unbestimmte Figur sie ihm suggeriert.«¹⁷ Dieser Punkt macht deutlich, dass Merleau-Ponty für eine naive visuelle Evidenz plädiert. Von all dem, was sich möglicherweise in einer Figur sehen lässt, darf nur jenes eine Rolle spielen, was im Einklang mit den Normen steht.

Während bei Kant aber argumentativ die Emergenz von Eigenschaften der betrachteten geometrischen Struktur im Vordergrund steht, die nicht bereits in den konstruierten begrifflichen Voraussetzungen enthalten waren, geht es bei Merleau-Ponty stärker darum, die Struktur anders und neu auffassen zu kön-

15 | Vgl. Euklid, *Elemente*, 1971, I, 32.

16 | Merleau-Ponty, *Phänomenologie der Wahrnehmung*, 1965, S. 437. Erstaunlich ist hier übrigens auch die Rede vom dreidimensionalen Raum, der eigentlich in Euklidischer Geometrie keine Rolle spielen sollte.

17 | Merleau-Ponty, *Phänomenologie der Wahrnehmung*, 1965, S. 438.

nen. Denn die Regelmäßigkeit der Mathematik kombiniert er mit der Fähigkeit, in einer Struktur verschiedene Konfigurationen oder Konstellationen ausfindig zu machen. So steht für Merleau-Ponty im Zentrum des Beweises die Fähigkeit, in dem Dreieck zwei verschiedene Konstellationen erkennen und miteinander korrelieren zu können:

»Und daher kann man [...] auch sagen, der Beweis bestehe darin, daß man die konstruierte Winkelsumme in zwei verschiedenen Konstellationen auftreten lasse und sie einerseits als der Winkelsumme des Dreiecks und andererseits als zwei rechten Winkeln gleich sehe; doch ist dem die Bemerkung beizufügen, daß wir es nicht lediglich mit zwei aufeinander folgenden und wechselseitig sich verdrängenden Konfigurationen zu tun haben [...], vielmehr die erste, während die zweite sich herstellt, für mich bestehen bleibt.«¹⁸

Euklids Beweis basiert tatsächlich darauf, eine Konstruktion für ein beliebiges Dreieck zu finden, welche die drei Innenwinkel so zusammenbringt, dass sie gerade zwei rechten Winkeln oder einem Halbkreis gleichen (und also eine Summe von 180° aufweisen). Der Beweis ruht dabei eben gerade nicht, wie oben gesagt, auf faktischem Augenschein, sondern auf den Regeln und den 31 vorher bewiesenen Sätzen des ersten Buches der Elemente, etwa was die Konstruierbarkeit paralleler Linien angeht.

Merleau-Ponty hat hier eine Fähigkeit im Blick, die große Ähnlichkeiten zu Wittgensteins Konzept des Aspektwechsels aufweist. Allerdings sollte man hier weniger an die paradigmatischen Beispiele für Wittgensteinianisches Aspektsehen – den Hasen-Enten-Kopf oder das Doppelkreuz – denken, sondern eher an die ungleich vielfältigeren, komplexeren, aber zugleich deutlich unbekannten Fälle von Aspektsehen in der Mathematik, die Wittgenstein diskutiert.¹⁹ Auch hier geht es darum, zwei verschiedene Konstellationen oder Aspekte, die man in ein und derselben Struktur erkennen kann, miteinander in Verbindung zu setzen. Anders als beim Hasen-Enten-Kopf oder anderer zutiefst instabiler Kippbilder betont Merleau-Ponty aber die Notwendigkeit, dass mathematische Erkenntnis eben keine bloße Abfolge der Konstellationen, kein reines Umkippen der Aspekte sein dürfe, sondern deren notwendige Verbindung voraussetzt. Es handelt sich eben um die gleiche Winkelsumme, die in zwei verschiedenen Formen auftritt, und erst das Wissen darüber, dass es sich um die »gleiche« Winkelsumme handelt, ermöglicht den Beweis. Merleau-Ponty bezeichnet dies als »Immanenz des Neuen im Alten« und ist damit nahe an Wittgensteins Aussage: »Der Ausdruck des

18 | Merleau-Ponty, *Phänomenologie der Wahrnehmung*, 1965, S. 438.

19 | Vgl. Juliet Floyd: Das Überraschende: Wittgenstein on the Surprising in Mathematics, in: Jonathan Ellis, D. Guevara (Hg.): *Wittgenstein and the Philosophy of Mind*, Oxford: Oxford University Press 2012, 225-258; Juliet Floyd: Wittgenstein on Aspect-Perception, Logic, and Mathematics, in: William Day, V.J. Krebs (Hg.): *Seeing Wittgenstein anew*, Cambridge: Cambridge University Press 2010, 314-337.

Aspektwechsels ist der Ausdruck einer neuen Wahrnehmung, zugleich mit dem Ausdruck der unveränderten Wahrnehmung.«²⁰

Arithmetische Strukturen

In *Prosa der Welt* entwickelt Merleau-Ponty an einem Beispiel aus einem anderen mathematischen Bereich, der elementaren diskreten Mathematik, analoge Überlegungen. Es geht konkret um den Beweis der Summenformel der Folge der ersten zehn natürlichen Zahlen – d.h. der Summe der Zahlen 1, 2, ..., 9, 10 – einer Miniaturvariante jener Summe, deren effiziente Berechnungsformel Gauß bereits als Grundschüler fand. Entscheidend ist Merleau-Ponty zufolge die Fähigkeit zu erkennen, dass man die Zahlensequenz auf eine solche Weise in eine andere Struktur transformieren kann, dass die gewünschte Summenformel zum Vorschein kommt: »Ich muß auf den Einfall kommen, daß die Progression von 1 bis 5 exakt symmetrisch ist zur Regression von 10 bis 5, daß ich auf diese Weise dazu gelange, einen konstanten Wert der Summen 10+1, 9+2, 8+3 usw. zu erfassen und daß ich die Reihe schließlich auflöse in Paare, die jedesmal gleich $n+1$ sind und deren Anzahl nur mit $n/2$ gleich wäre.«²¹

Kern des Beweises der Gaußschen Summenformel ist die Einsicht in eine Binnensymmetrie der Reihe der natürlichen Zahlen: Der Anstieg der Folge von der ersten bis zur letzten Zahl findet ein exaktes Pendant in dem Abstieg von der letzten bis zur ersten Zahl. Die folgende Skizze dient der Verdeutlichung:

$$\begin{array}{cccccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ 10 & 9 & 8 & 7 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 \end{array}$$

Das Aufzeigen dieser »internen« Relation der Folge der natürlichen Zahlen, um einen Ausdruck Wittgensteins zu verwenden, ist das Herzstück des Beweises. Aus ihm folgt alles Weitere. Zunächst die Einsicht, dass sich die Folge in Zweierpaare aufteilen lässt, die jeweils die gleiche Summe haben, genauer gesagt, deren Summe gleich dem Wert der letzten Zahl in der Folge (hier: 10) plus 1 ist.

$$\begin{array}{cccccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ 10 & 9 & 8 & 7 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 \\ \text{Summe} & 11 & 11 & 11 & 11 & 11 & 11 & 11 & 11 & 11 \end{array}$$

11 + 11 + ... + 11 bzw. einfacher: 10 * 11 (denn es gibt gerade 10 Summanden) stellt also die Summe aller Paare dar. Berücksichtigt man, dass darin jede Zahl der ur-

20 | Merleau-Ponty, *Die Prosa der Welt*, 1984, S. 138; Vgl. Ludwig Wittgenstein: *Philosophische Untersuchungen*, in: Ders.: *Werkausgabe*, Bd. 1, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1984, S. 522f.

21 | Merleau-Ponty, *Die Prosa der Welt*, 1984, S. 143.

sprünglichen Folge gerade doppelt enthalten ist, dann erhält man durch einfache Teilung gerade die gesuchte Summe der Folge der ersten n natürlichen Zahlen: $n(n+1)/2$, hier: $10 \cdot 11/2 = 55$.

Der Beweis basiert auf dem Vermögen zur Restrukturierung. Man muss in der Lage sein, zwei verschiedene Perspektiven auf die gleiche Struktur miteinander zu verbinden. Es geht für Merleau-Ponty nicht einfach darum, eine Struktur zu transformieren, sondern darum, in der zweiten Strukturvariante die erste wiederzuerkennen. Er fasst es wie folgt zusammen: »Das Wesentliche des mathematischen Denkens findet also in dem Augenblick statt, wo eine Struktur sich dezentriert, wo sie sich einer Frage öffnet und sich umorganisiert zu einem neuen Sinn, der aber immer noch der Sinn derselben Struktur ist.«²² Dieses Prinzip findet bemerkenswerterweise unabhängig davon statt, ob wir es mit Geometrie oder Algebra zu tun haben. In beiden Fällen, die von der Tradition gerne getrennt werden, finden wir die gleiche Zentralstellung von De- und Retransformation einer Struktur wieder.

Leiblichkeit und Handlungsorientierung

Die Rolle der Konfigurationen resultiert für Merleau-Ponty aus der Existenzialität des Menschen. Wir müssen verstehen, schreibt Merleau-Ponty, dass »die Wahrheit sich im Dienste der mathematischen Forschung einem Subjekt anbietet, das in ihr schon engagiert ist und von den leibhaftigen Bindungen profitiert, die es mit ihr vereinen.«²³ Die entscheidende Frage ist, wie dies zu verstehen ist. Mir scheint, dass die Existenzialität des Menschen zwei entscheidende Implikationen für die Untersuchung mathematischer Erkenntnisvorgänge hat: Erstens impliziert sie die Leiblichkeit des Menschen, zweitens die Interessebasiertheit menschlicher Mathematik. Zunächst zur Leiblichkeit. Menschliche Mathematik ist verleblichte Mathematik. Merleau-Ponty leitet – zumindest im Falle der Geometrie – die Offenheit der mathematischen Struktur aus der Offenheit der körperlichen Bewegungen ab: »[S]o kennt auch der Geometer [...] die Beziehungen, die ihn angehen, nur dadurch, daß er sie wenigstens virtuell mit seinem Körper beschreibt. Das Subjekt der Geometrie ist ein Bewegungssubjekt.«²⁴ Mathematisches Denken wäre hier eine Reprise des leiblichen In-der-Welt-Seins. Geometrie und Algebra sind, wie Wissenschaft überhaupt, für Merleau-Ponty an vielen Stellen sekundäre Ausdrücke der Welt, Ausdrücke von Ausdrücken, nämlich von der fundamentalen Ausdrucksweise der Welt in leiblicher Erfahrung:

»Insofern er sich selbst bewegt, d.h. insofern er untrennbar von einer Sicht auf die Welt und selber deren Verwirklichung ist, ist unser Leib Bedingung der Möglichkeit nicht nur jeder

22 | Merleau-Ponty, *Die Prosa der Welt*, 1984, S. 144.

23 | Merleau-Ponty, *Die Prosa der Welt*, 1984, S. 141.

24 | Merleau-Ponty, *Phänomenologie der Wahrnehmung*, 1965, S. 441.

geometrischen Synthese, sondern all der Ausdrucksleistungen und Erwerbungen überhaupt, die die Kulturwelt konstituieren.«²⁵

Merleau-Ponty postuliert hier eine sehr direkte Weise, in der die synthetische Kraft der Mathematik auf Wahrnehmung und Anschauung zurückzuführen ist, nämlich insofern Mathematik noch in ihren Beweisen auf der virtuellen Wiederausführung elementarer Vollzüge des Leibes gründet. Doch diese Perspektive erscheint mir fragwürdig. Euklidische Geometrie ist mehr als sekundärer Ausdruck einer primären leiblichen Erfahrung von Raum. Vielmehr handelt es sich um ein artifizielles, Prinzipien von Konsistenz und Deduktion folgendes System. Es gilt, was Wittgenstein anlässlich eines Diagramms eines technischen Mechanismus bemerkt:

»Denken wir uns die Konstruktionen der Stadien des Mechanismus mit Strichen von wechselnder Farbe ausgeführt. Die Striche seien zum Teil schwarz auf weißem Grund, zum Teil weiß auf schwarzem Grund. Denke dir die Konstruktionen im Euklid so ausgeführt; sie werden allen Augenschein verlieren.«²⁶

Geometrie ist also gerade nicht die virtuelle Reprise der Alltagswahrnehmung, im Gegenteil: Die Wahrnehmung geometrischer Strukturen sollte als eine spezifisch eigene Form von Wahrnehmung verstanden werden, deren Ausprägung in starkem Maße vom Grad des Erlernens und Einübens der Regeln des Systems abhängt. Es ist nicht einfach so, dass die primäre Wahrnehmung in die Geometrie getragen wird, sondern dass die ›virtuelle Bewegung‹ in den geometrischen Figuren eigenen Regeln folgt. Hier wie auch sonst wünscht man sich nicht nur eine Rückführung der Mathematik auf Wahrnehmung, sondern zugleich eine eingehendere Beschäftigung mit den Eigenarten und Spezifika mathematischen Denkens und Arbeitens.

Vielversprechender als die konkrete Ausgestaltung der Wahrnehmung ist daher eine grundlegendere Parallele, die Merleau-Ponty zwischen Mathematik und Wahrnehmung zieht. Beide haben es mit ›Strukturen‹ zu tun. Eine ›Struktur‹ ist für Merleau-Ponty ungefähr das, was eine ›Gestalt‹ ist,²⁷ also ein Ganzes mit Eigenschaften, die nicht auf die Eigenschaften seiner Teile reduzierbar sind. Dabei darf eine Struktur nicht physikalistisch oder repräsentationalistisch verstanden werden, als äußerlich vorhandenes Objekt. Eine ›Struktur‹ im Sinne Merleau-Pontys hat stets einen ›Sinn‹ für den Menschen, der sie wahrnimmt. Dieser Sinn

25 | Merleau-Ponty, *Phänomenologie der Wahrnehmung*, 1965, S. 442. Zu diesen Argumenten vgl. insbesondere Rouse, Merleau-Ponty's Existential Conception of Science, 2005.

26 | Ludwig Wittgenstein: *Bemerkungen über die Grundlagen der Mathematik*, in: Ders.: *Werkausgabe*, Bd. 3, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1984, IV, 49.

27 | Vgl. Chadarevian, *Zwischen den Diskursen*, 1990, S. 38.

besteht in den Handlungen, die sie ermöglicht, die sie anbietet oder nahelegt. Es gilt, schreibt Merleau-Ponty, »daß meine Wahrnehmung des Dreiecks schon von Anfang an keine gleichsam erstarrte und tote ist; die Zeichnung des Dreiecks auf dem Papier ist bloß eine Hülle, das wahrgenommene Dreieck selbst aber von Kraftlinien durchzogen, die nach allen Seiten nicht ausgezogene mögliche Richtungen aufkeimen lassen. Als impliziert in meinem Anhalt an der Welt überhaupt ist das Dreieck erfüllt von endlosen Möglichkeiten, deren eine die vollzogene Konstruktion nunmehr verwirklicht.«²⁸ Kontra kognitivistische Ansätze geht Merleau-Ponty dabei davon aus, dass man die Möglichkeiten direkt wahrnimmt.

Was man also in einer einzelnen mathematischen Repräsentation wahrnimmt, ist nicht die Abbildung eines präsenten, in sich geschlossenen Zustands, ist nicht die isomorphe Darstellung eines unabhängigen platonischen Objekts – sondern vielmehr eine Latenz, eine Menge von Möglichkeiten, Schlüsse zu ziehen, Konstruktionen fortzusetzen, Restrukturierungen vorzunehmen. Mathematische Strukturen sind nicht neutral, sondern Aufforderungen, sind handlungsanleitende und -eröffnende Darstellungen.²⁹ Diese Offenheit ist für Merleau-Ponty eine Folge der Existenzialität des Menschen:

»Sicherlich, diese Transformationen, die das Äquivalent bilden zu einer Konstruktion in der Geometrie, sind immer möglich; ich vergewissere mich, daß sie nicht irgendeinem Nebenumstand entspringen, sondern aus den Strukturelementen, die die Zahlenreihe definieren – und in diesem Sinne sind sie auch deren Resultat. Aber *sie sind nicht Teil desselben*, sie kommen nur bei einer bestimmten Fragestellung zum Vorschein, die ich an die *Struktur* der Zahlenreihe richte oder besser: die die Struktur mir nahelegt, sofern sie eine offene und zu vollendende Situation ist [...].«³⁰

Nur ein Wesen, das Fragen hat, das ein Interesse hat, ist zu Strukturierungen in der Lage. Im Falle des Beweises ist die gewählte Konstruktion ›eine‹ Wahl, ›ein‹ Gang durch ein weites Feld von Möglichkeiten.³¹

28 | Merleau-Ponty, *Phänomenologie der Wahrnehmung*, 1965, S. 440.

29 | In Anlehnung an den Begriff der Action-Oriented Representation nach Andy Clark: *Being There. Putting Brain, Body, and World Together Again*, Cambridge: MIT Press 1997, S. 149.

30 | Merleau-Ponty, *Die Prosa der Welt*, 1984, S. 143.

31 | Vgl. dazu auch die Aussagen in der frühen Diagrammtheorie Steffen Bogen, F. Thürlmann: *Jenseits der Opposition von Text und Bild. Überlegungen zu einer Theorie des Diagramms und des Diagrammatischen*, in: Alexander Patschovsky (Hg.): *Die Bildwelt der Diagramme Joachims von Fiore. Zur Medialität religiös-politischer Programme im Mittelalter*, Ostfildern: Thorbecke 2003, 1-22. »Für die Benutzer heißt das ›Lesen‹ des Diagramms dann auch, aus dem Spektrum an Operationsmöglichkeiten auszuwählen, aktiv individuelle Pfade der Lektüre einzuschlagen.« Ebd., S. 8.

Die Rede von den Kraftlinien erinnert stark an eine Passage aus *Struktur des Verhaltens*, in der Merleau-Ponty darlegt, warum uns im alltäglichen Umgang Dinge nicht als Objekte, sondern als Handlungsanregungen begegnen:

»Der Fußballplatz ist für den Spieler in Aktion kein ›Objekt‹ [...]. Er ist von Kraftlinien durchzogen (›Seitenlinien‹, Linien, die den ›Strafraum‹ abgrenzen) – in Abschnitte gegliedert (z.B. die ›Lücken‹ zwischen den Gegnern), die eine Aktion von ganz bestimmter Art hervorrufen, sie auslösen und tragen, gleichsam ohne Wissen des Spielers. [...] Jedes Manöver, das der Spieler vollführt, verändert den Aspekt des Spielfeldes und zeichnet darin neue Kraftlinien ein, wo dann ihrerseits die Handlung verläuft und sich realisiert, indem sie das phänomenale Feld erneut verändert.«³²

Hier wird deutlich, wie sehr Merleau-Ponty – bis hinein in die identische Rede vom Durchzogenensein von Kraftlinien – mathematische und lebensweltliche Aktionen parallelisiert. Die entscheidende Differenz allerdings ist die ungleich stärkere Betonung der »endlosen Möglichkeiten« in der Geometrie im Vergleich zu den Aktionen »von ganz bestimmter Art«, wie sie im Fußballspiel stattfinden. Während wir es im letzteren Fall eher mit jenen Fällen unbewusst ausgeführten körperlichen Handlungen zu tun haben, zeichnet sich die Wahl einer Handlung in der Mathematik oftmals durch größere Distanz und Reflexivität aus. Je vertrauter eine Person mit Euklidischer Geometrie wird, desto stärker werden die Handlungen auch »gleichsam ohne Wissen« stattfinden, werden zu motorischen Routinen.³³ Doch gerade die kreativen und produktiven Momente der Mathematik bestehen in der ›Wahl‹ einer eben nicht naheliegenden, eben nicht offensichtlichen oder sich routinemäßig anbietenden Restrukturierung. Kreativität besteht nicht in der blinden Aneinanderreihung von Regeln, sondern in dem Auftauchen eines neuen Sinnes einer mathematischen Struktur, einer neuen Perspektive, die man auf sie werfen kann.

Gilles Chatelet hat – deutlich nach Merleau-Ponty – die Wendung vom Diagramm als gefrorener Geste gefunden. Für Chatelet ist das Diagramm eine Art Verdichter von Gesten, ein Punkt, an dem sie sich speichern, und von dem aus sie entfaltet werden können in viele verschiedene Richtungen, ganz so, wie es die Struktur für Merleau-Ponty ist.³⁴

32 | Maurice Merleau-Ponty: *Die Struktur des Verhaltens*, Berlin/New York: de Gruyter 1976, S. 193, 194.

33 | Vgl. dazu klassisch: Kenneth Koedinger, John Anderson: Abstract Planning and Perceptual Chunks: Elements of Expertise in Geometry, in: *Cognitive Science*, 4(14), 1990, 511-550.

34 | Vgl. Gilles Châtelet: *Figuring Space. Philosophy, Mathematics and Physics*, Dordrecht: Kluwer 2000, S. 9-10.

4.3 KONKLUSION

Merleau-Pontys Ausführungen bilden keine Theorie, sondern bleiben äußerst knappe Skizze, die viele Defizite aufweist. Schmerzlich ist zunächst der Verzicht auf eine Auseinandersetzung mit höherer Mathematik. Die Beispiele, an denen Merleau-Ponty seine Ideen entwickelt und präsentiert, bewegen sich in auch Laien zumindest peripher vertrauten Feldern. Euklids Figuren und Gauß' berühmter Beweis der Summenformel sind herausragende Teile der populären Mathematikgeschichte, sie haben beinahe anekdotischen Charakter. Hinzu kommt, dass sie – zumindest auf den ersten Blick – als vermeintlich anschauungsnah gelten: Figuren hier, natürliche Zahlen dort. Wichtig wäre zu wissen, wie Merleau-Ponty seine Theorie der Re- und Dekonfigurationen auf Beispiele höherer Mathematik aus Analysis, Algebra oder Wahrscheinlichkeitstheorie anwenden würde. Dort erscheint etwa die Idee, sich virtuell in die Figur hineinzuversetzen, deutlich weniger plausibel. Mehr Erfolg verspricht ein Fokus auf die mathematische ›Struktur‹, wie ihn Merleau-Ponty ja auch im Falle der Gaußschen Summenformel selbst schon legt. Auch vermisste ich eine genauere Analyse der vielfältigen Formen, die als mathematische Struktur bezeichnet werden können, ebenso wie eine Analyse oder auch nur den Hinweis darauf, wie unterschiedlich Rekonfigurationen von Strukturen sein können. Welches erstaunlich breite Spektrum es hier geben kann, wird ja bereits an den Differenzen zwischen den Beispielen Euklidischer Geometrie und diskreter Mathematik deutlich.

Sehr knapp fallen auch die Erläuterungen zur Notwendigkeit und Regelmäßigkeit von Mathematik aus. Merleau-Ponty schreibt mehr über die Leiblichkeit und Offenheit von Mathematik, weniger darüber, wie sich in Einklang mit ihrer Normativität verträgt. Diese Seite des Dilemmas bleibt bei ihm irritierend ausgeblendet.³⁵ Diese Defizite sind gerade deshalb auffällig, weil Merleau-Pontys Überlegungen ansonsten aus mehrfachen Gründen äußerst interessant sind. Denn erstens werfen sie ein neues Licht auf den Philosophen Merleau-Ponty, der nicht mehr als der ausschließliche Kritiker der Geometrie als Modell für die Raumwahrnehmung erscheint, sondern als jemand, der ausgerechnet eine adäquate Beschreibung der Wahrheiten Euklidischer Geometrie als Testfall für das ganze Projekt der Phänomenologie begreift.

Zweitens werfen sie ebenfalls ein neues Licht auf die Funktionslogik mathematischer Beweise. Merleau-Pontys Betonung der Sinn- und Strukturtransformationen trifft sich mit einigen jüngeren Arbeiten in der Philosophie der Mathematik, deren Potenzial noch lange nicht erschöpft ist.³⁶ Sie findet vor allem aber eine Parallele in Wittgensteins Bemerkungen zum Aspektsehen in der Mathematik,

35 | Ähnlich Chadarevian, *Zwischen den Diskursen*, 1990, S. 69, 70.

36 | Vgl. beispielsweise Danielle Macbeth: Diagrammatic Reasoning in Euclid's Elements, in: Bart Van Kerkhove, Jonas De Vuyst, Jean Paul Van Bendegem (Hg.), *Philosophical Perspectives on Mathematical Practice*, London: College Publications 2010, 235-267;

die allerdings deutlich präziser die Vielfalt und Normativität der Formen und Weisen herausarbeitet, in denen es in der Mathematik darum geht, etwas ›in‹ etwas anderem zu sehen. Doch was Merleau-Ponty stärker als Wittgenstein betont, ist die existenziale Fundiertheit dieser Fähigkeit.

Dies schließlich ist an sich bereits der wichtigste Punkt, in dem der zentrale Wert von Merleau-Pontys Ausführungen liegt: Mathematik ist eine genuin menschliche, existenzielle Tätigkeit. Das mag auf den ersten Blick wenig aufregend klingen, ist es aber. Es dreht geradezu den klassischen philosophischen Blick auf mathematische Erkenntnis um. Denn üblicherweise gibt es Mathematik ›trotz‹, aber nicht ›aufgrund‹ der Menschlichkeit. Das Telos der Mathematikphilosophie ist die Überwindung der menschlichen Schwäche durch syntaktische, formale Strenge. Sehr scharf und bestechend konsequent hat das Jody Azzouni herausgearbeitet. Er expliziert den radikalen Kern dieser Bewegung auf eindrückliche Weise, wenn er diskutiert, computerbetriebene Ableitungen (›derivations‹) anstelle menschengemachter Beweise zum Kriterium der Korrektheit mathematischer Behauptungen zu machen. Es ist der Versuch einer Entmenschlichung der Mathematik. Mit Merleau-Ponty ist hingegen zu argumentieren, dass, was Computer leisten, schlicht etwas anderes ist als das, was Mathematiker tun. Computerbeweise sind nicht Präzisierungen menschlicher Mathematik, sondern etwas anderes. Denn, wie Haugeland so schön formuliert hat: »The trouble with artificial intelligence is that computers don't give a damn.«³⁷ Das tun sie auch in der Mathematik nicht. Merleau-Ponty verschiebt den Fokus der Philosophie der Mathematik von Korrektheit auf Werthaftigkeit. Die Philosophie des 20. Jahrhunderts war geradezu besessen von Fragen der Korrektheit mathematischer Beweise. Das führte dann zu dem syntaktischen Dogma, in dem nur das als Beweis anerkannt wird, was »a syntactic object consisting only of sentences arranged in a finite and inspectable array« ist.³⁸ Umgekehrt will Merleau-Ponty zeigen, dass nur eine menschengemachte Mathematik in der Lage ist, kreativ zu sein. Nur wer sich interessiert, für wen Strukturen von Bedeutung und Relevanz sind, nur wer einen Leib hat, der kann synthetische Erkenntnisse haben.

Annalisa Coliva: Human diagrammatic reasoning and seeing-as, in: *Synthese*, 186, 2012, 121-148.

37 | John Haugeland: *Having thought. Essays in the metaphysics of mind*, Cambridge: Harvard University Press 1998, S. 47.

38 | Neil Tennant: The Withering Away of Formal Semantics?, in: *Mind & Language*, 1, 1986, 302-318, S. 304.

5. Synthese in der Philosophie der Wahrnehmung

Stephan Günzel

5.1 KANT: SYNTHESIS UND APPREHENSION

Der Begriff der Synthesis wurde von Immanuel Kant als Fachterminus in die deutschsprachige Philosophie eingeführt.¹ Das zugrunde liegende Wort meint eine Zusammenstellung und ist seinerseits zusammengesetzt aus gr. ›syn‹ für zusammen und ›thesis‹ für Stellung. Bei Kant sind die mathematischen Ursprünge des Begriffs sowie seines Gegenbegriffs Analysis (gr. ›análysis‹ für ›Auflösung‹) noch deutlich erkennbar. Analytische Urteile werden von Kant den synthetischen Urteilen gegenübergestellt und im Rahmen seiner Transzendentalphilosophie wird vor allem danach gefragt, wie diese ›apriori‹, d.h. vor der Erfahrung möglich sind.

Kants Beispiel für ein synthetisches Urteil apriori ist ein mathematisches: Die Summe von 5 und 7 ist nicht, wie der schottische Philosoph David Hume zuvor behauptet, analytisch in dem Ergebnis (12) enthalten, sondern ›5‹ und ›7‹ müssen nach Kant vom rechnenden Verstand zusammengeführt werden zu etwas, das beide nicht sind (›12‹). Dass das Ergebnis weder empirisch gewonnen noch erfahrungsabhängig ist, wird durch zweierlei ersichtlich: Erstens muss das Ergebnis zu allen Zeiten und an allen Orten das gleiche sein – sofern richtig gerechnet wurde; zweitens besteht die Möglichkeit, dass eine Apparatur, die wegen fehlender Sinne keinerlei Erfahrung macht, dieses Ergebnis dennoch richtig zusammensetzt. (Der lateinische Ausdruck für zusammensetzen lautet ›computare‹. Die von Pascal und Leibniz ersonnenen Rechenmaschinen mögen noch keine Computer gewesen sein, doch ließen sich mit ihnen Zahlen zusammensetzen, etwa 7 und 5 zur 12.)

1 | Vgl. dazu Hansgeorg Hoppe: *Synthesis bei Kant. Das Problem der Verbindung von Vorstellungen und ihrer Gegenstandsbeziehung in der ›Kritik der reinen Vernunft‹*, Berlin/New York: de Gruyter 1983.

Synthesis wird von Kant aber auch generell auf das Zusammenführen des Mannigfaltigen bezogen, gleich ob rein verstandesgemäß oder empirisch. Im letzten Fall, der Synthesis ›aposteriori‹, wird die sinnliche Erfahrung auf einen Gegenstand bezogen, dessen (apriorische) ›Rohform‹ das sogenannte Ding an sich ist. Diesen Vorgang nennt Kant mit einem Begriff, den bereits der Scholastiker Thomas von Aquin im 13. Jahrhundert verwendet, die Apprehension. Sie lässt sich als Auffassung (von lat. ›apprehension‹ für ›Erfassung‹) oder mitunter auch als Begreifen (vom lat. Verb ›prehendere‹ für ›ergreifen‹) übersetzen, und ist letztlich das, was die Fakultät des Verstandes definiert, und zwar als einen möglichen Zustand des Gemüts neben der künstlerischen Einbildungskraft oder der moralischen Vernünftigkeit.

Bereits die antike Sinnenlehre von Aristoteles kennt dieses Moment als ›koiné aisthesis‹. Damit wurde ein Sinn oder eine alle Sinne übergreifende Leistung angenommen, die die Einzelwahrnehmungen zusammenführen, also die visuellen, akustischen, taktilen u.a. Modalitäten auf ein Objekt beziehen sollte. Kant rechnet diese Syntheseleistung der sogenannten produktiven Einbildungskraft zu, die allerdings auch Phantasiegebilde im Sinne von Phantasmen hervorbringen kann.

In der Physiologie des 19. Jahrhunderts wurde bisweilen von einem sechsten und/oder gar einem siebten Sinne gesprochen,² durch den die ›Synthesis eines Mannigfaltigen‹ nach Kant geleistet werden sollte. Als diese Sinne wurden dann die von Kant ebenfalls vor der Erfahrung angesetzten Formen der Anschauung – nämlich Raum und Zeit – identifiziert, denen nun aber ein konkreter physiologischer Ursprung zugewiesen wurde: nämlich die beiden Teile der Innenohren, die drei Bogengänge und die sogenannte Schnecke.³ In Ersterem wurde der Ursprung eines für die räumliche Synthese zuständigen, natürlichen Richtungssystems gesehen (welches nicht nur die Dreidimensionalität, sondern auch die Orthogonalität des kartesischen Koordinatengitters begründet). Das Letztere galt als der Ursprung der zeitlichen Differenzerfahrung, insofern der auditive Teil des Innenohrs zunächst eine Analyse der Töne nach ihrer Höhe vornimmt und dadurch Unterschiede bzw. Intervalle (in der Synthese) erlebbar macht.

5.2 HUSSERL: ›PASSIVE SYNTHESIS‹

Die Synthese-Vorstellung, wie sie anfangs des 20. Jahrhunderts von Edmund Husserl vorgelegt wurde, schließt an die oben skizzierte Problematik an. Dies überrascht zunächst, da man Husserl als ausdrücklichen Kritiker einer Physiologie kennt, die die Sinnesleistungen organisch erklären will, sowie auch einer

2 | So besonders Ernst Heinrich Weber: *Tastsinn und Gemeingefühl* (1846), Leipzig: Engelmann 1905; Karl Vierordt: *Der Zeitsinn nach Versuchen*, Tübingen: Laupp 1868.

3 | So vor allem durch Elias von Cyon: *Das Ohrenlabyrinth als Organ der mathematischen Sinne für Raum und Zeit*, Berlin: Springer 1908.

daran anschließenden Psychologie, die alle mentalen Vorgänge, zu privaten, inneren – allein ›psychischen‹ – erklärt. Der Phänomenologe Maurice Merleau-Ponty hat diese Theorien später als »amphibische[n] Denkweise« bezeichnet.⁴

Im Unterschied zu einem weitverbreiteten Missverständnis ist es keineswegs das Anliegen der Phänomenologie, alles auf eine ›subjektive‹, innere Anschauung zurückzuführen. Vielmehr wird die ›Logik der Phänomene‹ beschrieben, deren Existenz als solche angenommen wird. Freilich impliziert auch die Phänomenologie ein wahrnehmendes Subjekt, doch die beschriebenen Wahrnehmungsstrukturen werden als subjektübergreifend angesehen. Vor allem aber werden die Phänomene nicht als bloße Erscheinungen disqualifiziert (was im Zuge des Psychologismus geschieht, der die Wahrnehmungen als individuell-subjektiv begreift), sondern als das Primäre angesehen. Beispielsweise ist für die Phänomenologie die Erscheinung eines ›Glitzerns‹ nicht richtig oder falsch, sondern sie ist oder sie ist nicht. Auch ist das Dafürhalten nicht richtig oder falsch, sondern eine das Phänomen begleitende bzw. es konstituierende Wahrnehmung: So ist etwa die Wahrnehmung des Glitzerns als Glitzern eines Geldstücks im Moment dieser Wahrnehmung auch dann nicht falsch, wenn das glitzernde Objekt sich später als Kronkorken zeigt.

Martin Heidegger kam als Husserls Nachfolger auf dessen Philosophielehrstuhl an der Universität Freiburg. In seinem Hauptwerk *Sein und Zeit* von 1927 hat er dem siebten Paragraphen einen Abschnitt ›Der Begriff des Phänomens‹ vorangestellt und drei Weisen des ›Erscheinens‹, d.h. des Phänomen-seins, unterschieden:

»Der Ausdruck ›Erscheinung‹ kann selber wieder ein Doppeltes bedeuten: einmal das *Erscheinen* im Sinne des Sichmeldens als Sich-nicht-zeigen und dann das Meldende selbst – das in seinem Sichzeigen etwas Sich-nicht-zeigendes anzeigt. Und schließlich kann man Erscheinen gebrauchen als Titel für den echten Sinn von Phänomen als Sichzeigen.«⁵

Der erste Fall wäre das psychologische oder physiologische Verständnis von Erscheinung, worin diese auf eine Ursache zurückgeführt wird, die das Phänomen als wahrheitsverstellend ausgibt, weil dies ›bloß‹ eine Erscheinung ist. Der zweite Fall wäre die Benennung dieses Anderen als Ursache des Phänomens, worin es ›erscheint‹. Phänomenologen hingegen anerkennen nach Heidegger – und dies ist der dritte Fall –, dass die Möglichkeit zur Disqualifizierung eines Phänomens als das Erscheinen eines anderen (das sich selbst nicht zeigt), die reine Phänomenalität ist oder, wie Heidegger es nennt, das Phänomen als »das *Sich-an-ihm*«.

4 | Maurice Merleau-Ponty: *Phänomenologie der Wahrnehmung* (1945), Berlin/New York: de Gruyter 1966, S. 36.

5 | Martin Heidegger: *Sein und Zeit* (1927), Tübingen: Niemeyer 1993, S. 30.

selbst-zeigende, das Offenbare«. ⁶ Im Falle des Geldstücks/Kronkorkens wäre dies das Glitzern als solches.

Phänomene sind aber nicht isoliert gegeben, sondern werden von ›Absichten‹ oder Intentionen begleitet, die untrennbar mit der Erscheinung verbunden sind. Mit Intentionalität ist in der Phänomenologie wiederum nicht eine psychische Motivation als Ursache für eine (Falsch-)Wahrnehmung (wie Geldmangel für das Geldstück-sehen) gemeint, sondern jenes Dafürhalten (die sogenannte Noesis) des Phänomens: also das Wahrnehmen des Glitzerns als Glitzern eines Geldstücks oder aber Kronkorkens, die eben nicht nur visuelle Eigenschaften haben, sondern auch haptische etc. Für Kant war dies die besagte Apprehension von Eigenschaften, die einem möglichen Gegenstand (dessen ›Rohform‹ das Ding an sich bildet) zugesprochen werden, oder mit Husserl gesprochen: die zugleich an ihm wahrgenommen werden.⁷

Husserl nimmt nun zwei Arten der Synthese an: eine aktive und eine passive. Wobei die produktive Einbildungskraft (nach Kant) oder Phantasie (nach Husserl) an beiden teilhat: Sie ergänzt fehlendes (passiv), kann aber auch (aktiv) vorstellen.⁸ Phänomenologisch basal ist für Husserl aber die ›Normalwahrnehmung‹, die sich nach Kant als Vorgang der Apprehension gestaltet und die Husserl als ›passive Synthesis‹ bezeichnet:

»Wenn Kant in seinem großen Werk [sc. *Kritik der reinen Vernunft*] von einer analytischen Synthese [eine Formulierung, die sich bei Kant selbst so nicht findet, die aber in der zweiten Auflage von 1787 als ›analytische Einheit der Apperzeption‹ (B 132) auf die ›ursprünglich-synthetische Einheit der Apperzeption‹ zurückgeführt wird] spricht, so meint er das darin in expliziten Formen des Begriffs und Urteils sich entfaltende Erkennen, und dieses weist nach ihm zurück auf eine produktive Synthese. Das ist aber nach unserer Auffassung nichts anderes als das, was wir passive Konstitution nennen, als das nach unserer phänomenologischen Methode enthüllbare Zusammenspiel der sich beständig höher entwickelnden Intentionalität des passiven Bewußtseins, in dem sich passiv eine überaus vielgestaltige immanente und transzendente Sinnggebung vollzieht und sich organisiert zu umfassenden Sinngestalten und Seinsgestalten, wie es die immanente Einheit des Erlebnisstroms ist und hinsichtlich der Transzendenz die Einheit der Welt mit ihren universalen Formen.«⁹

6 | Heidegger, *Sein und Zeit*, 1993, S. 28.

7 | Vgl. zu beiden auch Nathan Rotenstreich: *Synthesis and Intentional Objectivity. On Kant and Husserl*, Dordrecht: Kluwer 1998.

8 | Vgl. hierzu vor allem den als Ergänzungsband zum elften Band der *Husserliana*, der von Roland Breeur 2000 herausgegebene Vorlesungsauszug aus der *Transzendentalen Logik* von 1920/21 unter dem Titel *Aktive Synthesen*.

9 | Vgl. *Husserliana*, Bd. XI, S. 275f.

Die Passage mag nach Merleau-Ponty zunächst wie ein »Widerspruch in sich«¹⁰ anmuten, da Synthesen per definitionem durch eine Aktivität beschrieben sind: eben derjenigen der Hinzunahme. »Doch wollte die Rede von passiver Synthesis vielmehr sagen, daß in ihr das Mannigfaltige zwar von uns durchdrungen ist, gleichwohl aber nicht wir es sind, die seine Synthese vollbringen.« – Passiv bedeutet für Husserl demnach so viel wie »unbewusst«, wäre der Begriff selbst nicht wieder psychologisierend. Ein Beispiel für einen solchen Vorgang im Denken ist für Husserl ein »passiv auftauchendes Urteil als »Einfall.«¹¹ Diese Denkoperation wiederum gehört zur Gruppe der Assoziationen, die einen Hauptteil der passiven Synthesen ausmachen.¹²

»Uns bezeichnet der Titel Assoziation eine zum Bewußtsein überhaupt ständig gehörende Form und Gesetzmäßigkeit der immanenten Genesis, nicht aber, wie den Psychologen, eine Form objektiver, psychophysischer Kausalität, nicht eine gesetzmäßige Art, wie im menschlichen und tierischen Seelenleben das Auftreten von Reproduktion, Wiedererinnerung kausal bestimmt ist.«¹³

5.3 ZEIT ALS IMMANENTES ERLEBEN

Husserl hat seine Reflexionen zur passiven Synthesis in Vorlesungen und Forschungsmanuskripten ausgeführt bzw. niedergelegt, die allesamt erst postum, im Jahr 1966 im Rahmen der Gesamtausgabe *Husserliana*, als deren elfter Band unter dem Titel *Analysen zur passiven Synthesis* erschienen sind.¹⁴ Gleichwohl konnte sich die Rezeption auf eine Publikation von Husserl stützen, in der der Sache nach eine elementare passive Synthesis phänomenologisch beschrieben wird: die Erfahrung von Zeit. Dies geschieht in den 1905 gehaltenen *Vorlesungen zur Phänomenologie des inneren Zeitbewusstseins*, die zunächst 1917 von Edith Stein unter Heranziehung von neuen Notizen Husserls und in Absprache mit ihm bearbeitet wurden, schließlich aber erst 1928 von Martin Heidegger (der Stein 1919 als Assistent von Husserl ablöste) final herausgegeben wurden – just nachdem

10 | Merleau-Ponty, *Phänomenologie der Wahrnehmung*, 1966, S. 485.

11 | *Husserliana*, Bd. XVII, S. 29.

12 | Vgl. dazu grundlegend Elmar Holenstein: *Phänomenologie der Assoziation. Zu Struktur und Funktion eines Grundprinzips der passiven Genesis bei E. Husserl*, Den Haag: Nijhoff 1972.

13 | *Husserliana*, Bd. XI, S. 17.

14 | Im veröffentlichten Werk wird die Synthese auch manchmal als Genesis angesprochen und entsprechend ist die Rede von »aktiver und passiver Genesis«. – Siehe so etwa den gleichnamigen Paragraphen 38 in Husserls *Cartesianische Meditationen*, die 1931 auf Französisch und 1950 erstmals auf Deutsch erschienen.

sein Buch zur Zeitlichkeit ein Jahr zuvor erschienen war und Husserls Ansatz sich damit letztlich überholt hatte.¹⁵

Die titelgebende Wortwahl einer ›inneren Zeitvorstellung‹ könnte irreführend sein, wenn unter ›inneren‹ die psychisch-private Vorstellung gemeint wäre. Husserl aber möchte eine Zeitlichkeitswahrnehmung beschreiben, die sich nicht an einer Objektbewegung festmacht, was entsprechend eine ›äußere‹ Zeitlichkeit wäre. Husserl selbst nennt dies die ›immanente Zeit des Bewußtseinsverlaufs.‹¹⁶ Bereits der französische Philosoph Henri Bergson hatte in *Essai sur les données immédiates de la conscience* von 1889 solcherart zwischen zwei Zeitlichkeitsformen unterschieden: der messbaren Zeit als Bewegung durch den Raum (sprich: die Zeit, die vergeht, bis ein Objekt sich von A nach B bewegt) und einem Erleben d(i)e(se)r Zeit als sog. Dauer (frz. ›durée‹). Letztlich findet sich diese Unterscheidung auch schon bei Kant, wenn er veranschlagt, dass die Möglichkeit an äußeren Dingen eine Bewegung wahrnehmen zu können, auf den inneren Sinn der Zeit zurückgeht.

Merleau-Ponty kannte nun nicht nur Heideggers Edition von Husserls Zeitvorlesungen, sondern war auch als einer der ersten in die belgische Stadt Löwen gereist, wohin Husserls Nachlass von dem Franziskanermönch Herman Van Breda vor den Nazis gerettet worden war. So konnte er die Texte zur passiven Synthesis auf die bereits veröffentlichten Arbeiten beziehen. Entsprechend verwundert es nicht, dass Merleau-Ponty als erstes Beispiel für die scheinbar widersprüchlich bezeichnete passive Synthesis das Phänomen der Zeit oder vielmehr den Vorgang der Zeitigung anführt:

»Eben diesen beiden Bedingungen [sc. dass das Mannigfaltige zwar von uns durchdrungen ist, gleichwohl aber nicht wir es sind, die seine Synthese vollbringen] aber genügt ihrem Wesen nach die Zeitigung: denn offenkundig bin ich zwar nicht Urheber der Zeit, so wenig wie der meines Herzschlages, nicht bin ich es, der die Initiative der Zeitigung ergreift; es geschah nicht nach meiner Wahl, daß ich geboren wurde, und bin ich einmal geboren, so bricht durch mich hindurch die Zeit hervor, was immer ich tun mag.«¹⁷

Husserls Beispiel für die immanente Zeiterfahrung ist wiederum »das Bewußtsein eines Tonvorgangs, einer Melodie, die ich eben höre.«¹⁸ Das Beispiel ist hierbei nicht irgendeines, sondern vielleicht das einzige, für das die Existenz eines rein ›innerlichen‹, aber gleichwohl objektiv für alle nachvollziehbaren Ereignisses

15 | Beide Bücher zur Zeit erschienen zunächst als Beiträge in den von Husserl herausgegebenem *Jahrbuch für Philosophie und phänomenologische Forschung*, in leicht korrigierter Fassung liegt Husserls Schrift über die Zeit seit 1969 als Band X der *Husserliana*, herausgegeben von Rudolf Boehm, vor.

16 | *Husserliana*, Bd. X, S. 5.

17 | Merleau-Ponty, *Phänomenologie der Wahrnehmung*, 1966, S. 485.

18 | *Husserliana*, Bd. X, S. 5.

bzw. Phänomens angenommen werden kann. Dabei ist der Grund für diese spezielle Zeiterfahrung als ›reines‹ Phänomen gerade kein menschlicher, sondern ein maschineller. Eine ›innere‹ Isoliertheit der Melodie, die von ihrer Ursache (die in ihr erscheinen könnte), war nämlich erst wenige Jahre zuvor medientechnisch durch das Grammophon seit 1887 und die Schellack-Platte seit 1895 möglich geworden.¹⁹ Es handelt sich um die Erzeugung einer artifiziellen Präsenz²⁰ im auditiven Bereich. Sie kann als Äquivalent zur Fotografie gesehen werden, auf welche Husserl zumeist rekurriert, wenn er den Unterschied zwischen einem materiellen Träger oder Medium (dem Bild als ›picture‹ oder dem von Husserl sog. Bildträger) und dem Bild als Erscheinung oder Phänomen (dem Bild als ›image‹ oder dem von Husserl sog. Bildobjekt) thematisiert; wobei es sich also wiederum um die Unterscheidung eines reinen Phänomens von seiner (materiellen) Ursache handelt.

So schreibt Husserl in der kurz vor der Zeitvorlesung gehaltenen Bildvorlesung über »Phantasie und Bildbewusstsein« von 1904/05:

»Der abgebildeten Sache steht nämlich ein Doppeltes gegenüber: 1) Das Bild als physisches Ding, als diese bemalte und gerahmte Leinwand, als dieses bedruckte Papier usw. In diesem Sinne sagen wir, das *Bild* ist verbogen, zerrissen, oder das Bild hängt an der Wand usw. 2) Das Bild als das durch die bestimmte Farben- und Formgebung so und so erscheinende *Bildobjekt*. Darunter verstehen wir nicht das abgebildete Objekt, das *Bildsujet*, sondern das genaue Analogon des Phantasiebildes, nämlich das erscheinende Objekt, das für das Bildsujet Repräsentant ist. Z.B. eine Photographie liege vor uns, ein Kind darstellend. Wie tut es das? Nun dadurch, dass es primär ein Bild entwirft, das dem Kinde zwar im ganzen [sic!] gleicht, aber in Ansehung der erscheinenden Grösse, Färbung u.dgl. sehr merklich von ihm abweicht. Dieses hier erscheinende Miniatur-Kind in widerwärtig grauviolletter Färbung ist natürlich nicht das gemeinte, das dargestellte Kind. Es ist nicht das Kind selbst, sondern sein photographisches *Bild*.«²¹

Synthetisiert wird zufolge der Phänomenologie Husserls hierbei das Bild(objekt) als reine Erscheinung durch das Bewusstsein und nicht etwa durch das Bild als Trägermedium.

19 | Zu den medientheoretischen Implikationen dieser Erfindung vgl. die einschlägige Studie von Friedrich Kittler: *Grammophon, Film, Typewriter*, Berlin: Brinkmann & Bose 1986.

20 | Zu diesem Ausdruck und anschließend an Husserl vgl. Lambert Wiesing: *Artifizielle Präsenz. Studien zur Philosophie des Bildes*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 2005.

21 | *Husserliana*, Bd. XXIII, S. 18f.

5.4 MECHANISCHE REPRODUKTION

In Entsprechung ist beim Grammophon der Tonträger das (äußere) Medium, durch das ein (inneres) Erleben des Phänomens Klang hörbar wird, das aber als Phänomen nicht vorrangig ist bzw. nicht als im Phänomen erscheinend ausgegeben wird. Husserl hätte in Analogie zu seiner Bildbeschreibung auch von einem ›Tonobjekt‹ sprechen können, er schreibt jedoch verallgemeinernd vom »Zeitobjekte[er]«.²² Wie die Differenz von Bildträger und Bildobjekt auch an nichtfotografischen Bildern, vor allem Gemälde, beobachtet werden kann, lässt sich die Differenz zwischen Tonträger und Tonobjekt auch an Instrumenten festmachen, die Klang nicht über eine Aufzeichnung erzeugen, sondern aktuell produzieren, wie etwa das Klavier. Das Beispiel ist durchaus naheliegend, da am Klavier die einzelnen Töne (oder Tonträger) durch die separaten Tasten indiziert werden. Trotzdem kann der Eindruck einer musikalischen Einheit entstehen. Wie aber ist dies möglich? Und ist es von Bedeutung, ob ein Mensch oder ein Lochstreifen die Tastatur auslöst? Die Frage stellt sich angesichts mechanischer Klaviere oder sog. Reproduktionsklaviere, deren Produktion von der Firma M(ichael) Welte und Söhne in Freiburg i.Br., wo Husserl lebte und lehrte, eben in dem Jahr begonnen wurde, in dem Husserl seine Vorlesungen über Zeit und Synthese hielt. Bekannt wurden diese Klaviere als Welte-Mignon-Reproduktionsklaviere oder schlicht als ›Mignonflügel‹. Sie wurden über einen Lochstreifen gesteuert, die sog. Notenrolle. Der Vorteil gegenüber einem Grammophon war die Klangqualität, da nicht eine Aufnahme des Gesamtklangs wiedergegeben wurde, sondern der Klang jeweils neu an einem Klavier (jedoch ohne Pianist) erzeugt wurde. Rein klanglich ist daher der Unterschied zwischen einem menschlich und einem mechanisch (re)produzierten Stück nicht zu hören.

In den *Analysen zur passiven Synthesis* beschreibt Husserl an einer Stelle, wie durch die Vermutung einer mechanischen Reproduktion der Tonobjekte diese nachträglich unter Verdacht geraten:

»Z.B. wir hören in Pausen mehrerer Klavierstücke und haben die Apperzeption [von lat. *ad-percipere* für ›hinzuwahrnehmen‹], im Nebenraum spiele jemand Klavier. Plötzlich werden wir zweifelhaft, ob es sich nicht um Leistungen eines mechanischen Apparats (eines Mignonflügels) handelt. Als bald überträgt sich der Zweifel in die retentionale Sphäre, nämlich auf die vorher gehörten Stücke.«²³

22 | *Husserliana*, Bd. X, S. 23. Vgl. dazu auch Inga Römer: *Das Zeitdenken bei Husserl, Heidegger und Ricœur*, Dordrecht u.a.: Springer 2010, S. 34ff.

23 | *Husserliana*, Bd. XI, S. 238. Vgl. dazu auch Daniel Schmicking: *Hören und Klang. Eine phänomenologische Untersuchung*, Würzburg: Königshausen & Neumann 2003, S. 237.

Über diesen Fall lässt sich sogleich das entscheidende Grundbegriffspaar der Synthesistheorie Husserls erläutern: Retention und Protention. Ersteres betrifft die in dem Beispiel angesprochene rückwirkende Wahrnehmung, die sich in dem genannten Beispiel durch eine sich ändernde Intentionalität auszeichnet.²⁴ So wie in dem visuellen Phänomen Glitzern sich die Intentionalität von ›echtem Geld‹ auf ›ein Kronkorken, der wie ein Geldstück aussieht‹ sich ändert, so wechselt hier die Absicht oder Bezugsform von ›von einem echten Menschen gespielt‹ zu ›mechanisch reproduziert‹. Vor allem interessiert Husserl aber die Zeitlichkeit des Tonobjekts. Auch ohne Intentionalitätsveränderung vollzieht sich nämlich ein retentionaler Rückgriff – ebenso wie ein protentionaler Vorgriff. Anders lässt sich nach Husserl nicht erklären, warum einzelnen Tonphänomene als ein Gesamt – die Melodie – wahrgenommen werden.

Die »objektive [...] Zeit«²⁵ als die Zeit, in der die Töne messbar von einem Menschen oder einer Maschine gespielt wurden, ist hierbei ›ausgeschaltet‹. ›Ausschaltung‹ ist der deutsche Terminus für die phänomenologisch in Anschlag gebrachte Methode der Epoché (von gr. ›epoché‹, für ›Haltepunkt‹), zumeist von Husserl auch als ›Einklammerung‹ wiedergegeben. In der bewussten Ausschaltung, d.h. der ›Absehung‹ vom Material des Tonereignisses, wird die Melodie allererst hörbar. Diesen Schritt vollzieht nicht nur der Phänomenologe, der das Wahrnehmungsphänomen untersucht, sondern jeder Mensch, der Musik rezipiert. Das Beispiel der Melodie, das Husserl hierbei anführt, wurde bereits von dem österreichischen Philosophen Franz Brentano verwendet, der in seiner Schrift *Psychologie von einem empirischen Standpunkte* von 1874 den für die Husserlsche Phänomenologie wichtigen Begriff der Intentionalität geprägt hatte. Seine Ausführungen zur Melodie wurden jedoch nur in unpublizierten Vorlesungen vorgetragen; sie fanden durch Schüler wie Carl Stumpf Verbreitung, der die Annahme in seiner *Tonpsychologie* von 1890 zitiert:

»Die Aufmerksamkeit [...] [ist] ein Gefühl, und ihre primäre Wirkung [...] [ist] die längere Forterhaltung des bezüglichlichen Inhalts im Bewusstseins. Unter solcher Forterhaltung [...] [ist] natürlich nicht etwa bloß [sic!] verstanden die längere Dauer der Vorstellung, nachdem sie nicht mehr Empfindung ist, sondern auch das Bewusstsein dieser Dauer, d.h. die Vorstellung der bereits vergangenen, mit diesem Merkmal behafteten, sodass der Eindruck, während er im Bewusstsein erhalten bleibt, zugleich eine immer größere Ausdehnung gewinnt.«²⁶

24 | Vgl. dazu auch Jay Lampert: *Synthesis and Backward Reference in Husserl's ›Logical Investigations‹*, Berlin u.a.: Springer 2010.

25 | *Husserliana*, Bd. X, S. 4.

26 | Carl Stumpf: *Tonpsychologie*, Bd. 2, Leipzig: Hirzel 1890, S. 277.

5.5 RÄUMLICHE REDUKTION

Aus der Wortwahl Stumpfs wird ersichtlich, dass die Beschreibung des immanenten Erlebens von Zeit auf eine räumliche Beschreibung angewiesen ist. Es soll hier nicht geklärt werden, welcher Beschreibungsmodus der ursprünglichere ist, und ob so etwas wie Zeit überhaupt existiert,²⁷ sondern es soll deutlich werden, dass Husserl das phänomenale Zeiterleben wesentlich als räumliches Ereignis begreift. Er tut dies in zweierlei Hinsicht: Einmal eröffnet die Melodie einen (virtuellen) Raum, der nicht auf denjenigen der Tonproduktion zurückzuführen ist, ein anderes Mal ist dieses Erlebte selbst in sich räumlich organisiert. Eine vergleichbare Annahme findet sich bereits bei Immanuel Kant, der die (innere) Zeit als notwendig (wenngleich auch fälschlicherweise) mit der Vorstellung einer Linie verknüpft sieht. Henri Bergson brachte ein Trichtermodell der Zeit in Anschlag, worin die Zeit auf die Dauer als ihre Essenz reduziert wird. Husserl greift im Wesentlichen auf das Kantische Modell der Linie zurück und beschreibt eine Melodie als den Zurück- und Vorgriff entlang ihres Verlaufs. Retention und Protention sind dabei also die Prozesse einer exemplarischen passiven Synthesis, ohne die aus den Tönen gar keine Melodie entstehen würde. Es sind einzelne Töne, die zusammengeführt werden, aber diese existieren in ihrer Gesamtheit nicht als ein psychisches oder privates Ereignis, sondern liegen phänomenal (objektiv) vor. Hieraus erklärt sich auch die Möglichkeit, warum mehrere Menschen dieselbe Melodie zugleich mitsingen können (oder es zumindest versuchen).

Bezeichnenderweise lässt Husserl der Beschreibung des Zeiterlebens in *Zur Phänomenologie des inneren Zeitbewusstseins* eine Beschreibung des Raumerlebens vorangehen, wobei er beide Wahrnehmungen (sofern sie immanent sind) als Gleichnisse füreinander ansieht:

»Was die Ausschaltung der objektiven Zeit besagt, das wird vielleicht noch deutlicher, wenn wir die Parallele für den Raum durchführen, da ja Raum und Zeit so viel beachtete und bedeutsame Analogien aufweisen. In die Sphäre des phänomenologisch Gegebenen gehört das Raumbewußtsein, d.h. das Erlebnis, in dem ›Raumanschauung‹ als Wahrnehmung und Phantasie sich vollzieht. Öffnen wir die Augen, so sehen wir in den objektiven Raum hinein – das heißt (wie die reflektierende Betrachtung zeigt): wir haben visuelle Empfindungsinhalte, die eine Raumanschauung fundieren, eine Erscheinung von so und so gelagerten Dingen. Abstrahieren wir von aller transzendierenden Deutung und reduzieren die Wahrnehmungserscheinung auf die gegebenen primären Inhalte, so ergeben sie das Kontinuum des Gesichtsfeldes, das ein *quasi*-räumliches ist, aber nicht etwa Raum oder eine Fläche im Raum: roh gesprochen ist es eine zweifache kontinuierliche Mannigfaltigkeit. Verhält-

27 | Vgl. dazu Stephan Günzel: Zeit – Philosophisches Scheinproblem und räumliche Figuration, in: Claudia Öhlschläger, L.P. Capano (Hg.): *Zeichen der Zeit. Mediale, philosophische und poetische Figurationen von Temporalität*, Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht 2013, S. 65-75.

nisse des Nebeneinander, Übereinander, Ineinander finden wir da vor, geschlossene Linien, die ein Stück des Feldes völlig umgrenzen usw. Aber das sind nicht die objektiv-räumlichen Verhältnisse. Es hat gar keinen Sinn, etwa zu sagen, ein Punkt des Gesichtsfeldes sei 1 Meter entfernt von der Ecke dieses Tisches hier oder sei neben, über ihm usw. Eben- sowenig hat natürlich auch die Dingerscheinung eine Raumstelle und irgendwelche räum- lichen Verhältnisse: die Hauserscheinung ist nicht neben, über dem Haus, 1 Meter von ihm entfernt usw.«²⁸

In diesem Zusammenhang muss ein weiterer methodischer Grundbegriff der Phänomenologie – neben Intentionalität und Epoché – genannt werden: Phäno- menologie betreibt immer eine Reduktion. Eine solche Verminderung ist jedoch nicht negativ gemeint, etwa im Sinne eines Übersehens von Nuancen, sondern sie bedeutet die Suche nach Grundstrukturen. In dieser Weise ist der Raum als Phä- nomen nach Husserl gar nicht dreidimensional, sondern – sofern durch das Se- hen konstituiert – zweidimensional. Entsprechend scheint für die Zeit zu gelten, dass sie (als die in der Reduktion frei gewordene Dimension) eindimensional ist. Jedoch hat auch diese mindestens zwei Dimensionen, wenn die Vergangenheit – wie Husserl dies schildert – als ein ›Herabsinken‹ von Jetztpunkten begriffen wird. Wird auch noch die Zukunft (als Protention) hinzugenommen, so kommt nach Husserl nicht dem Raum, sondern der Zeit eine Dreidimensionalität zu. So jedenfalls lautet die Beschreibung von Zeit, die Martin Heidegger in *Sein und Zeit* vorlegt, wenn er die Zeit als drei Ekstasen fasst, d.h. als drei Momente des Her- ausstehens:²⁹ zunächst in der Gegenwart, dann aber in Vergangenheit (Retention) und Zukunft (Protention).

5.6 DEKONSTRUKTION: ZWISCHEN RETENTION UND PROTENTION

Für den phänomenalen Vorgang der Retention lässt Husserl seiner Veröffentlichung von 1928 ein »Diagramm der Zeit« beigeben, das er auch in den *Analysen zur passiven Synthesis* erläutert »In jeder Phase haben wir Urimpression, Retention und Protention, und Einheit kommt im Fortgang dadurch zustande, daß die Pro- tention jeder Phase sich in der Urimpression der kontinuierlich angrenzenden Phase erfüllt.«³⁰

28 | *Husserliana*, Bd. X, S. 5f.

29 | Heidegger, *Sein und Zeit*, 1993, S. 323ff.

30 | Vgl. *Husserliana*, Bd. XI, S. 66.

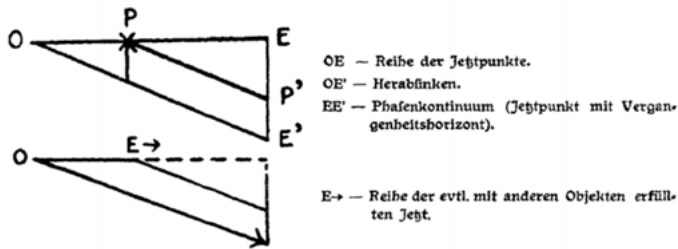


Abbildung 5.1: Edmund Husserl: *Diagramm der Zeit*. Bildnachweis: Edmund Husserl: Vorlesungen zur Phänomenologie des inneren Zeitbewusstseins, (hg. von Martin Heidegger), in: *Jahrbuch für Philosophie und phänomenologische Forschung*, Bd. IX, Halle a.D. Saale: Niemeyer 1928, 367-496, S. 389.

Jeder Punkt (P) in der Jetztreihe (von O nach E) kann solcherart als Vorgriff (Pro-tention) vom Beginn der Reihe aus gesehen werden, an dem aber zugleich immer auch ein Rückgriff (Retention) auf die »abgesunkenen« Jetztpunkte erfolgt. (Das erste Teilschema zeigt den Aspekt der Retention, das zweite Teilschema denjenigen der Protention.) Da eine Melodie sich aber erst im Verlauf der Klange-reignisse bildet, kann deren beispielhafte Konstitution zugleich als Belege dafür genommen werden, dass die sogenannten Urimpressionen erst nachträglich als solche wahrgenommen werden. Von daher impliziert die Theorie der passiven Synthesis nicht nur eine Bewusstseinstheorie der Immanenz, sondern auch eine Dekonstruktion der Zeit als Reihe, da ihr Anfang oder jeder vorhergehende Mo-ment immer nur nachträglich als ein solcher wahrgenommen werden kann – im Unterschied zum »Jetzt« der Gegenwart als aktuelle Wahrnehmung. Für die Zu-kunft gilt spiegelbildlich, dass auch sie erst nachträglich als solche wahrgenom-men wird, wenn sie Gegenwart geworden ist. Husserl selbst reflektiert nicht auf dieses Problem der gegenwartsbezogenen Wahrnehmungsphilosophie, wohl aber spricht er im ersten Satz seinen Vorlesungen über die *Analysen zur passiven Syn-thesis* immerhin von Prä-tention, also einer »Anmaßung«, des Bewusstseins, inso-fern dieses (protentional) vorgreift auf Kommendes: »Die äußere Wahrnehmung ist eine beständige Prä-tention, etwas zu leisten, was sie ihrem eigenen Wesen nach zu leisten außerstande ist.«³¹ Auch wenn Husserl dies im Sinne des »äuße-ren Sinns« nach Kant zunächst auf den Raum bezieht,³² kann gleiches für die Zeit gelten. Allenfalls kann es hier nur insofern Vorgriffe geben, die keine Anmaßung sind, wenn das kommende Gegenwärtsmoment bereits bekannt ist. (Wie es eben bei der maschinellen oder technischen Synthese des Klaviers bzw. der Audioauf-nahme im Beispiel der Melodie der Fall ist.)

31 | Vgl. *Husserliana*, Bd. XI, S. 3.

32 | Siehe dazu weiter unten das Ende dieses Abschnitts.

Jener Aspekt der Zeitphilosophie Husserls ist entscheidend für die Herausbildung einer nachphänomenologischen Synthesistheorie in Frankreich: So hat Gilles Deleuze 1968 in *Différence et Répétition* daraus die drei Formen der Zeit als jeweils andere Arten der Synthese abgeleitet: die »lebendige Gegenwart«, die »reine Vergangenheit« und die Zukunft als »leere Form der Zeit«. Die Modi, in welchen die passive Synthese auftritt, sei entsprechend »Gleichzeitigkeit, Koexistent und Präexistenz«.³³ Vor allem aber hat sich der Begründer der Dekonstruktion in der Philosophie, Jacques Derrida, bereits in seiner Diplomarbeit von 1953/54 mit der besonderen Konstellation in der gegenwartsfixierten (also prässenzphilosophischen) und dennoch zwei differierende Zeitformen voraussetzenden Beschreibung Husserls auseinandergesetzt.³⁴ Es ist keine Übertreibung zu sagen, dass die Möglichkeit der Dekonstruktion hierbei von Derrida überhaupt entdeckt wird. So schreibt er Husserl kommentierend:

»Was nach dieser Ausschaltung [der objektiven Zeit] zurückbleibt, ist folglich eine phänomenologische Dauer, eine unmittelbare Wahrnehmung der Zeit, die den einzig möglichen und gültigen Beginn, die einzige ursprüngliche Gewissheit einer Reflexion über Zeit darstellt. [...] Diese Evidenz [des Nacheinanders eines Tonvorgangs] ist der Subjektivität rein immanent. [...] Damit jedoch die Subjektivität nicht rein psychologische und nicht in sich selbst abgeschlossen ist, [...] müssen in dieser Immanenz die Intentionalität und mit ihr die unmittelbare Konstitution der zeitlichen Gegenstände [*objectivités*] wie die Vergangenheit, die Zukunft usw. gewahrt bleiben. [...] Wie kann ein intentionales Zeitbewusstsein, dass sich auf dialektische Weise durch Retention und Protention [ergibt ...] einem rein immanenten Erfassen zugänglich werden? Wird das, was bereits *im* inneren Zeitbewusstsein konstituiert wurde, in einer absoluten phänomenologischen Evidenz gegeben [...]? Diese Evidenz ist nicht bewegungslos. Besteht ihre wesentliche Bewegung nicht darin, fortwährend aus sich selbst auszubrechen, und zwar aus einer Gegenständlichkeit, die sich soeben konstituiert hat, in eine Gegenständlichkeit, die sich jetzt konstituiert? [...] [W]enn man [...] erkennt, dass die Gegenwart nicht konstituiert ist, weil sie sich, sobald sie in ihrer absoluten Neuheit aus einer unmittelbar konstituierten Vergangenheit auftaucht, in dieser Vergangenheit festsetzt und sich selbst als Gegenwart nur vor dem Hintergrund ihrer passiven Kontinuität mit dem vorhergehenden Moment erscheinen kann, dann hat man das Recht die folgende Frage zu stellen: Welche grundsätzliche Diskontinuität besteht zwischen dieser bereits konstituierten Vergangenheit und der objektiven Zeit, die mit auferlegt und die ohne irgendeinen aktiven Beitrag unabhängig von mir konstituiert wurde?«³⁵

33 | Gilles Deleuze: *Differenz und Wiederholung* (1968), Fink: München 1997, S. 114.

34 | Zum Anschluss der Dekonstruktion an Husserl vgl. Leonard Lawlor: *Derrida and Husserl. The Basic Problem of Phenomenology*, Bloomington: Indiana University Press 2002.

35 | Jacques Derrida: *Das Problem der Genese in Husserls Philosophie* (1990), Zürich/Berlin: diaphanes 2013, S. 144-146.

Derrida unterstellt mit der schließenden Frage nichts weniger als eine Indifferenz zwischen der objektiven (durch Messgeräte wie Uhren vorausgesetzten) Zeit und der durch das Bewusstsein konstituierten Zeit, welche gerade von den objektiven Modi (Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft) unterschieden sein soll. Nachträglichkeit und Vorträglichkeit sind solcherart zugleich Bedingung und Problem der Synthese zufolge der phänomenologischen Wahrnehmungsphilosophie Husserls.

In den Texten zur *Analyse der passiven Synthesis* wird noch eine andere Analogie auf räumliche (»äußere«) Verhältnisse in Anschlag gebracht: Es ist die von Husserl sogenannte Abschattung, welche als zentrales Beispiel für die Anmaßung in der Wahrnehmung angeführt wird. Aktuell (zu einem Jetzt-Punkt der Zeit) werden Raumdinge immer nur perspektivisch wahrgenommen. Die Rückseite der Dinge und letztlich alles, was verdeckt ist, bleibt abgeschattet. Die Wahrnehmung übersteigt durch die passiven Synthesen der Einzelansichten immer die aktuelle Ansicht und setzt sie bereits im Hinblick auf den Gegenstand im Ganzen (oder das Gegenstandskonstrukt als »Ding an sich«) zusammen. Was also heißt es, einen Tisch zu sehen, und zwar als einen?

»Das ist eine sehr merkwürdige Wesenslage. Denn zu dem eigenen Sinn jeder Wahrnehmung gehört ihr wahrgenommener Gegenstand als ihr gegenständlicher Sinn, also dieses Ding: der Tisch, der gesehen ist. Aber dieses Ding ist nicht die jetzt eigentlich gesehene Seite, sondern ist (und dem eigenen Sinn der Wahrnehmung gemäß) eben das Vollding, das noch andere Seiten hat, Seiten, die nicht in dieser, sondern in anderen Wahrnehmungen zur eigentlichen Wahrnehmung kommen würden.«³⁶

5.7 FAZIT: APRIORISCHE SYNTHESEN APOSTERIORI

Husserls Auffassungen sind – wie Derridas Analysen der Analysen zeigt – nicht unkritisiert geblieben. Der bekannteste Kritiker dürfte Theodor W. Adorno sein, der in seiner letzten von vier, erstmals im selben Jahr wie Derridas Diplomarbeit veröffentlichten »Studie über Husserl« die Annahme von Volldingen historisch zu entkräften sucht:

»[N]immt man in deutschen Städten nach dem zweiten Krieg ein Haus in strikt frontaler Perspektive wahr, so muß man oft genug zur Seite treten, um zu wissen, ob man wirklich ein Haus sieht oder bloß eine intakte Mauer eines eingestürzten. Eine solche Möglichkeit wird von Husserl nicht berücksichtigt.«³⁷

36 | Husserliana, Bd. XI, S. 4.

37 | Theodor W. Adorno: Zur Dialektik der Erkenntnistheoretischen Begriffe (1959); in: Ders.: *Zur Metakritik der Erkenntnistheorie. Studien über Husserl und die phänomenologischen Antinomien*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1990, 130-189, S. 158.

Daneben lässt sich insbesondere auf das fotografische und weiterhin filmische Dispositiv dieser Synthesevorstellung hinweisen, insofern Husserl die räumliche wie zeitliche Wahrnehmung als einzelne Standbilder konzipiert, die qua passiver Synthese als Bewegtbild erscheinen.³⁸ Von hier aus wird die transzendente Konzeption von Subjektivität durch Kant und Husserl zum ungewollten Vorläufer der filmwissenschaftlichen Apparatus-Theorie, die Kino stets als System (oder ›Ideologie‹) einer Synthese von Materie zu etwas diagnostiziert, das sie nicht ist.³⁹

Husserls Theorie der passiven Synthesen, die nach Kant auf die produktive Einbildungskraft zurückgehen und im Wesentlichen als assoziative Verknüpfungen vorliegen, kann als Vorwegnahme einer aposteriorischen Verknüpfungsleitung verstanden werden, wie sie paradoxerweise von einer apriorisch verfahrenenden Maschine geleistet wird: So hat Vannevar Bush 1945 in seiner Vision *How We May Think* die zukünftige Verwendung der Leibnizschen Rechenmaschine in einem ›Memex‹ gesehen, einem Gerät, das die bislang von Menschen hergestellten Verknüpfungen nun speichern kann: »Es werden ganz neue Arten von Enzyklopädien entstehen, bereits versehen mit einem Netz assoziativer Pfade, bereit dafür, in den Memex aufgenommen und dort erweitert zu werden.«⁴⁰ Diese Synthesen aber sind nichts anderes als die Links eines Hypertextes, der bislang unverbundene Inhalte miteinander in Beziehung setzt.

38 | Vgl. Iris Därmann: Husserls Extrablatt. Bild special, in: Michael Wetzell, H. Wolf (Hg.): *Der Entzug der Bilder. Visuelle Realitäten*, München: Fink 1994, 67-77.

39 | Vgl. Hartmut Winkler: *Der filmische Raum und der Zuschauer. ›Apparatus‹ – Semantik – ›Ideologie‹*, Heidelberg: Winter 1982.

40 | Vannevar Bush: *Wie wir denken werden* (1945), in: Karin Bruns, R. Reichert (Hg.): *Reader Neue Medien. Texte zur digitalen Kultur und Kommunikation*, Bielefeld: transcript 2007, 106-125, S. 123.

6. Synthese als Vermittlung

Innere Berührung und exzentrische Empfindung

Karin Harrasser

Anders als in der nachkantianischen Philosophie ist die Frage nach Struktur und Effizienz von Syntheseleistungen in der Psychologie und in den Künsten häufig mit Blick auf eine gewisse mediale Verfasstheit der sinnlichen Wahrnehmung gestellt worden. Im Zentrum der hier präsentierten Überlegungen stand seit der Antike der Tastsinn. Im aristotelischen Schema der Sinnesqualitäten, die Aristoteles in *De Anima* entfaltet, ist er keineswegs mit Unmittelbarkeit korreliert sondern – im Gegenteil – mit einem zutiefst vermittelnden Charakter belegt.¹ Aristoteles begreift den Tastsinn doppelt: als ›koine aisthesis‹, als Allgemeinsinn, das spätere ›Gemeingefühl‹ und als eine ›innere Berührung‹, welche die einzelnen Sinneswahrnehmungen synthetisiert. Ein solches Verständnis des Tastsinns resoniert noch in Marshall McLuhans Parteinahme für ihn: ›Taktik‹ nannte er all jene Perzepte, die eine starke innere Beteiligung des Wahrnehmenden verlangen. Auf der Gestalttheorie aufbauend, spekulierte er über die Fähigkeit, Figuren und Gestalten ›geistig‹ zu vervollständigen. ›Kühle‹ Medien fordern demnach Beteiligung, während ›heiße‹ Medien die sinnliche Wahrnehmung fluten und lähmen. Im Folgenden werde ich Versionen einer solchen Konzeption von Taktilität in zwei Bereichen verfolgen: in der Physiologie und Psychologie der Prothetik und in den klassischen Avantgarden des frühen 20. Jahrhunderts, nämlich in Raoul Hausmanns Gedankenexperimenten mit Ernst Marcus' Konzept der ›exzentrischen Empfindung‹.

6.1 HAUT UND FLEISCH ALS MEDIUM

Das Thema der Taktilität mithilfe der Prothetik anzuvisieren ist einerseits naheliegend, andererseits aber auch nicht. Verfolgt man nämlich die Technik- und Kulturgeschichte der Prothese, ist der Mangel an Taktilität eines ihrer größten Probleme. Dies wird sowohl in den künstlerischen Verarbeitungen der Prothese deutlich, in

1 | Vgl. Aristoteles: *De Anima/Von der Seele*, Wien/Zürich: Artemis 1950.

der sie von Götz von Berlichingens ›Eiserner Hand‹ über Captain Ahabs Prothese aus Fischbein bis zu diversen James Bond-Bösewichten für Empfindungslosigkeit, für Monomanie, für emotionale Defekte, für eine soziale Außenseiterposition und den radikalen, menschenfeindlichen Eigensinn ihrer Träger steht.

Die taktile Empfindungslosigkeit der Prothese war aber auch stets ein veritables Problem im Prothesenbau, und zwar nicht, weil die Sorge der Prothesentechniker der Ausgewogenheit der Sinnesökonomie der PatientInnen galt, sondern weil durch den Wegfall des Tastsinns und der propriozeptiven Wahrnehmung die Kontrolle und Steuerung künstlicher Gliedmaßen nur schwer zu bewerkstelligen ist. Das technische Problem der Rückmeldung taucht in der Prothetik immer dann auf, wenn die Prothese nicht nur kosmetisch gedacht ist, also ästhetisch-sozialen Überlegungen entspringt, sondern da, wo Prothesen eine Funktion erfüllen sollen, wo mit ihrer Hilfe der Alltag bewältigt werden, gearbeitet oder Sport betrieben werden soll. Taktilität ist ein zentraler Modus des Selbstbezugs, sie ist es aber umso mehr, wenn der Leib in Bewegung befindlich ist und er zielgerichtet agieren soll. In der Prothetik wurde dies augenfällig. In der medizinischen und psychologischen Literatur der 20er Jahre wird immer wieder das Problem vermerkt, dass viele der Kriegsversehrten wenig Antrieb zeigten, ihre Prothesen zu verwenden, weil sie diese als unpraktisch, als ›Fremdkörper‹ im vollen Wortsinn empfanden. Deshalb wurde bereits in den 20er Jahren der Ruf nach ›sensiblen Prothesen‹ für die Kriegsversehrten laut.

Viele jener Probleme, die im 20. Jahrhundert für eine Theoretisierung des Körpers und seines medialen Charakters schlagend wurden (und auch für die Konstruktion von Prothesen zentral waren), sind bereits in *De Anima* angesprochen. Aristoteles hatte große Schwierigkeiten, den Tastsinn mit seinem analytischen Schema für Sinnesqualitäten und Wahrnehmung in Einklang zu bringen. Der Tastsinn ist komplexer als die anderen Sinne und wird deshalb in *De Anima* als jener Sinn charakterisiert, der die Wahrnehmung, dass wahrgenommen wird, ermöglicht. Im Prozess der sinnlichen Wahrnehmung ist demnach ›aisthesis‹ schon reflexiv (und nicht erst durch nachgelagerte kognitive Prozesse). Der Tastsinn stellt nämlich erstens einen fundamentalen und fragilen ›Selbstbezug‹ des Menschen her, inauguriert zweitens den Leib als ›Medium‹ und ermöglicht drittens aufgrund seiner Vielgestaltigkeit die ›Unterscheidung‹ verschiedener Sinnesqualitäten. Weil der Tastsinn so unterschiedliche Empfindungen wie Druck, Rauigkeit und Temperatur gleichzeitig empfängt und unterscheidbar macht, führt er unseren Sinnen vor, dass sie empfinden. Diese Empfindung, die ›koine aisthesis‹, den Allgemeinsinn, hat der Altphilologe Daniel Heller-Roazen, mit der Vorstellung einer »inneren Berührung« in Verbindung gebracht, einem sinnlichen Selbstbezug, der im antiken Denken jene Systemstelle einnimmt, die später das Bewusstsein als ein ›kognitivistischeres‹ Konzept besetzt.² Der Tastsinn

2 | Vgl. Daniel Heller-Roazen: *The Inner Touch. Archaeology of a Sensation*, New York: Zone Books 2007.

unterscheidet sich von den anderen Sinneswahrnehmungen auch dadurch, dass im Tasten Medium und Organ der Wahrnehmung nicht klar zu trennen sind. Während man das Sichtbare ›durch‹ das Transparente ›mit‹ dem Auge sieht und das Hörbare ›durch‹ Bewegung der Luft ›an das‹ Ohr dringt, das Medium also das Organ affiziert, das Organ unter dem Medium leidet, ist dies beim Tastsinn nicht ganz klar. Das Ertastete berührt unmittelbar die Haut, aber das Organ leidet nicht unter dem Medium, sondern »gleichzeitig mit dem Dazwischen, so wie einer, der durch sein Schild hindurch getroffen wird«.³

Der Tastsinn ist mithin auch jener Sinn, der das wahrnehmende Lebewesen besonders verletzbar macht. Diese Überlegungen führen Aristoteles dahin, das Fleisch inklusive der Haut nicht als Organ, sondern als Medium des Tastsinns zu verstehen, während sich das Wahrnehmungsorgan für das Tasten irgendwo ›im Inneren‹ befindet. Berührt wird durch das Medium der Haut und des Fleisches die Seele selbst. Der Körper hingegen ist das »angewachsene Zwischen für das Tastorgan«.⁴ Die Haut und das Fleisch sind die Vermittlungsinstanz zum Organ Seele, das organische Substrat hingegen ist das Medium. Der Tastsinn ist ›koine aisthesis‹, der Gemeinsinn, in zweierlei Hinsicht: Er macht durch Vermischung und Entmischung der Sinneswahrnehmungen diese erst unterscheidbar und er garantiert den Selbstbezug durch innere Berührung. Als einziger Sinn ist der Tastsinn also viele Sinne gleichzeitig und gleichzeitig das ›Zentralorgan‹ der (Selbst)wahrnehmung. Er ist dies »wie es einige vom Punkte sagen, daß er einer oder zwei ist und insofern auch teilbar«.⁵ Aristoteles verwendet den Punkt als Modell dieses Doppelcharakters. Er ist Ausgangspunkt und Grenzphänomen, gleichzeitig Mittelpunkt eines Kreises und immer weiter teilbarer Durchgangspunkt einer Linie. Der Tastsinn ist in zweifacher Hinsicht ein Grenzphänomen: als Vermittler zwischen Innen und Außen im Medium der Haut und als jener Sinn, der Grenzziehungen und Unterscheidungen ermöglicht.

6.2 TELETAKTILITÄT

Der besondere Charakter des Tastsinns hat die Philosophie und Ästhetik seither auf unterschiedliche Art und Weise beschäftigt. Und auch die experimentelle Physiologie wurde von den Problemen heimgesucht, die Aristoteles beobachtet hatte. Die Psychophysik des 19. Jahrhunderts stieß bei der Erforschung des Tastsinns auf gravierende Probleme. Die Objektivierbarkeit von Sinneswahrnehmungen als solche war ein kompliziertes Unterfangen, und dies galt umso mehr für den Tastsinn mit seinem fragwürdigen Selbst- und Außenbezug, mit seinen multiplen Ausprägungen und der Vielzahl der involvierten Organe (Haut, Muskula-

3 | Aristoteles, *De Anima/Von der Seele*, 1950, Kap. II, 423b3.

4 | Aristoteles, *De Anima/Von der Seele*, 1950, Kap. II, 423a9.

5 | Aristoteles, *De Anima/Von der Seele*, 1950, Kap. III, 526b30.

tur, Nerven).⁶ Zwei Bücher aus der Mitte des 19. Jahrhunderts geben ein lebhaftes Zeugnis von diesem epistemologischen Unruheherd ab: Ernst Heinrich Webers *Tastsinn und Gemeingefühl* (1846) und Rudolf Hermann Lotzes *Mikrokosmos* (3 Bände, 1856-1864).⁷ Beide Werke wurden von den Zeitgenossen lebhaft rezipiert. Lotze war zu seiner Zeit ein Bestsellerautor. Gemeingefühl meint bei beiden Autoren (und im Anschluss an Aristoteles) nicht in erster Linie etwas Soziales, sondern etwas Subjektives: Schmerzwahrnehmungen und andere Empfindungen, die nicht eindeutig lokalisierbar sind.

Der Lehrer (Weber) und sein Schüler (Lotze) haben sich für ähnliche Phänomene interessiert, für das Ferntasten und Synästhesiephänomene, erforschten diese jedoch mit unterschiedlichen Methoden. Im Vergleich zu Weber bauen die Argumente des jüngeren Lotze weniger auf Messbarkeit und experimentelle Objektivierung, sondern versuchen eine Einordnung der Physiologie in Philosophie und Anthropologie. Sie sind spekulativer und alltagsnäher. Anders als die messende Physiologie, die auf die Erforschung allgemeingültiger Naturgesetze zielte, geht es Lotze um die Formulierung von anthropologischen Gesetzen. So bescheiden der Titel *Mikrokosmos* im Vergleich zu Humboldts *Kosmos* klingen mag, so deutlich markiert der Untertitel *Ideen zur Naturgeschichte und Geschichte der Menschheit. Versuch einer Anthropologie* einen in Hinblick auf den Menschen generellen Erklärungsanspruch.

Warum ist Lotze überhaupt von Bedeutung und mehr als eine Fußnote in der Geschichte der Psychologie? Seine Gedankenexperimente wurden in der Psychologie des 20. Jahrhunderts, insbesondere in der Gestalttheorie, in der Phänomenologie und in der philosophischen Anthropologie aufgegriffen. Der *Mikrokosmos* bildet die Unterströmung des Denkens von so unterschiedlichen Akteuren wie Sigmund Freud (in dessen Bibliothek sich mehrere Bücher Lotzes befanden), William James, Maurice Merleau-Ponty, Helmuth Plessner und Arnold Gehlen. Auch für die psychologische Prothesenforschung war er eine zentrale Referenz. Jene Stellen, die theoriegeschichtlich besonders wirksam geworden sind, widmen sich zwei Themen: der Selbstwahrnehmung des Subjekts im Raum und der Frage der Teletaktilität, außerkörperlicher Tastwahrnehmung. Für beide Felder entwickelt Lotze eine neue Sichtweise und eine Nomenklatur, die prägend wurde. Was die Selbstwahrnehmung im Raum betrifft, geht er einen Weg, der weder der Unabhängigkeit raum-zeitlicher Kategorienbildung von Erfahrung, den Kant'schen »a

6 | Dieser Schwierigkeit begegneten die Forscher u.a. mit Selbstexperimenten und mit einem regelrechten Training der eigenen Empfindungsfähigkeit und Introspektionskompetenz, vgl. Katrin Solhdju: *Selbstexperimente. Die Suche nach der Innenperspektive und ihre epistemologischen Folgen*, München: Fink 2011.

7 | Vgl. Ernst Heinrich Weber: *Tastsinn und Gemeingefühl* (1846), (hg. von Ewald Her-ring), Leipzig: Wilhelm Engelmann 1905; Hermann Lotze: *Mikrokosmos. Ideen zur Naturgeschichte und Geschichte der Menschheit. Versuch einer Anthropologie* (1858), 3 Bde., Leipzig: Meiner 1923.

priori«, folgt, noch die Anerziehung von Raum- und Zeitanschauung favorisiert, also kulturkonstruktivistisch wäre. Vielmehr propagiert er eine spezifisch leibliche Reflexivität, die wir heute als ›praxeologisch‹ oder pragmatisch bezeichnen würden. Er widmet sich der Frage, wie sich im Hin und Her zwischen Erfahrung und Erinnerung, zwischen Innen und Außen, im arbeitenden, spielenden, eingreifenden Umgang mit der Welt, Kategorien, Ordnungen und Wissensbestände auskristallisieren. Diese sind nach Lotze ein Resultat von Erfahrungen und Wissensformen, die sich an der Körperperipherie ausbilden. Er prägte hierfür den Begriff des »Lokalzeichens«⁸ – die späteren »Engramme« der Psychologie. Er interessiert sich besonders für die kognitive und sinnliche Ausdehnung des eigentlichen Körpers über seine physischen Grenzen hinaus. Deshalb behandelt er die menschliche Fähigkeit zur Projektion und zur Einfühlung in nicht-menschliche Erlebniswelten. So können Menschen sich in den Vogelflug hineinversetzen, in das eng begrenzte Dasein eines Muscheltiers, »in die schlanken Formen des Baumes, [...] dessen feine Zweige die Lust anmutigen Beugens und Schwebens beseelt.«⁹ Wissen und Handeln konzipiert Lotze auf William James »Panpsychismus«¹⁰ vorgreifend als im Körper und seinen Relationen liegend. Der Tastsinn dient dabei der »leichten Verknüpfung«, also der Synthetisierung, von früheren Erfahrungen mit aktuellen. Dabei ist die Auge-Hand-Korrelation von besonders hoher Bedeutung. Prototypisch hierfür ist das wissenschaftliche Experiment: »Während die eine Hand das Objekt fesselt, die andere es prüft und seine Lage zu erneuerter Prüfung verändert, entsteht unsere Kenntniss auf dem Wege des Experimentes.«¹¹ Die Auge-Hand-Koordination ordnet Lotze der allgemeinen Tendenz des Menschen zur »exzentrischen Projektion« zu. Das Thema der »exzentrischen Projektion« war Mitte des 19. Jahrhunderts ein Forschungsthema, das Heterogenes umfasste. Lotzes Lehrer Ernst Heinrich Weber musste deshalb explizit vor Ungenauigkeiten warnen: Er wollte die unterschiedlichen Vorgänge des »Hinauswerfens« und »Antizipierens« (Mitbewegung, Phantomempfindung, die Entwicklung einer Vorstellung von Raum, Zeit und Zahl, abstrakte Begriffsbildung) streng unterschieden wissen.¹² Aber genau die Unschärfen zwischen physiologischen Effekten und erkenntnistheoretischen Problemstellungen machte die exzentrische Projektion zu einem so attraktiven Forschungsfeld.

Ernst Heinrich Weber hatte sich an zentraler Stelle seiner Untersuchung *Tastsinn und Gemeingefühl* mit dem Phänomen befasst, dass taktils Empfinden sich in eine nicht zum empfindenden Körper gehörige Verlängerung fortsetzt.

8 | Lotze, *Mikrokosmos*, 1923, Bd. 2, S. 200.

9 | Lotze, *Mikrokosmos*, 1923, Bd. 2, S. 201.

10 | James greift mehrfach auf Lotze zurück, insbesondere auf seinen Begriff des Lokalzeichens und auf seine Überlegungen zur Synästhesie. Vgl. William James: *The Principles of Psychology* (1890), 2 Bde., New York: Dover 1950, Bd. 1, S. 522 sowie Bd. 2, S. 152.

11 | Lotze, *Mikrokosmos*, 1923, Bd. 2, S. 202.

12 | Vgl. Weber, *Tastsinn und Gemeingefühl*, 1905, S. 12.

Er untersuchte dies mit Hilfe von an Fingern und Zähnen befestigten Stäbchen, mittels – wenig glamouröser – Extensionen also. Lotze ergänzte Webers Experimente durch lebensnahe Beobachtungen. Über einen in der Hand geführten Stab schreibt er, dass man mit seiner Hilfe Entferntes so fühlen könne, als berühre man es unmittelbar.¹³ Er prägte das in Phänomenologie, Gestalttheorie und Medientheorie bis heute präsenste Arsenal von Figuren der »Verlängerung der Existenz bis in die Enden und Oberflächen [eines] fremden Körpers hinein«.¹⁴ Der Blinde mit seinem Stock, der Arzt mit der Sonde, der Schreibende mit seiner Feder, der Malende mit seinem Pinsel. Mitempfindung ist in seiner Auffassung nicht immer wohlthuende Empathie, sondern auch die Basis von Gewaltanwendung: Nur wer empfinden kann, wie sich ein Stock auf dem Rücken des Gegenübers anfühlt, wird den Impuls verspüren, ihn zu schlagen.¹⁵ Lotze beschreibt Teletaktilität entsprechend als ein soziales Grenzphänomen. Das Miterfassen außerkörperlicher Realitäten hat kommunikative und funktionale Aspekte. Es ist real, weil wirksam, und bleibt dabei ontologisch fragwürdig. Fern- und Mitempfindung sind gleichermaßen »freundliche Täuschungen«,¹⁶ jedoch solche, die zielgerichtetes Handeln und Sozialität ermöglichen. Teletaktilität, Mitempfindung und exzentrische Projektion sind demnach metarationale Phänomene. So unentscheidbar es ist, ob »wirklich« eine sinnliche Wahrnehmung stattfindet, so eindeutig kann man ihre Effekte beobachten.

6.3 SENSIBLE PROTHESEN

Ich habe Lotze relativ ausführlich dargestellt, weil er ein überaus wichtiger Bezugspunkt für die psychologische Prothesenforschung der 1910er und 1920er Jahre war. Die Psychologen der Prothetik griffen auf seine Überlegungen zurück, um praktische Probleme beim Bau von Prothesen zu adressieren: Wie kann die Prothese gezielt gesteuert werden? Wie muss eine Prothese konstruiert sein, damit sie sich in das vom Patienten bereits erlernte System der Propriozeption eingliedert? Wie können Rückkopplungen zwischen Empfindung, Selbstwahrnehmung und Bewegung technisch koordiniert werden? Wie verändert sich der Selbstbezug durch den Fremdkörper?

Einer der einflussreichsten Leser Lotzes war der Pädagoge und spätere Gestaltpsychologe David Katz, der seit 1918 Prothesenexperimente an Kriegsversehrten durchführte. Exemplarisch lässt sich in Katz' Publikationstätigkeit der Übergang von anlassbezogener, militärischer Forschung an Kriegsversehrten in zuerst zivile, angewandte Forschung, dann in Grundlagenforschung und zum Schluss

13 | Vgl. Lotze, *Mikrokosmos*, 1923, Bd. 2, S. 202.

14 | Lotze, *Mikrokosmos*, 1923, Bd. 2, S. 210.

15 | Vgl. Lotze, *Mikrokosmos*, 1923, Bd. 2, S. 204.

16 | Lotze, *Mikrokosmos*, 1923, Bd. 2, S. 204.

der Übergang zu theoretischen Generalisierungen in der Gestalttheorie nachvollziehen. Erste Ergebnisse zur Prothetik publiziert er 1920 (*Psychologische Versuche mit Amputierten*), eine Zusammenfassung und eine theoretische Explikation kam 1921 dazu (*Zur Psychologie des Amputierten und seiner Prothese*).¹⁷ 1925 wurden die Experimente mit Prothetikern in sein Buch *Der Aufbau der Tastwelt* aufgenommen, und zwar in einem Kapitel über das ›Tasten mit Zwischenmedien‹.¹⁸

Katz' Ausgangsfragestellung ist pragmatisch: Wie lässt sich eine bessere Abstimmung zwischen Amputiertem und Prothese erreichen? Er antwortet damit auf die Forderung des Kriegsministeriums und der Wohlfahrt, Kriegsversehrte mittels Prothesen wieder arbeitsfähig und leistungswillig zu machen. Er bemängelt die bisherige Ausrichtung der Prothetik auf mechanische Faktoren und forderte eine »Sensibilisierung der Prothese«.¹⁹ Der Auslöser der Beschäftigung mit der Sensibilität von Prothesen ist also eine Effizienzforderung. Die heute seltsam klingende Rede von einer ›Beseelung der Prothese‹ war ganz praktisch gedacht. ›Beseelung‹ meinte die Aktivierung von still gestellten Sinnesleistungen, die unter »dem Polster der Prothese« schlummerten.²⁰ Praktisch führen – so Katz – zwei Wege zur ›Beseelung‹. Erstens die bessere Ausnutzung der Muskulatur und Sensibilitäten des Stumpfs, zweitens die Sensibilisierung der Prothese selbst, beispielsweise durch die Formung des Stumpfansatzes aus dünnwandigem Leder. Auch Katz interessierte sich für die Psychologie des Alltags und erklärt, Lotze darin folgend, dass die ganz normale Wahrnehmung ebenfalls ›prothetisch‹ sei. Von einem spezifischen klinischen Problem schwenkt Katz zum Prothetiker als einem Modellsubjekt der allgemeinen Psychologie um:

»Der psychologische Mechanismus, nach dem [...] die Sensibilisierung [der Prothese] erfolgt, ist jener allbekannte, durch den vermittels Handwerkszeugs oder auch nur unserer Kleidungsstücke eine Erweiterung des von uns beherrschten Empfindungsbereichs unseres Körper-Ichs erfolgt, so wenn der Arzt eine Sonde benutzt [...], wenn der Blinde sich mit dem Stock durch die Welt ertastet oder wenn wir alle durch die Schuhsohle hindurch die Beschaffenheit des Bodens wahrnehmen, auf dem wir gehen.«²¹

17 | Vgl. David Katz: *Psychologische Versuche mit Amputierten*, in: *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*, Abt. I, 1920, (Festschrift zum 70. Geburtstage von G. E. Müller), 83-117; David Katz: *Zur Psychologie des Amputierten und seiner Prothese*, Leipzig: Johann Ambrosius Barth 1921 (Beihefte zur Zeitschrift für angewandte Psychologie 25).

18 | David Katz: *Der Aufbau der Tastwelt*, Leipzig: Johann Ambrosius Barth 1925 (Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane. I. Abteilung: Zeitschrift für Psychologie, Ergänzungsband 11).

19 | Katz, *Zur Psychologie des Amputierten und seiner Prothese*, 1921, S. 2.

20 | Vgl. Katz, *Zur Psychologie des Amputierten und seiner Prothese*, 1921, S. 2.

21 | Katz, *Zur Psychologie des Amputierten und seiner Prothese*, 1921, S. 7.

Die Passage ist prägnant, da Lotzes Beispiele beinahe wörtlich wiedergegeben werden. Entscheidend ist zudem die Einebnung des Unterschieds zwischen defizitärer und »normaler« Wahrnehmung. Ein Amputierter, ein Blinder, ein Arzt und letztlich jede/r hantiert mit Prothesen, um ihr/sein Körper-Ich zu erweitern.

In seinem Buch *Aufbau der Tastwelt* geht Katz dann einen weiteren Schritt in Richtung einer psychologischen Ausdeutung des technisch erweiterten Körpers:

»In einer stellenweise humoristisch gefärbten Darstellung legt LOTZE dar, welche Bedeutung unsere nach diesem Prinzip (dem Sondenprinzip) wirkenden Kleidungsstücke für die Erweiterung des von unserem Körper-Ich beherrschten Raumes besitzen. In dem Zeitalter von Automobil und Flugzeug ist es vielleicht gestattet darauf hinzuweisen, dass nach dem gleichen Prinzip der exzentrischen Projektion der Chauffeur mit den Pneumatiks die Güte der Chaussee, der Flugzeugführer mit den Tragflächen des Areoplans die elastischen Verhältnisse der Luft fühlt.«²²

Auf Basis von Lotzes wenig technisch gedachter Konzeption dringt Katz hier auf jenes Gebiet vor, das 22 Jahre später Kybernetik heißen sollte: die Lehre von der Regelung von Systemen, zumal solcher, in denen Menschen mit Maschinen zielgerichtet interagieren. Was mit der Arbeit an »sensiblen Prothesen« begann, transformiert sich über eine allgemeine Theorie der menschlichen Wahrnehmung in eine Metatheorie »aller« Systeme, seien sie organisch oder mechanisch, tierisch oder menschlich.²³

Katz hat sich in seinen gestalttheoretischen Standardwerken ab den 1940er Jahren von der Kybernetik distanziert und sich der philosophischen Anthropologie angenähert. In seinen frühen Publikationen wird jedoch deutlich, wie sich aus der Forschung mit Amputierten und Prothesen und in Verbindung mit Lotzes spekulativer Anthropologie eine Idee von Taktilität herauschält, wie sie später Marshall McLuhan – der bekanntermaßen mit der Kybernetik, der Gestalttheorie und der Physiologie flirtete – verwendet hat: Taktilität als »inneres« Vermögen der Berührung mit der Umwelt, des Ausgreifens von Gedanke und Gefühl auf weit Entferntes, Taktilität als komplettierendes, rückkoppelndes Vermögen, das Orientierung in der Welt und Einfühlung in andere ermöglicht. Paradoxerweise ist der Tastsinn in dieser Konzeption diskarniert und inkarniert zugleich: Er ist ein leibliches Vermögen, Nicht-Leibliches zu vergegenwärtigen.

22 | Katz, *Der Aufbau der Tastwelt*, 1925, S. 116.

23 | Zum Zusammenhang zwischen Gestalttheorie und Kybernetik vgl. Stefan Rieger: *Kybernetische Anthropologie. Eine Geschichte der Virtualität*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 2003, S. 349f; Benjamin Bühler: *Lebende Körper. Biologisches und anthropologisches Wissen bei Rilke, Döblin und Jünger*, Würzburg: Königshausen & Neumann 2004, S. 86.

6.4 OPTOPHONETIK UND EXZENTRISCHE EMPFINDUNG

1922, in der Gründungsphase von DADA Berlin, verfasste Raoul Hausmann den Text *Optophonetik*.²⁴ Es ist ein Manifest in dem er unter anderem die Idee der ›exzentrischen Empfindung‹ propagiert. War das physiologische Konzept einer ›exzentrischen Projektion‹ auf die Korrespondenzen von Innen und Außen gerichtet, ist mit der ›exzentrischen Empfindung‹ zuallererst die interne Sinnesökonomie adressiert. Hausmann wünscht sich, ähnlich wie später Marshall McLuhan, die medientechnische Rekonstruktion eines synästhetischen ›Urzustands‹, in dem sich die Sinnesqualitäten in einem ausgewogenen Verhältnis befinden. Damit korreliert ist – auch schon bei Hausmann – die phantasmagorische Vorstellung einer globalen ›Erweiterung der Sinnesemanationen‹. Diese Erweiterung sollte die individuelle Wahrnehmungsfähigkeit und das Zusammenleben revolutionieren und dabei einen ›sechsten Sinn‹ hervorbringen, eben jene ›exzentrische Empfindung‹. Als Schlüssel zu dieser grundstürzenden Wahrnehmungsrevolution galt Hausmann in den 1920er Jahren die *Optophonetik*, also die Übersetzung akustischer Signale in optische und umgekehrt.²⁵ Als Beispiel optophonetischer Wahrnehmung dient Hausmann die Biene, die mit ihren Augen gleichzeitig sieht und ›hört‹, die ihre Augen beim Zellenbau als eine Art Sonar, als akustischen Abtaster einsetzt.²⁶ In dieser Phase scheint Hausmanns Beschäftigung mit der technischen Modifikation der Sinneswahrnehmung zwei Trajektorien zu folgen: der experimentellen Physiologie in der Tradition Hermann von Helmholtz' und einer ›prothetischen Anthropologie‹ mit dem Ziel einer medientechnischen Verbesserung der organischen Ausstattung.

24 | Raoul Hausmann: *Optophonetik*, in: Ders.: *Sieg Triumpf Tabak mit Bohnen. Texte bis 1933*, Bd. 2, (Hg. von Michael Erhoff), München: edition text + kritik 1982, 51-57.

25 | Die Idee ist u.a. von Emil du Bois-Reymonds Experimenten mit der Durchtrennung und Vertauschung von Nervensträngen inspiriert, von dessen Umleitung von Sinnesimpulsen an die falschen Verarbeitungszentren. Vgl. Peter Bexte: *Mit den Augen hören/mit den Ohren sehen. Raoul Hausmanns optophonetische Schnittmengen*, in: Helmar Schramm, L. Schwarte, J. Lazardzig (Hg.): *Spuren der Avantgarde: Theatrum anatomicum. Frühe Neuzeit und Moderne im Vergleich*, Berlin/New York: de Gruyter 2011, 426-441.

26 | Die Optophonetik hat Hausmann – mit Unterstützung durch einen Ingenieur – später auch technisch durchdacht und realisiert. Hausmann stellte praktische Überlegungen zur Umsetzung von Lichtwellen in akustische Wellen mit Hilfe von Selenzellen an, die in einem von Daniel Broido – dem Bruder von Hausmanns damals aktuellem Model Vera Broido – in England eingereichten Patentantrag resultierte, der sich aber nicht auf einen Akustikwandler, sondern auf einen Schaltmechanismus mittels einer Selenzelle bezieht. Vgl. Cornelius Borck: *Sinnesmontagen. Die Sehprothese zwischen Ersatzapparat und Technovision*, in: Sabine Flach, M. Vöhringer (Hg.): *Ultravision. Zum Wissenschaftsverständnis der Avantgarden*, München: Fink 2010, 149-164.

Um die Entstehungszeit von *Optophonetik* rezipierte Hausmann, der ein eifriger und wilder Leser war und halbe Bücher exzerpierte, den heute recht unbekannten Philosophen Ernst Marcus und seine Theorie der ›Exzentrizität der Empfindung‹. Diese nimmt einerseits eine Zuspitzung des Kant'schen Subjektivitätspostulats der sinnlichen Wahrnehmung vor, enthält aber auch Überlegungen zu einer internen Ökonomie der Sinneswahrnehmungen. Ernst Marcus postulierte, dass sämtlichen Sinneswahrnehmungen stets der haptische Sinn beigemischt sei. Diese Beimischung wirke nicht nur synthetisierend und unterscheidend, wie der Tastsinn bei Aristoteles, sondern wahrnehmungssteigernd. Die ›exzentrische Empfindung‹ dürfte Hausmann aus zwei Gründen interessiert haben: als eine Theorie ursprünglicher Synästhesie und als Theorie eines unmittelbar an die Sinneswahrnehmung geknüpften, physiologischen Organisationsprinzips des Denkens, als eine physiologische Theorie des Geistes. Noch in seinem Text aus den 1960er Jahren (*Exzentrische Empfindung*) schreibt er: »Man kann annehmen, dass die exzentrische optische Empfindung ihren wirklichen Sitz oder ihre Quelle im Gehirn hat, dort wo, wie in einer elektrischen Centrale, sich die verschiedenen Signale austauschen, die die Sinne vermitteln.«²⁷

Wie stehen diese Theoriemontagen Hausmanns zu seinem bildnerischen Werk? In den 1920er Jahren entwickelt er Methoden der Collage und Montage, die ich ›prothetische Mimikry‹ nennen möchte: eine parodistische Affirmation des technisch-ingenieurwissenschaftlichen, aber auch künstlerischen Programms der Körper- und Gesellschaftsveränderung, das sich in seinen Collagen und Skulpturen ablesen lässt. So etwa in der Collage *Tatlin zu Hause* von 1920, die den Konstruktivistin Tatlin mit grotesk aus seinem Kopf ragenden Maschinenungehümen porträtiert. ›Prothetische Mimikry‹ spielt mit Strategien des verfehlenden Ersetzens, mit der Unterminierung verlässlicher Verweissysteme, eine Strategie, die für die Dadaisten insgesamt zentral war. Das Spiel mit falschen Ersetzungen und das ›Zusammenschneiden‹ von Heterogenem zielten eher auf eine Unterbrechung von Wahrnehmungsautomatismen als auf eine ›synthetische Erweiterung‹ der Sinne.²⁸ Walter Benjamins Charakterisierung der dadaistischen Kunst als ›Geschoss‹ ist ein Hinweis auf das Kalkül einer gewaltsamen Berührung, das die Ästhetik der Dadaisten bestimmte. Die Ausstellungen und Publikationen waren als Angriff auf die Sinne gedacht und verfolgten das Ziel, den Schleier der normalisierten Wahrnehmung zu zerreißen. Das Motiv des vom Krieg zerfetzten, prothetisch reparierten Soldaten, dessen Körpergrenzen gewaltsam perforiert worden waren, gab die Ikone für den Wunsch nach intensiver, und im Zweifelsfall: gewaltsamer Berührung des Fühlens und Denkens des Publikums ab. Die solcherart angestrebte ›Erweiterung‹ der Sinneswahrnehmung erforderte

27 | Raoul Hausmann: *Die exzentrische Empfindung. La Sensorialité excentrique, mit Illustrationen von Raoul Hausmann*, (hg. und mit einem Nachwort versehen von Adelheid Koch), Graz: Droschl 1994, S. 37.

28 | Vgl. Bexte, *Mit den Augen hören/mit den Ohren sehen*, 2011, S. 429f.

zunächst die Destruktion von Wahrnehmungsautomatismen und die Prothese figurierte als ikonischer Platzhalter für die zerstörte Einheit.

1969 schrieb Raoul Hausmann ein weiteres Manifest zur exzentrischen Empfindung. Der Text wurde auf Französisch geschrieben und erst posthum (1994) auf Deutsch publiziert. Hausmanns Haltung zur Frage der Sinneserweiterung spaltete sich – wie dargestellt – in den 1920er Jahren zwischen einer Euphorie für eine physiologisch-technische Umarbeitung der Sinneslandschaft einerseits und der Erfahrung der Destruktivität von Technik andererseits auf. Hausmanns Schrift aus den 1960er Jahren hält nun zwar am Begriff der exzentrischen Empfindung als sozialrevolutionärer Kraft fest, meint aber etwas entschieden anderes.

Zuallererst fällt die stärkere Parteinahme für Taktilität und Resonanzphänomene auf, während das Visuelle als eine Art narzisstische, intellektualistische Selbsttäuschung, als eine ›pseudologia phantastica‹ erscheint. Der Tastsinn hingegen garantiert nun eine ›unkognitive‹ Verständigung unter Lebewesen. Das Modell hierfür ist die Zelle, die zwar über definierte Außengrenzen verfügt und auch in der Mitose eine Konzentration ihrer ›Essenz‹ vornimmt, aber über Osmose und Eigenbewegung mit dem restlichen Organismus mittels Resonanz und Berührung in Kontakt steht. Die haptische exzentrische Empfindung ist – so Hausmann – eine intuitiv gerechte, da sie die Empfindungsfähigkeit des Berührten mitfühlt. Zweitens ist *Die Exzentrische Empfindung* im Gegensatz zu den frühen Schriften Hausmanns antitechnokratisch: »Der Mensch hat die Werkzeuge erfunden, die Waffen, um seine somatischen Fähigkeiten zu steigern, aber, sich auf den Prothesen auszuruhen, seien es elektronische oder haushälterische, bedeutet nichts anderes, als in intellektuelle und moralische Stagnation zu versinken.«²⁹ Es geht also immer noch um eine Revolutionierung der Wahrnehmung, aber nicht mehr auf technischem Weg. Im Gegenteil fällt Hausmann im Abschnitt *Die neue Zivilisation* ein eindeutiges Urteil über die medientechnische Durchdringung der Gesellschaft: »[...] seitdem Radio, Elektronik und Rechner die Welt-Information lenkt, verkleidet man sich überall auf die gleiche Weise, und die Verbreitung der Atomwaffen steigert noch die Gleichschaltung der Vorstellungen und Gedanken.«³⁰ Die Apparate machen gleichförmig und ermöglichen »die Abschiebung der Selbstverantwortung auf die Götter!!!«³¹

Aber wenn die Erweiterung der Sinneswahrnehmung, die somatische Revolution und die Dezentrierung des *ego* nicht technisch – und im Übrigen auch nicht durch LSD, wie Hausmann extra betont – erreicht werden kann, wie dann? Einmal kann die exzentrische Empfindung dadurch kultiviert werden, dass die Sprache ihre haptischen Qualitäten zurückerhält. Die gesprochene, die gesungene, die lyrische Sprache, diejenige, die mit Schallwellen ›berührt‹, zieht Hausmann der gedruckten Prosa vor: »[M]an muss das Gewicht des Wortes fühlen. Man muss

29 | Hausmann, *Die exzentrische Empfindung*, 1994, S. 43.

30 | Hausmann, *Die exzentrische Empfindung*, 1994, S. 47.

31 | Hausmann, *Die exzentrische Empfindung*, 1994, S. 45.

selbst unter der Schwere des Tons sich beugen.«³² Wie Marshall McLuhan auch, gilt seine Hoffnung dem Akustischen als einem Gegengewicht zur Dominanz des Optischen und Linearen. Auch die zweite Antwort Hausmanns ähnelt der christlichen Grundhaltung McLuhans: »Eine andere Form der Exzentrischen Empfindung ist die Liebe.«³³ Sie ist es, weil sich in ihr sinnlicher Genuss und Verantwortung für den Anderen verbinden. Selbst wenn die körperliche Liebe ein Akt der Besitzergreifung und der Unterwerfung darstellt, die Liebe als exzentrische Empfindung geht darüber hinaus, denn sie ist der »Verzicht des Eigenen-Ich, zugunsten des DU.«³⁴

Beides – die Betonung der sinnlichen Qualitäten der Sprache und die Utopie der Liebe – sind Grenzfälle der Kommunikation, Grenzfälle des Sozialen. Anstatt durch Haut und Fleisch ›hindurchzustoßen‹, kommt der Tastsinn zu seinem Recht als jene Sinnesqualität, die Verletzlichkeit und die Fragilität des Mitleidens ins Zentrum setzt. Er bleibt Medium im strikten Sinn: Mittler, Durchgangsstelle, Differenzierungsfähigkeit. Es kommt dann weniger auf die Intensität oder Qualität der konkreten Berührung an, als auf das Vermögen exzentrisch zu werden, sich von etwas Fremdem berühren zu lassen. Selbstbezug und Fremdkörper fallen aber nicht in eins, sie bleiben notwendig getrennt und differenziert. ›Koine aisthesis‹, das ist nicht der Gemeinsinn eines undifferenzierten ›Wir‹, einer organischen Gemeinschaft, sondern Gemeinsinn als ein stets doppelt agierendes Unterscheidungsvermögen: Wahrnehmung, die weiß, dass sie wahrnimmt, Unterscheidung, die weiß, dass sie unterscheidet, ein Gemeinsames, das weiß, dass es sich (prozessual, resonierend) herstellt.

32 | Hausmann, *Die exzentrische Empfindung*, 1994, S. 57.

33 | Hausmann, *Die exzentrische Empfindung*, 1994, S. 56.

34 | Hausmann, *Die exzentrische Empfindung*, 1994, S. 57.

Hybridräume der Konvergenz

7. ›Design‹ in der chemischen Synthese – eine Fiktion?¹

Martin Jansen und J. Christian Schön

7.1 EINLEITUNG

Der Prozess der wissenschaftlichen Erkenntnis in den Naturwissenschaften läuft in einem durchaus hierarchischen Sinne stufenartig ab. Am Anfang stehen dabei Beobachtung und Messung, deren Resultate den ständig wachsenden Fundus an faktischem Wissen bilden. In den nächsten Schritten werden die Einzelbeobachtungen systematisiert, werden Zusammenhänge aufgezeigt und diese mathematisch formalisiert. Auf der höchsten Ebene werden schließlich allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten abgeleitet (Induktion), die, besonders erstrebenswert, Ursache-Wirkungs-Beziehungen erkennen lassen. Die Reife einer wissenschaftlichen Disziplin lässt sich in diesem Sinne daran messen, inwieweit neuartige Experimente kontrolliert und gezielt durchgeführt werden können, oder allgemeiner gefasst, inwieweit und mit welcher Genauigkeit Ereignisse in unserer materiellen Umgebung richtig prognostiziert werden können. Dieses ist das Entwicklungsstadium, in dem die Theorie beginnt, das Experiment herauszufordern und Thesen aufzustellen, die experimentell zu verifizieren sind, und die oben beschriebene induktive Vorgehensweise in eine deduktive umschlägt.

In der Chemie hat sich der induktive Ansatz als besonders erfolgreich erwiesen. Reduziert man diese Disziplin auf eines ihrer Hauptanliegen, nämlich die Synthese neuer Verbindungen, und versucht den heute erreichten Stand zu bewerten, so kommt man zu dem Schluss, dass in den zurückliegenden zweihundert Jahren auf überwiegend experimentellem Wege Großartiges geleistet wurde: In wichtigen Teilgebieten der Synthesechemie ist man heute mit eindrucksvoller Zuverlässigkeit in der Lage, sowohl noch unbekannte Verbindungen als Syntheseeziele zu formulieren als auch gangbare Syntheseschritte zu deren Realisierung

1 | Der vorliegende Beitrag ist ein Nachdruck des gleichnamigen Artikels aus der Zeitschrift *Angewandte Chemie*, 118, 2006, 3484-3490. Mit freundlicher Genehmigung von John Wiley and Sons.

vorauszuplanen. Die inzwischen dokumentierten zahllosen Beispiele einer derartigen nahezu vollständigen Kontrolle der Synthese haben den Eingang klangvoller Begriffe wie ›Maßschneidern‹ oder ›Synthesestrategie‹ in die einschlägige Literatur provoziert. In jüngerer Zeit erfreut sich in diesem Zusammenhang der Begriff ›Design‹ besonderer Beliebtheit. Dabei wird er nicht nur im Sinne von ›Design‹ der Zusammensetzung und Struktur einer neuen Verbindung, sondern auch (von Teilen) ihres Eigenschaftsspektrums verwendet. Als Beleg sei eine kleine Auswahl an Überschriften von Veröffentlichungen der jüngeren Vergangenheit angeführt: *Turning Down the Heat: Design and Mechanism in Solid-State Synthesis*,² *Design of Solids from Molecular Building Blocks: Golden Opportunities for Solid State Chemistry*,³ *Reticular synthesis and the design of new materials*,⁴ *Looking for design in materials design*.⁵

Diese und viele weitere hier unerwähnte Beispiele mögen belegen, wie verbreitet man sich heute dieser Aufmerksamkeit und Anerkennung heischenden Begriffs bedient. Sein Gebrauch im Zusammenhang mit der Synthese chemischer Verbindungen und erst recht mit der Einstellung bestimmter Stoffeigenschaften birgt allerdings die Gefahr, dass ein falscher Eindruck von den Gestaltungsmöglichkeiten des Chemikers erweckt wird. Darüber hinaus liegt in vielen Fällen der unkorrekten Wortwahl ein unzutreffendes konzeptionelles Verständnis zugrunde.

In der allgemein akzeptierten Definition umfasst der Vorgang des ›Designens‹ den Entwurf einer Topologie/Gestalt/Form, die eine vorgegebene Funktion möglichst gut erfüllt und darüber hinaus als ästhetisch empfunden wird. Als weiterer konstitutiver Aspekt wird dem ›Designen‹ im Allgemeinen auch eine künstlerische Komponente zugesprochen und dadurch mit einer Selbstexpression des Designers verknüpft. Auf dieser Grundlage entwickelten klassische Stilschulen, wie das Bauhaus, ihren spezifischen Duktus (siehe Abbildung 7.1 und 7.2). Neben dieser Hauptbedeutung von ›designen‹, die in allen Sprachen und Kulturen die gleiche ist, gibt es verschiedene einschränkende Definitionen. Meist geht es dabei um die Konkurrenz, die Gewichtung oder das gegenseitige Bedingen von Funktionalität und Ästhetik. Die engste Begriffsbestimmung, die im Englischen als Nebendefinition auftritt, sieht im ›Designen‹ den rein technischen Vorgang der Herstellung eines Gegenstandes nach einem Entwurf, ohne Wertung seiner Funktion oder Schönheit. Jede der Definitionen unterstellt jedoch einen gestalterischen Freiraum, eine

2 | Vgl. Andreas Stein, S.W. Keller, T.E. Mallouk: *Turning Down the Heat: Design and Mechanism in Solid-State Synthesis*, in: *Science*, 259(5101), 1993, 1558-1564.

3 | Vgl. Omar M. Yaghi, M. O'Keeffe, M. Kanatzidis: *Design of Solids from Molecular Building Blocks: Golden Opportunities for Solid State Chemistry*, in: *Journal of Solid State Chemistry*, 152(1), 2000, 1-2.

4 | Vgl. Omar M. Yaghi, M. O'Keeffe, N. W. Ockwig, H. K. Chae, M. Eddaoudi, J. Kim: *Reticular synthesis and the design of new materials*, in: *Nature* 423, 2003, 705-713.

5 | Vgl. Mark E. Eberhart, D.P. Clougherty: *Looking for design in materials design*, in: *Nature Materials*, 3, 2004, 659-661.

bloße Auswahl aus vorgegebenen und unveränderlichen Topologien wird in keiner Sprache mit dem Begriff »designen« assoziiert. Im Folgenden wollen wir versuchen zu zeigen, dass ein solcher Freiraum der Gestaltung im Zusammenhang mit der Synthese neuer chemischer Verbindungen nicht gegeben ist.

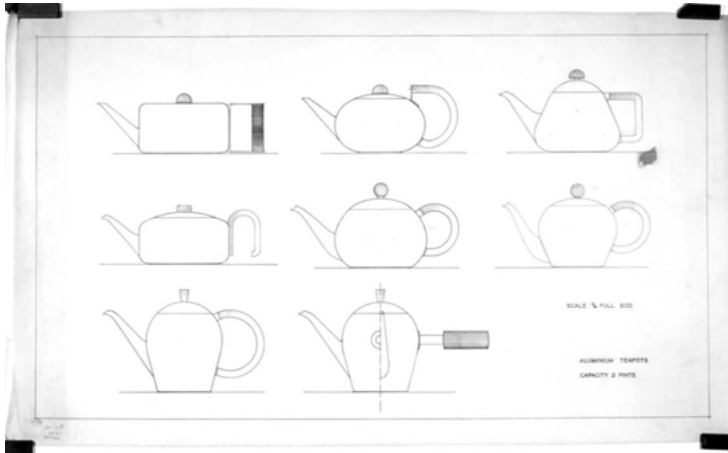


Abbildung 7.1: Walter Gropius: Entwurfszeichnung für acht Teekannen aus Aluminium, 1935. Bildnachweis: Bauhaus Archiv Berlin, Inv. Nr. 5886.



Abbildung 7.2: Walter Gropius: Teekanne (Entwurf). The London Aluminium Co. Ltd., Birmingham. Der einzige Typ von Kanne, der nach Entwürfen in Abb. 7.1 gefertigt wurde. Bildnachweis: Bauhaus Archiv Berlin, Inv. Nr. 7186.

7.2 DAS KONZEPT DER ENERGIELANDSCHAFT CHEMISCHER STOFFE

Als Basis für eine allgemeingültige, alle Stoffklassen umfassende Erörterung etwa gegebener Gestaltungsmöglichkeiten eines Synthesechemikers im Sinne von Design ziehen wir unser Konzept für die Syntheseplanung in der Festkörperchemie heran.⁶ Im Unterschied nämlich zur Molekülchemie – insbesondere des Kohlenstoffs –, die über ein großes Repertoire effizienter Methoden zur zielgerichteten Syntheseplanung verfügt, ist man bei der Präparation neuer Festkörper im Allgemeinen nicht in der Lage, zuverlässig zu planen und ist daher immer noch auf eine explorative Vorgehensweise angewiesen. Mit der Suche nach Abhilfe beschäftigen wir uns seit Längerem und folgen seit 14 Jahren einer konkreten Konzeption. Grundlage unseres Ansatzes ist die Projektion der gesamten Welt der bekannten und der noch nicht hergestellten, aber existenzfähigen chemischen Verbindungen auf eine Energielandschaft. Vereinfachend kann unser Konzept anhand des Konfigurationsraumes erläutert werden, der im Anhang des Designartikels mit den übrigen involvierten Räumen definiert und in Beziehung gesetzt wird.⁷ Ein Punkt im Konfigurationsraum entspricht einer Atomkonfiguration, und alle Atomkonfigurationen, die gemeinsam eine lokal ergodische Region auf der Beobachtungszeitskala bilden, stellen in ihrer Gesamtheit eine existenzfähige (meta)stabile chemische Verbindung auf dieser Zeitskala dar. Insbesondere bei tiefen Temperaturen entspricht der Bereich um jedes Minimum der potenziellen Energie einer existenzfähigen Verbindung. Zur Vereinfachung der Nomenklatur sprechen wir im Folgenden immer von Minima, auch wenn es sich um einen größeren lokal ergodischen Bereich handelt, der viele Einzelminima umfasst.

6 | Vgl. Martin Jansen: *Wege zu Festkörpern jenseits der thermodynamischen Stabilität*, (Abhandlungen der Nordrhein-Westfälischen Akademie der Wissenschaften, Bd. N420), Opladen: Wissenschaftsverlag 1996; J. Christian Schön, M. Jansen: A first step towards planning of syntheses in solid state chemistry: determination of promising structure candidates using global optimization, in: *Angewandte Chemie*, 108, 1996, 1358-1377 (*Angewandte Chemie*, Int. Edition, 35, 1996, 1286-1304); J. Christian Schön, M. Jansen: Determination, prediction and understanding of structures, using the energy landscapes of chemical systems (Part I), in: *Zeitschrift für Kristallographie*, 216, 2001, 307-325; J. Christian Schön, M. Jansen: Determination, prediction and understanding of structures, using the energy landscapes of chemical systems (Part II), in: *Zeitschrift für Kristallographie*, 216, 2001, 361-383; Martin Jansen: Ein Konzept zur Syntheseplanung in der Festkörperchemie, in: *Angewandte Chemie*, 114, 2002, 3896-3917 (*Angewandte Chemie*, Int. Edition, 41, 2002, 3746-3766); J. Christian Schön, M. Jansen: From configuration space to thermodynamic space: Predicting new inorganic solids via global exploration of their energy landscapes, in: *Solid State Chemistry of Inorganic Materials V*, Proceedings of the MRS-meeting, 848, (Boston, December 2004), 333-344.

7 | Vgl. Martin Jansen, J.C. Schön: ›Design‹ in der chemischen Synthese – eine Fiktion?, in: *Angewandte Chemie*, 118, 2006, 3489f.

Eine solche Beschreibung der Welt chemischer Verbindungen durch den Konfigurationsraum und eine ihm zugeordnete Energielandschaft eröffnet unmittelbar zugängliche und ganz grundlegende Einsichten.

- a) In einer eindeutigen Beziehung gehört zu jedem Minimum der Energielandschaft eine existenzfähige Verbindung, und umgekehrt lässt sich jeder realisierten oder realisierbaren chemischen Verbindung ein Minimum zuordnen. Aus diesem Grunde ist diese Darstellung umfassend und schließt alle kinetisch und thermodynamisch stabilen Atomkonfigurationen ein, unabhängig etwa vom Aggregatzustand, vom Vorhandensein oder Fehlen kristalliner Ordnung oder von der jeweiligen Teilchengröße (nano-, meso- oder makroskopisch). Als ein willkommener Nebenaspekt werden konstruierte Gegensätze und nutzlose Polarisierungen wie die zwischen natürlichen und synthetischen Stoffen,⁸ belebter und unbelebter Materie oder zwischen Festkörper- und Molekülchemie aufgelöst, zumindest aber relativiert.
- b) Die in der Vergangenheit, aber auch heute oft noch feststellbare, beinahe reflexartige Überbetonung der Frage, ob eine hypothetische Verbindung ›thermodynamisch stabil‹ sei, erweist sich im Bezug auf ihre Realisierbarkeit als unangebracht. Die einzig notwendige Voraussetzung für die Herstellbarkeit einer Verbindung ist, dass sie einem lokalen Minimum zuzuordnen ist, also mindestens kinetisch stabil ist.
- c) Die Struktur der Energielandschaft, wie sie dem Raum aller denkbaren atomaren Konfigurationen zugeordnet werden kann, ist naturgesetzlich (durch die Summe aller interatomaren Wechselwirkungen) festgelegt. Damit sind unter gegebenen Randbedingungen globale wie lokale Minima und folglich alle im thermodynamischen Sinne stabilen wie metastabilen Verbindungen vorgeprägt.
- d) Die hier beschriebene Vorgehensweise ist deduktiv und stellt damit einen Paradigmenwechsel gegenüber dem früher in der Chemie bevorzugten induktiven Ansatz dar.

Synthesechemie zu betreiben heißt in unserem Bild, die Landschaft der freien Enthalpie zu erkunden, was in der Vergangenheit überwiegend experimentell durch den präparativ arbeitenden Chemiker betrieben wurde. Einer solchen Vorgehensweise tritt mehr und mehr die theoretische Erkundung an die Seite, die verständlicherweise für kleinere Moleküle bislang am weitesten entwickelt ist. Die beiden Zugänge stehen nicht in Opposition zueinander, sie ergänzen sich vielmehr. Die Computerchemie wird zumindest auf längere Sicht billiger und schneller sein und die präparativ-explorative Arbeit nachhaltig stützen können.

8 | Roald Hoffmann: *The Same and Not the Same*, New York: Columbia University Press 1995 (deutsche Übersetzung: Roald Hoffmann: *Sein und Schein. Reflexionen über die Chemie*, Weinheim: Wiley-VCH 1995).

Die klassisch präparative Chemie bleibt allerdings unverzichtbar, da der praktische Nutzen aus einem Stoff trivialerweise nur dann gezogen werden kann, wenn dieser auch faktisch verfügbar ist. Die Anforderungen an die Synthesekunst der Chemiker werden eher noch steigen, denn die Modellierungen ergeben durchaus überraschende, ja exotische Strukturvorschläge, deren Realisierungen bei Aufbietung selbst des modernen Methodenrepertoires große Herausforderungen darstellen. Auch bleibt die experimentelle Verifizierung grundsätzlich letzte Instanz bei der Bewertung der Richtigkeit einer Prognose.

Die Quintessenz dieser Betrachtungen in Bezug auf den Gegenstand dieses Essays ist eindeutig: Aufgrund der erwähnten Äquivalenz von existenzfähigen Verbindungen mit eindeutig vorbestimmten lokal ergodischen Regionen der Energielandschaft chemischer Systeme, fehlt für eine (freie/willkürliche) Gestaltung von Zusammensetzungen und/oder Topologien chemischer Verbindungen durch den Menschen jeglicher Spielraum, und ein ›Design‹ ist folglich nicht möglich, kurz, »die Menschen sind die Entdecker und nicht die Schöpfer chemischer Welten«.⁹ Besonders abwegig ist es, von einer gewünschten Stoffeigenschaft ausgehend ein entsprechendes (neues) Material ›designen‹ zu wollen,¹⁰ weil eine Eigenschaft kein Kriterium für die Existenzfähigkeit einer Verbindung sein kann: In einem ersten Schritt ist die Existenzfähigkeit einer Verbindung nachzuweisen, dann kann unter Umständen aus Zusammensetzung und Struktur das Spektrum ihrer Eigenschaften abgeleitet werden.

7.3 WARUM IST DER GLAUBE AN DIE MÖGLICHKEITEN DES ›DESIGNS‹ VON CHEMISCHEN VERBINDUNGEN SO VERBREITET?

Angesichts dieser leicht nachvollziehbaren Betrachtungen ist es erstaunlich, wie verbreitet und hartnäckig sich der Glaube an eine Gestaltungsmöglichkeit des Wissenschaftlers im Sinne von ›Design‹ in der chemischen Synthese hält. Psychologisch verständlich wird eine solche Auffassung möglicherweise, wenn man sich das in Teilbereichen der Chemie erreichte wirklich bewundernswerte Ausmaß an Kontrolle und Planbarkeit von Synthesen vor Augen führt. Dies zusammen mit der unvorstellbaren Vielfalt möglicher chemischer Verbindungen (›kombinatorische Explosion!‹)¹¹ könnte leicht den falschen Eindruck vermitteln, man könne Ensembles von Atomen mit einer bestimmten Struktur oder gar Eigenschaft in

9 | Vgl. Schön, Jansen, A first step towards planning of syntheses in solid state chemistry, 1996.

10 | Vgl. Eberhart, Clougherty, Looking for design in materials design, 2004; Martin Jansen, J.C. Schön: Rational development of new materials – putting the cart before the horse?, in: *Nature Materials* (Corresp.), 3, 2004, 838.

11 | Vgl. Jansen, Ein Konzept zur Syntheseplanung in der Festkörperchemie, 2002.

einem schöpferischen Akt, etwa wie ein Kunstwerk, erschaffen. Natürlich bleibt die Landschaft der Verbindungen auch in Bereichen sehr nahe beieinanderliegender Minima diskret und sind die Gleichgewichtstopologien unveränderbar. In Wirklichkeit handelt es sich bei einer erfolgreichen Syntheseplanung stets um ein Antizipieren (Vorhersagen, Identifizieren oder intuitives Erahnen) einer noch unbekannten Verbindung, d.h. eines vorgeprägten lokalen Minimums auf der Energiehyperfläche. Zugehörige Strukturen, einschließlich möglicher Isomere und polymorpher Modifikationen, Gleichgewichtsabstände oder Stoffeigenschaften wie Schmelzpunkte oder Dichten sind vorgegeben und bleiben einem »Design« verschlossen.

Auffällig ist, wie unterschiedlich weit das Instrumentarium für eine Syntheseplanung in den verschiedenen Stoffklassen der Chemie entwickelt ist. Ganz ohne Zweifel am weitesten fortgeschritten ist in dieser Hinsicht die organische Synthese. Hier kann man mit scheinbar spielerischer Leichtigkeit selbst komplexere existenzfähige Molekülstrukturen entwerfen, ohne aufwändige Hilfsmittel einsetzen zu müssen.¹² Die Gründe hierfür sind vielschichtig. Auf die Chemie des Kohlenstoffs ist in den zwei zurückliegenden Jahrhunderten der wissenschaftlichen Chemie sicherlich der größte Teil der für die Chemie verfügbaren Ressourcen verwandt worden. Der so erarbeitete reiche Erfahrungsschatz, zusammen mit einer gewissen Uniformität im Bindungsverhalten von Kohlenstoff, unter anderem seiner Neigung zu homoatomarer Verkettung, ermöglicht in besonderer Weise Extrapolationen und damit Vorhersagen noch unbekannter Molekülverbindungen. Dass ein System von praktisch universell verknüpfbaren Strukturinkrementen entwickelt werden konnte, hat seine physikalische Ursache in der Tatsache, dass die Stereochemie des Kohlenstoffs und vieler anderer Nichtmetalle weitgehend durch lokale, kovalente Bindungskräfte determiniert ist und langreichweitige Bindungskräfte vernachlässigbar, zumindest nicht strukturbestimmend sind. Für die Realisierung des jeweiligen Syntheseziels steht mittlerweile ein wirkungsvolles Instrumentarium zur Verfügung.¹³ Das entscheidende Stichwort ist Selektivität durch kinetische Kontrolle, wobei durch Verwendung von funktionellen Gruppen, Schutzgruppen oder Auxiliaren die jeweils gewünschte Chemo-, Regio-, Positions- oder Stereoselektivität erreicht wird. Dieser Situation noch recht nahe kommen Teilbereiche der anorganischen Molekülchemie, wenn

12 | Vgl. Elias J. Corey: Die Logik der chemischen Synthese: Vielstufige Synthesen komplexer »carbogener« Moleküle (Nobel-Vortrag), in: *Angewandte Chemie*, 103, 1991, 469-479 (*Angewandte Chemie*, Int. Edition, 30, 1991, 455-465).

13 | Vgl. Corey, Die Logik der chemischen Synthese, 1991; Kyriacos C. Nicolaou, E. J. Sorensen: *Classics in Total Synthesis*, Weinheim: Wiley-VCH 1996; Michael B. Smith, J. March: *Advanced Organic Chemistry*, (5. Aufl.), New York Wiley-Interscience 2001; Ivar Ugi, J. Bauer, K. Bley, et al.: Die computerunterstützte Lösung chemischer Probleme eine neue Disziplin der Chemie, in: *Angewandte Chemie*, 105, 1993, 210-239 (*Angewandte Chemie*, Int. Edition, 32, 1993, 201-227).

in konzeptionell angelegten Vorgehensweisen etwa unter Ausnutzung elektronischer oder sterischer Effekte und Einsatz von Reaktionsschritten mit hoher Zugkraft wie z.B. Salzeliminierungen eine bestimmte Konfiguration gezielt realisiert wird.¹⁴

Aktuell erlebt das Gebiet der ›Koordinationspolymere‹¹⁵ (ein Begriff, der schon 1964 geprägt wurde)¹⁶ eine weltumfassende Blüte¹⁷ und zeitigt geradezu spektakuläre Erfolge¹⁸. Insbesondere stehen die Varianten mit offenporigen, dreidimensionalen Gerüststrukturen im Fokus, weil ihnen ein besonderes Potenzial für wichtige Anwendungen wie Gasspeicherung oder heterogene Katalyse zugesprochen wird. Bei dieser Verbindungsklasse hat sich ein geradezu inflationärer Gebrauch des Begriffs ›Design‹ herausgebildet. Wie in der organischen Chemie bedient man sich auch hier eines Systems unabhängiger Strukturinkremente, die über Polykondensation oder Donor-Acceptor-Wechselwirkungen aneinander gebunden werden. Die dafür benötigten Baueinheiten müssen unter den Reaktionsbedingungen und für die Reaktionsdauer beständig sein und die für die Verknüpfungen richtigen ›Haftstellen‹ aufweisen. Bei kluger Wahl der Inkremente ist, häufig auch ohne Einsatz aufwändiger Hilfsmittel, eine sehr zuverlässige Vorhersage von Strukturen möglich. Da es sich bei den angestrebten Verbindungen um kollektive Festkörper handelt, greifen hier die Konzepte der Molekülchemie zur Steuerung der Synthese allerdings nicht. Die Lenkung auf eine Zielverbindung muss vielmehr über die Kontrolle des Löslichkeitsproduktes sowie der Keimbildung und -selektion erfolgen.¹⁹ In diesem Punkt ist die Kluft zwischen vorgege-

14 | Vgl. Christoph Elschenbroich: *Organometallchemie*, Stuttgart: Teubner 2005.

15 | Vgl. Christian Robl: Polyoxometalates and Coordination Polymers, in: Luigi Fabbrizzi, A. Poggi (Hg.): *Chemistry at the Beginning of the Third Millenium*, Berlin u.a.: Springer 2000, 278-303; Christoph Janiak: Engineering coordination polymers towards applications, in: *Dalton Transactions*, 14, 2003, 2781-2804.

16 | Vgl. John C. Bailar, Jr.: Coordination Polymers, in: William L. Jolly (Hg.): *Preparative Inorganic Reactions*, New York: Wiley-Interscience 1964, 1-25.

17 | Vgl. Yaghi, et al., Reticular synthesis and the design of new materials, 2003; Anthony K. Cheetham, G. Ferey, T. Loiseau: Anorganische Materialien mit offenen Gerüsten, in: *Angewandte Chemie*, 111, 1999, 3466-3492 (*Angewandte Chemie*, Int.Edition, 38, 1999, 3268-3292); Chintamani N.R. Rao, S. Natarajan, R. Vaidhyanathan: Offene Metallcarboxylat-Architekturen, in *Angewandte Chemie*, 116, 2004, 1490-1520 (*Angewandte Chemie*, Int. Edition, 43, 2004, 1466-1496); Susumu Kitagawa, R. Kitaura, S. Noro: Funktionale poröse Koordinationspolymere, in: *Angewandte Chemie*, 116, 2004, 2388-2430 (*Angewandte Chemie*, Int. Edition, 43, 2004, 2334-2375).

18 | Vgl. Gérard Ferey, C. Mellot-Draznieks, C. Serre, et al.: A Chromium Terephthalate-Based Solid with Unusually Large Pore Volumes and Surface Area, in: *Science*, 309, 2005, 2040-2042; Adrien P. Côté, A. I. Benin, N. W. Ockwig, et al.: Porous, Crystalline, Covalent Organic Frameworks, in: *Science*, 310(5751), 2005, 1166-1170.

19 | Vgl. Jansen, Ein Konzept zur Syntheseplanung in der Festkörperchemie, 2002.

bener und tatsächlich erreichter Kontrolle unangenehm weit. Auch sei an dieser Stelle kritisch angemerkt, dass in aller Regel in Fällen, in denen erfolgreiche Synthese nach ›Design‹ reklamiert wird, Design und Realisierung in derselben Arbeit publiziert wurden. Dieses erscheint uns wenig überzeugend.

In der Festkörperchemie sind mit den klassischen Ansätzen nur sehr eingeschränkt Vorhersagen möglich. Sie beziehen sich meist auf Extra- und Interpolationen von Strukturfamilien wie Perowskiten, Spinellen oder Kochsalzvarianten.²⁰ Bei bestimmten Stoffklassen, etwa den Oxosilicaten, wurde erfolgreich auch auf der Basis des tetraedrischen Bauelements SiO_4 systematisiert und prognostiziert.²¹ Mit Abstand am schwierigsten ist die Vorhersage möglicher Zusammensetzungen und Strukturen bei den intermetallischen Phasen.²² Allen Stoffgebieten, für die die Möglichkeit eines ›Designs‹ von Synthesezielen und -wegen unterstellt wird, ist gemeinsam, dass sich dort die Verbindungen gedanklich in Strukturinkremente zerlegen lassen, aus denen sie auch tatsächlich aufgebaut werden können. Dieses Planen und Systematisieren von chemischen Verbindungen durch Aneinandersetzen von monomeren oder oligomeren Baueinheiten hat in der Chemie eine lange Tradition. Hier angeführt seien Beispiele wie die Kohlenwasserstoffe und ihre Isomere oder die Silicatchemie²³ bis hin zur Beschreibung von Zeolithen über sekundäre Baueinheiten (SBUs),²⁴ wobei auch mathematische Instrumente, etwa die Graphentheorie,²⁵ herangezogen werden. Diese Beschränkung auf bestimmte Verbindungsklassen ist, wie wir oben diskutiert haben, natürlich überwindbar, wenn man zur globalen Erkundung der chemischen Energielandschaft übergeht. Diese Vorgehensweise ist viel aufwändiger, aber insofern korrekter und umfassender, als keine Vorfestlegungen bezüglich bestimmter, im Syntheseprozess unveränderlicher Baueinheiten getroffen werden.

20 | Vgl. Ulrich Müller: *Anorganische Strukturchemie*, Stuttgart: Teubner 1992; Bruce G. Hyde, S. Andersson: *Inorganic Crystal Structures*, New York: Wiley-Interscience 1989.

21 | Vgl. Friedrich Liebau: *Structural Chemistry of Silicates*, Berlin u.a.: Springer 1985.

22 | Vgl. Linus Pauling: The electronic structure of metals and alloys, in: *Theory of Alloy Phases*, (American Society for Metals, Cleveland), 1956, 220-242; Reinhard Nesper: Chemische Bindungen – intermetallische Verbindungen, in: *Angewandte Chemie*, 103, 1991, 805-837 (*Angewandte Chemie*, Int. Edition, 30, 1991, 789-817).

23 | Vgl. Liebau, *Structural Chemistry of Silicates*, 1985; S. Han, J. V. Smith: Enumeration of four-connected three-dimensional nets. I. Conversion of all edges of simple three-connected two-dimensional nets into crankshaft chains, in: *Acta Crystallographica Section A*, 55, 1999, 332-341.

24 | Vgl. Walter M. Meier, D. H. Olson: *Handbook of Zeolite Structure Types*, London: Butterworth 1987.

25 | Vgl. George Pólya: Kombinatorische Anzahlbestimmungen für Gruppen, Graphen, und chemische Verbindungen, in: *Acta Mathematica*, 68, 1937, 145-254; S. J. Chung, T. Hahn, W. E. Klee: Nomenclature and generation of three-periodic nets: the vector method, in: *Acta Crystallographica Section A*, 40, 1984, 42-50.

Streng genommen sind in homogenen Systemen (etwa Lösungen) alle Spezies in Systeme von chemischen Gleichgewichten eingebunden. Selbst Benzol tauscht unter erstaunlich milden Bedingungen Wasserstoff gegen Deuterium aus, und es werden komplexe Oxometallate aus Mutterlösungen einphasig kristallisiert, die eine schier unüberschaubare Vielzahl über dynamische Gleichgewichte gekoppelte Oligomere enthalten.²⁶

Doch ganz unabhängig vom Grad der Vervollkommenung der Syntheseplanung in den verschiedenen Feldern der Chemie gilt allgemein, dass ›Design‹ als Begriff zur Beschreibung des Vorgehens in der chemischen Synthese unzutreffend und daher unangebracht ist. Man könnte einwenden, die Verwendung von Begriffen in ihrem korrekten Sinngehalt wäre für unsere Wissenschaft von eher nachrangiger Bedeutung und sei unter dem Stichwort ›Semantik‹ den Sprachwissenschaften zuzuordnen. Wir haben nur begrenztes Verständnis für eine solche Auffassung und möchten nicht versäumen, auf die Gefahren unsauberer Begriffsbildung hinzuweisen: Wie schon die wohlbekannte Sapir-Whorf-Hypothese zum Ausdruck bringt,²⁷ spiegelt unser sprachlicher Ausdruck unsere Imagination wider, eine unkorrekte Begriffsbildung kann daher zu falschen Vorstellungen führen. Auch in unserer Wissenschaft wird man auf Dauer nur erfolgreich sein, wenn Vorstellungen und Konzeptionen so ›richtig‹ wie möglich sind, d.h. der Realität so gut wie möglich entsprechen. Eine besondere Gefahr geht von der unkorrekten sprachlichen Umschreibung wissenschaftlicher Zusammenhänge gegenüber Nichtfachleuten und vor allem in der Lehre gegenüber Schülern und Studenten aus, bei denen auf diese Weise ein falsches Verständnis angelegt werden könnte.

Tatsächlich stößt man auch in der einschlägigen chemischen Literatur auf Beispiele, bei denen mit der unkorrekten Begriffsbildung ein falsches konzeptionelles Verständnis einherzugehen scheint. So wurde vorgeschlagen, ausgehend von einer angestrebten Stoffeigenschaft eine Verbindung zu ›designen‹, die genau diese Eigenschaft aufweist.²⁸ Dieses ist aus wenigstens zwei Gründen prinzipiell nicht möglich. Zum einen existiert kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Eigenschaft und Verbindung (eine bestimmte Eigenschaft kann von mehreren Verbindungen abgebildet werden). Zum anderen ist eine Eigenschaft niemals ein Kriterium für die Stabilität einer Verbindung.²⁹ Auch werden

26 | Vgl. Michael T. Pope, A. Müller: Polyoxometalate Chemistry: An Old Field with New Dimensions in Several Disciplines, in: *Angewandte Chemie*, 103, 1991, 56-70 (*Angewandte Chemie*, Int. Edition, 30, 1991, 34-48).

27 | Vgl. Franz Boas: *Race, Language and Culture*, Chicago: University of Chicago Press 1940; Edward Sapir: The Status of Linguistics as a Science, in: *Language*, 5(4), 1929, 207-214; Benjamin L. Whorf: *Language, Thought and Reality*, Cambridge: MIT Press 1963.

28 | Vgl. Eberhart, Clougherty, Looking for design in materials design, 2004.

29 | Vgl. Jansen, Schön, Rational development of new materials – putting the cart before the horse?, 2004.

in Bezug auf den Syntheseweg häufig Formulierungen gewählt, die den Eindruck eines gezielten Eingriffs und der vollständigen Kontrolle erwecken, wobei schon im Ansatz das tatsächliche Prinzip der Steuerung der Reaktion auf das gewünschte kristalline Produkt verfehlt wird, das die Prozesse Keimbildung, -selektion und -wachstum umfasst. Die sehr aner kennenswerte Eleganz der gewählten Vorgehensweise³⁰ liegt in der geschickten Einschränkung des Raumes chemischer Konfigurationen, wobei nicht vergessen werden sollte, dass neben den ›designten‹ und publizierten Topologien viele weitere unter Ausnutzung anderer im System vorhandener Spezies und zusätzlicher Bauprinzipien (z.B. gegenseitige Durchdringung der Raumnetze) bei veränderter Keimselektion (Konzentration, Lösungsmittel, Druck, Temperatur) möglich sind.

Als besonders riskant sehen wir Vergleiche zwischen der Syntheseplanung in atomaren Dimensionen und Entwürfen und Realisierungen in der makroskopischen Welt an, wie sie gelegentlich herangezogen werden, um die Verwendung des Ausdrucks ›Design‹ in der Chemie zu veranschaulichen oder gar zu rechtfertigen. Aus Ziegelsteinen gemauerte Gebäude als Modelle für aus Strukturinkrementen aufgebaute dreidimensionale Festkörper wecken wenigstens in zweierlei Hinsicht falsche Assoziationen. Ziegelsteine sind in ihren Abmessungen über weite Bereiche, gemessen an der angestrebten Funktion, kontinuierlich durchstimmbare, die chemischen Strukturinkremente sind dies nicht. Sie sind zwar variabel, aber dies ist nicht durch den Chemiker beeinflussbar. Auch beim Zusammenfügen der makroskopischen Bausteine gibt es einen weiten, kontinuierlich nutzbaren Spielraum, die chemischen Strukturinkremente hingegen lassen sich nur in einer für eine bestimmte Kombination jeweils festgelegten und durch den Menschen unveränderbaren Weise miteinander verbinden.

Wir sind uns sicher, dass sich die allermeisten der vielen Autoren (nur wenige sind hier beispielhaft erwähnt), die den Ausdruck ›Design‹ irreführend oder gar unkorrekt im Zusammenhang mit ihrer Syntheseplanung verwendet haben, der physikalisch-chemischen Hintergründe ihrer jeweiligen Experimente bewusst sind. Davon ganz unabhängig vertreten wir mit gewissem Nachdruck die Auffassung, dass man sich im Interesse eines Fortschritts der Wissenschaft möglichst weniger, gleichzeitig möglichst ›richtiger‹ Modellvorstellungen und ihrer zutreffenden Beschreibung bedienen sollte, wobei die Grenzen eines jeden Modells immer klar vor Augen stehen müssen.

30 | Vgl. Mohamed Eddaoudi, J. Kim, N. Rosi, et al.: Systematic Design of Pore Size and Functionality in Isorecticular MOFs and Their Application in Methane Storage, in: *Science*, 295(5554), 2002, 469-472.

7.4 Wo BEGINNT DAS DESIGN?

Die derzeit höchstmögliche Kontrolle bei der Realisierung von Strukturen im Mikroskopischen dürfte bei der Manipulation und Lokalisation einzelner Atome und Moleküle auf Oberflächen³¹ oder beim Aufbau heterogener Halbleiterstrukturen in monoatomaren Schichten³² mittels Molekularstrahlepitaxie vorliegen. Angesichts derart gezielter Manipulationen könnte man wiederum der Versuchung erliegen und annehmen, es handelte sich um ›Design‹. Aber auch hier werden die Atome, unbeeinflussbar durch den Menschen, stets diskrete Gleichgewichtslagen einnehmen. Das Handeln des Wissenschaftlers besteht also auch hier in der Auswahl einer einzelnen aus der Menge der vielen möglichen Gleichgewichtslagen.

Wann man berechtigterweise von ›Design‹ sprechen kann, also ein Freiraum zur Gestaltung durch den Menschen gegeben ist, ist eine Frage der Längenskala. Die Möglichkeit zu einem ›Design‹ ist erst dann gegeben, wenn die angestrebte Funktion durch eine Struktur mit makroskopischen Abmessungen realisiert werden kann. Selbstverständlich, auch bei Entwurf und Realisierung makroskopischer Objekte müssen die verwendeten Materialien im chemischen Sinne (kinetisch) stabil sein, also Minima der chemischen Energielandschaft entsprechen, und sollten allenfalls innerhalb langer Zeiträume zerfallen, etwa durch Korrosion oder bei zu starker Erwärmung. Auch müssen die Objekte formstabil sein im Sinne der Kontinuumsmechanik, ob unter Belastung oder ohne Belastung. Doch selbst mit diesen Einschränkungen gibt es die für ein ›freies‹ Planen erforderlichen Freiräume, und es sind beliebige Topologien (siehe Abbildung 1) herstellbar mit kontinuierlich änderbaren Abmessungen bis hinab zu Intervallen in der Größenordnung von wenigen Atomdurchmessern. Nach unserer Auffassung könnte ein geeignetes Kriterium für die Unterscheidung darin liegen, ob die Strukturbildung über atomare (chemische) oder mechanische Prozesse erfolgt. Diese Grenzziehung entspräche beispielsweise der Differenzierung von Nano- oder Mesostrukturierungen im ›bottom-up‹ – gegenüber dem ›top-down‹ – Modus.

31 | Vgl. Donald M. Eigler, E. K. Schweizer: Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope, in: *Nature*, 344, 1990, 524-526; Michael F. Crommie, C. P. Lutz, D. M. Eigler: Confinement of Electrons to Quantum Corrals on a Metal Surface, in: *Science*, 262, 1993, 218-220; L. Bartels, G. Meyer, K. H. Rieder: Basic Steps of Lateral Manipulation of Single Atoms and Diatomic Clusters with a Scanning Tunneling Microscope Tip, in: *Physical Review Letters*, 79, 1997, 697-700.

32 | Vgl. Edward H.C. Parker: *The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy*, New York: Plenum 1985.

7.5 ZUR ROLLE DER MENSCHLICHEN KREATIVITÄT UND ZUM URSPRUNG DER CHEMISCHEN STRUKTURINFORMATION

Bei denjenigen Lesern, die bereit waren, obigen Überlegungen zu folgen, werden sich möglicherweise Gefühle der Ernüchterung, ja der Frustration breitmachen, angesichts der Beschränkung ihres Betätigungsfeldes auf ein Entdecken vorgeformter Welten ohne wirkliche Gestaltungsmöglichkeit. Auch wenn diese Limitierung grundsätzlich gegeben ist, stellt die Beschäftigung mit der unfassbaren Formenvielfalt chemischer Verbindungen Anforderungen in Art und Umfang, die an die Grenzen des intellektuellen Potenzials von Menschen stoßen, ja diese häufig überschreiten. So würden wir auch nicht der Ansicht einiger Philosophen wie George Steiner folgen wollen, der den Naturwissenschaften jegliche Kreativität pauschal abspricht.³³ Wie es seinen täglichen Erfahrungen entspricht, muss der Chemiker sein ganzes Wissen, sein ganzes Vorstellungs- und Einfühlungsvermögen aufbieten, um (neue) Verbindungen zu antizipieren und schließlich zu realisieren, die seine jeweiligen konzeptionellen Erwartungen erfüllen. Oft genug sind bei diesen Bemühungen herbe Niederlagen zu verkraften.

Überträgt man diese Überlegungen auf die makroskopische Welt und fragt nach der Rolle der Kreativität eines bildenden Künstlers, eines Designers von Gebrauchsgegenständen oder eines Architekten beim Entwurf eines Gebäudes, so erkennt man hier tatsächlich die Möglichkeit zur Selbstexpression, weil innerhalb weit gesteckter Grenzen die Topologien der Objekte kontinuierlich variiert werden können. Daraus resultiert eben die oben erwähnte, für ein ›Design‹ unerlässliche Gestaltungsfreiheit. Nun kann man ohne sich in Widersprüche zu verwickeln den Standpunkt einnehmen, dass der kreative Akt etwa eines Bildhauers darin besteht, aus der unendlichen Zahl der aus einem Granitblock erzeugbaren Skulpturen genau eine ›auszuwählen‹. Diese Sicht würde erlauben, das Wirken von Synthesechemikern und von Künstlern in Beziehung zu setzen, wie es etwa von Roald Hoffmann vorgeschlagen wurde, allerdings auf einer ganz anderen Bezugsebene, bei der man unterstellt, dass in beiden Regimen ›nur‹ aus der Menge des Möglichen ausgewählt wird.³⁴ Durch diese Parallele wird jedoch der aufgezeigte fundamentale Unterschied zwischen der mikroskopischen (atomare Längenskala) und der makroskopischen Welt keineswegs aufgehoben.

Im Kontext mit dem zentralen Gegenstand dieses Essays – atomare Strukturen und ihre Vielfalt – wird häufig die Frage gestellt, ob die Strukturinformation an irgendeiner Stelle der materiellen Welt kodiert sei, etwa wie die genetischen

33 | Vgl. George Steiner: *Grammars of Creation*, London: Faber & Faber 2001 (deutsche Übersetzung: George Steiner: *Grammatik der Schöpfung*, München: Carl Hanser 2001).

34 | Vgl. Roald Hoffmann, *Creation and Discovery*, in: *American Scientist*, 78, 1990, 14-15.

Baupläne in den DNA.³⁵ Oft wird vermutet, analoge ›Baupläne‹ der Struktur der Materie müssten im Moment des Urknalls, oder kurz danach, erzeugt und abgespeichert worden sein. Hans Jonas gibt eine unmittelbar überzeugende Antwort zu dieser Problematik: »Information braucht für sich selbst schon, als ihr physisches Substrat, ein differenziertes und stabiles System [...] Information ist also nicht nur Ursache, sondern selber schon Ergebnis von Organisation, Niederschlag und Ausdruck des vorher Erreichten, das dadurch perpetuiert, aber nicht erhöht wird.«³⁶ Dem kann man wohl zustimmen, und in unserem Bild folgen die Strukturen chemischer Verbindungen unmittelbar aus der Natur der Materie und den Arten ihrer Wechselwirkungen. Deren Ursprünge zu ergründen, ist allerdings den Autoren, und wohl auch den meisten Lesern, nicht gegeben.³⁷

35 | Vgl. Achim Müller: Chemie und Ästhetik – die Formenvielfalt der Natur als Ausdruck der Kreativität, in: *ZfM-Mitteilungen*, 4, 1999, 7-21.

36 | Hans Jonas: *Philosophische Untersuchungen und metaphysische Vermutungen*, Frankfurt a.M.: Insel 1992, S. 209.

37 | In der Physik gibt es immer wieder Bestrebungen, aus grundlegenden Ansätzen wie Optimierungsprinzipien oder statistischen Wahrscheinlichkeitsanalysen theoretisch möglicher physikalischer Gesetze die Gestalt dieser Gesetze oder die beobachteten Naturkonstanten abzuleiten. Am bekanntesten ist wohl das sogenannte schwache anthropische Prinzip, das besagt, dass der Grund, dass wir aus der Vielzahl der möglichen entstehenden und vergehenden Universen gerade in einem Universum leben, das genau die beobachteten physikalischen Gesetze und Naturkonstanten aufweist, darin liegt, dass in einem Universum mit anderen Gesetzen und Konstanten kein menschliches Leben hätte entstehen können.

8. Unverfügbarkeit in der Synthese

Untersuchungen zu Chemie und Biotechnologie im Zusammenspiel naturwissenschaftlicher und philosophischer Perspektiven

Werner Kogge und Michael Richter

»Während einzelne skeptische Naturforscher von der chemischen Synthese nicht einmal einen unmittelbaren Nutzen für die Biologie erwarten, sind im großen Publikum übertriebene Vorstellungen besonders über die wirtschaftlichen Folgen einer solchen Entdeckung verbreitet. Durch die glänzenden Leistungen der chemischen Synthese auf dem Gebiet der Farben, Heilmittel, Riechstoffe, Sprengstoffe, Süßstoffe usw. ist die Welt in den letzten 50 Jahren so verwöhnt worden, daß sie alles für möglich hält und deshalb in dem künstlichen Eiweiß die billige und gute Volksnahrung der Zukunft erblickt. Diese Hoffnung kam in der Öffentlichkeit zum lebhaften Ausdruck, als ich vor Jahresfrist eine Zusammenfassung meiner synthetischen Versuche gab, und steigerte so weit, daß eine ausländische Zeitung unter dem Stichwort ›Nahrung aus Kohle‹ ein prächtiges Bild brachte, auf dem ein vornehmes Speisehaus mit einem Kohlenbergwerk durch ein chemisches Laboratorium in Verbindung gebracht war, und wo man die Transformation von Steinkohlen in schöne Speisen aller Art sehen konnte.« (Emil Fischer 1907)¹

»Die ›Philosophie der Chemie‹ oder die theoretische Grundlagen der modernen Chemie sind ursächlich mit der Entwicklung der chemischen Synthese verknüpft. Der Begriff der chemischen Synthese von Naturstoffen ist ein altes Problem der Philosophie überhaupt [...]. A priori gingen Jatrochemiker von der Möglichkeit der Synthese sogar *belebter* Naturstoffe aus unbelebten Material aus, indem sie der Palingenesie und der generatio aequivo-ca s. spontanea nachstrebten.«

1 | Emil Fischer: *Die Chemie der Proteine und ihre Beziehung zur Biologie*, Sitzungsberichte d. Königl. Preuß. Akad. d. Wissenschaften zu Berlin 1907, 35; abgedruckt in: Ders.: *Untersuchungen über Aminosäuren, Polypeptide und Proteine II* (1907-1919), (hg. von M. Bergmann), Berlin: Springer 1923, 1-21, S. 14f.

Weiter fährt er fort

»Erst als man statt der Synthese von chemischen *Elementen* diejenige von *zusammengesetzten* Körpern in Angriff nahm und als man statt der *belebten* Stoffe die *organischen* Körper unter *Ausschaltung* der Lebenskraft zu synthetisieren begann, erst dann wurde der wissenschaftlichen Erkenntnis als eine neue Komponente der Erfahrungssatz eingefügt: *Die chemischen Stoffe der unorganischen sowie der organischen Natur sind künstlich herstellbar!*« (Paul Walden 1928)²

»Heutzutage ist die chemische Wissenschaft recht weit fortgeschritten. Während sie voranschreitet und sich selbst immer weiter verfeinert, wird sie genutzt, um Fortschritte und Entdeckungen in einem beeindruckenden Aufgebot an Forschungsgebieten zu ermöglichen, z.B. in der Gesundheitspflege, Ernährung, Energieversorgung und in der Herstellung von Hochleistungsmaterialien sowie Werkzeugen, um komplexe biologische Vorgänge zu beobachten, zu enträtseln und zu nutzen. [...] Die Leistungsfähigkeit der Chemie leitet sich hauptsächlich von ihrer Fähigkeit ab, die molekulare Struktur zu verstehen, sie zu synthetisieren und in ihr durch molekulares Design und Synthese eine Funktion zu schaffen.« (Kyriacos C. Nicolaou 2013)³

»[Drew] Endy believes it will someday be possible for anyone to participate in the design of synthetic organisms. He imagines a new class of professionals similar to today's graphic designers that will design new biological devices on laptops and then send those designs by email to gene foundries.« (Drew Endy 2007)⁴

»Creation of a Bacterial Cell Controlled by a Chemically Synthesized Genome.« (Daniel Gibson et al. 2010)⁵

Diese Zitate dokumentieren eine Annahme weitreichender Möglichkeiten der chemischen, biochemischen und biotechnischen Synthese, die die Herstellung von neuartigen Stoffen und Prozessen bis hin zur Herstellung künstlicher biolo-

2 | Paul Walden: Die Bedeutung der Wöhlerschen Harnstoffsynthese, in: *Die Naturwissenschaften*, 16, 1928, 835-849, S. 848.

3 | Kyriacos C. Nicolaou: Vom Aufkommen des Molekülkonzepts zur Kunst der Molekülsynthese, in: *Angewandte Chemie*, 125, 2013, 141-157, S. 141.

4 | Zitiert nach ETC Group (2007): *Extreme genetic engineering: An introduction to Synthetic Biology*. www.etcgroup.org/upload/publication/602/01/synbioreportweb.pdf. (www.etcgroup.org/en/node/602 January 16, 2007 D (Abruf 17.8.2012), S. 34; Vgl. auch Drew Endy: Foundations for engineering biology, in: *Nature*, 438, 2005, 449-453, S. 451; Henk van den Belt: Philosophy of biotechnology, in: Anthonie Meijers (Hg.): *Philosophy of technology and engineering sciences*, Amsterdam: Elsevier 2009, 1301-1340, S. 1308.

5 | Daniel Gibson, John I. Glass, Carole Lartigue, C., et al.: Creation of a Bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome, in: *Science*, 329(5987), 2010, 52-56.

gischer Systeme und sogar neuartiger Lebensformen in den Horizont des Machbaren rückt. Sie stammen aus der Zeit seit Beginn des 20. Jahrhunderts bis zur Gegenwart, ihre Wurzeln liegen in den Erfolgen der Chemie des 19. Jahrhunderts.

In den folgenden Ausführungen geht es uns um die Frage, auf welcher gedanklichen, konzeptuellen und praktischen Grundlage diese Annahme besteht. Wir wollen die Voraussetzungen untersuchen, unter denen es plausibel scheinen kann, mit dem Begriff der Synthese (weitgehend) unbeschränkte schöpferische Möglichkeiten zu assoziieren. Dabei geht es uns darum, diese Voraussetzungen kritisch auszuleuchten. Ziel ist es, einige Aspekte dessen, was der Annahme von unbeschränkten schöpferischen Möglichkeiten entgegensteht (und was unter dem Schlagwort ›Komplexität‹ häufig mehr verdeckt als herausgearbeitet wird), zu verdeutlichen. Dabei gehen wir davon aus, dass eine Sichtweise, die die sich der Beherrschung entziehenden Momente der stofflichen und lebendigen Natur in Rechnung stellt, zu einer angemesseneren Haltung führt, sowohl dieser Natur als auch den sie erforschenden Wissenschaften gegenüber.

Methodisch gehen wir so vor, dass wir unser Thema von zwei Seiten her beleuchten. Aus der Perspektive einer Reflexion von Theorie und Praxis in den chemischen Wissenschaften spüren wir den Momenten nach, an denen sich Risse zwischen dem Glauben an unbeschränkte Synthesemöglichkeiten und den tatsächlichen wissenschaftlichen Ergebnissen und Vorgehensweisen zeigen. Aus philosophischer Perspektive untersuchen wir, welche Denkfiguren, Begriffe und konzeptuelle Transformationen mit dieser Annahme verbunden sind. Die beiden Perspektiven werden alternierend und sich aufeinander beziehend im Text eingenommen.

8.1 DER BEGRIFF DER SYNTHESE: EIN PHILOSOPHISCHER EINSATZ

Auf die Frage, welches philosophische Thema mit ›Synthese‹ angesprochen ist, liegt eine Antwort nahe, die auf die Begriffsgeschichte des Wortes verweist, wie sie in philosophischen Lexika dokumentiert ist. Zwar sind die Verhältnisse in dieser Geschichte verwickelter als es zunächst scheint (dazu später), doch es ist zu bemerken, dass das altgriechische Wort ›synthesis‹ mitsamt seiner lateinischen Übersetzung ideengeschichtliche Traditionsstränge bildete, in denen es bis ins zwanzigste Jahrhundert eine gewichtige Rolle im Nachdenken über Erkenntnis und Wissenschaft spielte.

Bevor historische Verwicklungen des Begriffs in einigen Aspekten beleuchtet werden, soll hier zunächst anders angesetzt werden: und zwar direkt bei der Frage, was am Begriff der Synthese uns denn im philosophischen Sinne zu frappieren in der Lage ist. Wo liegt heute eine Frage, wo zeigt sich ein Problem von weitreichender Bedeutung in unserem Begriff der Synthese?

Im heutigen Sprachgebrauch findet sich ›Synthese‹ (wo nicht explizit auf philosophische Themen verwiesen wird) in sehr allgemeiner Verwendung (z.B.

»das Bauwerk ist eine Synthese unterschiedlicher Einflüsse«) und im chemisch-technischen Kontext, der Alltagssprachlich sehr vertraut geworden ist, bis hin zum geläufigen Ausdruck ›Synthetik‹ für Kunstfasertextilien. Geläufig ist auch das Begriffspaar Analyse/Synthese, in dem ›Synthese‹ als Zusammensetzung von Elementen ein Pendant zur ›Analyse‹ bildet, die ein Ganzes in seine Elemente auflöst. Dieses Bild nun ist es, das bei näherer Betrachtung immer mehr Fragen aufwirft. Es hat zwar den Anschein, dass im Sinne von Zerlegung und Verbindung mit Analyse und Synthese schlicht zwei einander gegengerichtete Handlungsarten angesprochen sind. Doch sind denn die Begriffe der Synthese und der Analyse in dieser Weise schon bestimmt? Sind sie schlicht Fremdwörter für deutsche Wörter wie Zerlegung und Zusammensetzung?

Wir brauchen uns nur zu vergegenwärtigen, dass, wenn wir beispielsweise ein Puzzle aus seinen Teilen zusammensetzen, wir nicht von Synthese sprechen würden – so wenig wie von Analyse, wenn wir es zerlegen. Wird aus Ziegelsteinen eine Mauer aufgeschichtet, so gereicht das ebenso wenig zu einer Synthese wie ihr Abtrag zu einer Analyse. Das Begriffspaar Synthese/Analyse verlangt offenbar mehr als bloße Zusammensetzung und Zerlegung. Wir verstehen darunter offenbar etwas Bestimmteres – ›besondere Weisen‹ der Zusammenfügung und Auflösung. Doch worin könnte dieses Spezifische bestehen? Dass nicht jede Zusammenfügung als eine Synthese gelten kann, ist klar: Offenbar muss daraus etwas entstehen, doch was? Sollen wir sagen: ein ›Ganzes‹? Doch auch das vollständig gesetzte Puzzle kann als ein ›Ganzes‹ bezeichnet werden – gleichwohl bleibt es dabei: Ein solches Ganzes ist nicht ganz durch Synthese.

Der Ausdruck ›Analyse eines Puzzles‹: wenn jemand die Puzzleteile nach der Bildvorlage vorsortiert, z.B. nach Farbe, Zugehörigkeit zu bestimmten Bildelementen etc.: Könnten wir dann nicht von einer Analyse sprechen? – Vielleicht. So wäre Analyse mit Zerlegung nach bestimmten Kriterien verbunden. Das Ganze würde zerlegt und zugleich sortiert nach bestimmten Unterscheidungsmerkmalen. Woher aber sind diese gewonnen? Zeigt sich von selbst, wie zu zerlegen und zu sortieren ist? Offenbar gelangen wir hier an einen prekären Punkt: Denn es erschließt sich nicht von selbst, woher die Leitvorgaben – oder sollen wir sagen: ›Prinzipien‹? – der Zerlegung und Sortierung zu nehmen sind. Sicherlich hätte die Analyse des Puzzles etwas mit dem Puzzlebild, mit seiner Gliederung und seinem Aufbau zu tun. Doch ebenso offensichtlich ist, dass unterschiedliche Analysten unterschiedlich gliedern und sortieren könnten.

Fraglich bliebe auch, ob in Bezug auf die Zusammensetzung eines Puzzles aus gefertigten Teilen überhaupt von ›Synthese‹ gesprochen werden kann, auch wenn die Zusammensetzung einer Analyse im genannten Sinne nachfolgte. Spricht man in der Erstellung eines Puzzles von Synthese, so wäre wohl eher an die Bildkomposition zu denken, also daran, wie etwa im Vorgang des Entwerfens die Bildwirkung aus Quellen der Farbigkeit, der Proportion und Formgebung erwächst. Synthese bedeutete also auch hier weit mehr als bloße Zusammensetzung. Der Begriff zeigt sich verwiesen auf weitere Begriffe wie ›Ganzes‹, ›Ord-

nung«, »Gliederung«, »Sortierung«, »Unterscheidung«, »Merkmal« und »Prinzip«. Eine ganze Kohorte philosophischer Grundbegriffe tritt zum Vorschein, wenn wir daran rühren, was wir meinen, wenn wir von Synthese sprechen. Es wird also darum gehen müssen, Synthese im Kontext solcher Begriffe zu verstehen. Doch wollen wir zunächst sehen, was heute unter dem Begriff der Synthese in der Chemie tatsächlich verstanden wird.

8.2 DER BEGRIFF DER SYNTHESE IM SPRACHGEBRAUCH IN DER CHEMIE

Der Begriff Synthese hat in der Chemie als »chemische Synthese« eine zentrale Bedeutung gefunden. In diesem Wortsinne verstehen Chemiker darunter den planmäßigen und praktisch realisierbaren Aufbau von chemischen Verbindungen aus anderen chemischen Verbindungen oder Elementen.⁶ Das Gegenstück zur chemischen Synthese ist die chemische Analytik, mit der das Ziel verfolgt wird, chemische Substanzen hinsichtlich ihres chemischen Aufbaus und ihrer Eigenschaften aufzuklären. Beide Disziplinen bedingen und ergänzen sich gegenseitig. So kann zum Beispiel Synthese eine wichtige Rolle bei der Analytik spielen. Die Notwendigkeit der Aufklärung solcher synthetischen Prozesse durch instrumentelle Analytik und bioanalytische Verfahren gilt auch für die Biosyntheseforschung, die sich mit der Synthese in Organismen oder durch Substrukturen von Organismen, wie beispielsweise Enzyme, beschäftigt.

Die chemische Synthese beschreibt die Herstellung von Ziel-Verbindungen (Produkten) aus einer oder mehreren Ausgangsstoffen (Edukten) unter definierten Reaktionsbedingungen und meist unter Verwendung einer bestimmten Apparatur. Das Produkt unterscheidet sich vom Edukt-Material in seinen Eigenschaften, welche aber nicht einfach aus der molekularen Struktur ohne eigens angestellte Analytik ableitbar sind.

Die Umsetzung einer chemischen Synthese oder die Produktion von chemischen Verbindungen ist im Wesentlichen in folgenden Ablauf eingebettet: 1.) Syntheseplanung, 2.) Synthesedurchführung (ein- oder mehrstufige chemische Reaktion oder Stoffumwandlung, 3.) Isolation des Produkts oder der Produkte, 4.) Charakterisierung des jeweiligen Produkts (Analytik). Demnach geht der Synthese die Syntheseplanung voraus. Diese beinhaltet Literaturrecherche, um zu sehen, ob wirklich ein neuer Stoff synthetisiert wird und ob bereits eine Synthesevorschrift besteht. Im Falle der Synthese von neuen Verbindungen folgen Testexperimente (wie Löslichkeitsversuche der Edukte, Reinheitstests und Synthesen im analytischen Maßstab, d.h. mit Mengen, die für die notwendige Analytik

6 | Etliche Kurzbeschreibungen zum Verständnis von chemischer Synthese finden sich im Artikel von Kyriacos C. Nicolaou: Vom Aufkommen des Molekülkonzepts zur Kunst der Molekülsynthese, in: *Angewandte Chemie*, 125(2013), 141-157, S. 151.

ausreichend sind), um erste Erkenntnisse für die Synthesebedingungen zu gewinnen. Eine gründliche, auch energetische Abschätzung des Reaktionsablaufs und der Stabilitäten möglicher Intermediate und Produkte anhand des auf Papier gezeichneten vorgeschlagenen Reaktionsschemas und Mechanismus, inklusive der Berechnung der Stöchiometrie der Reaktionspartner, ist oft notwendig und angelehnt an bekannte, analytisch beschriebene Beispiele für Reaktionstypen sowie an bekannte Werte strukturell ähnlicher Verbindungen.

In der Entwicklung von Synthesen neuer Verbindungen kann das Betrachten der Synthese homologer Verbindungen lohnenswerte Hinweise geben, bei ganz neuen Verbindungen die Betrachtung der Energetik der sich bildenden und brechenden Bindungen. Energetische Berechnungen für den Reaktionsverlauf sind letztlich auch deshalb wichtig, um die Synthese problemlos apparativ steuern zu können.

Eine Strategie zur Isolation von Zwischenprodukten in Mehrstufensynthesen gehört zur optimalen Syntheseplanung, wie auch die Wahl günstiger und strukturell einfach aufgebauter Ausgangsstoffe. Dabei spielt in der organischen Chemie der Begriff des ›Synthons‹ eine große Rolle. Unter einem Synthon versteht man eine strukturelle Einheit innerhalb eines Moleküls, das für einen Syntheseschritt verwendet wird.⁷ Weitere wichtige Aspekte sind heutzutage die Optimierung der Atomökonomie, Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit eines Prozesses und die Minimierung der allgemeinen der Synthese (einschließlich der Apparatur etc.).

Synthesechemiker orientieren sich bei der Planung und Durchführung einer chemischen Synthese am geeignetsten Reaktionstyp für einen geplanten Umsatz einer Verbindung und möchten sicherstellen, dass die gewünschte chemische Reaktion möglichst quantitativ abläuft, das bedeutet, dass ein vollständiger Umsatz der Edukte zum gewünschten Produkt ohne Nebenreaktionen stattfindet. Der zentrale Umformungsschritt bei einer chemischen Synthese ist die chemische Reaktion. Wichtige Parameter zur Charakterisierung einer chemischen Reaktion sind kinetische und thermodynamische Größen. Diese werden für definierte Reaktionsbedingungen wie gegebener Temperatur, Druck, Stoffmengenkonzentrationen und Reaktionszeit beschrieben. Ein erwähnenswertes Prinzip ist, dass manche Reaktionen unter kinetischer Kontrolle, andere dagegen unter thermodynamischer Kontrolle ablaufen können. Ganz wichtig, besonders in der Naturstoffsynthese, sind Phänomene der Chemo-, Regio- und Stereoselektivität.⁸ Die Reaktionen in der organischen Chemie umfassen zahlreiche Reak-

7 | Vgl. Elias J. Corey: General methods for the construction of complex molecules, in: *Pure and Applied Chemistry*, 14, 1967, 19-37.

8 | Vgl. Reinhard Brückner: *Reaktionsmechanismen: organische Reaktionen, Stereochemie, moderne Synthesemethoden*, Heidelberg/Berlin: Spektrum 2003.

tionstypen und Namensreaktionen, deren Kenntnis zum Handwerkszeug jedes Chemikers gehört.⁹

8.3 SKRIPTURALES REAKTIONSSCHEMA UND ›GEEIGNETSTER REAKTIONSTYP‹: EIN SCHRIFTTHEORETISCHER ASPEKT

Bei der Syntheseplanung spielt das schriftliche Reaktionsschema eine zentrale Rolle, bei der Durchführung der ›geeignetsten Reaktionstyp‹. ›Eine‹ Antwort auf die Frage, was der Annahme weitreichender oder gar unbeschränkter Möglichkeiten durch chemische Synthese zugrunde liegt, weist in eine medien- und schrifttheoretische Richtung. Ursula Klein hat gezeigt, dass die vom schwedischen Chemiker Jacob Berzelius eingeführten chemischen Formeln nicht bloß Aufzeichnungen chemischer Verbindungen im Sinne ihrer Repräsentation darstellen, sondern zugleich als Werkzeuge, als ›papertools‹ zu betrachten sind.¹⁰ Die Möglichkeit nämlich, auf Papier Kombinationen chemischer Bestandteile versuchsweise herzustellen, umzuschreiben, ja: die Kombinationen beliebig zu verändern, macht die Zeichen und ihre Verknüpfungen zu einem Baukasten, bei dem – genau genommen – jedes Zeichenelement als Material und als Werkzeug der Manipulation dienen kann. In der Schrifttheorie spricht man vom ›operativen Aspekt‹ des Schriftzeichens. Dem liegt die Beobachtung zugrunde, dass schriftlichen Zeichenelementen nicht nur die Möglichkeit der Bezugnahme auf Anderes (Referenz), der Verdauerung und sinnlichen Vergegenwärtigung (ästhetische Präsenz), sondern auch der operativen Manipulation eignet, was sich am eindrücklichsten im schriftlichen Rechnen, aber auch beispielsweise im musikalischen Komponieren in Notenschrift und eben auch in der chemischen Formelschreibweise äußert.¹¹

Ein eindrückliches Beispiel dafür, wie die schriftliche Praxis in der Chemie die Herstellung und Komposition chemischer Verbindungen möglich erscheinen lässt, indem sie ihre schriftliche Darstellbarkeit vor Augen führt, demonstriert Klein, wenn sie aus dem Text *Mémoire sur les ethers composés* von Jean Baptiste Dumas und Polydore Boullay von 1828 zitiert:

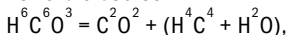
9 | Viele chemische Reaktionen sind nach dem Namen ihrer Entdecker benannt (wie die Wöhlersche Harnstoff-Synthese). Weitere Beispiele dafür finden sich in: Brückner, *Reaktionsmechanismen*, 2003.

10 | Vgl. Ursula Klein: *Experiments, Models, Paper-Tools. Cultures of Organic Chemistry in the Nineteenth Century*, Stanford: Stanford University Press, 2003.

11 | Werner Kogge, Gernot Grube: Zur Einleitung: Was ist Schrift?, in: Gernot Grube, Werner Kogge und Sybille Krämer (Hg.): *Schrift. Kulturtechnik zwischen Auge, Hand und Maschine*, München: Fink, 2005, 9-21.

»In der Tat, nach der Analyse von Th. de Saussure enthalten diese Zucker $\text{C}^6\text{H}^7\text{O}^{31/2}$, was wir repräsentieren als $\text{H}^6\text{C}^6\text{O}^3 + \text{HO}^{1/2}$, indem wir das halbe Atom Wasser als Kristallwasser betrachten.

Es verbleibt also:



das heißt, dass der Zucker der Stärke repräsentierbar ist durch gleiche Volumina Kohlensäure und Alkohol. Unter diesem Gesichtspunkt können der Zucker des Zuckerrohrs und der der Stärke als Carbonate von Bicarboniertem Wasserstoff betrachtet werden, die sich nur darin unterscheiden, dass ersterer zweimal weniger Kristallwasser enthält als der zweite.«¹²

Wir können uns also das System der chemischen Formelschreibweise gleichsam als ein »ideales Labor« vorstellen, in dem willkürlich Verbindungen zusammengestellt werden können, um zu sehen, was sich aus einer bestimmten Konfigurationsvariante ergibt oder was in ihr impliziert sein könnte. Es können Verbindungen entworfen, oder – wie man heute sagt – »designed« werden, unabhängig von Restriktionen des chemischen Materials und der Umstände. Diese Möglichkeit des Entwurfs scheint eine nachhaltige Quelle des Machbarkeitsglaubens in Chemie und Biotechnologie zu sein – was in Anbetracht der aktuellen Konjunktur des Design-Begriffs in diesen Bereichen deutlich wird.¹³

Die chemische Formelschreibweise war aber nicht die einzige Quelle der sich ausbreitenden Erwartungen an chemische Synthese. Als 1858 Friedrich August Kekulé das Theorem der Kohlenstoff-Kohlenstoff-Verbindungen entwickelte, also der kettenförmigen Moleküle, die in verschiedensten Anordnungen konfiguriert jeweils andere Molekülarten ergeben, wurde es noch bedeutend plausibler, eine explizite Analogie zwischen chemischer und skripturaler Welt herzustellen, und damit die Suggestion zu nähren, mit chemischen Elementen könnte operativ verfahren werden wie mit Elementen eines schriftlichen Notationssystems.

Dem entgegen steht das Problem des »geeignetsten und möglichen Reaktionstyps« in der Durchführung der chemischen Synthese. Was macht einen Reaktionstyp zur Beschreibung einer chemischen Umformung geeignet und wie müssen solche Vorgehen eingeordnet werden?

12 | Jean Baptiste André Dumas, Polydore Boullay: *Mémoire sur les ethers composés*, in: *Annales de Chimie et de Physique*, 37, 1828, 15-53, S. 47f. Zitiert nach: Klein, *Experiments, Models, Paper-Tools*, 2003, S. 144. Übersetzt in Ursula Klein: *Experimente, Modelle, Paper-Tools. Kulturen der organischen Chemie im 19. Jahrhundert* (Habilitationsschrift), Universität Konstanz 1999, S. 218.

13 | Vgl. Martin Jansen, J.C. Schön: *Design in chemical synthesis – An illusion?*, in: *Angewandte Chemie*, (Int. Edition), 45, 2006, 3406-3412 sowie der übersetzte Artikel in diesem Band Kapitel 7 »Design« in der chemischen Synthese – eine Fiktion?

8.4 DIE ORGANISCHE CHEMIE: TECHNISIERUNG DER LEBENSKRÄFTE

Mit dem Entdecken der organischen Synthese 1828 durch Wöhler, der zeigte, dass er Harnstoff ohne Zuhilfenahme eines Organismus synthetisieren konnte, schien die Annahme einer »vis vitalis« obsolet zu werden. Damit vereinnahmte die Synthese-Chemie mit ihrer neuen Disziplin quasi diese bis dahin alles Organische gestaltende Kraft.

»Erst als man statt der Synthese von chemischen ›Elementen‹ diejenige von *zusammengesetzten* Körpern in Angriff nahm und als man statt der *belebten* Stoffe die *organischen* Körper unter *Ausschaltung* der Lebenskraft zu synthetisieren begann, erst dann wurde der wissenschaftlichen Erkenntnis als eine neue Komponente der Erfahrungssatz eingefügt: *Die chemischen Stoffe der unorganischen sowie der organischen Natur sind künstlich herstellbar!*«¹⁴

Die Wöhlersche Harnstoff-Synthese wird deshalb trotz diverser Wegbereiter als Startpunkt der organischen Synthese-Chemie betrachtet. Damals gelang es Wöhler, als »Doktor der Medizin, Chirurgie und Geburtskunde«¹⁵ gewissermaßen der Chemie der Lebewesen nahestehend, aus Ammoniumisocyanat Harnstoff (als Umlagerungsprodukt) zu synthetisieren,¹⁶ der bis dato nur aus lebenden Organismen isoliert werden konnte. Wöhler schrieb an seinen Lehrer Berzelius »[...] ich muss ihnen erzählen dass ich Harnstoff machen kann, ohne eine Niere oder überhaupt ein Tier [...] nötig zu haben.«¹⁷

Eine wesentliche Untermauerung des Begriffs »organische Synthese« wurde durch die experimentellen Arbeiten von Herman Kolbe erbracht. Er synthetisierte 1845 erstmals in geplanter Weise Essigsäure aus CS_2 , Cl_2 und H_2O , also aus anorganischen Materialien, und zeigte damit die Möglichkeit auf, von der anorganischen zur organischen Natur eine Brücke zu schlagen.¹⁸ In der Folge entwickelte sich die organische Synthese rapide und das Verständnis der Synthese-Chemiker wurde durch die Verbannung der »vis vitalis« vom rein technischen Verständnis abgelöst und damit von Arbeitsmethoden beherrscht, die Organismen wesensfremd sind.

Die enormen Fortschritte innerhalb der organischen Chemie führten auch dazu, dass enorme Erwartungen für die Gesellschaft durch synthetische Leistungen formuliert wurden. Diese Formulierungen reichen von »Wenn einst der

14 | Walden, Die Bedeutung der Wöhlerschen Harnstoffsynthese, 1928, S. 848.

15 | Walden, Die Bedeutung der Wöhlerschen Harnstoffsynthese, 1928, S. 837.

16 | Nicolaou, Vom Aufkommen des Molekülkonzepts zur Kunst der Molekülsynthese, 2013, S. 150.

17 | Walden, Die Bedeutung der Wöhlerschen Harnstoffsynthese, 1928, S. 836.

18 | Walden, Die Bedeutung der Wöhlerschen Harnstoffsynthese, 1928, S. 839.

große Plato das Weltganze [...] durch Götter erschaffen ließ, so werden dereinst die *Chemiker-Techniker* aus Luft, Kohlensäure, Wasserdampf und Erde ihre Synthesen der *organischen Stoffwelt* vollführen!« bis zum pathetischen Fazit »Die *Erde* aber selbst bleibt der begrenzte Kampfplatz ums Dasein für die Menschenmilliarden. Möge die große Symphonie des Weltgeschehens eine erhöhte Konsonanz gewinnen, indem die chemische Synthese ihrerseits ein *wirksames Instrument des Friedens und Wohlergehens* der Menschheit wird!«¹⁹

Eine in der Synthesechemie allgegenwärtige Frage ist, neben den Aspekten »was« und »woraus« etwas synthetisiert wird, immer schon die Frage nach dem, »wie« es synthetisiert wird, die besonders von Friedrich Mohr 1868 gestellt wurde. Er forderte in Bezug auf organische Stoffe, den Weg zu finden »[...] *auf welchem die Natur diese Stoffe aus Kohlensäure, Wasser und Ammoniak bildet.*«²⁰ Es ist erstaunlich, dass 100 Jahre nach der ersten organischen Synthese als ein Ziel der Synthesechemie für das kommende Jahrhundert klar formuliert wird, dass der Weiterentwicklung der chemischen Synthese mittels Enzymen und Katalysatoren sowie Energiesteigerungen eine große Bedeutung zukommt:

»Das höchste und reizvollste Objekt der experimentellen Forschung ist nun die *lebende Natur* selbst. Ihren *Chemismus* zu erforschen, aus dem Reich der *Lebensvorgänge* neue *Provinzen* auch für die chemische Synthese abzuringen, dies ist eines der Ziele der chemisch-synthetischen Forschung im *zweiten Jahrhundert* ihres Bestehens. »Zurück zur lebenden Natur!« [...]«²¹

Die hier angesprochenen Aspekte sind tatsächlich Gegenstand aktueller Forschung und Entwicklung, sofern sie nicht schon in vielen Lebensbereichen in Prozessen oder Produkten erfolgreich etabliert sind.

8.5 BEGRIFFSGESCHICHTLICHE ASPEKTE: ARISTOTELES, EUKLID UND DIE REZEPTION

Offenbar schwanken die mit dem Begriff der Synthese verbundenen Assoziationen zwischen der Vorstellung einer (nahezu) willkürlich planbaren Zusammensetzung aus Einzelteilen einerseits und der Entstehung eines neuen Herstellungsweges andererseits, der nur unter Voraussetzung eines umfassenden Verständnisses des betreffenden Naturbereichs und großer praktischer Erfahrung zustande kommen kann. Während der erste Fall im Anwenden einer Technik nach gegebenen Regeln besteht, ist im zweiten Fall ein Typ von Wissen und Könnerschaft erforderlich, der sich auch in ausdauernder Praxis bildet und be-

19 | Walden, Die Bedeutung der Wöhlerschen Harnstoffsynthese, 1928, S. 848.

20 | Walden, Die Bedeutung der Wöhlerschen Harnstoffsynthese, 1928, S. 843.

21 | Walden, Die Bedeutung der Wöhlerschen Harnstoffsynthese, 1928, S. 849.

währt – ein Motiv, das in der Aristotelischen Philosophie von zentraler Bedeutung ist. Überhaupt ist es naheliegend anzunehmen, dass das Schwanken im modernen Verständnis von Synthese etwas mit der Geschichte des Begriffs zu tun hat. Im Folgenden sollen nun einige entscheidende Punkte und Wendungen dieser Geschichte skizziert werden, um ein klareres Bild von begrifflichen Unterschieden in diesem Bereich zu gewinnen.

Wenn wir versuchen, den Begriff der Synthesis in seinem historischen Hintergrund zu verorten, so geraten wir in eine zunächst verwirrende Situation. Geläufigerweise wird das Begriffspaar Analyse/Synthese auf Autoren der griechischen Antike zurückgeführt, nämlich auf Euklid und Aristoteles. Doch bei genauerer Hinsicht findet sich ein entsprechendes Begriffspaar im griechischen Denken gar nicht. Zwar kann Analysis als ein Schlüsselbegriff der Aristotelischen Philosophie gelten – titelgebend für zwei Hauptwerke (*Erste Analytik* und *Zweite Analytik*), doch ist der ›analysis‹, die in diesen und anderen Schriften erläutert wird, nicht unmittelbar ›synthesis‹ als Pendant zur Seite gestellt. Analysis ist ein Begriff aus den methodischen Schriften des Aristoteles. Er bezeichnet die Zergliederung (wörtlich: Auflösung) eines Satzes in die vorausgesetzten Schlussformen, Prämissen und Prinzipien. *Synthesis* dagegen ist ein Begriff aus den Aristotelischen Schriften zu Physik und Metaphysik. Er steht im Zusammenhang damit, wie etwas aus Anfangsgründen aufgebaut ist oder entsteht. Tatsächlich findet sich in den Aristotelischen Werken keine Textstelle, in der ›analysis‹ und ›synthesis‹ als Komplementärbegriffe erläutert oder auch nur gemeinsam erwähnt werden.

Diese Zusammenstellung taucht erstmals in einem Zusatz zu dem mathematischen Grundlagenwerk *Die Elemente* von Euklid auf. Dort liest man: »Was ist eine Analysis und was eine Synthesis? Eine Analysis ist die Zugrundelegung des Gefragten als anerkannt um seiner auf anerkannt Wahres führenden Folgerungen willen. Eine Synthesis ist die Zergliederung des Anerkannten um seiner auf Vollendung oder Ergreifung des Gefragten führenden Folgerungen willen.«²²

Liest man zuweilen, Aristoteles habe methodische Leitlinien aus den Euklidischen Elementen übernommen, so steht dem schon die Chronologie entgegen: Aristoteles war bereits gut zwei Jahrzehnte tot, als *Die Elemente* verfasst wurden (Aristoteles 384-322; Verfassung der Euklidischen *Elemente* zwischen 305 und 285).²³ Der zitierte Textteil zu Synthesis und Analysis ist sicher noch weit später hinzugefügt worden, vermutlich von dem um 100 n. Chr. lebenden Mathematiker und Ingenieur Heron von Alexandrien. Darauf deuten Passagen aus den Euklid-

22 | Euklid: *Die Elemente*, Buch 1-13, (hg. u. übers. von Clemens Thaer), Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1963, S. 386f.

23 | Vgl. für Aristoteles Otfried Höffe: *Aristoteles*, München: Beck 1996, S. 288. Vgl. für Euklid: *Paulys Realencyclopädie der classischen Altertumswissenschaft*, (hg. von Georg Wissowa), 11. Halbband, Stuttgart: Alfred Druckenmüller 1907, 1003-1052, S. 1004.

Kommentaren des Proklus (nach 400 n. Chr.) und des al-Nairizi (um 920 n. Chr.) hin.²⁴

Das wissenstheoretische Vorbild, an das die Euklid-Kommentatoren die mathematische Methode anpassten, findet sich in einem Text der Aristotelischen Ethik besonders prägnant ausgedrückt. Dort erläutert Aristoteles in Bezug auf den Begriff des Überlegens (›bouleúesthai‹ – im Sinne von ›praktisch Bedenken‹), dass Gegenstand dieser Geistestätigkeit nicht das Ziel, sondern das Mittel sei, um ein Ziel zu erreichen. Dabei gibt er einem Begriff der ›analysis‹ Kontur als einer Tätigkeit, die auf einen Endpunkt führt, welcher wiederum auch einen Ausgangspunkt bietet. Aristoteles schreibt:

»[...] nachdem man sich ein Ziel gestellt hat, sieht man sich um, wie und durch welche Mittel [das Ziel] zu erreichen ist; wenn es durch verschiedene Mittel möglich scheint, sieht man zu, durch welches es am leichtesten und besten erreicht wird; und wenn es durch eines regelrecht verwirklicht wird, fragt man wieder, wie es durch dasselbe verwirklicht wird, und wodurch wiederum jenes, bis man zu der ersten Ursache gelangt, die als letzte gefunden wird. Auf diese so beschriebene Weise verfährt man analysierend, d.h. zergliedernd, wie wenn es sich um die Konstruktion einer geometrischen Figur handelte. Doch ist nicht jedes Suchen ein Überlegen, z.B. das Suchen des Geometers nicht: dagegen ist jede Überlegung ein Suchen, und das, was bei der Zergliederung als Letztes herauskommt, ist bei der Verwirklichung durch die Handlung das Erste.«²⁵

In der Analogie zur Geometrie tritt Aristoteles aus dem Kontext der praktischen Philosophie heraus und ordnet die praktische Fragestellung in einen allgemein wissenstheoretischen Rahmen ein. Jedoch bezieht sich diese Analogie nur auf den Weg ›hin‹ zur ersten Ursache auf die Analysis. Ausgehend ›von‹ der ersten Ursache findet sich hier kein mathematisches Verfahren, sondern ein unmittelbar auf Wirklichkeit bezogenes praktisches Tun. In den Analytiken steht an dieser Stelle ebenfalls kein mathematisches, sondern ein logisches Verfahren, nämlich der ›syllogismos‹, der aus Voraussetzungen methodisch auf das schließt, was aus ihnen folgt.

24 | Anthony Lo Bello (Hg.): *The Commentary of al-Nayrizi on Books II-IV of Euclid's Elements of Geometry*, Leiden/Boston: Brill 2009, S. 22; Jürgen Schönbeck: *Euklid*, Basel: Birkhäuser 2003, S. 202. Eventuell fand diese Hinzufügung auch erst im Euklid Kommentar des Neuplatonikers Proklos Diadochos im 5. Jahrhundert n. Chr. statt. Vgl. Hans-Jürgen Engfer: *Philosophie als Analysis. Studien zur Entwicklung philosophischer Analysiskonzeptionen unter dem Einfluss mathematischer Methodenmodelle im 17. und frühen 18. Jahrhundert*, Stuttgart: Frommann-Holzbog 1982, S. 72.

25 | Aristoteles: *Nikomachische Ethik* (auf der Grundlage der Übersetzung von Eugen Rolles, hg. von Günther Bien), Hamburg: Meiner 1985, 1012b16-25.

Um zu verstehen, welche begrifflichen Überlagerungen und Verwirrungen in der Aristoteles-Rezeption entstanden sind, müssen folgende Punkte der Aristotelischen Philosophie berücksichtigt werden, die ich hier nur kurz erläutern kann:

1. *Epagogé, Induktion und Analysis*: An zwei prominenten Stellen der Aristotelischen Schriften, nämlich am Beginn der *Metaphysik* und am Ende der *Zweiten Analytik* erklärt Aristoteles, wie der Mensch zu den ersten Ursachen und Prinzipien gelangt – also zu dem, worauf auch die Analyse führt. Er beschreibt diesen Weg als einen stufenförmigen Aufbau von der Erfahrung als Verallgemeinerung von sinnlichen Wahrnehmungen über die sprachliche und begriffliche Erfassung der Erfahrung in Wissen/Wissenschaft (»epistemé«) und Kunst/Können (»techné«) bis hin zu den ersten Ursachen und Prinzipien, nach denen sich das Erfasste verhält. In welcher Beziehung steht nun dieser Weg, den Aristoteles mit dem Begriff der »epagogé« (ins Lateinische mit »Induktion« übersetzt) fasst, zu der Tätigkeit der Analysis? Man muss hier zwischen einem genealogischen und einem reflexiven Aspekt dieses Erkenntnisweges unterscheiden:²⁶ Während »epagogé« sich darauf bezieht, wie Erkenntnis der ersten Ursachen und Prinzipien überhaupt entsteht, bezeichnet »analysis« die besondere Tätigkeit der sprachlichen Reflexion, durch die innerhalb von Wissen/Wissenschaft und Kunst/Können die ersten Ursachen und Prinzipien expliziert werden. Da in der Rezeptionsgeschichte diese Differenzierung aber verwischt wurde, kam es zur Überblendung von »epagogé« und »analysis«, was letztere zu einem genuinen Erkenntnismittel aufwertete und erstere (unter dem Begriff Induktion) logifizierte.

2. *Die Rolle der ersten Ursachen und Prinzipien*: Um der Aristotelischen Konzeption in ihrer Eigenheit gerecht zu werden, müssen insbesondere die Begriffe der ersten Prinzipien und Ursachen geklärt werden. Prinzip (»arché«) und Ursache (»aitía«) werden von Aristoteles weitgehend als eine semantische Einheit behandelt (»alle Ursachen sind Prinzipien«)²⁷. Beide Begriffe beziehen sich auf das Wo-durch und das Woher in einem Sinne, der nicht mit einer modernen Vorstellung von Kausalketten identifiziert werden darf. Vielmehr bezeichnen beide Begriffe die konstitutiven Faktoren, die sowohl zur Entstehung als auch zum Verständnis einer Sache vorausgesetzt werden müssen: »Allgemeines Merkmal [...] ist, daß es ein Erstes ist, wovon her etwas ist, wird, oder erkannt wird.«²⁸ Erste Ursachen und Prinzipien lassen sich also als so etwas wie Konstituenten verstehen: Bedingungen, deren Gegeben- und Wirksamsein wir für eine Sache oder Entwicklung voraussetzen müssen und können.

26 | Vgl. zu dieser Unterscheidung Höffe, *Aristoteles*, 1996, S. 53.

27 | Aristoteles: *Metaphysik*, 1. Halbband, (Neubearb. d. Übers. v. Hermann Bonitz mit Einl. u. Komm. hg. von Horst Seidl), Hamburg: Meiner 1989, 1013a.

28 | Aristoteles, *Metaphysik*, 1989, 1013a.

3. *Synthesis und Ursachenlehre*: Aristoteles differenziert den Begriff der Ursache näher in seiner Lehre von den vier Ursachen: Stoff-, Form-, Beweg- und Zielursache. Während die Moderne nur die Bewegursache als Ursache im engeren Sinne akzeptiert, erschien es im griechischen Denken sinnvoll, ebenso Stoff, Form und das Telos eines Geschehens als Konstituenten für eine Gegebenheit gleichwertig zu behandeln. Der Begriff der Synthesis spielt im Rahmen dieser Ursachenlehre bei Aristoteles eine spezielle Rolle: Wenn Aristoteles nämlich erklärt, wie etwas aus einem Stoff zu etwas Bestimmten wird, so schlüsselt er dies so auf, dass die »Ganzheit (*hólon*), die Zusammensetzung (*synthesis*) und die Form (*eídos*)« diese Bestimmung ergeben.²⁹ Synthesis ist hier also als ein Bestimmungsaspekt im Bereich der Formung von Gegebenheiten konzipiert.

Beziehen wir diese drei Punkte auf die Rezeptionsgeschichte, so wird deutlich, welche einschneidenden konzeptionellen Veränderungen mit der Einführung von Analysis und Synthesis als Begriffspaar verbunden waren: Indem Synthesis aus dem Kontext der Ursachenlehre herausgelöst und als Komplementärbegriff zu einem Analysis-Konzept eingesetzt wurde, das seinerseits von einem sprachlogisch-reflexiven Konzept zu einem Konzept genereller Erkenntnisgewinnung ausgeweitet wurde, konnte ein Bild entstehen, dem gemäß es möglich erscheinen konnte, mit sprachlogischen Mitteln konstitutive Bestandteile zu erschließen, die in umgekehrter Richtung – auf konstruktivem Wege – sich zu bestimmten Entitäten zusammensetzen lassen. Dass in dieser logisch reduzierten Form der Synthesis die Bedingungen der Stoff-, der Beweg- und der Zielursache und auch die Bedingungen der jeweiligen Form und Ganzheit (um hier die Aristotelische Ursachensystematik zu vervollständigen) hinter das Konzept einer Zusammensetzung aus Bestandteilen zurücktrat, wird als eine der Quellen des mit dem Synthesis-Begriff verknüpften modernen Machbarkeitsglaubens angesehen werden müssen.

Anders gesagt: In der Geschichte der Rezeption wurden zwei aristotelische Begriffe, nämlich »analysis« und »syllogismos«, die beide eine Funktion bloß innerhalb des »logos« haben, mit dem Begriffspaar »epagógé« (lateinisch: Induktion) und »synthesis« überblendet (wobei dieser Begriff der »synthesis« weder als Pendant zur logischen »analysis«, noch als Pendant zur epistemologischen »epagógé« in der aristotelischen Philosophie vorkommt, vielmehr nur eines der ontologisch-epistemologischen Prinzipien innerhalb der aristotelischen Wirklichkeitskonzeption ist). Indem dabei der Begriff der Synthesis sowohl dem Begriff der logischen »analysis« als auch dem der epistemologischen »epagógé« in einem allgemeinen Sinne von Ableitung und Beweisführung als Pendant diente, entstand die Tendenz, diese beiden Aspekte, miteinander zu verschmelzen und eine logische Deduktion als gegenläufige Bewegung zur Induktion zu verstehen, die ihrerseits in

29 | Aristoteles: *Metaphysik*, 1013b. Vgl. Aristoteles: *Physik*, 1. Halbband, (Übers., mit Einl. u. Anm. hg. v. Hans Günter Zekl), Hamburg: Meiner 1987, 195a.

dieser Neuinterpretation zu einem bloß logischen Verfahren wurde. Diese Tendenz prägte sich immer da aus, wo ohnehin die (Aristoteles fremde) Annahme vorausgesetzt war, dass die Ordnung der Welt im Grunde in logisch-mathematischer Form besteht – wo also (aristotelisch gesprochen) das Abstrakte dem Konkreten vorausgesetzt wird. Während, gemäß Aristoteles, in den konkreten Wesenheiten jeweils verschiedene Prinzipien wirksam sind, die sie jeweils konstituieren und die erst gleichsam nachholend und nur unter der Bedingung vorhergegangener ›epagoge‹ durch ›analysis‹ reflexiv-logisch erschlossen werden, entsteht nun ein Bild, demgemäß die Prinzipien durch Analyse logisch-mathematischer Formen erschlossen und aus den Prinzipien durch logisch-mathematische Synthese Formen gebildet werden können. Ein Bild, dem gemäß der Mensch durch die bloße Beherrschung logisch-mathematischer Verfahren konstruktiv tätig werden kann – und zwar nicht nur innerhalb eines Bereiches logischer Abstraktion, sondern – so war man dann im Selbstbewusstsein der Renaissance bereit zu glauben und zu denken – innerhalb der als mathematisch verfasst gedachten Ordnung der Wirklichkeit selbst.

Ist es nicht mehr als naheliegend, dass dieser Konstruktionsgedanke und dieser Machbarkeitsglaube für die Neuzeit bestimmend wurden? Und dass der Begriff der Synthese, als er sich in der Chemie mit der Erfolgsgeschichte der Herstellung von Stoffen verband, zu einem Zentralbegriff dieses Denkens und Glaubens werden musste – sodass sich im Begriff der Synthese die Frage bündelte, wozu der Mensch mit seinen wissenschaftlich-technischen Verfahren in der Lage sein kann?

In der Denkfigur einer Synthese aus Einzelteilen – im Unterschied zum Verständnis einer Sache aus dessen Konstitutionsbedingungen – liegt eine Quelle eigentümlicher Verkürzungen und Ausblendungen. Das zeigt sich am deutlichsten dort, wo die Vorstellung von Synthesevorgängen explizit einem Baukastenmodell folgt (wie etwa im Lego-Baustein-Bild, das in der Frühphase der Synthetischen Biologie prominent wurde (dazu später mehr). Gemäß diesem Denkschema können aus einzelnen Bausteinen, die in Größe, Form und anderen Eigenschaften differieren, in freier Variation unterschiedliche Gebilde hergestellt werden. Mit der Zusammensetzung eines Puzzles hat der Aufbau aus Bausteinen gemeinsam, dass das Ganze aus einer Zusammenfügung bestimmbarer dinglicher Einzelteile entsteht. Doch es gibt auch einen Unterschied: Während im Fall des Puzzles bereits durch die Form der Einzelteile bestimmt ist, wie das Ganze aussehen wird, bietet ein herkömmlicher Baukasten (etwa aus Holzbausteinen) die Möglichkeit, aus demselben Bausatz ganz unterschiedliche Gebilde aufzuführen. Die Bauelemente lassen unterschiedliche Kombinationen zu, sodass aus ihnen prinzipiell unbeschränkt viele Varianten hergestellt werden können. Wird allerdings nach einem vorgegebenen Plan gebaut, dann gleicht sich der Fall dem der Puzzle-Zusammensetzung an: Der Plan definiert, was durch die Bauelemente unterdeterminiert ist; er bestimmt Position und Verbindung der Elemente zueinander. Als Unterschied zwischen den Fällen bleibt bestehen, dass beim Puzzle

bereits die Elemente durch ihre Gestalt die Bauform des Ganzen determinieren, während dies im planmäßigen Bau mit Bausteinen erst durch den Plan des Ganzen geschieht; was wiederum bedeutet, dass die Unterdeterminierung der Bauelemente in Bezug auf das Ganze Freiheiten in der Planung, mithin auch die Verwendung nach unterschiedlichen Plänen erlaubt.

Das Lego-Baustein-Bild erweist sich vor diesem Hintergrund als verführerische Metapher: Es suggeriert freie Konstruierbarkeit nach planmäßigen Entwürfen – und zugleich eine Kombinatorik nach eindeutigen Regeln. Denn die Noppen der Lego-Bausteine lassen ja keine kontinuierlich-unbestimmte Weise der Verknüpfung von Elementen zu, sondern immer nur bestimmte distinkte Kombinationen; sie funktionieren als ein digitales, nicht als ein analoges System (im Sinne der Unterscheidung von digital und analog, wie sie z.B. in Bezug auf Uhren verwendet wird und wie sie der Philosoph Nelson Goodman expliziert hat). So entsteht das Bild der Möglichkeit einer freien und dennoch Schritt für Schritt planbaren, nach eindeutigen Vorgaben realisierbaren Konstruktion.

Wie verhält sich nun die chemische Synthese zu diesen Denkfiguren? Lässt sich die Syntheseplanung mit der Anleitung vergleichen, die etwa einem Lego-Schiffsbaukasten beiliegt und die Schritt für Schritt angibt, welche Elemente wie zusammenzusetzen sind? Wie frei ist die Planung in der chemischen Synthese? Offenbar ist es der Chemie ja gelungen, nicht nur Naturstoffe zu rekonstruieren, sondern neuartige Stoffe, Kunststoffe, zu konstruieren. Was aber beschränkt die Möglichkeiten solcher Synthese? Warum kann nicht nach Belieben konstruiert werden?

8.6 GRENZEN DER SYNTHESE IN DER CHEMISCHEN PRAXIS

Grundsätzlich lassen sich nur chemisch existenzfähige Verbindungen synthetisieren und in ausreichenden Mengen unter definierten Bedingungen isolieren. Deshalb ist eine beliebige Synthese nach Strategien des künstlichen/künstlerischen Designs nicht möglich. Eine eindeutige Korrelation oder Vorhersage zwischen molekularer Struktur und der Funktion einer chemischen Verbindung oder deren Eigenschaften ist, wenn überhaupt, nicht leicht möglich. Diese Tatsache verschärft sich ganz besonders zum Beispiel bei der Frage, wie synthetische Verbindungen mit biologischen Strukturen wechselwirken (Wirkstoffforschung).

Bei einer Synthese sind annähernd vollständige (quantitative) Umsätze von Edukten zu Produkten möglich, jedoch nicht die Regel. Unter bestimmten Bedingungen laufen meist auch Nebenreaktionen ab. Das heißt klar: die geplante Trajektorie von Edukt(en) zu Produkt(en) besteht dann zwar, aber unter den gewählten Bedingungen neben ihr auch weitere. Präzise Rückschlüsse bei fehlender Produktbildung werden je nach Problem schnell schwierig und erfordern moderne, teils aufwendige Analytik – beispielsweise auch unter Zuhilfenahme von Modellverbindungen. Die Skalierung von kleinen Reaktionsansätzen (mit

Mengen, die für analytische Zwecke nützlich sind) hin zu großen (präparativen) Ansätzen ist nicht leicht zu bewerkstelligen. Ein und derselbe Syntheseprozess ist auch meist nicht hundertprozentig reproduzierbar, das heißt in Sachen Umsatz, Ausbeute, eventuell Stereoselektivität, nicht stets identisch.

Chemische Verbindungen sind überhaupt nur realisierbar innerhalb einer bestimmten Energielandschaft. Das Verständnis des Designs in der Synthese oder der planvollen Schöpfung jeder beliebigen Verbindung ist somit obsolet und Synthese-Chemiker sind höchstens die Entdecker chemischer Welten³⁰ und angewiesen auf die Qualität der Analytik zur jeweiligen Zeit.

8.7 NEUE ERWARTUNGEN FÜR DIE MÖGLICHKEITEN VON SYNTHESE: DER EINSATZ DER MOLEKULARBIOLOGIE³¹

In einem der Grundlagentexte der modernen Genetik, in Erwin Schrödingers Schrift *Was ist Leben?* von 1944, heißt es: »Die Chromosomstrukturen [...] sind zugleich Gesetzbuch und ausübende Gewalt, Plan des Architekten und Handwerker des Baumeisters.«³²

Die Möglichkeit, Text und Handlungsmacht zusammenzudenken, ist in unserem Zeitalter der Computertechnik und der programmierten Steuerungsmechanismen so selbstverständlich geworden, dass es gar nicht mehr leicht ist, die darin unreflektiert verwobenen Metaphern voneinander zu lösen (auch eine Form der Analyse).

Wie sich Text und Exekutive zusammendenken lassen, wird verständlicher, wenn man an technische Apparaturen denkt, die Zeichenkomplexe in physische Signale verwandeln und rückverwandeln. Betrachtet man diese Maschinen für sich, sieht es sehr wohl so aus, als könnte ein Text (z.B. ein Programm) einen Prozess, auch einen Produktionsprozess steuern. Was in dieser Verwendung der Grundform des Computers als allgemeine Idee allerdings herausgekürzt wird, ist die schlichte Tatsache, dass jeder Computer, jede nachrichtenverarbeitende Apparatur, so eingerichtet ist, dass es bestimmte Zeichen in genau definierter Weise prozessiert, dass also die Letztinstanz der Exekutive nicht beim Text liegt, sondern bei denen, die den Automaten einrichten und einstellen.

30 | Vgl. Jansen, Schön, »Design« in der chemischen Synthese – eine Fiktion?, in diesem Band Kapitel 7.

31 | Eine frühere Version des folgenden Textabschnittes findet sich in: Werner Kogge: Spurenlesen als epistemologischer Grundbegriff: Das Beispiel der Molekularbiologie, in: Werner Kogge, Sybille Krämer, Gernot Grube (Hg.): *Spur. Spurenlesen als Orientierungstechnik und Wissenskunst*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 2007, 182-221.

32 | Erwin Schrödinger: *Was ist Leben? Die lebende Zelle mit den Augen des Physikers betrachtet* (1944), München: Piper 1987, S. 57.

Gestützt wurde diese verkürzte Konzeption vermutlich auch dadurch, dass die Auffassung des Organismus als eines Automaten – von Descartes und La Mettrie bis von Neumann – über eine Jahrhunderte alte Tradition verfügte. Ein Automat, der einen Text enthält und durch diesen Text gesteuert wird, konnte daher eine von Grund auf plausible Vorstellung sein. So genügte es zu vernachlässigen, dass die DNA ihre Funktion nur in einer vollständig eingerichteten Zelle zu erfüllen vermag, um sie zu einem – qua Text unbewegten, qua Transkriptions- und Translationsmechanismus bewegenden – ursprünglichen und ursächlichen Akteur im Zellgeschehen zu machen.

Die Macht dieser historisch tief gegründeten Evidenzen lässt erst verständlich werden, warum eine Verschmelzung gleich zweier urmetaphysischer Denkfiguren den Kern einer neuen Wissenschaft bilden konnte. Als nämlich ein knappes Jahrzehnt nach dem Erscheinen von Schrödingers Werk die Struktur der DNA als eine stabile Anordnung diskreter Elemente in Form einer Doppelhelix beschrieben wurde, war das Feld aufs Beste bereitet, diese Molekülstruktur in der Doppelrolle eines Informationsspeichers und seiner eigenen Exekutionsinstanz aufzufassen. So war es für Francis Crick, dem Mitentdecker der Doppelhelix, ausgemacht, dass die auf ihr angeordneten Gene sowohl den Text der Erbinformation vollständig enthalten, als auch – kausal und aktiv – Entwicklung und Funktionieren des Organismus determinieren, was er in seinem berühmten »zentralen molekularbiologischen Dogma« zum Ausdruck brachte, das besagt, dass die Information von der DNA auf die Proteine übertragen werden kann, aber nicht in die Gegenrichtung, und dass diese Übertragung als »präzise Bestimmung der Sequenz« zu verstehen sei.³³ Obwohl in der Folge die entscheidenden Fortschritte klassischer biochemischer Arbeit erzielt wurden, blieb das von Schrödinger formulierte Amalgam aus Zeichensystem, Akteurialität und Automatenhaftigkeit bestehen. So formulieren Jacob und Monod, die Entwickler des in den 1960er Jahren führenden Operon-Modells der Molekularbiologie: »Wie die Entdeckung der Regulator- und Operatorgene [...] zeigt, enthält das Genom nicht nur eine Reihe von Bauplänen, sondern ein koordiniertes Programm der Proteinsynthese sowie die Mittel zur Kontrolle ihrer Ausführung.«³⁴

Noch zu Beginn der 1990er Jahre schrieb Walter Gilbert, einer der Initiatoren der Genom-Sequenzierung: »Drei Milliarden Basen einer DNA-Sequenz passen auf eine einzige Compact-Disc (CD), und man wird eine CD aus der Tasche ziehen und sagen können: ›hier ist ein Mensch; ich bin es!«³⁵ Und er verknüpfte

33 | Francis Crick: On Protein Synthesis, in: *Symposium for the Society of Experimental Biology* 12, 1958, 138-163, S. 153. (Eigene Übersetzung, Hervorhebung im Original).

34 | François Jacob, Jacques Monod: Genetic Regulatory Mechanisms in the Synthesis of Proteins, in: *Journal of Molecular Biology*, 3, 1961, 318-356 zitiert nach: Evelyn Fox Keller: *Das Jahrhundert des Gens*, Frankfurt a.M.: Campus 2001, S. 107.

35 | Walter Gilbert: A Vision of the Grail, in: Daniel J. Kevles, L. Hood: *The Code of Codes. Scientific and Social Issues in the Human Genome Project*, Cambridge/London: Harvard

diese, in ihren Grundmotiven auf Norbert Wiener zurückgehende Vision,³⁶ mit einer bemerkenswerten Konklusion: »Zu wissen, dass wir von einer endlichen Informationssammlung determiniert sind, die erkennbar ist, wird unsere Sicht von uns selbst verändern. Eine intellektuelle Grenze wurde geschlossen und damit müssen wir fertig werden.«³⁷ Vor diesem Hintergrund kann es dann nicht verwundern, dass das vorläufig abgeschlossene Humangenomprojekt schließlich als »Entschlüsselung des Erbes der Menschheit«, als Blick in »Gottes genetische Karten« gefeiert wurde.³⁸

Die hier angesprochenen Motive sind in der Geschichte der Molekularbiologie so omnipräsent, dass das Netz der Verweise sich beliebig enger knüpfen ließe. Die Vorstellung, mit der DNA-Struktur über eine Ordnung zu verfügen, die sich lesen und deren Bedeutung sich durch Berechnung entschlüsseln ließe, war so verführerisch, weil in ihr das Versprechen lag, über ein Wissensgebiet in vollständiger Transparenz und Endgültigkeit verfügen zu können.³⁹ Es sah eine Zeit lang so aus, als wäre die ganze Komplexität und Dynamik des Organischen auf eine textuelle Struktur zurückzuführen. Diese textuelle Struktur, die auf der einen Seite die Lebensprozesse determiniert, wäre auf der anderen Seite der Wissenschaft in einem skripturalen Setting gegeben gewesen: Die Buchstabenfolge der DNA lässt sich in übersichtlichen Tableaus aufschreiben, sie lässt sich in ihren bedeutungsvollen Mustern kartieren, graphisch darstellen und mit Mitteln der Datenverarbeitung prozessieren. Hätte die DNA tatsächlich, wie angenommen worden war, die Lebensvorgänge vollständig in ihrer Struktur repräsentiert, dann wäre mit dem Abschluss der Sequenzierungen die Molekularbiologie als Wissenschaft an ihr Ende gekommen; sie hätte sich in eine Technik der Lektüre, Redaktion und Edition verwandelt.

Kritiker des Informationsdiskurses in der Molekularbiologie hatten seit langem schon zu bedenken gegeben, dass der isolierte Blick auf die DNA als ein sich

University Press 1992, 83-98, S. 96. Übersetzung nach Keller, *Das Jahrhundert des Gens*, 2001, S. 17.

36 | Bereits 1950 hatte Norbert Wiener, Mathematiker, Begründer der Kybernetik und Protagonist in den Frühzeiten moderner Genetik, die Ansicht geäußert, dass es kein prinzipielles, sondern lediglich ein technisches Problem sei, einen Organismus gleich einem Telegramm von einem Ort zum anderen zu übertragen: »[D]ie Tatsache, dass wir das Schema eines Menschen nicht von einem Ort zum anderen telegraphieren können, liegt wahrscheinlich an technischen Schwierigkeiten und insbesondere an der Schwierigkeit, einen Organismus während einer solchen umfassenden Rekonstruktion am Leben zu erhalten. Sie liegt nicht an der Unmöglichkeit der Idee.« Norbert Wiener: *Mensch und Maschmaschine: Kybernetik und Gesellschaft*, Frankfurt a.M.: Metzner 1958, S. 101.

37 | Gilbert, *A Vision of the Grail*, 1992, S. 96. Übersetzung nach Lily E. Kay: *Das Buch des Lebens. Wer schrieb den genetischen Code*, München: Hanser 2000, S. 17.

38 | Vgl. Ernst Peter Fischer: *Das Genom*, Frankfurt a.M.: Fischer 2002, S. 30ff.

39 | Kay, *Das Buch des Lebens*, 2000, S. 57.

selbsttätig ausführender Text von Instruktionen sowohl philosophisch unhaltbar als auch sachlich unangemessen ist. Den philosophisch entscheidenden Punkt hat insbesondere Susan Oyama in ihrem einflussreichen Buch *The Ontogeny of Information* von 1985 herausgearbeitet. Oyama zielt darin in erster Linie auf das Konzept der Information als einer Entität, die den Lebensprozessen präexistiert und sie steuert. Sie erkennt darin die von Ryle als »Geist in der Maschine«⁴⁰ beschriebene metaphysische Konstruktion einer mentalen Entität, die zugleich als kausaler Ursprung der körperlichen Aktivitäten fungiert; eine Konstruktion, die sie für ungeeignet hält, biologische Prozesse zu erfassen:

»Wo auch immer die kognitiv-kausale Funktion untergebracht ist, ob im Geist Gottes, in Drieschianischen Lebensenergien oder in kleinen Computerprogrammen in der Zelle, solange sie als präexistierend und separiert von ihrer materiellen Realisation angesehen wird, kann sie Lebensprozesse nicht beleuchten.«⁴¹

Auch auf der phänomenalen Ebene wurde die Verklärung der DNA zu einem ursprünglichen Bewegter scharf angegriffen. So schrieb etwa der Genetiker Richard Lewontin 1992 in seinem Artikel *The Dream of the Human Genome*:

»Die DNA ist ein totes Molekül und zählt zu den reaktionslosesten, chemisch trägsten Molekülen der Welt [...] Die DNA ist nicht nur unfähig, Kopien ihrer selbst herzustellen [...] sie ist auch nicht in der Lage, irgendetwas anderes zu »machen«. Die lineare Nukleotidsequenz in der DNA wird von der Zellmaschinerie benutzt, um zu bestimmen, welche Aminosäuresequenz in ein Protein eingebaut werden soll, und um festzulegen, wann und wo das Protein erzeugt werden soll.«⁴²

Die Verlagerung der Akteurialität von der DNA auf die Zellmaschinerie nimmt der DNA den exorbitanten Status, den ihr die Protagonisten der Molekularbiologie zugeschrieben hatten. Die gesamte Zelle und das Zytoplasma, das – wie Evelyn Fox Keller anmerkt – durch die »kraftvollen Metaphern »Information« und »Programm« von der »räumliche(n) Karte« der Wissenschaft verdrängt worden war,⁴³ erscheint im Zeitalter von Epigenetik und Postgenomics wieder auf der Bildfläche.

40 | Susan Oyama: *The Ontogeny of Information. Developmental Systems and Evolution*, Durham: Duke University Press 2000, S. 14 (eigene Übersetzung).

41 | Oyama, *The Ontogeny of Information*, 2000, S. 15 (eigene Übersetzung).

42 | Richard Lewontin: *It Ain't Necessarily So: The Dream of the Human Genome and Other Illusions*, New York: New York Review Books 2001 zitiert nach Evelyn Fox Keller: *Metaphern der Biologie im 20. Jahrhundert*, München: Kunstmann 1998, S. 41.

43 | Keller, *Metaphern der Biologie im 20. Jahrhundert*, 1998, S. 43.

8.8 VOM SUBSTITUT ZUM NUTZNIESSER DER NATUR: DIE BIOLOGISIERUNG DER CHEMIE

In Bezug auf die Vorhersage von enzymatischen Funktionalitäten und Biosynthesewegen ausgehend von DNA-Sequenzen lässt sich sagen, dass grundsätzlich Annotationen von Nukleotid-Sequenzen, also die Zuweisung einer bestimmten Protein-Funktion zu einem DNA-Abschnitt, bei genügend hoher Homologie beziehungsweise Identität der abgeleiteten Aminosäuresequenzen zwischen bekannten und noch nicht charakterisierten Proteinen häufig ein gutes Mittel zur Vorhersage einer Funktionalität bietet. Eine sichere Vorhersage der für eine ganz bestimmte Funktion notwendigen Veränderungen innerhalb der Gensequenz oder der durch sie codierten Aminosäuresequenz im Sinne einer gezielten Veränderung ist nicht leicht möglich. Oft wird für Änderungen der Funktion eines Proteins ein experimentelles Design benutzt, das randomisierte Schritte enthält und auch die Kenntnis der dreidimensionalen Struktur eines Proteins ist dafür oft von enormer Bedeutung. Das heißt, dass eine Vorhersage der vollständigen Funktion von neuen und noch nicht experimentell untersuchten Enzymen anhand von definierter Information etwa einer Nukleotid- oder Aminosäuresequenz allein nicht hinreichend möglich ist.

Um Biosynthesewege zu verstehen, ist es nützlich, einige zugrunde liegende Prinzipien zu verdeutlichen. Die entscheidenden Biomoleküle für die Biosynthese sind Enzyme, die eine Polypeptid-Grundstruktur besitzen und Reaktionen in einzigartiger Weise katalysieren. Enzym-Artefakte, die mit natürlich vorkommenden Enzymen gleichgesetzt werden können, sind nach momentanem Stand nicht »de novo« zu designen, da sich die Komplexität des Aufbaus in Kombination mit der Funktionsweise eines Enzyms zu weiten Teilen einer Planung entzieht. Das ist insbesondere der Fall, wenn es keine Vorlagen aus der Natur gibt. Es gibt jedoch einige beeindruckende Arbeiten in dieser Richtung und Kiss et al. schreiben im Schlusswort ihres Aufsatzes über computergestütztes Enzym-Design, dass Lösungen zur Herstellung von artifiziellen Enzymen »in Sicht« sind.⁴⁴ Dieser Aussage stehen die bisherigen Errungenschaften auf diesem Gebiet entgegen. Die generelle Frage nach dem sinnvollen Gebrauch des Begriffs »Design« in der chemischen Synthese, ob von kleinen organischen Molekülen wie Naturstoffen oder von Bio-Makromolekülen wie Enzymen, ist berechtigt.

Die Aufbruchsstimmung zur Vollendung der Synthesekenntnisse und dem vollständigen Verständnis von Enzymen hat sich seit Walden gehalten und wurde durch molekularbiologische und strukturchemische Einblicke weiter genährt. Die Frage, ob die Möglichkeit einer »de novo« Synthese von Enzymen (quasi als Krönung der organischen Synthese) realisiert werden kann, ist letztlich ganz offen. Dieser Gedanke ist von Bedeutung für Felder wie das der Synthetischen Bio-

44 | Vgl. Gert Kiss, N. Çelebi-Ölçüm, R. Moretti, et al.: Computational Enzyme Design, in: *Angewandte Chemie*, (Int. Edition), 52, 2013, 5700-5725.

logie, die generell auf einem technischen Verständnis biologischer oder biomolekularer Prinzipien beruhen.⁴⁵

Biotransformationen sind grundsätzlich aus zwei Gründen für Synthesechemiker von Bedeutung: 1.) wegen der Fähigkeit von Mikroorganismen, wie zum Beispiel Bakterien, große Mengen an Biomasse und eine Fülle verschiedener Enzyme in kurzer Zeit zu produzieren (zu bio-synthetisieren), sowie 2.) der Nutzung der Chemo-, Regio- und Enantioselektivität von Enzymen. Außerdem kann die Biologie in Fällen nützlich sein, für die es keine klassische synthetische Lösung gibt, oder sie vermag eine Erweiterung des synthetischen Repertoires der Chemiker zu bieten.⁴⁶ Die Biosynthese und die klassische chemische Synthese ergänzen sich als analytische und synthetische Disziplinen.

Enzymatische Synthesen und Biosynthese-Schritte werden erst in jüngerer Zeit häufiger genutzt. Besonders wichtige Hürden, die in der Etablierung solcher Verfahren genommen werden müssen, sind das Umrüsten oder Neubauen von Prozessanlagen samt kostenaufwendiger Prozessoptimierungen, da klassisch-chemische und biochemische Prozesse nicht immer leicht zu kombinieren sind. Wichtigste Hilfestellung aus den Geisteswissenschaften könnten hier Denkfiguren sein, die weg vom mechanizistischen Denken führen und wertvoller und praktikabler sind für die Diskussion von Reaktionen und Synthesen als die bisherigen Metaphern.⁴⁷

Der Begriff Biosynthese steht für die Synthese von Metaboliten und Naturstoffen in biologischen Systemen, ausgehend von natürlich vorkommenden Substanzen. Im weiter gefassten Sinne fallen darunter auch Synthesen, die mit Hilfe von biologischen Strukturen, wie Enzymen, als Biokatalysatoren durchgeführt werden. Synthesen in biologischen Systemen unterscheiden sich rein von der Chemie her nicht von klassischen Synthesen. Anders formuliert: Ein Lebewesen oder ein Chemiker sind in der Lage, eine große Anzahl chemisch identischer existenzfähiger Moleküle zu synthetisieren. Die Natur erschafft das ihr Notwendige im Rahmen der fortwährenden Evolution, so wie der Synthesechemiker zu weiten Teilen nach seiner Planung und Intuition. Allerdings unterscheidet sich die Art und Weise, »wie« künstliche organische Synthesen und Biosynthesen realisiert werden deutlich voneinander. Das »wie« bezüglich der Synthese rückt hier ganz besonders in den Mittelpunkt.

Biosynthesereaktionen umfassen die Synthesen von vielzähligen Verbindungen, die für Lebewesen essenziell sind. Sie sind meist aus Enzym-Kaskadenreak-

45 | Vgl. Werner Kogge, M. Richter: Synthetic biology and its alternatives. Descartes, Kant and the idea of engineering biological machines, in: *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences* 44(2), 2013, 181-189.

46 | James E. Lerescheu, H.-P. Meyer: Chemocatalysis and Biocatalysis (Biotransformation): Some Thoughts of a Chemist and of a Biotechnologist, in: *Organic Process Research & Development*, 10, 2006, 572-580.

47 | Vgl. Kogge, Richter, Synthetic biology and its alternatives, 2013.

tionen aufgebaut, die von Sequenzen aus einzelnen Enzymen, aus Enzymkomplexen oder Mega-Synthasen aufgebaut sind. Naturgemäß unterscheiden sie sich schon allein durch den »apparativen Aufbau« in einer Zelle. Biosynthesewege sind in lebenden Systemen evolvierbar. Interessant ist die Tatsache, dass bei manchen Organismen die Zahl der Naturstoffe größer ist als die der Genprodukte. Somit müssen Enzyme und Biosynthesewege für die Erzeugung molekularer Diversität genutzt werden. Für die Erzeugung bioaktiver Stoffe haben Richard Firn und Jones ein eindruckliches Modell aufgestellt.⁴⁸ Es baut auf der Poly-Reaktivität von Enzymen und der Annahme, dass Bioaktivität von Naturstoffen selten ist. Im sogenannten Matrix-Modell können alle Enzyme der metabolischen Matrix mehrere Syntheseschritte ausführen und somit kann eine hohe Zahl an Verbindungen »in vivo« synthetisiert und hinsichtlich ihrer Bioaktivität getestet werden. Dieses Screening unterscheidet sich als dynamischer Prozess grundsätzlich von zum Beispiel kombinatorischen Ansätzen der organischen Wirkstoff-Synthese. Ein Vergleich von Stoffgruppen mit biologischer Aktivität, bei denen einerseits Naturstoffe sowie auch Synthetika nach molekularem Aufbau und nach chemischen Gruppen analysiert wurden, lieferte erstaunliche Aufschlüsse. Nicht nur im atomaren Aufbau unterscheiden sich diese Substanzkollektionen bioaktiver Stoffe deutlich, sondern auch im Vorkommen und in der Zusammensetzung hinsichtlich chemischer Funktionalitäten. Außerdem kommen in den Arten, aus denen die Naturstoffe isoliert wurden, unterschiedlich viele Naturstoffe aus bestimmten chemischen Stoffgruppen vor.⁴⁹ Demnach decken bioaktive Naturstoffe einen besonderen Bereich der Chemie ab.

Es gibt in der Natur viele Biosynthesestufen und Wege, die sich als Variation von bestimmten Themen verstehen lassen. Grundsätzlich gilt für die »de novo« Synthese von Biosynthesewegen das Gleiche, was wir in Hinblick auf Enzyme gesagt haben.

8.9 EIN WORT ZUM SCHLUSS AUS SICHT DER (BIO)CHEMIE

Die chemische Synthese ist für das Leben im modernen Alltag unersetzlich und wesentlich für die technisierte Gesellschaft. Eine besondere Gefahr besteht im Glauben und in der Erwartung, alle lebenswichtigen Dinge beliebig synthetisieren zu können.

Die Erwartungen, die an die Synthese gerichtet werden, werden größer. Die Bedeutung von Synthese für Bereiche wie Gesundheit und Ernährung (Synthese

48 | Richard D. Firnu, C.G. Jones: Natural products – a simple model to explain chemical diversity, in: *Natural Product Reports*, 20, 2003, 382-391.

49 | Thomas Henkel, R.M. Brunne, H. Müller et al.: Statistical Investigation into the Structural Complementarity of Natural Products and Synthetic Compounds, in: *Angewandte Chemie*, (Int. Edition), 38, 1999, 643-647.

von Wirkstoffen, Implantaten, Zahnersatzmaterialien, Kosmetika, Lebensmitteln etc.) zeigt dies deutlich. Es entwickelt sich ein ökonomischer Markt, was wiederum dazu führt, dass hinsichtlich der wissenschaftlichen Forschung und Entwicklung von Synthesestrategien ein Spannungsverhältnis zwischen Unabhängigkeit der Forschung einerseits und der marktorientierten Konzeption von Forschung und Entwicklung im Korsett finanzieller Abhängigkeit andererseits entsteht. Aus dieser Marktorientierung resultiert eine entsprechende Kommunikation und Vermittlung nach außen, mit Konzepten, die Zeitgeist-Trends folgen, ohne über ein ausreichendes Regulativ durch einen radikal fragenden wissenschaftlichen Diskurs zu verfügen. Wünschenswert wäre an dieser Stelle eine konzeptuelle Reflexion unter Einbezug unterschiedlicher wissenschaftlicher Disziplinen aus Natur- und Geisteswissenschaften, die mehr Streitbarkeit innerhalb forschersicher Planung und Ausrichtung zulässt.⁵⁰ Die Wahrnehmung solcher Stimmen ermöglicht Interdisziplinarität und damit eine Bestimmung der Bedeutung von ›Synthesis‹ in einem umfänglicheren und angemesseneren Sinne. Kurzschlüssige Folgerungen, die zu schnell von besonderen Phänomenen zu allgemeinen Konzepten führen, ließen sich dadurch wahrscheinlich besser vermeiden. Gerade für solche Fälle, in denen die besonderen Phänomene noch nicht ausreichend verstanden sind, hat dies große Bedeutung.

Wir plädieren auch für mehr Beharrlichkeit hinsichtlich der gedanklichen Durchdringung von Forschungskonzepten, sodass ein konzeptuelles Verständnis des bereits Erreichten einer Orientierung an möglicherweise Erreichbarem nicht nachgeordnet wird – ohne dass dabei der Mut fehlt, Neuland zu erschließen.

Ein weiterer Aspekt ist hier zu bedenken: Das Selbstverständnis von Synthese und Biosynthese im Rahmen eines technisierten Denkens läuft Gefahr, dass die klassische chemische Synthese und die Biosynthese nicht als komplementäre Disziplinen angesehen werden und damit in ihrer jeweiligen Fülle nicht ausgeschöpft werden können. Damit werden die Möglichkeiten der Synthese deutlich eingeschränkt. Innerhalb der organischen Chemie stellt das Vorantreiben dieser Ergänzung und die Implementierung von biologisch orientierten Syntheseprozessen im Rahmen von nachhaltigen Ansätzen und naturnaher Lösungen eine aussichtsreiche Strategie dar.

Die Belastung der organischen Synthese und Biosynthese mit überzogenen Erwartungen birgt die Gefahr, das Konzept der Synthese sowohl aus den theoretischen als auch aus den praktischen Zusammenhängen zu lösen, in denen es nur situiert und wirksam erscheinen kann. Die Chemie und Biowissenschaften haben mit der Synthetischen Biologie ein Feld eröffnet, das zwar so weit trägt, wie die Nutzung von schon vorhandenen, modifizierten, natürlichen Funktionssys-

50 | Vgl. Werner Kogge, B. Griesbeck: C-ELSI. Für eine neue Rolle des Faktors Kultur in der Wissenschafts- und Technikgestaltung, in: Birgit Griesbeck: *Fremde Wissenschaft? Konzepte geistes- und kulturwissenschaftlicher Wissenschaftsforschung*, Berlin: kadmos 2013.

temen reicht, das aber als ein allgemeiner Ansatz zur ›de novo‹ Herstellung von Enzymen und Biosynthesewegen oder gar Lebewesen kritisch betrachtet werden muss. Wissenschaftler, die noch nicht verstandene Themen und Prinzipien planmäßig im Sinne eines beliebigen Designs zur Synthese nutzen wollen, werden im Bereich der Synthesis somit mehr der Analytik dienen als der Synthese, die sie beabsichtigen.⁵¹

51 | Vgl. Kogge, Richter, *Synthetic biology and its alternatives*, 2013.

9. Keine Synthese, kein Bauplan

Leben und (bio)technische Objekte in Simondons
irreduktionistischer Philosophie der Individuation
als Operation der Information

Michael Cuntz

Gilbert Simondon hat in seinen Schriften sowohl das Verhältnis zwischen lebendigen Organismen und technischen Objekten, insbesondere von Maschinen, als auch die Grenzen und Übergänge zwischen anorganischer Materie und dem Lebendigen intensiv ausgelotet. Dabei kommt jeweils dem Begriff der Information eine zentrale Rolle zu. Sein Denken, das mit dem Label Technikphilosophie nur äußerst unzureichend erfasst werden kann, erscheint daher in besonderer Weise geeignet, um sich der Synthetischen Biologie und dem ihr zugrunde liegenden Verständnis von Synthesis, Information, Leben und Maschine zu nähern.¹

Dies umso mehr, als für Simondon das Zeitalter der Informationstechnologie, das das Zeitalter der thermodynamischen Maschinen ablöst, die beständige Mi-

1 | Für entsprechende Vorschläge vgl. Bernadette Bensaude-Vincent, Xavier Guichet: Nano-Machine: One Word for Three Paradigms, in: *Techné: Research in Philosophy and Technology*, 11(1), 2007, 71-89, Xavier Guichet: Nature et artifice dans les nanotechnologies, in: Bernadette Bensaude-Vincent, Raphaël Larrère, Vanessa Nurock (Hg.): *Bionano-éthique. Perspectives critiques sur les bionanotechnologies*, Paris: Vuibert 2008, 19-32, Adrian Mackenzie: Technical objects in the biological century, in: *Zeitschrift für Medien- und Kulturforschung*, 1, 2012, 151-168. In allen Texten zentral ist Simondons Konzept der Konkretisation. Bensaude-Vincent und Guichet sowie Mackenzie spielen darüber hinaus den Begriff des Milieus ein. Beide beziehen sich zudem auch auf das Simondonsche Verständnis von Erfindung als intuitiver Antizipation der Funktionsweise eines technischen Individuums, die gerade nicht identisch mit planmäßigem ›engineering‹ ist, vgl. vor allem Mackenzie, Technical objects in the biological century, 2012, S. 166ff.

nimierung der Dimensionen der technischen Objekte ermöglicht und erfordert, was zunächst wie eine Antizipation der Nanotechnologie anmutet.²

Doch bereits die enge Verbindung, die der vermeintlich geläufige Informationsbegriff bei Simondon nicht nur mit dem Begriff der ›Form‹, sondern auch mit den weniger orthodoxen Begriffen der ›Individuation‹ und, mit dieser verbunden, der ›Transduktion‹ sowie, für die technischen Objekte, der ›Konkretisation‹ eingeht, deutet darauf hin, dass sich die Einschätzung, die sich auf dieser Grundlage von der Synthetischen Biologie gewinnen lässt, deutlich von den Selbstbeschreibungen und Zielsetzungen des Mainstreams der Vertreter dieser ›Technowissenschaft‹ abhebt.³

In kritischer Auseinandersetzung mit nachrichtentechnischer Informationstheorie und Kybernetik hat Simondon seine Theorie der Information zu einer Zeit entwickelt, in der die Grundlagen der Computertechnologie und somit des Paradigmas des Digitalen erst im Entstehen begriffen waren. Jenes Paradigma, auf dem die Evidenz einer wechselseitigen Übersetzbarkeit des genetischen Codes in den Computercode beruht, die eine zentrale Arbeitsgrundlage der Synthetischen Biologie bildet.

Diese Unzeitgemäßheit Simondon stellt sich in dem Moment als ein Vorteil heraus, in dem die Alleingültigkeit des Paradigmas von Code und Digitalität zur Erklärung der Prozesse des Lebens hinterfragt wird. Was, wenn diese nicht auf der verlässlichen Ausführung eines beherrschbaren Sets von Befehlen beruhen? Simondon konzeptualisiert diese nicht als Abläufe, in denen die Information und somit der Ablaufplan in einem dem Prozess präexistierenden Element, der Form, voll enthalten wäre, die so das Geschehen steuert und deren Manipulation folglich eine kontrollierte Umlenkung dieses Geschehens erlauben würde. Vielmehr denkt er diese Abläufe als Operationen, in denen durch ein dynamisches Regime, in dem energetische (und strukturelle) Potenziale aktualisiert werden, sich Form und Materie, in-formierte Materie erst herausbilden, bzw. für einander Form und Materie werden können. Form wie Stoff sind aktiv in diesen Prozess involviert. Solche Prozesse nennt Simondon ›Transduktionen‹. Information ist darin des-

2 | »Dagegen neigt der Informationstechniker dazu, nach den kleinstmöglichen Dimensionen zu suchen, die noch mit den thermodynamischen Restanforderungen vereinbar sind, wie sie für die von ihm verwendeten Apparate fortbestehen. Denn je geringer die Verzögerung ist, mit der eine Information eintrifft, desto nützlicher ist sie für einen Regelungsvorgang. Das Anwachsen der Dimensionen der Maschinen oder Vorrichtungen für die Übertragung der Information lässt die Trägheit und die Zeit für die Durchleitung der Information anwachsen.« Gilbert Simondon: *Die Existenzweise technischer Objekte*, Zürich: diaphanes 2012, S. 122.

3 | Zur Differenzierung zwischen *technosciences* im Sinn Bruno Latours oder Isabelle Stengers und DER Technowissenschaft vgl. Bernadette Bensaude-Vincent: *Les vertiges de la techno-science. Façonner le monde atome par atome*, Paris: Editions de la découverte 2009, S. 19-81.

wegen verkörpert und kann nur als verkörperte existieren, weil die Materie selbst formative Kräfte enthält, die an der Formbildung mitwirken, die Form sich also weder vom Stoff abstrahieren lässt noch Information auf der Übersetzung eines präetablierten Codes beruht, der realisiert wird.⁴

Folgt man diesen Hypothesen, so hätte dies Konsequenzen für die Konstruktion von biotechnischen Entitäten und möglicherweise auch für deren Gebrauch.

9.1 TRADITIONEN DES HYLEMORPHISMUS

Obwohl Simondon vor dem Zeitalter des Digitalen geschrieben hat, hat er sich ausführlich mit Denkstrukturen auseinandergesetzt, die auf der von ihm infrage gestellten Form/Stoff-Dichotomie beruhen und in der Genealogie des Informationsbegriffs des Digitalen und seiner Anwendung auf das Leben äußerst einflussreich waren. Dass Leben als Phänomen der Information im Sinn der Kommunikation mit präetablierten Codes aufgefasst wird, gilt bereits, bevor es im digitalen Zeitalter zur Ermöglichung von Synthetischer Biologie als Verzahnung zwischen Software und Wetware, Informatik und Biologie kommt.

Unmittelbar evident ist, dass die Dominanz des dichotomischen Informationsparadigmas aus den engen Austauschbeziehungen resultiert, die zwischen Kybernetik und der entstehenden Molekularbiologie bestanden haben.⁵ So wie für die Kybernetik Information die Grundlage von Steuerungsprozessen bildet, ist es im zentralen Dogma des Neodarwinismus, das weiterhin die Grundlage für die Ziele der Synthetischen Biologie darstellt, die DNA, die einen Code bereitstellt. Dieser gibt die Befehle zur Ausführung eines Programms, wobei die Befehlsketten ausschließlich in eine Richtung gehen. An diesem Prinzip ändert sich auch dann (erst recht) nichts, wenn der Bau eines synthetisierten lebendigen Organismus als ›Projekt‹ konzipiert wird, das nach den Vorstellungen seines Designers ablaufen soll, der nicht nur ›Naturgesetze entdeckt‹, sondern seine Gesetze vorschreibt⁶ – und es ist auch wenig erstaunlich, das ›Schalter‹ eines der beliebtesten

4 | Vgl. Gilbert Simondon: *L'individu et sa genèse physico-biologique. L'individu à la lumière des notions de forme et d'information*, Paris: P.U.F 1964, S. 39-50.

5 | Vgl. Isabelle Stengers: *La vie et l'artifice: visages de l'émergence* (1997), in: Dies.: *Cosmopolitiques II*, Paris: La Découverte 2003, 191-284, S. 210; Eugene Thacker: *Biomedica*, in: William J.T. Mitchell, M.B. Hansen (Hg.): *Critical Terms for Media Studies*, Chicago/London: The University of Chicago Press 2010, 117-130, S. 120; Bensaude-Vincent, *Les vertiges de la techno-science*, 2009, S. 90ff.

6 | Vgl. Stengers, *La vie et l'artifice*, 2003, S. 234. Die scharfe Differenzierung zwischen Gesetz und Projekt, die sie vornimmt, übersieht diese Gemeinsamkeit, sowie den Umstand, dass in der synthetischen Biologie eine Partizipation an den Gesetzen des Lebens postuliert wird, sodass diese in den Projekten eher umgeschrieben als neu geschrieben werden sollen.

biotechnischen Konstruktionsziele der Synthetischen Biologie sind.⁷ Dies ist die erste Dimension eines Reduktionismus – die Zurückführung einer ungebrochenen und ununterbrochenen Kausalitätskette, in der die Organisation der jeweils höheren Ebene (hierarchisch wie maßstäblich) Ausführung oder ›Expression‹ des Codes der jeweils niedrigeren Ebene ist.⁸ Diese geht in der Synthetischen Biologie mit einer zweiten Dimension der Reduktion einher, deren Evidenz wiederum auf einer Kontamination der Synthetischen Biologie durch die Kybernetik beruhen dürfte, wie Isabelle Stengers konstatiert: Der Unterscheidung zwischen Verarbeitung von Daten und ihrer materiellen Implementierung (von Neumann), aus der die Vorstellung erwächst, die Information, auf deren Grundlage sich biologische Organismen entwickeln, lasse sich vollständig von der Materie ablösen, sodass ebenso gut ›in silico‹ wie ›in vitro‹ operiert werden kann.⁹

Diese Vorstellung, der zufolge ein aktives Formprinzip der Materie inhärent, aber so autonom ist, dass es weitgehend verlustfrei aus dieser extrahiert werden kann, stellt eine Zuspitzung des hylemorphen Schemas dar, das Aristoteles' Denken der Entelechie zugrunde liegt:¹⁰ Die Information ist hier nur insofern nicht immateriell, als sie der Materie als passiver Substanz bedarf, um das in ihr enthaltene Programm umzusetzen, indem es formloser Materie Gestalt verleiht. Seine Evidenz dürfte dieses Modell der Inskription aber in noch größerem Maße von einer Religion beziehen, deren Schöpfergott allzu oft nicht nur als allmächtig gegenüber seiner Schöpfung aufgefasst wird, sondern der die Ordnung der Welt in Form von Sprache und Gesetzen dekretiert hat. Der genetische Code als allmächtiges Programm folgt der Vorstellung der Schöpfung als ›liber naturae‹.¹¹

Wie sich an der Diskursivierung der Synthetischen Biologie zeigt, schließt dieses Informationsparadigma keineswegs alle anderen Paradigmen aus, die Cang-

7 | Vgl. Guichet, *Nature et artifice dans les nanotechnologies*, 2008, S. 21; Gabriele Gramelsberger: *The Simulation Approach in Synthetic Biology*, in: *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44(2), 2013, 150-157.

8 | Vgl. Jean-Jacques Kupiec, Pierre Sonigo: *Ni Dieu ni gène. Pour une autre théorie de l'hérédité*, Paris: Seuil 2003, S. 71ff.

9 | Vgl. Chris Langtons Manifest von 1987, zitiert bei Stengers, *La vie et l'artifice*, 2003, S. 236; Bensaude-Vincent, *Les vertiges de la techno-science*, 2009, S. 120. Thacker, *Bio-media*, 2010, S. 123 affiziert diese Extraktionslogik. Trotz aller Beteuerungen, Biomedien wie er sie konzipiert, seien nicht immateriell, reproduziert er eine klassisch hylemorphistische Form-Stoff-Scheidung.

10 | Vgl. Gilbert Simondon: *Form, Information, Potentiale*, in: Ilka Becker, Michael Cuntz, Michael Wetzel (Hg.): *Just not time*, Paderborn: Fink 2011, 221-247, S. 229; vgl. Simondon, *L'individu et sa genèse physico-biologique*, 1964, S. 39-50.

11 | Vgl. Hans Blumenberg: *Die Lesbarkeit der Welt*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1983. Schon die Idee, die Natur folge Gesetzen, ist nur schwer ohne die Vorstellung eines göttlichen Gesetzgebers zu denken.

Guilhem für das Verständnis des Lebens unterschieden hat.¹² Es verbindet sich harmonisch mit einem cartesianisch-mechanistischen, ebenfalls reduktionistischen Modell von Leben »und« Maschine, das beide als Konstruktion aus diskreten Einzelteilen, »partes extra partes«, versteht. Dies ist insofern wenig erstaunlich, als das dahinterstehende Bild des Konstrukteurs und, auf das Leben übertragen, des blinden Uhrmachers ebenfalls davon ausgeht, dass die formierende Kraft im Prozess der Konstruktion des Uhrwerks einzig im Entwurf des Konstrukteurs liegt, der dieses »design« der Materie auferlegt: Der eine Reduktionismus stützt den anderen: Die Form oder der Bauplan, der vom Konstrukteur in die Maschine hineingelegt wurde, lässt sich aus dieser wieder abstrahieren.¹³ Die Kette, oder eher der Zirkel der reduktiven Annahmen, auf denen die Synthetische Biologie beruht, funktioniert also wie folgt: Alles lässt sich auf die Information als Code zurückführen; die Information lässt sich aus der Materie abstrahieren; das Leben funktioniert wie eine Maschine – eine Maschine ist »partes extra partes« aus Teilen aufgebaut (die vom Konstrukteur nach dessen Entwurf zusammengesetzt werden, bzw. denen er seinen Bauplan einschreibt) – »conclusio«: Auch das Leben besteht aus einigen Bausteinen, Elementen oder Prinzipien, die gefunden, isoliert und kontrolliert, analysiert und synthetisiert werden können und auf denen das gesamte Leben basiert. Abstrahiert wird schließlich noch von der Bedeutung des Austauschs lebendiger Entitäten mit ihrem Milieu: Unterschätzt wird die Rolle eines natürlichen oder artifiziellen Milieus für das Verhalten der Entitäten und somit die Auswirkungen der Überführung von einem Milieu in das andere.

Das Simondonsche Modell von Information ist weitaus eher mit jüngeren Entwicklungen in der Biologie kompatibel, die bis hin zu einer Rehabilitierung der verpönten Epigenetik Lamarcks reichen, zumindest aber die Wechselwirkung

12 | Vgl. Georges Canguilhem: *Le concept de la vie* (1966), in: Ders.: *Etudes d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris: Vrin 1994, 335-364.

13 | Das alternative Modell des kybernetischen Automaten wird im Folgenden vor allem hinsichtlich der Präention der Autonomie thematisiert. Dass die Auseinandersetzung weniger ausführlich verläuft, liegt auch daran, dass es in der hier entscheidenden Perspektive mit Simondon eher eine Sonderform des mechanistischen Maschinenmodells darstellt: Auch kybernetische Konstruktionen und ihre Theoretisierung, wie etwa jene der zellulären Automaten, folgen einer Bausteinlogik: Der Unterschied ist, dass hier mit einer Emergenz aus den Komponenten gerechnet wird, die nicht vorhersehbar war. Letztlich bleibt aber alles auf die Struktur zurückführbar, vgl. Bensaude-Vincent, Guichet, *Nano-Machine*, 2007. Die Struktur sind aber die Komponenten. Dies entspricht weder der Logik des Lebendigen noch der Entstehung einer konkretisierten Maschine: Weil die »Bauteile« gerade nicht informierbar im Simondonschen Sinn sind, muss sich diese zur Information nötige Konkretisierung im Lebendigen vollziehen: Sie bedarf der Erfinder als Biomedium der Konkretisation, s.u. Davon abgesehen ist auch eine Uhr ein Quasi-Automat (quasi, weil ihr von außen Energie zugeführt werden muss, um sie am Laufen zu halten und eventuelle Zeitabweichungen durch das Stellen korrigiert werden müssen [Information]).

zwischen genetischen und epigenetischen Faktoren in der Ontogenese betonen.¹⁴ Das zentrale Dogma oder die Vorstellung ›ein Gen, eine Funktion‹, beide mittlerweile in ihrer Gültigkeit massiv hinterfragt,¹⁵ werden darin zugunsten der Beschreibung einer komplexen Interaktion zwischen genetischen und epigenetischen Faktoren, DNA und Proteinen, Germen, Organismus und Milieu revidiert: Es ist das Umschalten von der Beobachtung vorgegebener Strukturen auf Prozesse der Interaktion, in denen etwas entsteht, was von keinem beteiligten Agens a priori vorgegeben, sondern lediglich konditioniert war.

Es ist aufschlussreich, dass Simondon 1970, als das zentrale Dogma eigentlich unumstrittene Lehrmeinung war, in der Einleitung seines *Cours sur la communication* gegenüber der neodarwinistischen Genetik auf der Gültigkeit Lamarcks beharrt:

»Les plus célèbres biologistes contemporains se déclarent darwiniens en affirmant, comme Monod, que mutations et sélections suffisent pour expliquer l'évolution. Cependant, on ne doit pas oublier que l'un des aspects de la doctrine de Lamarck, relativement à la doctrine de l'évolution, réside dans l'idée que l'évolution se fait parce que l'organisme prend en charge l'organisation active et régulière des apports d'énergie et de matière qu'il attendait, à une époque plus primitive, des mouvements aléatoires du milieu [...].«¹⁶

14 | Vgl. Henri Atlan: *La fin du ›tout génétique‹? Vers de nouveaux paradigmes en biologie*, Paris: INRA 1999; Kupiec, Sonigo, *Ni Dieu ni gène. Pour une autre théorie de l'hérédité*, 2003; Pierre Sonigo: Une onde d'abeilles, in: Pierre Sonigo, Isabelle Stengers (Hg.): *L'évolution*, Les Ulis: EDP 2003, Staffan Müller-Wille, H.-J. Rheinberger: *Das Gen im Zeitalter der Postgenomik. Eine wissenschaftliche Bestandsaufnahme*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 2009.

15 | Vgl. Raphaël Larrère: De quelques doutes sur la convergence, in: Bensaude-Vincent, Larrère, Nurock, *Bionano-éthique*, 2008, 33-40, S. 38; Müller-Wille, Rheinberger, 2009, *Das Gen im Zeitalter der Postgenomik*, S. 114ff.

16 | Gilbert Simondon: *Cours sur la communication (1970-71)*, in: Ders.: *Communication et information. Cours et conférences*, (hg. von Nathalie Simondon), Chatou: Les éditions de la transparence 2010, 53-185, S. 62. »Die berühmtesten zeitgenössischen Biologen sind erklärte Darwinisten, wenn sie wie Monod behaupten, dass Mutation und Selektion ausreichen, um die Evolution zu erklären. Indes darf man nicht vergessen, dass einer der Aspekte von Lamarcks Lehre, was die Evolutionslehre anbetrifft, in der Idee besteht, dass sich die Evolution vollzieht, weil der Organismus die aktive und regelmäßige Organisation der Zufuhr an Energie und Materie übernimmt, die er in einer früheren Zeit von den zufälligen Bewegungen des Milieus erwartete.« (Diese wie alle weiteren Übersetzungen von Simondon von Michael Cuntz).

9.2 KRITIK DER VORSTELLUNG VON LEBEN ALS SYNTHESE

Der Begriff der ›Synthese‹ selbst gehört nicht zu Simondons zentralen Konzepten. Dies dürfte einerseits in seinem anti-dialektischen Verständnis der Entstehung technischer Objekte und der Evolution von Technizität begründet liegen, in der seiner Auffassung nach die Negativität des Antithetischen keine konstruktive Rolle spielt.¹⁷ Zentraler ist im vorliegenden Kontext allerdings die Frage nach der Synthese im Sinne des Erzeugens eines Ganzen, also mittels seiner Zusammensetzung oder seiner ›assemblage‹ Stück für Stück aus Teilen, wie es dem spezifischen ›bottom-up‹ Ansatz der Konstruktion vollständiger lebendiger Organismen aus ›bio-bricks‹ zugrunde liegt,¹⁸ mit dem auch die weitestreichenden Ziele der Synthetischen Biologie verknüpft sind.¹⁹ Hinsichtlich der verwirklichten oder angestrebten Entitäten bietet sich hier eine Differenzierung in zwei Kategorien an, die als ›cyborg technology‹ und ›living technology‹ bezeichnet wird, also der Einbau eines technischen Elements in einen Organismus oder aber Design und Konstruktion eines vollständig synthetisierten Organismus, also künstliches Leben im eigentlichen Sinn.²⁰ Hiervon muss noch ein drittes Verfahren unterschieden werden: der Einbau von ›Elementen‹ des Lebens, Nanoteilen von Organismen, etwa Molekülen, in ein technisches Gebilde wie etwa einen Chip, das seine Verhaltensweise lenken soll.²¹ In allen Fällen geht es um die Grenze zwischen Technik und Leben, aber, wie zu zeigen sein wird, auch zwischen Leben und unbelebter Natur.

Für eine auf Simondon aufbauende Kritik am Reduktionismus der Synthetischen Biologie ist entscheidend, dass auch dieser nicht von einer strikten Grenze oder einer spezifischen Differenz zwischen Unbelebtem und Belebtem ausgeht, was sich schon darin zeigt, dass er auf Transduktion beruhende Individuationsprozesse, also jene Prozesse, die zur Entstehung von Individuen und somit von organisierten Einheiten oder Systemen führen, auch für den Bereich des Anorganischen und insbesondere für Kristalle beschreibt – ein Kristall ist ein anorganisches Individuum.²² Jeder Versuch der Reduktion des komplexen Lebendigen auf

17 | Vgl. Simondon, *Die Existenzweise technischer Objekte*, 2012, S. 64.

18 | Vgl. hierzu v.a. Mackenzie, *Technical objects in the biological century*, 2012.

19 | Vgl. Bensaude-Vincent, *Les vertiges de la techno-science*, 2009.

20 | Vgl. Mark A. Bedau, P.G. Hansen, E. Parke, S. Rasmussen: *Living Technology: 5 Questions*, Automatic Press Publishing 2010.

21 | Vgl. Guichet, *Nature et artifice dans les nanotechnologies*, 2008, S. 27.

22 | Kristalle sind kein willkürlich gewähltes Beispiel, denn Enzyme, die sich kristallisieren lassen, sind zentrale Akteure im Streit um das Verständnis des Lebens: Der Nachweis, dass sie ›tote Moleküle‹ seien, galt als Todesstoß für vitalistische Deutungsmuster, vgl. Bernadette Bensaude-Vincent, I. Stengers: *Histoire de la chimie*, Paris: Editions de la découverte 1992, S. 274ff. Ein Umschalten auf die Frage nach Organisationen und ihren Individuationen statt nach inhärenten substantiellen Qualitäten, wie sie Simondon vorschlägt,

das einfache Unbelebte geht also deswegen fehl, weil die unbelebte Natur bereits einen hohen Organisationsgrad aufweisen kann.²³ Mehr noch, Simondon geht davon aus, und dies ist für das Operieren auf der Nanoebene oder doch auf Ebenen extrem kleiner Maßstäbe von Belang,²⁴ dass es unterhalb einer bestimmten Größenschwelle keinerlei Differenzierung zwischen dem Belebten und dem Unbelebtem gibt, was sich mit dem heutigen Wissensstand deckt.²⁵

Folglich lässt sich auch nicht zwischen einer unbelebten und einer belebten »Materie« unterscheiden.²⁶ Für die Ebene der Mikrophysik spricht Simondon von »präphysikalischen und prävitale« Phänomenen.²⁷ Die Ebene der Makromoleküle,²⁸ auf der neben Viren auch die DNA und Enzyme existieren, situiert sich demnach zwischen mikro- und makrophysikalischem Level, sie ist laut Simondon eine Zone der Unentschiedenheit zwischen Lebendigem und Nicht-Lebendigem. Es ist also nicht die Emergenz einer geheimnisvollen neuen Substanz, die das Leben erklären würde, aber dies heißt nicht, dass sich das Leben nachbauen ließe, indem man Bausteine auf der »prä-individuellen« Nano-Ebene zusammenfügen würde. Denn was Anorganisches und Organisches gleichwohl unterscheidet, ist die Emergenz anderer Formen der Aufnahme von Information – eben dies ist mit der Transduktion als Grundlage der Individuation gemeint. In der Individuation des Lebendigen kommt es zu anderen transduktiven Prozessen und zur Ausbildung anders organisierter Individuen. Somit ist Simondons Auffassung auch insofern dezidiert anti-reduktionistisch, als es nicht um das Auffinden eines »essential core or atomic unit that would describe the complexity of life and the living« geht.²⁹

Die Grenze zwischen Unbelebtem und Belebtem ist daher Simondon zufolge nicht undurchlässig, doch hat der Übergang vom einen in den anderen Bereich nichts mit einer Syntheseleistung zu tun. Die Transformation der Organisation, die den Übergang zwischen beiden Bereichen ermöglicht,³⁰ erfolgt im Gegenteil

durchbricht die entweder-oder-Logik und könnte gerade zur Erklärung des Übergangs zwischen belebt und unbelebt beitragen.

23 | Vgl. Simondon, *L'individu et sa genèse physico-biologique*, 1964, S. 139 und S. 141.

24 | Vgl. zur Differenzierung Sacha Loeve: Autour d'une définition des nanos, in: Bensaude-Vincent, Larrère, Nurock, *Bionano-éthique*, 2008, 3-18.

25 | Vgl. Bernadette Bensaude-Vincent: Pour une philosophie du terrain, in: Bensaude-Vincent, Larrère, Nurock, *Bionano-éthique*, 2008, XI-XXX, S. XIII.

26 | Zur Problematisierung dieses Begriffs s.u.

27 | Simondon, *L'individu et sa genèse physico-biologique*, 1964, S. 131.

28 | »Mais au niveau des macro-molécules, on ne peut guère dire si le virus filtrant est vivant ou non vivant.« Simondon, *L'individu et sa genèse physico-biologique*, 1964, S. 132.

29 | Thacker, Biomedica, 2010, S. 127.

30 | »S'il était vrai que l'organisation ne se perd ni ne se crée, on aboutirait à cette conséquence que l'organisation ne peut que se transformer.« Simondon, *L'individu et sa genèse physico-biologique*, 1964, S. 141. »Würde es zutreffen, dass die Organisation sich

durch eine Analyse (die keine Abstraktion ist), durch die Differenzierung eines unbelebten Individuums in eine belebte Gruppe:

»Rien ne s'oppose théoriquement à ce qu'il y ait une possibilité d'échanges et d'alternances entre un système physique et un système biologique ; mais [...] il faudra supposer qu'une unité individuelle physique se transforme en un groupe biologique, et que c'est en quelque matière la suspension du développement de l'être physique, et son analyse, non point une relation synthétique, réunissant des individus physiques achevés, qui fait apparaître le vivant.«³¹

Simondon verwirft also offenbar die Vorstellung einer synthetisierenden Bauform des Lebens, die von Forschern in ihre Teile oder *Elemente* aufgebrochen werden müsste, die dann direkt re-synthetisiert werden bzw. für das Synthetisieren neuer Lebensformen kopiert werden könnte.

Es wird häufig übersehen, dass es ›drei‹ Existenzweisen, die des Unbelebten, des Belebten und des Technischen sind, die im Bereich der Synthetischen Biologie involviert sind. Die Versprechungen der Synthetischen Biologie beruhen aber nicht zuletzt darauf, dass nicht nur das Leben mechanistisch aufgefasst wird und somit das Leben auf das Unbelebte reduziert wird, sondern dass auch die Existenzweise technischer Objekte und unbelebter natürlicher ›Materie‹ als identisch betrachtet werden. Die Reduktion des Lebens auf mechanische Prinzipien macht aber im Kontext der Nanotechnologie überhaupt nur dann Sinn, wenn auch die Identität der Existenzweisen technischer Objekte und natürlicher unbelebter Materie behauptet werden kann, sodass alle den gleichen Gesetzen unterworfen wären. Dieser Schluss beruht auf impliziten substanzialistischen Argumenten: dass die unbelebte Materie weniger komplex sei als die belebte und dass sich auf der Nano-Ebene die belebte nicht von der unbelebten Materie unterscheide. Wenn Maschinen aber aus unbelebter Materie bestehen, kann folglich auf der Nanoebene mit der unbelebten Materie so operiert werden wie beim Zusammenbau von Maschinen. Die Evidenz dieser Gleichsetzung schwindet, wenn man wie Simondon nach der Existenzweise als der Weise der Individuation, als Form der Organisation oder der Bildung von Systemen fragt.

weder verliert noch entsteht, würde man die Konsequenz ziehen müssen, dass die Organisation sich nur transformieren kann.«

31 | »Theoretisch steht nichts der Möglichkeit entgegen, dass es zu Austausch und Hin- und Herwechseln zwischen einem physikalischen System und einem biologischen System kommt ; doch wird man annehmen müssen, dass sich eine individuelle physikalische Einheit in eine biologische Gruppe umwandelt, und dass es auf gewisse Weise die Unterbrechung der Entwicklung des physikalischen Wesens und seine Analyse, und eben nicht eine synthetische Relation ist, die fertige physikalische Individuen vereint, welche zum Erscheinen des Lebendigen führt.« Simondon, *L'individu et sa genèse physico-biologique*, 1964, S. 139.

9.3 INDIVIDUATION, INDIVIDUALISATION, KONKRETISATION

Ein ›unbelebtes Individuum‹ wie etwa ein Kristall individuiert einmalig durch einen transduktiven Prozess, in dem eine übersättigte und somit metastabile Lösung durch einen strukturierenden Keim mit Formpotenzial, der als Singularität von außen auf diese trifft, in eine (stabile) Form überführt wird,³² die nur an ihren Grenzen metastabil bleibt: Die energetischen Potenziale der Lösung werden in der Transduktion vollständig aktualisiert, sodass keine weitere Modifikation der Form mehr erfolgen kann.³³ Zudem individuiert das unbelebte Individuum einförmig, ohne Differenzierung. Das ›belebte Individuum‹ hingegen erschöpft in seiner Individuation, die seine Ontogenese begründet, auch in seinem Inneren seine Potenziale keinesfalls, weswegen seine Form insgesamt metastabil bleibt und in sukzessiven Krisen weiter transduktiv informiert wird: Dies nennt Simondon Individualisationen. Zudem ist das lebendige Individuum in der Lage, seine Strukturen selbst zu generieren. Für die Evolution des ›technischen Individuums‹ schließlich spricht Simondon nur von Individualisation – es fehlt also der konstitutive Akt der Individuation, denn die Existenzweise des technischen Objekts bleibt vom Menschen abhängig: Es geht aus der Erfindung hervor, in welcher Menschen als biotechnisches Leben sich in der Individualisation des technischen Individuums selbst weiter individualisieren. Im Akt des Erfindens ist der Erfinder also das Biomedium, in dem sich die Genese des technischen Objekts und ›seines‹ Milieus vollzieht.³⁴

Das technische Individuum unterscheidet sich folglich vom unbelebten Individuum dadurch, dass es nicht ›direkt‹ im Wechselspiel mit seinem assoziierten Milieu konditioniert und organisiert wird. Jede Individuation, aber auch die Individualisation des technischen Objekts setzt eine Interaktion mit einem Milieu voraus: Jedes Individuum konstituiert sich oder wird konstituiert durch ein Milieu, das es selbst (oder im Fall des technischen Individuums sein Erfinder), um existenzfähig zu sein, durch seine Funktionsweise so transformiert, dass es sein Milieu wird. In der Individuation entstehen das Individuum ›und‹ sein assoziiertes Milieu.

Dass es aber Evolution gibt und somit weitere Individualisation, deutet darauf hin, dass die Potenziale des technischen Objekts nicht ausgeschöpft sind, sondern weiter entwickelt werden können, was Simondon unter anderem als Prozess der ›Konkretisation‹ fasst. Konkretisation ist aber gerade keine Funktionsweise ›partes extra partes‹, sondern bedeutet einerseits Multifunktionalität der Elemen-

32 | Simondon, *L'individu et sa genèse physico-biologique*, 1964, S. 130f.

33 | Dies bedeutet aber nicht, dass das unbelebte Individuum sich deswegen vollständig im stabilen Gleichgewicht befände. An seinen Grenzen bleibt es metastabil und kann sich so immer weiter ausdehnen, vgl. Simondon, *L'individu et sa genèse physico-biologique*, 1964, S. 126 und 128.

34 | Vgl. Simondon, *Die Existenzweise technischer Objekte*, 2012, S. 52ff.

te und synergetische Effekte, welche die Interferenzen zwischen den Funktionen der Elemente minimieren, sowie andererseits die Integration eines assoziierten Milieus in die Funktionsweise des technischen Objekts.³⁵ Die Möglichkeit der Erfindung beruht auf einer Analogie zwischen der Organisation des Menschen als Lebewesen und des technischen Objekts. Die Existenzweise des technischen Objekts und vor allem des konkretisierten technischen Individuums situiert sich also nicht nur in Abhängigkeit von, sondern auch in größerer Nähe zum Lebendigen als zum Unbelebten, mit dem es in erster Linie seine Unfähigkeit zur selbst angestoßenen Individuation gemeinsam hat. Wie das Lebendige differenziert es sich in Teile, die sich nicht »partes extra partes« zu einem Ganzen zusammensetzen. Sowohl Adrian Mackenzie als auch Bernadette Bensaude-Vincent und Xavier Guichet haben darauf hingewiesen, dass ein Fortschritt in der Synthetischen Biologie nur in der Suche nach Konstruktionsmethoden liegen kann, die zu konkretisierten biotechnischen Objekten führen.³⁶ Dem ist in mehrfacher Hinsicht zuzustimmen, doch gilt es, die Implikationen dieses Vorschlags zu bedenken.

9.4 METASTABILITÄT/STABILITÄT

Es bedeutet zunächst, sich sowohl vom Konzept der Maschine als beherrschbarem Mechanismus wie vom kybernetischen Konzept des autonomen Automaten zu verabschieden. Obwohl Simondon für das Konzept der konkretisierten Maschine eine größere Nähe zum Lebendigen postuliert als für die abstrakte Maschine »partes extra partes« oder den kybernetischen Automaten, beruht es im Gegensatz zu diesen Modellen gerade nicht auf dem Anspruch, die Maschine könne das Leben imitieren oder Leben könne wie eine Maschine zusammengebaut werden. Living technology ist Technologie als Erfindung und somit Individualisierung des erfinderischen Lebens im und durch das technische Objekt, nicht aber im Sinn einer Nachschöpfung des Lebens aus seinen »Bausteinen«. Denn lebendige Organismen sind in einer Weise konkret, der sich das konkretisierte technische Objekt nur asymptotisch annähern kann, und auch nur deshalb in der Lage, sich zu reproduzieren.³⁷

Organismus und technisches Objekt unterscheiden sich durch die Art der Information und der Form, die sich durch diese Information bildet bzw. aus dieser heraus generiert wird: einerseits Form und Information, die auf stabilen, vorab

35 | Vgl. Simondon, *Die Existenzweise technischer Objekte*, 2012, S. 19ff. und S. 47ff.

36 | Vgl. Bensaude-Vincent, Guichet, *Nano-Machine*, 2007; Mackenzie, *Technical objects in the biological century*, 2012.

37 | »Es lässt sich aber nicht mehr sagen, als dass die technischen Objekte zur Konkretisation tendieren, während natürliche Objekte wie die Lebewesen von Anfang an konkret sind. Man darf die Tendenz zur Konkretisation nicht mit dem Status einer gänzlich konkreten Existenz verwechseln.« Simondon, *Die Existenzweise technischer Objekte*, 2012, S. 45.

festgelegten Formen beruhen, andererseits Form und Information, die auf metastabilen, wandelbaren und werdensfähigen Formen beruhen: Die Fähigkeit, fortgesetzt metastabile Formen und Informationen zu gebrauchen und so Information zu generieren – und zwar über einen transduktiven Prozess, bei dem es sich präzise um die Entstehung verkörperter Information handelt, ist dabei das, was das Lebendige und seine Zeitlichkeit ausmacht. Demnach beruht die Funktionsweise von Maschinen – und dies beträfe die stabilen Elemente, aus denen sie sich zusammensetzt, in gleichem Maße wie die Codes, mit denen sie arbeitet – auf vom Menschen einmal in intuitiver Antizipation der Funktionsweise des technischen Individuums erfundenen stabilen Formen, welche von der Maschine selbst nicht modifiziert werden können. Information im technologischen oder informationstheoretisch-kybernetischen Verständnis, also als eine einer gewissen Regelmäßigkeit folgenden, somit aber nur probabilistisch vorhersagbaren Nachricht kann auf Grundlage dieser festen Formen durch die Maschine übermittelt werden, dies aber nur, wenn ein Unbestimmtheitsspielraum in ihrer Funktionsweise und ihren Codes besteht, der die Regulierung und somit die Kopplung an den Menschen erforderlich macht, statt ein autonomes Funktionieren zu gewährleisten.

Die Integration lebendiger und technischer Funktionsweise vollzieht sich aber nicht in der Maschine, sondern im Menschen, der somit wiederum zu einer biotechnischen Lebensform wird:

»Der Mensch hat die Fähigkeit, einerseits die Funktionsweise der Maschine zu verstehen und andererseits zu leben: Man kann von technischem Leben als demjenigen sprechen, was im Menschen die Herstellung der Relation zwischen beiden verwirklicht [...] die technische Operation erfordert ein Leben, das technisch und natürlich ist.«³⁸

Für das Lebendige gelangt der Informationsbegriff der Informationstheorie an seine Grenze, was darauf hindeutet, dass sich für Simondon psychische Prozesse, wie sie sich in Menschen, aber auch in Tieren vollziehen, nicht auf algorithmische Funktionen reduzieren lassen. Was im informationstheoretischen Modell nicht erfasst werden kann, ist eine Information, in der nicht ein vorab konstituierter Sender und ein vorab konstituierter Empfänger mittels eines vorab festgelegten Codes kommunizieren, sondern in der man »die mögliche Serie der Empfänger als offen annimmt; die Informationsspannung verhält sich proportional zur Fähigkeit eines Schemas, von Empfängern als Information empfangen zu werden, die nicht im Voraus definiert werden.«³⁹ Diese Offenheit charakterisiert für Simondon aber eben jene Prozesse, die er mit dem Begriff der Transduktion beschreibt. Eine Transduktion kann sich nur deshalb ereignen, weil der Empfänger in einem solchen Prozess selbst ganz materiell informiert wird und in der Lage ist, diese inkorporierte Information anschließend in eine Form zu verwandeln,

38 | Simondon, *Die Existenzweise technischer Objekte*, 2012, S. 116.

39 | Simondon, *Form, Information, Potentiale*, 2011, S. 237.

die für die folgenden Wahrnehmungen strukturierend werden kann und so fort: »Das Lebendige ist das, worin das *a posteriori* [also die Information] zum *a priori* wird; das Gedächtnis ist diejenige Funktion, durch die *a posteriori* zu *a priori* werden.«⁴⁰ Dies ist deshalb möglich, weil die gewonnenen Formen nicht starr und stabil sind (wie die Gestalttheorie annimmt), sondern metastabil und jederzeit neu formierbar.

Simondon hat dies in *Die Existenzweise technischer Objekte* vor allem für die Information beschrieben, die innerhalb der Kommunikation von Mensch und Maschine – und in ihrer Kopplung – Verwendung finden kann. Da Information aber verkörperte Information ist, lässt sich diese Differenz zwischen codierter und verkörperter Information nicht von der Organisationsform, von den »dynamischen« Strukturen dieser Individuen ablösen, sondern geht aus diesen hervor.

Dies erlaubt, nun in Hinsicht auf Stabilität und Metastabilität die Topologie der verschiedenen Individuen zu unterscheiden:

Das *physikalische Individuum* ist eine stabile Form, die an ihren Rändern metastabil bleibt, was seine Expansion in Wiederholung eines gleichförmigen Individuationsprozesses erlaubt.

Das *lebendige Individuum* besteht aus metastabilen Formen, die eine komplexe Topologie von Innen/Außen-Verhältnissen fundieren: Sie durchziehen den ganzen Körper-Psyche-Komplex und ermöglichen weitere Differenzierungen in Form von Individualisationen, welche das Werden des Lebendigen ausmachen.

Das *technische Individuum* besteht aus stabilen Formen, die aber nicht »partes extra partes« zusammengesetzt sind, sondern konkretisiert sind. Diese Konkretisation bedeutet aber auch, dass sich das technische Individuum wie einige seiner Elemente dadurch auszeichnen, dass sie in ihrem Inneren in hohem Maße metastabile Vorgänge integrieren können, welche sie synergetisch konjugieren, und zwar, anders als das lebendige Individuum, deswegen, weil die Rahmen, die das technische Objekt liefert, stabil bleiben – die Zylinder eines Motors verformen sich gerade nicht im Vorgang der Verbrennung des Luft-Treibstoffgemischs, eine Elektronenröhre funktioniert nur dann, wenn ihre Elektroden nicht im Betrieb, in dem Elektronen fließen, schmelzen – oder wenn Änderungen zwischen stabilen Zuständen erfolgen (Schalter).⁴¹

40 | Simondon, *Die Existenzweise technischer Objekte*, 2012, S. 114.

41 | Diese *Stabilität* der Komponenten, die Simondon Elemente nennt, ist kein Defizit gegenüber dem Lebendigen, sondern macht ihren informationellen Mehrwert aus: Elemente können einem technischen Individuum unter Umständen entnommen und in hybrider Kombination in ein technisches Individuum ganz anderer Art überführt werden. Dies ist für Teile eines Organismus wie Organe schwer möglich.

9.5 ELEMENTE, UNTERINDIVIDUEN, INTEGRATION

Organismus wie technisches Individuum setzen sich aus ›Teilen‹ zusammen. Keines von beiden lässt sich holistisch betrachten, denn beide sind doppelt nach außen geöffnet: beide zu ihrem spezifischen Milieu, beide aber auch zu höheren Organisationsstufen: das technische Individuum zum technischen Ensemble, der Organismus zur Gattung oder zur Gruppe. Und doch deutet Simondon an, dass die Teil-Ganzes-Relationen unterschiedlicher Art sind, wie die Differenzierung in seiner Terminologie anzeigt. Während Simondon für die Komponenten des technischen Objekts von Elementen spricht, gebraucht er für den Bereich des Lebendigen den Ausdruck ›sous-individu‹ und verwendet diesen auch für das, was wir gemeinhin als Individuum fassen, und dies aus gutem Grund: »Ce qu'on nomme individu en biologie est en réalité en quelque manière un sous-individu beaucoup plus qu'un individu; en biologie, il semble que la notion d'individualité soit applicable à plusieurs étages, ou selon différents niveaux d'inclusion successifs.«⁴² Demnach muss man von einer »société biologique« sprechen. Dies bedeutet aber, dass sich das biologische Individuum nicht aus Teilen ›synthetisiert‹, sondern bereits die Autonomie von Individuen besitzende Entitäten, Unter-Individuen ›integriert‹, sodass das Denken in Teil-Ganzes-Relationen diesem Vorgang nicht gerecht wird.

Der transduktive Prozess der Individuation des Lebendigen ist demnach eine doppelte Bewegung der ›Differenzierung‹ und der ›Integration‹: Das heißt, dass es zum einen gegenüber dem physikalischen Individuum – und dieser Prozess muss sich offenbar auf der makromolekularen Ebene abspielen, die den Bereich des Übergangs oder der Indifferenzierung darstellt – zu einer Suspension der sich vollziehenden Individuation hin zu einer einheitlichen, relativ stabilen Form kommt. Stattdessen werden die Potenziale nicht vollständig aktualisiert und somit erschöpft, was einhergeht mit der Zerlegung eines hochkomplexen physikalischen Individuums in eine Gruppe weniger komplexer biologischer Unter-Individuen.⁴³ Zum anderen aber entnimmt das zur ›Auto‹-Genese fähige Individuum, und das folgende zeigt die Relativität dieses auto, seinem Milieu bereits organisierte und informierte Unter-Individuen, die es integriert: »On pourrait supposer alors que la richesse externe de la relation au milieu est égale à la richesse interne de l'organisation contenue dans un individu.«⁴⁴

42 | Simondon, *L'individu et sa genèse physico-biologique*, 1964, S. 138. »Das, was man in der Biologie Individuum nennt, ist in Wirklichkeit gewissermaßen weitaus eher ein Sub-Individuum als ein Individuum; es scheint, als ob in der Biologie die Vorstellung der Individualität auf mehreren Stufen anwendbar sei, oder gemäß verschiedener Ebenen sukzessiver Inklusionen.«

43 | Vgl. Simondon, *L'individu et sa genèse physico-biologique*, 1964, S. 139.

44 | Simondon, *L'individu et sa genèse physico-biologique*, 1964, S. 142. »Man könnte annehmen, dass die externe Fülle der Relation mit dem Milieu ebenso groß ist wie die innere Fülle der in einem Individuum enthaltenen Relationen.«

So bildet sich eine Staffelung von Ebenen, zwischen denen eine Relation der In-Formation in Form von Interaktion, von Transduktion besteht, in einer »double chaîne ascendante et descendante«,⁴⁵ einer doppelten, sowohl aufsteigenden wie absteigenden Kette, jeweils in Form von Integration und Differenzierung.

Die Komplexität dieser Prozesse übersteigt bei weitem mechanistische Maschinenvorstellungen und hat aufgrund der notwendigen Kopplung von Individuum und Milieu auch nichts mit den angeblich autonomen Automaten der Kybernetik zu tun. Simondons Rede von der biologischen Gesellschaft ist nicht metaphorisch zu nehmen, da die transduktiven Prozesse zwischen den Ebenen weit eher einer Aushandlung gleichen als der Ausführung von Befehlen oder Codes, denn die Transduktion ist eben nicht »simple transport d'information«. Hält man diesen, auch tiefgehend epigenetischen Ansatz⁴⁶ für plausibel, so rücken die Pläne für eine »living technology«, also den »Nachbau« ganzer Organismen in weite Ferne, weil die Zahl der Agenten, die an der Entstehung eines Organismus beteiligt sind, wie die Komplexität ihrer Interaktionen unüberschaubar ist und sich somit auch kein Bauplan extrapolieren lässt. Sie folgen keinem »Projekt« und die Pläne zur »Optimierung« von lebendigen Organismen oder Teilen dieser Organismen, ihre Standardisierung und Stabilisierung zugunsten eines »verlässlicheren« Arbeitsleistung, verkennen ebenso die Eigenlogik des Lebendigen wie der konkretisierten Maschine. Anders als die Maschine kann das Lebendige aber nicht einmal existieren ohne jenen Unbestimmtheitspielraum, der seine Metastabilität und die damit verbundene verkörperte Information begründet.

9.6 ZOMBIE TECHNOLOGY

Es ist die Projektförmigkeit der Technowissenschaft als »applied science« zum Ziel der Produktion auch ökonomisch verwertbarer Anwendungsergebnisse, die Gleichsetzung von Technologie mit Anwendungs- und Nutzenerwägungen, die höchst fragwürdig ist. Eines der zentralen Argumente Simondons zur Rehabilitation des Technischen lautet, dass das finalistische Denken das genuin Technische, die Technizität vollkommen verfehlt. Es ist ein Missverständnis, dass sich technische Objekte adäquat als Mittel zur Erlangung von Zielen begreifen ließen, die in Kategorien der Leistung, der Ausbeute oder der Arbeit, also in klassisch ökonomi-

45 | Simondon, *L'individu et sa genèse physico-biologique*, 1964, S. 142.

46 | Folgt man dieser Beschreibung, so kann die Evolution auch nicht nur auf der Weitergabe aleatorischer Mutationen von Germen zu Germen beruhen, sondern man muss auch wieder die Frage stellen, wie die Information in die Gene kam: Als Reaktion auf Prozesse der Integration und Differenzierung. Die Integration stellt dann auch die Vorstellung einer »art-eigenen« Evolution radikal in Frage, denn was integriert wird, sind ja organisiert-informierte Einheiten, die im Milieu vorgefunden werden: Kristalle, Bakterien, Viren etc. Dann gibt es auch kein Problem mit dem Status von Enzymen, die Kristalle sind.

schen Kategorien beschrieben werden könnten. Was zunächst paradox klingen mag, ist für Simondon zentral: Der Arbeitsertrag einer technischen Aktivität ist für das Verständnis dieser Aktivität irrelevant, er trägt nichts zur Erklärung des technischen Objekts bei.⁴⁷ Um den durch die Denkmuster des Hylemorphismus im dunklen verbliebenen Bereich zu erhellen, den das technische Objekt und in Sonderheit die Maschine darstellt, gilt es, die ›operative Funktionsweise‹ zu analysieren, die ein Erkenntnismedium ist:

»Das Erkennen erfolgt mittels der Operation, aber *operativ* ist kein Synonym für *praktisch*, die technische Operation ist nicht praktisch, sie lässt sich nicht nach Belieben des Subjekts in alle Richtungen biegen, wie es der Zufall der unmittelbaren Nützlichkeit verlangt; die technische Operation ist eine reine Operation, die die wirklichen Gesetze der natürlichen Realität ins Spiel bringt; das Artifizielle ist hervorgerufenes Natürliches und nicht Falsches oder Menschliches, das für Natürliches gehalten wird.«⁴⁸

Oder, mit anderen Worten, das technische Objekt ist ein ›faitiche‹, dessen Funktionieren die Gültigkeit seiner Konstruktion beweist.⁴⁹ Die technische Operation lässt sich aber deswegen nicht nach Belieben verbiegen, weil sie natürliche Agenzien zur Mitarbeit bewegen und mit ihrem Widerstand rechnen muss. Das Natürliche im Technischen lässt sich nur ›hervorrufen‹, in das technische Objekt ›hinein rufen‹, nicht zwingen oder unterwerfen. Die Konstruktion eines technischen Objekts ist folglich Trajekt, nicht Projekt.⁵⁰ Die Antwort auf die Synthetische Biologie liegt nicht in der Verurteilung des Technologischen, sondern im Verständnis der Technizität, die nicht nach dem Prinzip der Versklavung oder Unterwerfung funktioniert – auch wenn sie von einer Jahrtausende langen Herrschaftspraxis entsprechend instrumentalisiert wird. Es ist dieser Instrumentalismus und Utilitarismus, der aus Programmschriften und Verheißungen der Synthetischen Biologie spricht und der mittels dessen, was auf diese Weise als Technisches verstanden wird, in die Nanosphäre des Natürlichen und Lebendigen hineingetragen werden soll. Nichts anderes besagt die Rede davon, ein sich drehendes Molekül sei ein Motor und verrichte ›Arbeit‹ oder die Behauptung, bei

47 | Vgl. Simondon, *Die Existenzweise technischer Objekte*, 2012, S. 223-236.

48 | Simondon, *Die Existenzweise technischer Objekte*, 2012, S. 236.

49 | Zum faitiche vgl. Bruno Latour: *Petite réflexion sur la le culte moderne des dieux faitiches*, Le Plessis-Robinson: Les empêcheurs de penser en rond 1996; ferner Stengers, *La vie et l'artifice: visages de l'émergence*, 2003.

50 | Vgl. zum Begriff des Trajekts Etienne Souriau: *Du mode d'existence de l'œuvre à faire*, in: Ders.: *Les différents modes d'existence*, (hg. von Isabelle Stengers und Bruno Latour), Paris: Presses Universitaires de France 2009; vgl. dazu Bruno Latour, Isabelle Stengers: *Du sphinx de l'œuvre*, in: Souriau, *Les différents modes d'existence*, 2009, 1-75, S. 20f. und S. 52f.

Zellen handele es sich um Fabriken,⁵¹ bei lebenden Systemen um Apparate, die für spezifische Aufgaben entworfen wurden⁵² und der Imperativ der Nützlichkeit sei ›major driver‹ der Synthetischen Biologie:

»For industrial applications, such genes are not only redundant but also often obstructive when expressed, because they waste energy and sometimes even hinder the objective. Trimming organisms genetically to optimize their productivity is therefore a key technology of immense industrial importance.«⁵³

Die ›operative Funktionsweise‹ biologischer Entitäten soll also durch ihre Technisierung nach den Regeln der Optimierung des Ertrags und der Leistungsfähigkeit modifiziert werden. Die Verhinderung der Verschwendung von Energie und die Ausschaltung für die Funktionsweise hinderlicher Aspekte lassen sich bei oberflächlicher Betrachtung als Aspekte einer Konkretisation auffassen, wie sie Simondon für das technische Objekt beschreibt und als Richtung seiner evolutionären Fortentwicklung postuliert. Eine solche Auffassung übersieht zwei Dinge: erstens, wie bereit bemerkt, dass das Lebendige für Simondon immer schon in einer Weise konkretisiert ist, der sich das technische Objekt lediglich asymptotisch annähern kann. Zweitens werden Energieverschwendung und behindernde Einflüsse hier gerade nicht in Hinblick auf die inhärente Funktionsweise des Gens definiert, sondern auf einen diesem Gen auferlegten Zweck der Produktivität. Nichts aber garantiert, dass die ›Funktionsweise‹ des Gens tatsächlich auf diesen nach Gutdünken des Technowissenschaftlers isolierten Zweck ausgerichtet ist. Das Gen also auf seine Arbeitsleistung hin zu ›optimieren‹ bedeutet, es hinsichtlich seiner Funktionsweise, die sich durch die Fähigkeit zur Aufnahme, Inkorporation und Weitergabe von Information auszeichnet, zu desoptimieren und eine konkrete Entität abstrakter zu machen. Denn das Ziel der Modifikation lässt sich auch so beschreiben, dass es darum geht, das Gen in ein »Gen für dies« umzuwandeln, es also einer Vorstellung der Unifunktionalität der Gene anzupassen, die längst widerlegt ist: Weder gibt es eine eindeutige Zuordnung von Genen zu ›Funktionen‹ im Sinn der Ausführung einer Produktions- oder Konstruktionsarbeit, noch ist ein einzelnes Gen für bestimmte Funktionen unentbehrlich.⁵⁴ Das gewünschte Verhalten des Gens lässt sich nur durch eine Minimierung des Unbestimmtheitsspielraums erreichen, der das Lebendige vor allem anderen charakterisiert. Die gewünschten Optimierungen wären Aktualisierungen und Stabilisierungen, die dem Lebendigen das Leben selbst austreiben, es wäre, würde es denn funktionieren, keine ›living technology‹, sondern ›zombie technology‹.

51 | Vgl. etwa Bensaude-Vincent, *Pour une philosophie du terrain*, 2008, S. XV.

52 | Vgl. Bensaude-Vincent, Guichet, *Nano-Machine*, 2007.

53 | Masaru Tomita: Towards computer aided design (CAD) of useful microorganisms, in: *Bioinformatics*, 17(12) 2001, 1091-1092, S. 1091.

54 | Vgl. Müller-Wille, Rheinberger, *Das Gen im Zeitalter der Postgenomik*, 2009, S. 115f.

9.7 INDIVIDUEN AUF DER NANO-EBENE?

Simondons Theorie der Individuation hätte aber auch weitere Auswirkungen für die spezifische Nanoebene der Synthetischen Biologie: Wenn auf der Ebene der Makromoleküle eine Zone der Indifferenz zwischen Lebendigem und Unbelebtem besteht, dann gibt es keine inhärente Qualität, die die Entscheidung in die eine oder andere Richtung prädisponiert, sondern nur eine Differenz von Individuationsprozessen, die in der Relation zwischen verschiedenen Größenordnungen auf verschiedene Weise hergestellt werden. Eine Formulierung Simondons legt aber nahe, dass er diese Ebene als die Schlüsselebene einer transduktiven Verschaltung, also der Herstellung einer Relation zwischen Mikro- und Makroebene ansieht, denn die großen Moleküle seien »assez complexes pour que des régimes variables de réception d'information puissent y exister, et assez restreints en dimension pour que les forces microphysiques y interviennent comme porteurs des conditions énergétiques et structurales.«⁵⁵

Dies bedeutet aber nicht, dass die Mikro- und Makroebene nur einen Befehl ausführen würde, der von den Makromolekülen käme und in diesen präexistierte (dann ließe sich ja auch nicht die Indifferenz zwischen belebt und unbelebt erklären) – die In-Formation entsteht erst in der Transduktion, in der sich erst entscheidet, ob auf der supramolekularen Ebene ein unbelebtes oder ein biologische Individuum entsteht. Ist diese Ebene der (isolierten) Makromoleküle die niedrigste, auf der eine Individuation möglich ist, so bedeutet dies aber auch, was Simondon nicht weiter ausführt, dass die Individuation auf dieser Ebene sich noch vor einer Unterscheidung in Lebendiges und Unbelebtes situiert: Ein Makromolekül kann wohl Kristall oder Enzym werden, je nachdem, ob es in einem lebendigen oder unbelebten Milieu existiert, kann aber auch zwischen beiden Milieus hin- und herwechseln.

Wenn es aber unterhalb dieser Ebene keine Individuation gibt, so gibt es auch keinerlei Organisation im Sinn der Etablierung einer diskontinuierlichen Einheit, es kommt zu keiner Information als verkörperter Formbildung. Auf dieser »prä-individuellen« Ebene, die Simondon als prävitale und präphysikalisch bezeichnet, gibt es pure Potenzialität, eher Rauschen als Metastabilität. Diese Ebene enthielte das Reservoir, bildete die Ressource, derer es für transduktive Prozesse bedarf.

Vor allem Bensaude-Vincent und Guichet weisen auf die Probleme hin, die sich beim Bestreben nach der Stabilisierung von Formen zur Konstruktion von Maschinen auf der Nanoebene stellen: Oberflächenspannung und Viskosität sind ausschlaggebend, hingegen gibt es keine Architekturen oder Strukturen.⁵⁶

55 | »[...] komplex genug, damit ihnen variable Regime des Empfangs von Information existieren können und von genügend beschränkter Dimension, damit die mikrophysikalischen Kräfte als Träger der energetischen und strukturellen Bedingungen eingreifen können.« Simondon, *L'individu et sa genèse physico-biologique*, 1964, S. 131.

56 | Vgl. Bensaude-Vincent, Guichet, *Nano-Machine*, 2007.

Wenn Simondon bemerkt, dass sich das lebendige Individuum dadurch auszeichne, dass es etwas von der präindividuellen Spannung in sich aufrechterhalte,⁵⁷ so ließe sich dies mit Prozessen zusammenbringen, die sich auf der Nanoebene im Subindividuum der Zelle abspielen und die außerhalb dieses lebendigen Milieus zu steuern und zu manipulieren offenbar größte Schwierigkeiten bereitet. Die bloße Fixierung von Atomen oder Molekülen, ihre Isolation bedeutet nicht nur ihre ›mise à mort‹, sondern auch das Abschneiden von jeglicher Form der Individuation, auch der unbelebten Individuationen. Die Programmierung ihrer Strukturierung hingegen gelingt nicht zuverlässig: Das Verhalten der ›Nanomaschinen‹ bleibt aleatorisch.⁵⁸ Vollends unrealistisch bleibt aber die Vorstellung einer Speicherung von Information auf der Ebene von Molekülen,⁵⁹ wenn die Information an eine Individuation gebunden ist.

All dies verkennt Sache Loeve in seinem Versuch, Nanomaschinen auf der molekularen Ebene mit Simondon als ›konkrete Nanomaschinen‹ zu erfassen, wobei auch er natürlich konzedieren muss, dass es mit der Konkretisation solcher Maschinen bisher nicht weit her ist.⁶⁰ Die Isolation eines Moleküls ist, anders als er glaubt, alles andere als dessen Individuation, sondern seine Abschneidung von jeder Möglichkeit, als präindividuelles Potenzial in Prozesse der Individuation einbezogen zu werden.⁶¹ Das Maschinenmolekül ist keine Objektivation, sondern tatsächlich nur Metapher, eher noch Metonymie, eine Pars-pro-Toto-Verwechslung: Das Molekül kann höchstens Bestandteil eines Individuums und somit eines Organismus oder einer Maschine sein, nicht Individuum.

57 | »Ce qui conserverait dans l'individu vivant quelque chose de la tension préindividuelle, de la communication active, sous forme de résonance interne, entre les ordres extrêmes de la grandeur.« Simondon, *L'individu et sa genèse physico-biologique*, S. 132. »Was im lebendigen Individuum etwas von der prä-individuellen Spannung, von der aktiven Kommunikation in Form der internen Resonanz zwischen extremen Größenordnungen bewahren würde.«

58 | Vgl. Bensaude-Vincent, Guichet, Nano-Machine, 2007.

59 | Vgl. Bensaude-Vincent/Guichet, Nano-Machine, 2007.

60 | Vgl. Loeve, *Autour d'une définition des nanos*, 2008, S. 8.

61 | Selbst wenn das Molekül groß genug wäre, um als Makromolekül ein Individuum zu sein, so wäre die Isolation von seinem assoziierten Milieu die Amputation einer bereits individuierten Entität von dem, was sie ermöglicht und vervollständigt. Loeve folgt aber einer Abgrenzung, die die Makromoleküle als auf der ›Mesoebene‹ liegend exkludiert, vgl. Loeve, *Autour d'une définition des nanos*, 2008, S. 6. Dies ist aber die Ebene, die für Simondon entscheidend ist.

9.8 BIOMEDIEN UND DIE MASCHINE ALS BIOTECHNISCHES MILIEU

So ist es auch nicht erstaunlich, dass nicht nur die Einlösung des Projekts der Synthese ganzer Organismen nach dem ›bio-brick‹-Prinzip bislang ausgeblieben ist, sondern auch das Bauen von tatsächlich funktionierenden ›Maschinen‹ auf der Nanoebene, also das Schaffen einer autonomen Entität in diesem Größenbereich.

Ebenso wenig erstaunt es, dass es zwei andere Verfahren der Nanobiologie sind, die erfolgreich waren: zum einen das, was Gabriele Gramelsberger ›cyborg technology‹ nennt, also die Integration eines biotechnisch modifizierten bzw. konstruierten Elements oder »funktionalen Moduls«⁶² in einen bestehenden einfachen biologischen Organismus.

Simondon spricht ähnliche Vorgänge in *Die Existenzweise technischer Objekte* kurz als komplementäre Bewegung zur Konkretisierung des technischen Objekts an: die Artifizialisierung des lebendigen Individuums. Er denkt dabei etwa an die Modifikation von Pflanzen dergestalt, dass bestimmte Funktionen hypertelisch werden und auf Kosten der Funktionsweise des gesamten Organismus überausgeprägt erfüllt werden (etwa die exzessive Bildung schöner Blüten, die nicht mehr zur Befruchtung taugen).⁶³ Seine Beispiele sind so gewählt, dass entweder die Reproduktion nicht mehr durch den Organismus selbst, sondern nur noch durch den Menschen erfolgen kann oder aber der Organismus nur noch in einem artifizialen Milieu (etwa einem Treibhaus) überlebensfähig ist. Die Autonomie des lebendigen Individuums – die immer nur in Relation zu einem assoziierten Milieu gegeben ist –, also sein metastabiles Potenzial und sein Unbestimmtheitsspielraum werden also ›reduziert‹, aber eben ausgehend von diesen Informationsfähigkeiten des Lebendigen. Das implantierte (oder modifizierte) ›cyborg‹-Element oder Modul funktioniert somit im doppelten Sinn als Parasit dieses Organismus. Es profitiert von dessen Fähigkeit, Information zu empfangen und zu inkorporieren und es ist als Störung nicht schwerwiegend genug, um die Funktionsweise des Organismus zum Zusammenbruch zu bringen – nur dass, entgegen den geläufigen Beispielen, das Störgeräusch der Kommunikation eher durch zu große Stabilität der Information als durch zu große Entropie bestimmt wäre. Es ließe sich aber auch sagen, dass der Wirtsorganismus als das Milieu des biotechnisch modifizierten Moduls fungiert. Er wäre ganz buchstäblich dessen Biomedium: Das informationell stabilisierte Modul bewegt sich in metastabiler Umgebung. Das Problem besteht darin, dass dieses Modul auch in Wechselwirkung mit diesem Milieu existiert und daher offenbar häufig nicht verlässlich die gewünschte

62 | Michel Morange: Un périlleuse convergence: la biologie synthétique, in: Bensaude-Vincent, Larrère, Nurock, *Bionano-éthique*, 2008, 41-52, S. 45.

63 | Vgl. Simondon, *Die Existenzweise technischer Objekte*, 2012, S. 43.

Funktion ausführt.⁶⁴ Was aber garantiert überhaupt, dass das eingeschleuste Modul in diesem lebendigen Milieu seinerseits dauerhaft stabil bleibt?

Nun ist die Einbringung eines Moduls in ein Biomedium, etwa ein Bakterium, eine lebendige Zelle etc. nicht das einzige Verfahren dieser Art, das angewandt wird. Sowohl existierende einfache Organismen oder Zellen als auch die ›bottom-up‹ zu konstruierenden biotechnischen Organismen werden von den Biologen als Chassis bezeichnet.⁶⁵ Dies geschieht aber in Analogiebildung zu anderen Entitäten, die als Rahmen dienen: »Such chassis can be modified organisms like yeast or *E. coli*, but they can also be *constructed* as minimal cells fulfilling the minimum requirements for life. [Hervorhebung M.C.]«. Biologische Komponenten können auch direkt auf einen Halbleiterchip aufgebracht werden, um etwa Biosensoren zu konstruieren.⁶⁶ Guichet, der die Praxis von Nanowissenschaftlern beobachtet hat, beschreibt ähnliche Verfahrensweisen. So kontrollieren die Wissenschaftler ein Biphenyl-Molekül dadurch in seinen Bewegungen, dass es direkt auf eine Silizium-Oberfläche aufgebracht wird.⁶⁷ Auf gleiche Weise wird mit den Proteinen verfahren, die zur Konstruktion eines Nanomotors eingesetzt werden sollen: Diese werden zuerst aus ihrem biologischen Milieu isoliert, um sie anschließend zu vervielfältigen und zu reinigen und sie dann auf einen Siliziumträger aufzubringen. Anstelle biologischer oder auch nur biotechnischer Organismen kommen hier offenbar entweder biomimetische Minimalzellen oder rein technische Umgebungen (Silizium) zum Einsatz. Die ›Module‹, etwa Proteine, werden also in ein artifizielles Milieu überführt, das ihr Verhalten modifiziert und dadurch kontrollierbarer macht, als dies in einem natürlichen Milieu der Fall wäre. Eine solche Konstruktion aber wäre das eigentliche biotechnische Objekt, vielleicht sogar eine biotechnische Maschine: ein ›stabiler‹ Rahmen (insbesondere beim Silizium-Milieu), in dessen Innerem sich metastabile Prozesse vollziehen wie in einem Motor oder einer Elektronenröhre, wobei, was die Präzision angeht, die erforderlich ist, sicher die Elektronenröhre den Weg weist. Während aber die Elektronen in der Röhre nur dazu gebracht werden müssen, sich einzeln in einer bestimmten Weise zu ›bewegen, geht es in der Synthetischen Biologie darum, dass sich etwa Moleküle selbst ›zusammensetzen‹ oder dass sie gar Atome dazu bringen, sich zusammenzusetzen. Alles aber kommt auf die grammatikalische Struktur an, in der sich Handlungsanteile verteilen. Bensaude-Vincent zitiert die schöne Formulierung von Chemikern, die sagen: »on auto-assemble les molécules«. ⁶⁸ Diese aktantielle Paradoxie lässt sich auflösen in ein ›faire faire‹ oder

64 | Für Beispiele vgl. Gramelsberger, *The Simulation Approach in Synthetic Biology*, 2013; Bensaude-Vincent, Guichet, *Nano-Machine*, 2007.

65 | Vgl. etwa Morange, *Un périlleuse convergence: la biologie synthétique*, 2008, S. 45.

66 | Vgl. <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/biosensoren/pc.htm>

67 | Vgl. Guichet, *Nature et artifice dans les nanotechnologies*, 2008, S. 21, 27.

68 | Bernadette Bensaude-Vincent: *Entre chimique et vivant. Deux voies de passage*, in: Bensaude-Vincent, Larrère, Nurock, *Bionano-éthique*, 2008, 53-67, S. 59.

die Abwechslung der Initiative, wie sie Andrew Pickering als »dance of agency« beschrieben hat.⁶⁹ Auch wenn in Guichets Beispiel der Eingriff zum Zweck der Reinigung der Proteine »direkt« erfolgt, ein Eingriff, der sich als klassische Artifzialisierung des Lebens beschreiben lässt, anders gesagt, als die Reduktion seiner Metastabilität, Fähigkeit zur Informationsaufnahme und somit Offenheit, als die Verengung seiner Existenzweise hin auf die Erfüllung einer projektierten Aufgabe, so beruht der Erfolg des Verfahrens doch auf der Aktivität der biotechnischen Akteure: Die Konstruktion des technischen Objekts glückt dann, wenn das artifizielle Milieu so gestaltet ist, dass es die gewünschten Verhaltensweisen hervorruft. Mittels des Angebots eines Milieus wird indirekt auf diese Akteure eingewirkt: Das Informationsangebot des Milieus ist so modifiziert – und dies heißt zunächst einmal: reduziert –, dass die Hoffnung besteht, dass sich ihr Verhalten in gewünschter Weise lenken lässt. Die Reduktion der offenen Informierbarkeit, der Metastabilität dieser Akteure muss stark genug sei, dass ihr Verhalten sich wie gewünscht stabilisieren lässt, sie muss aber auch schwach genug sein, dass die Fähigkeit zur »auto-assemblage« nicht verloren geht. Verfolgt man Projekte, in denen man a priori festgelegte Forderungen an diese Akteure stellt, so besteht darin die Gratwanderung, die man auch als Nano-Gouvernementalität bezeichnen kann – dies ist die Zurückführung der Mikrophysik der Macht in den Bereich, aus dem dieses Konzept hervorgegangen ist.⁷⁰

Eine ganz andere Frage ist, ob die Praxis der Nanowissenschaftler überhaupt so projektförmig ist. Guichet zieht dies in Zweifel, seine Wissenschaftler scheinen sich nicht allzu sehr von jenen zu unterscheiden, die Latour für seine frühen Arbeiten begleitet hat. In jedem Fall wäre es die interessantere und vielversprechendere Herangehensweise an diese Objekte, sie voll und ganz als technische Objekte auch im Sinn Simondons zu begreifen. Dies würde zum einen bedeuten, diese nicht als Nachbau der Natur zu verstehen, sondern, auch im Sinn biomimetischer Forschungen, als Objekte mit einer eigenen Existenzweise, die sich durch Konkretisation, anders gesagt durch die Einbindung von so viel Metastabilität wie möglich, »asymptotisch« dem konkreten Lebendigen anzunähern. Dies würde auch zu einer doppelten Reserviertheit gegenüber der Vorstellung eines letzten Schritts führen, in dem die Akteure aus dem artifiziellen Milieu in ein natürliches überführt werden können, weil dies übersieht, dass der artifizielle, stabile Rahmen Teil des technischen Objekts ist und dessen Funktionsweise garantiert (und es würde auch die Notwendigkeit einer Reflexion über die Risiken

69 | Vgl. Andrew Pickering: *The Mangle of Practice. Time, Agency, and Science*, Chicago: University of Chicago Press 1995; vgl. auch Andrew Pickering: Preface, in: Ders. (Hg.): *The Mangle in Practice. Science, Society, and Becoming*, Durham/London: Duke University Press 2008, vii-xiv, S. viif.

70 | Ich postuliere hier die Hypothese einer Filiation zwischen den Vorstellungen Gabriel Tardes und den Überlegungen Michel Foucaults, die sicher auch über die Vermittlung von Deleuze und Guattaris *Mille plateaux* verlaufen ist.

einer Überführung der biotechnologischen Akteure von einem hochartifiziiellen in ein natürliches Milieu nach sich ziehen, in dem deren Verhalten noch weit unkontrollierbarer sein dürfte als in ersterem Milieu). Anstatt diese technischen Objekte so als finalistische Leistungsmaschinen für nützliche Arbeit zu begreifen, wäre es sinnvoller, diese zunächst in ihrer Technizität zu betrachten: Als experimentelle Objekte, die nicht nur ihre Konstrukteure durch ihre Funktionsweise überraschen,⁷¹ sondern deren Funktionsweise auch nicht durch die Vorgabe eines Projekts oder die Übertragung von mechanistischen Metaphern in den Bereich des Lebendigen präjudiziert wird, denn diese bringen es nicht nur dem Lebendigen keineswegs näher, sondern verfehlen noch das Potenzial des Technischen durch die Hypertelie: »Die Evolution der technischen Objekte kann nur in dem Maße zum Fortschritt werden, in dem die technischen Objekte frei in ihrer Evolution sind und nicht durch Sinn und Richtung einer fatalen Hypertelie erfordert werden.«⁷²

71 | Vgl. Guichet, *Nature et artifice dans les nanotechnologies*, 2008, S. 22.

72 | Simondon, *Die Existenzweise technischer Objekte*, 2012, S. 52.

10. Synthese von Maschine und Biologie

Organische Maschinen und die Mechanisierung des Lebens

Georg Trogemann

Seit Bakterienkolonien als Rechenmaschinen auftreten und Schleimpilze Ingenieursaufgaben lösen, drängt eine beantwortet geglaubte Frage zurück auf die Tagesordnung: Was ist eine Maschine? Die ursprüngliche Auffassung von der Maschine ist die eines mechanischen Gebildes, das sich im Hinblick auf einen Zweck und durch konkrete konstruktive Eigenschaften definiert. Die Mechanik bezeichnet bereits Hebel, Keile, Zahnräder, Winden, Flaschenzüge, Schrauben und schiefe Ebenen als einfache Maschinen und gewinnt komplexere Maschinen aus der Kombination dieser Grundelemente. In derartigen Vorstellungen sind physikalische Grundprinzipien vermengt mit der inneren Konstruktion und dem äußeren Zweck der Maschine. Definitionen dieser Art helfen, Maschinen als solche zu erkennen und von anderen künstlichen Dingen zu unterscheiden, der Kern des Maschinellen erschließt sich daraus allerdings nicht.

Zentrales Kennzeichen der Maschine ist das durch sie ausgedrückte Streben nach Unabhängigkeit von menschlicher Direktive und nach nichtreflektierter Wiederholung von erreichten Einsichten. Ein einmal verstandener Arbeitsprozess oder auch eine reflektierte Kette von Gedanken und Schlussfolgerungen wird funktionalisiert, d.h. in eine Folge elementarer materieller Handlungen übersetzt und dadurch der apparativen Lösung zugänglich. Entscheidend ist dabei nicht, mit welchen physikalischen Prinzipien oder in welchem Material die Maschine realisiert wird, sondern ob sie in der Umgebung, in die sie eingebettet ist, die gewünschte Leistung erzielt. Das Weiterdenken der Trennung zwischen Funktion und materieller Realisierung führt in letzter Konsequenz zur ›Symbolischen Maschine‹, die vollständig auf dem syntaktischen Spiel der Mathematik basiert, mechanisch mit Zeichen zu operieren.¹ Die einzelnen Zeichen repräsentieren dann nur noch jene Eigenschaften realer Bestandteile von Maschinen, soweit diese notwendig sind, das angestrebte ›Verhalten‹

1 | Zum Begriff der Symbolische Maschine vgl. Sybille Krämer: *Symbolische Maschinen. Die Geschichte der Formalisierung in historischem Abriß*, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1988.

der Maschine zu erzeugen. Dieses zunehmend abstraktere Verständnis von Maschinen steht in einem seltsamen Widerspruch zu gegenwärtigen Anstrengungen im Bereich der Synthetischen Biologie. Hier erhofft man sich gerade durch den Einsatz organischen Materials grundlegend neue technische Möglichkeiten. Gleichzeitig wissen wir, wann immer man einen Vorgang technisch fasst, wird dieser unweigerlich mechanisiert. Gehören deshalb nicht auch Aktivitäten von Organismen, sobald sie technisch domestiziert werden, zwangsweise zum Haus der Maschine? Kann die Biologie also die in sie gesetzten Erwartungen überhaupt erfüllen oder liegt die Begrenzung nicht schon immer auf der Seite des maschinellen Denkens?

Es stellt sich insbesondere die Frage, ob die neuen biologisch-basierten Syntheseverfahren das Potenzial haben, unsere gegenwärtige Vorstellung von der Maschine durch die Etablierung neuer biologischer Materialien herauszufordern. Bisher verfügen wir nicht über Handys, die ihren eigenen Gebrauch überwachen und anschließend die nächste verbesserte Generation von sich selbst herstellen. Was für das einzelne Gerät gilt, können wir für das umfassendere Gebiet der Informationsverarbeitung schon nicht mehr so einfach behaupten. Computer, auch bereits elektronische, spielen durchaus eine aktive Schlüsselrolle bei der Entwicklung ihrer jeweils nächsten Generation. Doch sind solche strukturellen Rückwirkungen schon ausreichend, um ein erweitertes Verständnis der Maschine einzufordern?

10.1 DIE MASCHINE

Die leitende Vorstellung von der Maschine war immer mit dem technologischen Entwicklungsstand der jeweiligen Zeit verbunden. Definitionen der Maschine sind also nicht statisch, sondern müssen immer angepasst werden, um mit neuen technischen Möglichkeiten und Praxen Schritt zu halten. Aus diesem Grund wurde unser Maschinenbegriff in der Vergangenheit mehrfach modifiziert. Mit den wachsenden maschinellen Möglichkeiten wurde der Begriff dabei immer ›abstrakter‹:

Abstraktion des Antriebs. Der Begriff der Energie erlaubt die Betrachtung unterschiedlicher Formen unter einem einheitlichen Konzept. Franz Reuleaux' Begriff der Maschine wurde beispielsweise vor dem Erscheinen der elektrischen, chemischen und nuklearen Energien formuliert.² Erst das Konzept der Energie erlaubte es, Technologien in das Maschinenkonzept zu integrieren, die keine makromechanisch bewegten Teile mehr besitzen.

2 | »Eine Maschine ist eine Verbindung von widerstandsfähigen Körpern, welche so eingerichtet ist, dass mittelst ihrer mechanische Naturkräfte genötigt werden können, unter bestimmten Bewegungen bestimmte Wirkungen auszuüben.« Franz Reuleaux: *Lehrbuch der Kinematik. Die praktischen Beziehungen der Kinematik zu Geometrie und Mechanik*, Bd. 2, Braunschweig: Vieweg 1900, S. 247.

Abstraktion der Struktur. Mit der maschinellen Erschließung neuer Energieformen haben wir gleichzeitig gelernt, dass Maschinen überhaupt nicht an bestimmte physikalische Realisierungen gebunden sind, sondern besser durch ihr funktionales Verhalten charakterisiert werden können. Die Gleichsetzung verschiedener materieller Realisierungen einer Maschine ist möglich durch die vermittelnde Rolle formaler Zeichensysteme, die für die präzise Notation ihres räumlichen, zeitlichen und logischen Verhaltens benutzt werden. Der Umgang mit formalen Zeichensystemen ist inzwischen eine zentrale und fachübergreifende Kompetenz in den ansonsten sehr unterschiedlichen natur- und technikwissenschaftlichen Disziplinen.

Abstraktion des Zwecks. Die Arbeit der Maschinen ist nicht mehr nur auf physische Arbeit konzentriert, sie umfasst auch geistige Arbeit und alle Formen der Kommunikation. Die Definition des Kybernetikers Georg Klaus demonstriert die Transformation, die der Maschinenbegriff durch das Erscheinen der informationsverarbeitenden Maschinen erfahren hat.

»Maschine: [...] jedes Gerät, jede Vorrichtung, jedes [...] System, das einen bestimmten Input (bzw. bestimmte Typen von Inputs) zu einem bestimmten Output (bzw. bestimmten Typen von Outputs) verarbeitet. Unter diesem Gesichtspunkt ist jede Maschine identisch mit dem materiellen Modell einer bestimmten Transformation. Diese Verallgemeinerung des klassischen Maschinenbegriffs ist notwendig, wenn stoffbearbeitende und -verarbeitende Maschinen, Maschinen zur Gewinnung bestimmter Energieformen aus anderen Energieformen und zur Übertragung usw. von Energie sowie Maschinen zur Erzeugung, Übertragung, Speicherung von Information unter einen Oberbegriff gebracht werden sollen.«³

Dieses Verständnis der Maschine als Input-Output-Gerät ist fast ununterscheidbar von der abstrakten Definition des *Systems* in der Systemtheorie. Der einzige Unterschied scheint zu sein, dass die Maschine am Ende immer noch eine materielle Realisierung braucht. Selbst wenn das tatsächlich verwendete Material unwichtig ist, solange es gestattet, die gewünschte Funktion zu realisieren.

Entscheidend für das Verständnis von Maschinen sind also weniger bestimmte Materialeigenschaften oder physikalische Prinzipien, sondern die übergreifenden technischen Organisationsformen. Nach Drew Endy hängt der durchschlagende Erfolg des Ingenieurwesens vor allem damit zusammen, dass es dort gelungen ist, allgemeine technische Prinzipien zu entwickeln, die eine routinierete und effiziente Herstellung komplexer und trotzdem zuverlässiger Artefakte garantieren.⁴ Dafür sind seiner Ansicht nach genau drei Prinzipien verantwortlich: »Standardisierung«, »Entkopplung« und »Abstraktion«. Standardisierung

3 | Georg Klaus (Hg.): *Wörterbuch der Kybernetik*, Bd. 1, Frankfurt a.M.: Fischer 1971, S. 380.

4 | Vgl. Drew Endy: Foundations for Engineering Biology, in: *Nature*, 438, 2005, 49-453, S. 450.

bezieht sich auf die Bereitstellung einer begrenzten Menge vordefinierter und technisch aufbereiteter Materialien, die industriell hergestellt werden und sich spezifikationsgemäß verhalten. Hinter dem Prinzip der Entkopplung steht die Idee, komplizierte Aufgaben in eine Reihe einfacherer Aufgaben zu zerlegen, die unabhängig voneinander bearbeitet werden können, zusammen aber ein funktionierendes Ganzes ergeben. Unter dem Begriff Abstraktion hält Endy zwei Verfahren für bedeutsam: Abstraktionshierarchien und Re-Modellierungen.

Abstraktionshierarchien sind ein mächtiges und nicht nur für die Technik, sondern für alle Organisationsprobleme unverzichtbares Strukturierungshilfsmittel. Sie erlauben es, Lösungen für eine Abstraktionsebene zu erarbeiten, ohne sich um die parallel existierenden weiteren Ebenen kümmern zu müssen. Der Austausch und die Interaktion zwischen den Ebenen werden dafür eingeschränkt und streng definiert. Ein zweites von Endy diskutiertes Abstraktionsprinzip ist das der ›Modellverfeinerung‹, das bis zu einem gewissen Grad auch mit natürlichen Selektionsprinzipien verglichen werden kann, weil es das Vorgehen widerspiegelt, wie über mehrere technische Generationen Lösungen optimiert werden können. In *CodeArt* haben wir vergleichbare Grundprinzipien für die Konstruktion und Handhabung komplexer Systeme beschrieben.⁵ Wir unterscheiden ›Module‹, ›Hierarchien‹ und ›Abstraktionen‹. Das wichtige Prinzip der Hierarchisierung komplexer Systeme wird dort weiter unterteilt in ›Skalenhierarchien‹, ›Kontrollhierarchien‹ und ›Abstraktionshierarchien‹. Diese Methoden, die wir für komplexe Softwaresysteme näher beschreiben, werden auch bei der Weiterentwicklung der Biotechnologien zur Ingenieursdisziplin eine wichtige Rolle spielen. Der vorliegende Artikel behauptet, dass für die adäquate Beschreibung biologischer Maschinen darüber hinaus ein weiteres abstraktes Organisationsprinzip näher betrachtet und weiterentwickelt werden muss – ›selbstreferenzielle Strukturen‹. Sie sind der Schlüssel und das markante Merkmal biologisch-basierter Technologien.

Die Biotechnologien beginnen gerade erst die Synthese von Organismen als Ingenieursproblem zu begreifen und Verfahren für biologische Artefakte bereitzustellen, die es erlauben, zuverlässig vordefiniertes Verhalten zu erzeugen. Es ist noch nicht entschieden, ob und gegebenenfalls welche Grenzen den technischen Prinzipien der ›Modularisierung‹, ›Hierarchisierung‹ und ›Abstraktion‹ im Biologischen gesetzt sind. Es ist andererseits leicht vorherzusehen, dass wir schon bald einer neuen Art von Artefakten gegenüberstehen werden. Sobald wir organische Maschinen produzieren, die nach allen uns zur Verfügung stehenden Unterscheidungskriterien ›leben‹, deren Herstellung aber gleichzeitig den technischen Prinzipien der Standardisierung, Entkopplung und Abstraktion unterliegen, kommt es zwangsweise zur Kollision objektiver und subjektiver Beschreibungsebenen. Neben den objektiven technischen Möglichkeiten, die Funktionsweisen biologi-

5 | Vgl. Georg Trogemann, Jochen Viehoff: *CodeArt – Eine elementare Einführung in die Programmierung als künstlerische Praktik*, Wien/New York: Springer 2005, S. 189ff.

scher Artefakte zuverlässig auf der Basis von Modulen, Hierarchien und Abstraktionsniveaus zu beschreiben, stehen wir dann der subjektiven Frage gegenüber, wie es sich anfühlt, dieser Organismus zu sein. Wir kommen im fünften Abschnitt auf dieses Problem zurück.

Westliche Technik hatte bereits seit dem 16. Jahrhundert ein Niveau erreicht, auf dem Maschinen lebensähnliche Eigenschaften zu zeigen begannen; es gab aber immer eine klare Grenze zwischen Natur und Technik. Während lebende Systeme selbstreplizierend und selbsterhaltend waren, haben sich Maschinen nicht selbst erzeugt und reproduziert, sie mussten von Menschen fabriziert werden und verlangten nach menschlicher Überwachung und Steuerung. Wenn wir die Beziehungen zwischen Maschinen und der Biologie aufdecken wollen, müssen wir vor allem ›Organismen‹ als die primäre Einheit des Lebens betrachten. Die beiden Begriffe ›Organismus‹ und ›Leben‹ stehen im Zentrum der theoretischen Fundierung der Biologie. Grundlegende Lebensprozesse wie Reproduktion, Metabolismus, Verhalten, Selbsterhaltung und Selbstregulation sind Eigenschaften von Organismen. Manfred Laubichler weist darauf hin, dass die Neuformulierung und Formalisierung unserer Vorstellung von Organismen eine zentrale Bedeutung in der Biologie des 21. Jahrhunderts einnehmen wird.⁶ Das Konzept der Funktion ist in der Biologie eng verbunden mit technischen Funktionen, zum Beispiel als Teil von Maschinen oder Artefakten die verknüpft sind mit Intentionalität und Teleologie. Für Laubichler ist die formale Beschreibung von Organismen der Startpunkt für mathematische Modelle und theoretische Reflexionen insbesondere in der Evolutions-, Entwicklungs-, Neuro- und Immunbiologie. Er stellt weiterhin fest, dass der neu propagierte Organismusbegriff sich schwer von anderen grundlegenden Konzepten, vor allem dem des *Systems* trennen lässt und fragt: »Unterscheiden sich Organismus- und Systembegriff überhaupt und, wenn ja, inwiefern spielen diese Unterschiede eine Rolle?«⁷ Sowohl Biologie als auch Technik kommen damit bei immer abstrakteren Begriffen und formalen Notationen – wie dem des *Systems* – an. Was wir vorher für den Begriff der Maschine beobachten konnten, scheint sich in der Biologie zu wiederholen.

Da die Systemtheorie starke Gemeinsamkeiten mit Norbert Wiensers Kybernetik aufweist, kommt an dieser Stelle eine weitere Metatheorie ins Spiel. Wiensers Kybernetik-Ansatz versuchte explizit, die Kommunikation und Kontrolle in Lebewesen und Maschinen auf die gleiche Basis abstrakter Mechanismen zu stellen. Die Kybernetik hat also von Anfang die Ähnlichkeiten zwischen lebenden Systemen und Maschinen untersucht. Durch die Konzentration auf Fragen der Autonomie, Kognition, Selbstorganisation und insbesondere die Rolle des Beobachters bei der Modellierung von Systemen wurde ab ca. 1970 die ›Kybernetik zweiter Ordnung‹ formuliert. Mittlerweile wurden die zentralen Ideen der Kybernetik

6 | Vgl. Manfred Laubichler: Systemtheoretische Organismuskonzeptionen, in: Ulrich Krohs, G. Toepfer (Hg.): *Philosophie der Biologie*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 2005, S. 123.

7 | Vgl. Laubichler, Systemtheoretische Organismuskonzeptionen, 2005, S. 123.

von anderen Disziplinen assimiliert. In den Ansätzen zum *Artificial Life* gilt Leben als Eigenschaft der Organisation von Materie und nicht als Eigenschaft der Materie selbst. Diese Feststellung deckt sich wiederum mit unserem Verständnis der Maschine. Sie muss ebenfalls als Organisationsform beschrieben werden und nicht als Eigenschaft der Materie. Und die allgemeine Methode, mit der wir heute Organisationsprinzipien beschreiben, sind formale Zeichensysteme.

In Rekapitulation des ersten Abschnitts sind vier Punkte herauszustellen: 1. Die entscheidende Eigenschaft von Maschinen, verglichen mit anderen technischen Artefakten wie zum Beispiel Werkzeugen ist die in Ihnen angelegte Unabhängigkeit von menschlicher Direktive. Alle Maschinen streben nach nichtreflektierter Wiederholbarkeit. Eine einmal erreichte Einsicht in einen Prozess oder eine Kette von Gedanken wird funktionalisiert und dadurch der technischen Realisierung zugänglich. Innerhalb dieses Vorgehens sind formale Modelle und symbolische Beschreibungen sehr handliche Verfahren um Einsichten zu funktionalisieren. 2. Die materielle Basis von Maschinen ist verglichen mit ihrer logischen Form sekundär. Die fortschreitende Abstraktion von Kontrollmechanismen für Maschinen hat zur Einsicht geführt, dass die wesentlichen Eigenschaften jeder Kontrollstruktur durch Systeme von abstrakten Regeln erfasst werden können. Folglich ist die zeitgemäße Entsprechung der Maschine die formalisierte Prozedur, das heißt: der ›Algorithmus‹. 3. Die Biologie lässt ebenfalls eine zunehmende Tendenz erkennen, Organismen und Leben auf der Basis von formalen Modellen zu beschreiben. Auf dem Gebiet des Artificial Life (AL) führt dieser Trend zur grundlegenden Annahme, dass Leben von seiner materiellen Basis getrennt werden kann und damit Lebendigkeit zur Eigenschaft der logischen Form wird. Für die Beschreibung organischer Systeme und lebendiger Maschinen müssen wir eine besondere logische Form heranziehen – die Selbstreferenzialität. Im Zuge der Untersuchung logischer Antinomien wurden selbstreferenzielle Formalismen in der Mathematik und philosophischen Logik ausgiebig untersucht. Während sich die Selbstbezüglichkeit dort vor allem als Problem darstellt, erweist es sich für die Beschreibung lebensähnlicher Maschinen als zentraler Lösungsansatz. 4. Die Verschmelzung technischer Prinzipien (zum Beispiel Modularisierung, Hierarchisierung und Abstraktion) mit Lebewesen führt zur Kollision objektiver und subjektiver Beschreibungsniveaus. Reicht es noch aus, diese künstlichen Lebewesen als technische Objekte zu behandeln? Ab wann müssen wir synthetischen Organismen subjektive Qualitäten zuschreiben?

10.2 SYMBOLISCHE MASCHINEN UND UNIVERSELLE COMPUTER

Während der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden die Grundlagen für die Beschreibung der logischen Form der Maschine gelegt. Die Mathematik wurde als mechanischer Prozess für die Manipulation von Zeichen aufgefasst. Berechenbarkeitstheorie in dieser Zeit hat die Frage gestellt: Was lässt sich effektiv automatisieren? Oder anders herum: Gibt es präzise formulierbare Probleme, die von keiner denkbaren Maschine und keinem vorstellbaren Zeichensystem jemals gelöst werden können? Um diese Fragen zu beantworten, wurden formale Beschreibungen entwickelt, die präzise erfassen, was wir genau unter einem ›Problem‹ verstehen oder einer effektiven Prozedur, die dieses Problem löst. Die formalen, operativen Modelle von effektiven Prozeduren nennen wir ›Algorithmen‹. Unser gegenwärtiger Begriff des Algorithmus geht zurück auf mathematische Arbeiten vieler Mathematiker in der 1930er Jahren, zum Beispiel Alan Turing, Alonzo Church, Kurt Gödel und Emil Post, um nur einige zu nennen. Mittlerweile existiert eine Vielzahl von Berechnungsmodellen, die sich in Bezug auf ihre Mächtigkeit als vollständig äquivalent erwiesen haben. Trotz beträchtlicher Unterschiede in den formalen Darstellungen teilen sie alle einige gemeinsame Charakteristiken: 1. Effektive Prozeduren werden aus einer Reihe von elementaren Schritten zusammengesetzt, die während der eigentlichen Berechnung nacheinander ausgeführt werden. 2. Es wird nur eine bestimmte Zahl unterschiedlicher elementarer Operationen benötigt. 3. Jede einzelne Rechenoperation wie auch die Auswahl des nächsten auszuführenden Schrittes ist deterministisch. Vom theoretischen Standpunkt wird nichts sonst vorausgesetzt, um das komplette berechenbare Universum zu konstruieren. Aus Effizienzgründen wurde eine Reihe weiterer Konzepte entwickelt, die die Beschreibung und Realisierung zuverlässiger und wieder verwendbarer Recheneinheiten erlauben. Am Wichtigsten ist die Kapselung von Operationsfolgen und ihrer zugehörigen Operanden zu neuen elementaren Einheiten sowie die Schachtelung dieser Einheiten in Hierarchien. Im Grunde finden wir hier alle technischen Organisationsprinzipien wieder, die wir oben beschrieben haben. Aus diesem abstrakten Blickwinkel sind Algorithmen ein sehr allgemeines Konzept, das nicht nur Rechenprobleme beschreiben kann, sondern ebenso Arbeitszyklen im Handwerk oder Abläufe in Institutionen. Um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden, setzen wir in der strengen Definition von Algorithmen ein formales Beschreibungssystem voraus.

Ein Rechenmodell, das leicht zu verstehen ist und strukturell nahe an tatsächlich gebauten Maschinen, ist die Random Access Machine (RAM), ein Formalismus aus der Klasse der sogenannten ›Registermaschinen‹. Die ursprüngliche Definition der RAM geht zurück auf John Sheperdson und Howard Sturgis aus dem Jahre 1963.⁸ Die folgende Menge von Operationen ist nur eine mögliche Variante,

8 | John Sheperdson, H. Sturgis: Computability of Recursive Functions, in: *Journal of the ACM*, 10, 1963, 217-255.

in der Literatur ist eine Vielzahl weiterer leicht abgeänderter Mengen von Elementaroperationen beschrieben. Die Grundeinheit ist eine potenziell unendliche Zahl von ›Zellen‹, wobei jede einzelne Zelle eine Speichereinheit darstellt, die aus einem ›Ort‹ (spezifiziert durch einen Index) und einem ›Inhalt‹ (eine natürliche Zahl) besteht. Die folgende Menge von Elementaroperationen kann für die Zellen definiert werden:

Operationen auf den Zellen

- 1) $A_i = 0$; //setze den Wert der Zelle A_i auf Null
- 2) $A_i = A_i + 1$; //erhöhe der Wert der Zelle A_i um 1
- 3) $A_i = A_i - 1$; //verringere der Wert der Zelle A_i um 1
- 4) while ($A_i \neq 0$) { //Schleifenbedingung
 - ...
 - ... führe Operationen aus 1 – 4 aus
 - ...
 - }

Jede Folge von Elementaroperationen definiert eine Maschine. Der ›while‹-Operator ist das zentrale Kontrollkonstrukt, das eine nichtlineare Ausführung des Programms realisiert. Abhängig vom Zwischenergebnis der Zellen während der Programmausführung werden Befehle des Programms ausgeführt oder übersprungen.

Die Random Access Stored Program Machine (RASP) ist eine RAM, die sowohl die Daten als auch das Programm im gleichen Speicher hält. In diesem allgemeinen Fall ist die Maschine gleichmächtig zu einer ›Universellen Turing Maschine‹ und liegt gleichzeitig sehr nahe bei der Beschreibung der praxisrelevanten Von-Neumann-Architektur. An dieser Stelle kommt ein entscheidender Unterschied zwischen einer ›Turingmaschine‹ und einer Universellen Turingmaschine ins Spiel. Der Formalismus zur Beschreibung von Turingmaschinen ist ausreichend mächtig um alle denkbaren Rechenmaschinen damit anzuschreiben. Jeder einzelne auf diese Weise definierte Algorithmus ist eine eigene Maschine. Die Stärke der universellen Maschine liegt gerade darin, mit einer einzigen Hardware alle anderen Maschinen nachbilden zu können und die notwendige Flexibilität für die Lösung unterschiedlicher Aufgaben hin zur Software zu verschieben. Dieser Trick wurde von Alan Turing wie folgt beschrieben:

»The importance of the universal machine is clear. We do not need to have an infinity of different machines doing different jobs. A single one will suffice. The engineering problem of producing various machines for various jobs is replaced by the office work of ›programming‹ the universal machine to do these jobs.«⁹

9 | Alan Turing: *Intelligent Machinery*, The Turing Digital Archive. www.turingarchive.org/viewer/?id=127&title=8 (Abruf 3.3.2012).

Eine ›universelle Maschine‹ ist in der Lage, die Beschreibung jeder anderen Maschine zu lesen und auszuführen. Auf diese Weise kann eine universelle Maschine jede andere Maschine simulieren. Alle handelsüblichen Desktop Rechner sind universelle Maschinen. Ihr Betriebssystem erlaubt es, Programme zu editieren oder zu laden und sie auszuführen. Da sowohl das Programm als auch die Daten als Zeichen codiert sind, kann die universelle Maschine das Programm lesen und entsprechend der beschriebenen Befehle die Daten manipulieren, sondern im Prinzip auch das Programm selbst umschreiben. Ein bestimmtes Problem durch das Schreiben eines RAM-Programms oder eines Turing-Programms zu lösen, erfordert die Entscheidung über jeden einzelnen Schritt, den die Maschine unter gegebenen Bedingungen, d.h. dem jeweiligen Zustand der Speicherzellen (oder des Bandes im Falle der Turingmaschine) ausführen wird. Der Programmierer ist verantwortlich für die Auswahl der geeigneten Elementaroperationen um eine bestimmte Aufgabe zu erledigen. Trotz der großen Fortschritte bei den Programmiersprachen, zum Beispiel durch objektorientierte Ansätze oder genetische Programmierung, werden Programme durch den Compiler immer noch heruntergebrochen in Sequenzen elementarer Befehle, die den Operationen der RAM durchaus ähnlich sind.

Konzepte wie das der RAM oder der universellen Turingmaschine sind nicht zuletzt deshalb so wichtig, weil sie zeigen, dass die materiellen Anforderungen an den universellen Rechner erstaunlich gering sind. Die Hardware muss lediglich ein paar wenige elementare Operationen ausführen können. Wie und auf welcher materiellen Basis diese Hardware realisiert wird, ist vollständig irrelevant im Hinblick auf die Funktionalität der Maschine. Die Reihenfolge der Operationen und damit die Funktion der Maschine wird durch die Software festgelegt. Wichtig für unsere weiteren Betrachtungen ist die Tatsache, dass jedes universelle Modell des Rechnens im Zentrum ein selbstreferenzielles Kontrollelement benötigt. Im Falle der RAM ist dies der ›while‹-Operator, der eine indirekte Form der Selbstreferenz realisiert. Abhängig vom Inhalt der Zelle A_i innerhalb des ›while‹-Konstrukts wird der von der Bedingung eingeschlossene Block von Operationen zwischen den geschweiften Klammern ausgeführt oder nicht. Der Inhalt der Zelle A_i kann aber selbst ein Resultat vorhergehender Operationen des Programms sein. Dadurch kontrolliert sich der gesamte Berechnungsvorgang abhängig von bestimmten Zwischenresultaten selbst. Ein Programm antizipiert vollständig die Zukunft der Maschine. Einen Algorithmus zu implementieren heißt gerade nicht, die tatsächliche ausgeführte Reihenfolge von Operationen schon vor dem Programmablauf festzulegen, sondern es bedeutet vielmehr, dass für jeden Zustand den der Berechnungsprozess während seiner Berechnung erreicht, das Programm aus sich selbst heraus sicherstellt, dass der nächste Schritt eindeutig bestimmt ist. Diese Form der Selbstreferenz war von Anfang an bedeutend für die Konstruktion universeller Berechnungsmodelle. Ähnliche Selbstreferenzen stehen auch im Zentrum der Rekursionstheorie und den Feedbackstrategien der Kybernetik.

10.3 BIOLOGIE UND RECHNEN

In letzten Abschnitt haben wir gesehen, dass es drei Beteiligte im Spiel des automatisierten Rechnens gibt: den Programmierer, den Formalismus und das Material (Hardware). Bei klassischen Maschinenkonzepten sorgen Formalismus (Programme, Operationsfolgen) und Programmierer (Problemanalyse, Schlussfolgerung, Interpretation und Handhabung von Input/Output-Relationen) für die notwendige Flexibilität bei der Problemlösung und die Hardware ist der invariable Teil der Berechnung. Diese Starrheit der Hardware wird bei biologischen Maschinen aufgegeben. Die Entstehung und Wiederauflösung der Maschine wird selbst Teil des Rechenprozesses.

Im zurückliegenden halben Jahrhundert, in dem wir Erfahrungen mit den schrittweisen, deterministischen Berechnungsmodellen sammeln konnten, haben sich verschiedene praktische Limitationen des Ansatzes gezeigt. Trotz der theoretischen Universalität im Sinne Turings sind elektronische Schaltkreise schon aufgrund ihrer technischen Randbedingungen inflexibel. Nachdem sie einmal hergestellt sind, können sie sich nicht evolutionär und adaptiv an sich ändernde Bedingungen und Aufgaben anpassen, was oft zu zeit-, ressourcen- und energieineffizienten Lösungen führt. Computerarchitekturen, die auf dem klassischen Modell der sequenziellen Verarbeitung basieren, sind auch nicht besonders geeignet, um Probleme nichtlinearer Komplexität in Bezug auf Zeit- und Speicherplatzbedarf zu handhaben. Synthetische Biologie mit ihrer ›flüssigen‹ skalierbaren Hardware scheint neue Möglichkeiten zu bieten, die Begrenzungen der klassischen Modelle zu überwinden.¹⁰ Auch die klassische algorithmische Methode war bereits stark durch Prinzipien beeinflusst, die wir aus der Beobachtung der Natur gelernt haben. Evolutionäre Algorithmen, künstliche neuronale Netzwerke, Schwarmverhalten und L-Systeme sind nur einige Beispiele. Biologie und Technologie treffen sich nicht nur in bestimmten Praxen, es gab immer auch die Notwendigkeit übergreifender Betrachtungsweisen und gemeinsamer Modellierungen. Obwohl es schon früh eine Reihe produktiver Verbindungen zwischen der Informatik und der Biologie gab, wird die angestrebte Dynamisierung der Hardware auf dem Gebiet des biomolekularen Rechnens möglicherweise unser praktisches Verständnis des Rechnens und schließlich unseren theoretischen Begriff des Algorithmus verändern. Die theoretische Turinggrenze der Berechenbarkeit mag auch für biologische Maschinen gelten, auch wenn diese Frage kontrovers diskutiert wird. Obwohl biologisches Rechnen sich noch in einem Status der Laborexperimente befindet, wurden die Bedeutung biologischer Prozesse und die Eigenschaften organischen Materials für das automatisierte Rechnen von Beginn an erkannt und formuliert.

10 | Vgl. beispielsweise Cheemeng Tan, H. Song, J. Niemi, L. You: A synthetic biology challenge: making cells compute, in: *Molecular BioSystems*, 3, 2007, 343-353.

Um eine konkretere Vorstellung von biologischen Maschinen zu vermitteln, betrachten wir zunächst einige Beispiele: (1) Bakteriencomputer, die das Hamiltonpfad-Problem lösen. (2) Schleimpilze, die den kürzesten Weg in einem Labyrinth finden. (3) Biologisch inspirierte Robotik und (4) das unüberschaubare Feld der Cyborg-Technologien, die ebenfalls unter dem Gesichtspunkt der biologischen Maschine betrachtet werden können.

- (1) Das mathematische Hamiltonpfad-Problem (HPP) fragt, ob es eine Sequenz von Knoten, ausgehend von einem Startknoten zu einem Endknoten, innerhalb eines gerichteten Graphen gibt, sodass auf diesem Weg jeder Knoten genau einmal besucht wird. Biologen ist es gelungen Bakterien innerhalb eines genetischen Kreislaufes so zu »programmieren«, dass alle möglichen Pfade automatisch generiert werden können und Hamiltonpfade dabei besonders markiert sind.¹¹ Die Abbildung des Problems von der DNA-Sequenz der Bakterien auf die Knoten und Kanten eines Hamiltonpfades erfordert mehrere Abstraktionsschritte. Bei dieser mehrstufigen Codierung modellieren DNA-Sequenzen die Kanten eines gerichteten Graphen. Knoten, mit Ausnahme des Endknotens, werden als in zwei Hälften gesplante Gen-Abschnitte behandelt. Die erste Hälfte des Gens findet sich auf jeder DNA-Kante, die in diesem Knoten terminiert; die zweite Hälfte des Gens findet sich in jeder DNA-Kante, die von diesem Knoten ausgeht. Jeder Knoten des Graphen ist durch ein Gen repräsentiert, das einen beobachtbaren Phänotyp codiert. Bakterienkolonien, die einen Hamiltonpfad beinhalten, werden dadurch eine einzigartige Kombination von Phänotypen aufweisen, die direkt detektiert oder herausgefiltert werden können.¹² Die Anzahl der Permutationen der Kanten des Graphen wächst sehr schnell mit der Zahl der Kanten. Für einen Graphen mit n Kanten gibt es $n!/2^n$ mögliche Kantenkonfigurationen. Der wachsenden Berechnungskomplexität wird durch eine exponentiell wachsende Zahl von »Verarbeitungselementen« (den Bakterien) begegnet. Die gesamte Population der Bakterien bildet den Computer. Eine wachsende Bakterienkolonie wird eine riesige Zahl unterschiedlicher Kantenkonfigurationen produzieren. Aber wir können nie sicher sein, dass sich eine HPP-Lösung in der wachsenden Kolonie befindet. Die Entwickler des Bakteriencomputers zeigen,¹³ dass für eine 99.9 prozentige Sicherheit in einen Graphen mit 14 Kanten einen HPP zu finden mindestens eine Milliarde unabhängige, gleichverteilte Bakterien not-

11 | Vgl. Jordan Baumgardner, K. Acker, O. Adefuye, et al.: Solving a Hamiltonian Path Problem with a bacterial computer, in: *Journal of Biological Engineering*, 3:11, 2009. www.jbioleng.org/content/3/1/11 (Abruf 3.3.2012).

12 | Für Details siehe Baumgardner, Acker, Adefuye, et al., Solving a Hamiltonian Path Problem with a bacterial computer, 2009.

13 | Vgl. Baumgardner, Acker, Adefuye, et al., Solving a Hamiltonian Path Problem with a bacterial computer, 2009.

wendig sind, die andererseits über Nacht aus einer einzigen Kultur entstehen können. Die gezielte Herstellung mutierender Bakterien wird hier benutzt, um ein mathematisches Problem zu lösen.

- (2) Schleimpilze (*Plasmodium*) wurden im Hinblick auf ihre Rechenfähigkeiten wissenschaftlich ausführlich untersucht. Es wurde gezeigt, dass dieser einfache Organismus die Fähigkeit hat, das Problem des kürzesten Pfades in einem Irrgarten zu lösen. Wenn Futter an verschiedenen Punkten eines Labyrinths platziert wird, adaptiert der Schleimpilz sein Wachstumsverhalten zwischen diesen Punkten und markiert auf diese Weise den kürzesten Pfad zwischen den beiden Futterstellen. Für das Eisenbahnnetz von Tokio wurde nachgewiesen, dass der Schleimpilz *Physarum Polycephalum* Röhrensysteme ausbildet, die im Hinblick auf Effizienz, Fehlertoleranz und Kosten mit dem von Ingenieuren entworfenen und tatsächlich gebauten Netzwerk vergleichbar sind.¹⁴ Der adaptive Prozess des wachsenden Schleimpilzes wurde zusätzlich auch mathematisch als Feedback-Mechanismus modelliert. Dieses formale Modell bildet somit ein Bindeglied zwischen Organismus und Berechnung.
- (3) Maschinen sind schlecht darin, sich an Teilausfälle und unerwartete Beschädigungen anzupassen. Normalerweise bricht die Leistung der gesamten Maschine zusammen und die Funktion erleidet einen Totalausfall. Tiere dagegen entwickeln qualitativ neues kompensatorisches Verhalten, wenn sie mit solchen Problemen konfrontiert werden. Die Robotik versucht deshalb Maschinen zu entwickeln, die sich von Funktionsstörungen erholen können. Ein wichtiges Element auf dem Weg zu dieser Form der Adaption ist die Implementierung einer kontinuierlichen Selbstmodellierung. In der Arbeit von *Josh Bongard et al.* nutzt eine vierbeinige Maschine Aktivierungs-Empfindungs-Beziehungen, um indirekt auf die eigene Struktur zurückzuschließen. Darauf aufbauend kann sie dieses Eigenmodell nutzen, um Vorwärtsbewegung zu generieren.¹⁵ Wenn Teile der Maschine entfernt werden, wird das Eigenmodell automatisch angepasst und werden alternative Gangarten generiert.
- (4) Da die Konstruktion sehr kleiner Flugmaschinen, die gute Flugeigenschaften in natürlichen Umgebungen zeigen, eine extrem schwierige Aufgabe ist, liegt die Idee nahe, die erstaunlichen Flugkünste von Insekten zu nutzen und deren Bewegung im Raum fernzusteuern. Ergebnisse aus Neurophysiologie und der Dynamik des Insektenflugs zusammen mit der fortschreitenden Miniaturisierung elektronischer Schaltkreise und der Verfügbarkeit von Funksystemen die nur wenig Energie verbrauchen hat zur Entwicklung von implantierbaren Interfaces geführt, die in der Lage sind den freien Flug von Insekten über einen längeren Zeitraum zu kontrollieren. Einzelne Forschergruppen

14 | Vgl. Atsushi Tero, S. Takagi, T. Saigusa, et al.: Rules for biologically inspired adaptive network design, in: *Science*, 327, 2010, 439-442, S. 439.

15 | Vgl. Josh Bongard, V. Zykov, H. Lipson: Resilient Machines Through Continuous Self-Modeling, in: *Science*, 314, 2006, 1118-1121.

haben damit begonnen, die Vorteile von Interfaces zu untersuchen, die bei der Verpuppung von Insekten implantiert werden:

»Beyond the issue of control, insects which undergo complete metamorphosis may present a unique system with which to study synthetic-organic interfaces. [...] Given the extensive re-working of the insect physiology during pupation, it is tempting to hypothesize that interfaces inserted during this period could somehow co-opt the developmental processes for an engineering advantage«.¹⁶

NP-vollständige Probleme wie das Hamiltonpfad-Problem sind ein typisches Anwendungsgebiet für biologisches Rechnen. Sie demonstrieren eindrucksvoll, wie Rechenprozesse durch die biologische Wachstumsprozesse beschleunigt werden können. Vom Standpunkt der Programmierung klassischer Computer wie der oben erwähnten RAM oder der Turingmaschine kann die Aufgabe wie folgt zusammengefasst werden: »Wie können wir eine Menge elementarer Operationen so aneinanderreihen, dass ein gewisser Typ von Endzuständen erreicht wird?« In der Molekularprogrammierung wird die Aufgabe neu formuliert: »Wie können wir eine Menge von Anfangsmolekülen so konfigurieren, dass sich daraus ein gewisser Typ von molekularen Komplexen formt?«¹⁷ Dies bedeutet eine gewaltige Veränderung in der Art und Weise Rechenmaschinen zu konstruieren und mit ihnen arbeiten. Der »Programmierer« biologischer Maschinen konzentriert sich nicht länger darauf, die richtige Sequenz von Elementaroperationen zu finden, sondern auf die geeignete Einstellung der Rahmenbedingungen eines sich selbstkontrollierenden biologischen Prozesses. Die involvierten biologischen Mechanismen sind nichtterminierend, massiv parallel, stochastisch, selbstreferenziell, adaptiv und selbstmodifizierend. In der Vergangenheit gab es eine Reihe von Versuchen die klassische von Neumann-Architektur zu erweitern, um ähnliche Qualitäten zu erreichen. In Bezug auf ihre Effizienz sind diese Ergebnisse noch immer relativ bescheiden. Auf der anderen Seite sind massiver Parallelismus, Adaption und Selbstmodifikation inhärente Eigenschaften von biologischen Systemen. Aber diese Eigenschaften stehen im Konflikt mit dem klassischen algorithmischen Ansatz des schrittweisen Determinismus bei dem Ort und Dauer jeder einzelnen Operation und damit die gesamte Maschinenaktivität vollständig der Kontrolle des Nutzers unterliegt.

Die vier skizzierten Beispiele sind sehr unterschiedlich. Sie sollen deutlich machen, wie breit unser Begriff der biologischen Maschine gefasst ist. Die Skala reicht von der Verwendung organischer Stoffe auf Molekularebene bis hinauf

16 | Hirotaka Sato, M.M. Maharbiz: Recent developments in the remote radio control of insect flight, in: *Frontiers in Neuroscience*, 4:119, 2010.

17 | Vgl. Grzegorz Rozenberg: The Nature of Computation and Computation in Nature, Acceptance speech on receiving an Honorary Degree from the University of Bologna, www.liacs.nl/~rozenber/bolognae.pdf (Abruf 3.3.2012).

zur technischen Manipulation und Imitation von Gliederfüßern. Was aber hat sich hier gegenüber früheren Ansätzen verändert? Die Technik hat sich schließlich schon immer biologischer Metaphern und biologischer Prinzipien bedient. Bisher galt: »Das Lebendige wird dem Toten unterworfen, es muss alle seine Eigenschaften als Lebendiges aufgeben, es wird benutzt wie totes Material, als Biomasse. – Denn: Das Lebendige funktioniert als Maschine nur, wenn es sein Leben verliert und die Eigenschaften des Toten annimmt.«¹⁸ Tatsächlich müssen wir Fälle, in denen wir organisches Material als leblose Biomasse verwenden, von Anwendungen unterscheiden, in denen wir Lebewesen technisch manipulieren oder gar synthetisch produzieren, die über Nervensysteme verfügen. Im letzten Abschnitt werden wir auf diese Problematik zurückkommen.

10.4 DIE FORMALISIERUNG DES LEBENS

Der deutsche Ingenieur Franz Reuleaux entwickelte im 19. Jahrhundert eine symbolische Notation zur Klassifikation von Maschinen:

»One of Franz Reuleaux's unique contributions to kinematics was the creation of a symbolic language with which to classify a machine, a syntax for kinematic devices which he proposed as a tool to address the problem of synthesis, a language for machine invention. In his quest for an alphabet of machine devices, Reuleaux built the world's largest collection of machine components, a dictionary of sorts of over 800 models. Using his symbolic system, along with his models, Reuleaux sought to deconstruct every machine that had been or would be invented in the future, a Genome project for the Machine Age.«¹⁹

Ein Klassifikationssystem, auch wenn es wie hier mit dem Genomprojekt verglichen wird, ist als formale Basis nicht ausreichend, um die Selbstreproduktion von Maschinen zu charakterisieren. Mechanische Reproduktion zu erfassen bedeutet, die Struktur der Maschine als Gewebe modifizierbarer Teile zu beschreiben. Diese Struktur muss dann durch sich selbst in der Lage sein, die Relationen der Teile untereinander immer wieder erneut zu rekonstruieren. Eine Möglichkeit besteht darin, als Zwischenstufe und Mittler eine symbolische Beschreibung der Maschine und ein mechanisches System einzuführen, die zusammen in der Lage sind, die Beschreibung in selbstkontrollierter Weise zu lesen und auszuführen.

Mathematisch ausgedrückt ist die einfachste Form einer Selbstreferenz auf formaler Ebene eine Variable y , die durch eine Funktion auf sich selbst abgebildet wird.

18 | Arno Bammé, G. Feuerstein, R. Genth, et al.: *Maschinen-Menschen Mensch-Maschinen, Grundrisse einer sozialen Beziehung*, Reinbek: Rowohlt 1983, S. 77.

19 | Francis Moon, F. Reuleaux: Contributions to 19th century kinematics and theory of machines, in: *Applied Mechanics Reviews*, 56(2), 2003, 261-285, S. 268.

$y = f(y)$ oder in iterierter, diskreter Form $y_{t+1} = f(y_t)$

Dabei können die Variable y und die Funktion f für unterschiedliche Typen von Zirkularität stehen. Die Variable y kann zum Beispiel eine Spannung in einem geschlossenen elektrischen Schaltkreis oder ein Bild innerhalb eines Videofeed-backs modellieren. Die Ausgabe wird ständig als neuer Input ins System zurückgeführt. Diese Form der Selbstreferenz ist in der Kybernetik, der Chaostheorie und der Selbstorganisationstheorie gut untersucht. Die Transformation f ist dabei fest, nur die Daten sind Gegenstand der Manipulation. Systeme, die sich von selbst zusammenbauen, markieren einen davon grundsätzlich verschiedenen Bereich selbstreferenzieller Probleme. Hier unterliegt im zeitlichen Verlauf des Vorgangs die Struktur des Systems selbst der Veränderung. Das Ziel ist, einen Prozess zu etablieren, der mit einigen einfachen Elementen beginnt und mit einem funktionsfähigen Artefakt endet, das genau bestimmbare Eigenschaften besitzt. Grundlegende physikalische Charakteristika solcher sich selbst erzeugender Systeme werden bei John A. Pelesko beschrieben. Er sieht in der Natur vier Schlüsselkomponenten der Selbstmontage am Werk:²⁰

Strukturierte Teilchen – Das sind die grundlegenden Montageelemente. Die innere Struktur dieser Partikel kann meist durch externe Stimuli modifiziert und auf diese Weise der Prozess kontrolliert werden. Ihr Aufbau beschränkt die Komplexität der entstehenden Artefakte.

Bindekräfte – Diese typischerweise reversiblen Kräfte halten die Montageelemente zusammen. Die Veränderung der Bindekräfte stellt eine weitere Möglichkeit zur Verfügung, das Verhalten des Systems zu kontrollieren.

Umgebung – Das ist die Summe aller Gegebenheiten und Verhältnisse, in denen sich die Teilchen befinden. Die Veränderung der Umgebung bietet ebenfalls eine Möglichkeit die Systemdynamik zu kontrollieren.

Antriebskraft – Die Antriebskraft stellt man sich als Störung vor. Ihr Vorhandensein stellt sicher, dass die Teilchen stochastisch interagieren können. Diese stochastische Interaktion ist das zentrale Prinzip, das den Prozess zwingt, auf dem Weg zum Endzustand unterschiedliche Konfigurationen zu durchlaufen.

Diese allgemeine Charakterisierung von Selbstmontageprozessen gilt sowohl für Mikrostrukturen wie biologische Zellen und Bakterien wie auch für makroskopische von Hand zu greifende Elemente, zum Beispiel Magneten, die auf einem Tisch angeordnet sind. Wenn die Behauptung gelten soll, dass formale und

20 | Vgl. John A. Pelesko: *Self Assembly – The Science of Things That Put Themselves Together*, Boca Raton: Chapman & Hall/CRC Press 2007.

selbstreferenzielle Modelle zentral für die Beschreibung von Organismen und von Lebendigkeit sind, dann muss es möglich sein, Peleskos physikalisch basierte Selbstmontage durch eine grundlegendere, material- und physikunabhängige Beschreibung zu ersetzen. Das Problem der Selbstmontage ist eng verbunden mit Problemen, die vom sogenannten ›bootstrapping‹ komplexer Systeme bekannt sind. Die Figur des ›bootens‹ ist die Bereitstellung immer leistungsfähigerer Funktionen während des Hochfahrens eines Systems.²¹ Der Vorgang beginnt mit der minimalen Fähigkeit, die notwendig ist, um die nächsthöhere Funktion zu starten. Diese wird dann wiederum benutzt, um wieder andere, noch komplexere zu realisieren und so weiter.

Selbstreplikation und Selbstreproduktion sind weitere Typen von Selbstreferenz. Douglas R. Hofstadter hat in seinem Buch *Gödel, Escher, Bach – An Eternal Golden Braid* auf die Parallelitäten zwischen formalen Mechanismen, die es einem System erlauben sich selbst zu reproduzieren und der biologischen Zellreplikation hingewiesen.²² Hofstadter untersucht intensiv sogenannte ›Quines‹, benannt nach dem amerikanischen Logiker Willard van Orman Quine. Quines sind selbstreplizierende formale Zeichensysteme, insbesondere Computerprogramme, die ihren eigenen Programmtext ausdrucken. Die Existenz von Quines ist in jeder Turing-vollständigen Programmiersprache durch das Fixpunkttheorem gewährleistet. Das Fixpunkttheorem wiederum greift zurück auf Cantors Diagonalbeweis. Wenn ein Quine-Programm auf einem Rechner ausgeführt wird, muss es exakt seine eigenen Instruktionen ausdrucken, ohne dabei auf die Quelldatei zuzugreifen. In den meisten Programmiersprachen ist es zudem nicht möglich, die eigene textuelle Repräsentation zu manipulieren. Um ein Quine zu schreiben, müssen wir also mit den elementaren Operationen zur Datenmanipulation auskommen, wie sie jede Programmiersprache zur Verfügung stellt.

Die Idee hinter der Realisierung von Quines kann am besten durch das syntaktische Konstrukt `write ›write‹` zusammengefasst werden. Das Wort `write` bezieht sich in diesem Fall auf Instruktionen und das Wort `›write‹` (in spitzen Klammern) auf Daten. Die Daten eines Quines sind weitestgehend eine Wiederholung der Instruktionen und können deshalb direkt aus diesen abgeleitet werden, im Wesentlichen indem sie in spitzen Klammern gesetzt werden. Während der Ausführung eines Programms werden die Daten zweimal benutzt. Zuerst benutzen die Instruktionen die Daten um die Instruktionen zu drucken. Dann benutzen die Instruktionen die Daten um die Daten zu drucken. Die zweite Zeichenfolge erhält man aus der ersten durch eine einfache algorithmische Transformation.

21 | Bootstrapping (von engl. *bootstrap* = Stiefelschlaufe) steht für ›sich an den eigenen Stiefeln herausziehen‹ und entspricht dem im Deutschen geläufigen Spruch des ›sich an den eigenen Haaren aus dem Sumpf ziehen‹.

22 | Vgl. Douglas R. Hofstadter: *Gödel, Escher, Bach – An Eternal Golden Braid*, New York: Basic Books 1979.

Das folgende Programm ist ein ausführbares Quine, das wir in der Programmiersprache *Processing* geschrieben haben. Wird es gestartet, druckt es exakt seinen eigenen Programmtext auf den seriellen Monitor.

```
void setup() { char a=34;
String h, g;
h = "void setup() { char a=34; String h, g; h = ";
g = "print(h+a+h+a+';'+'g'+'()'+'='+'a+g+a+';'+'g');} ";
print(h+a+h+a+';'+'g'+'()'+'='+'a+g+a+';'+'g');}
```

Es ist leicht einzusehen, dass Rechenprozesse, die Wachstum und Reproduktion von Elementen beinhalten (zum Beispiel die Bakterien im obigen HPP), nicht vollständig als Selbstmontageprozess erklärt werden können. Vom Standpunkt der organisatorischen Komplexität scheint Selbstmontage eine schwächere Forderung zu sein als Selbstreproduktion. Modelle der Selbstreplikation und auch der Selbstmontage brauchen nicht zwingend einen expliziten Konstruktionsplan, wie das materialorientierte Modell Peleskos zeigt. Beide Phänomene können Resultat einer materiellen Dynamik in einer geeigneten Umgebung sein. Auf der anderen Seite trägt in lebenden Systemen die DNA die Information über den Organismus. Heute interpretieren wir die DNA vor allem als Konstruktionsplan. Diese Form der Beschreibung für Maschinen zu nutzen bedeutet, dass die Maschine eine explizite Beschreibung ihrer eigenen Konstruktion besitzen muss. Turings Begriff des Universalcomputers brachte John von Neumann auf die Idee, dass es ein Äquivalent zur universellen Berechnung auf Konstruktionsseite geben könnte. Er fragte nach den logischen Prinzipien des ›universellen Konstruktors‹, das heißt, einer Maschine, die alle anderen Maschinen bauen kann. Von Neumanns Theorie selbstreproduzierender Automaten kann als Vorläufer einer formalen Theorie des Wachstums und der Selbstreproduktion gesehen werden.

Unter einem Konstruktor A verstehen wir eine Maschine, die ausgestattet mit einer geeigneten Beschreibung $I(N)$ eine Kopie von N herstellt. Aber wir müssen mehr tun, um einen universellen Konstruktor zu erhalten. A ist nicht selbstreproduzierend, da A gefüttert mit $A(I(A))$ zwar eine Kopie von A herstellt, aber keine Kopie der Beschreibung $I(A)$. Der Selbstreproduktionszyklus ist nicht in sich abgeschlossen und bricht bereits nach dem ersten Konstruktionsschritt ab. Die neu konstruierte Maschine wird nicht anfangen, selbst Nachfolger zu produzieren. Um diesen Defekt zu beseitigen, schlug John von Neumann die folgende komplexe Maschine A , B und C zusammen mit ihren Beschreibungen $I(A)$, $I(B)$, and $I(C)$ vor:²³

23 | Vgl. Michael A. Arbib: From Universal Turing Machines to Self-Reproduction, in: Rolf Herken (Hg.): *The Universal Turing Machine – A Half-Century Survey*, Wien/New York: Springer 1994, 161-172.

Konstruktionsmaschine A

Funktion: A gefüttert mit $I(X)$ liefert X

Kopiermaschine B

Funktion: B gefüttert mit einer Beschreibung $I_1(X)$ liefert eine Kopie $I_2(X)$ der Beschreibung

Kontrollmaschine C

Funktion: aktiviert $A(I(X))$, aktiviert $B(I(X))$ und packt $I(X)$ in die neu gebaute Maschine X

Die Selbstreproduktionsmaschine E schließlich besteht aus der Kombination dieser drei Maschinen

$E = D + I(D)$ wobei $D = A + B + C$ und $I(D) = I(A + B + C)$.

Von Neumanns Automat war die erste vollständig mechanische Beschreibung eines selbstreproduzierenden Artefakts ohne Rückgriff auf die Biologie oder gar den Vitalismus. Sein Konzept aus dem Jahre 1951 ist wegen seiner offensichtlichen Analogie zur Biologie noch immer wichtig. Die gesamte Biochemie ist aus der formalen Perspektive nur ein Spezialfall dieses sehr allgemeinen Modells. Nicht das Material oder die materiellen Grundeinheiten sind essenziell, sondern das allgemeine Prinzip der Organisation, das eine komplette symbolische Beschreibung seiner selbst einschließt. Wir können weiter fragen, wo diese Beschreibung herkommt. Anstelle eines vorgegebenen Plans der Konstruktion können wir auch Maschinen entwickeln, die in einem ersten Schritt Selbstbeschreibungen herstellen und erst dann anfangen, sich gemäß dieser Beschreibung zu reproduzieren. Für kinematische selbstreplizierende Maschinen geben Freitas und Merkle einen umfassenden Überblick.²⁴

Zum oben beschriebenen biologischen Computer zur Lösung des Hamiltonpfad-Problems gehören das Wachstum und die Vervielfältigung von Bakterien. Wir können ihn deshalb ebenfalls unter dem Gesichtspunkt der Selbstreproduktion analysieren. Von der Wendung von DNA-Rechnern hin zu lebenden Computern werden verschiedene Verbesserungen erwartet:

»Programming bacteria to compute solutions to difficult problems could offer the same advantage of parallel processing that DNA computing brings, with the following additional desirable features: (1) bacterial systems are autonomous, eliminating the need for human intervention, (2) bacterial computers can adapt to changing conditions, evolving to meet the challenges of a problem, and (3) the exponential growth of bacteria continuously increases the number of processors working on a problem.«²⁵

24 | Vgl. Robert A. Freitas, R. C. Merkle: *Kinematic Self-Replicating Machines*, Georgetown: Landes Bioscience 2004.

25 | Baumgardner, Acker, Adefuye, et al., Solving a Hamiltonian Path Problem with a bacterial computer, 2009, S. 3.

In den Beispielen des Bakteriencomputers und des labyrinthlösenden Schleimpilzes sind die Selbsterhaltung und das exponentielle Wachstum der Bakterien die primäre Eigenschaft der Biosysteme, die Berechnungsqualitäten dagegen sind externe Aufprägungen durch geeignete Präparationen der biologischen Systeme.

Unsere Maschinen beginnen selbstassemblierend, selbsterhaltend, inhärent nichtterminierend, massiv parallel, stochastisch, adaptiv, selbstmodifizierend usw. zu werden und gleichen damit mehr und mehr lebenden Kreaturen. Im Hinblick auf Eigenschaften biologischer Organismen wie Selbstreproduktion, Selbsterhaltung, Selbstreparatur, Selbstverbesserung und anderer Selbst-Strategien, fehlt uns noch ein tiefes Verständnis der formalen Prinzipien. Architekten, Ingenieure und Designer, die an selbst-kontrollierten Produktionsmethoden für Alltagsgegenstände oder Gebäude interessiert sind, stoßen auf die gleichen Fragestellungen wie Biologen und Informatiker. Es ist offensichtlich, dass unterschiedliche Felder wie Biocomputing, Biotechnologie oder industrielle Produktion von intelligenten Materialien den gleichen Arten von selbstreferenziellen logischen Problemen gegenüberstehen. Einsichten in vom Menschen entworfene selbst-bezügliche Prozesse können sowohl auf die Konstruktion makroskopischer wie auch mikroskopischer Objekte angewendet werden. Wir brauchen deshalb eine sehr viel breitere Basis von formalen Modellen und praktischen Beispielen, um die Vielfalt möglicher Beziehungen zwischen symbolischer Beschreibung von selbstbezüglichen Strukturen und ihrer materiellen Implementierung zu erfassen. Auch wenn die zentrale Voraussetzung sich als richtig erweisen sollte, dass Lebendigkeit ein Ergebnis der logischen Organisation und nicht eine Eigenschaft des verwendeten Materials ist, müssen am Ende, d.h. beim Bau der Maschinen die Materialeigenschaften und die logische Konstruktion natürlich in Übereinstimmung gebracht werden.

Für heutige Computer kann Programmierung beschrieben werden als Aufgabe, eine korrekte Sequenz von elementaren Operationen zu finden, sodass eine bestimmte Funktion realisiert wird oder ein bestimmter Typ von Endzuständen erreicht wird. Im Unterschied dazu konzentriert sich der Programmierer einer biologischen Maschine auf die geeignete Präparation von sich selbst kontrollierenden biologischen Prozessen. Die Lösung von Rechenproblemen mit lebendem Material ist also nicht das Ergebnis der herkömmlichen schrittweisen Kontrolle einer Maschine, sondern der Konfiguration der Anfangsbedingungen von biologischen Systemen und ihrer Umgebung. Vom materiellen Standpunkt kann ein Computer betrachtet werden als Objekt, das aufgrund seiner Rekonfigurierbarkeit unterschiedliche Funktionen implementieren und dadurch unterschiedliche Antworten auf unterschiedliche Fragen produzieren kann. Beim biologischen Rechnen suchen wir dagegen nach universell rekonfigurierbaren Systemen, die es erlauben, für jedes berechenbare Problem die geeigneten Randbedingungen herzustellen.

10.5 DIE KONVERGENZ MECHANISCHER UND BIOLOGISCHER QUALITÄTEN

Eine sich deutlich abzeichnende Konsequenz der Verbindung von Bio- und Informationstechnologien ist der Verlust der Trennlinie zwischen Technik und Leben. In der Vergangenheit haben sich Maschinen nicht selbst montiert und vervielfältigt, sie wurden von Menschen gemacht und durch sie überwacht und kontrolliert. Durch die technische Nutzung biologischer Prinzipien werden die gängigen Kennzeichen technischer Artefakte und ihre Abgrenzung vom Lebendigen unhaltbar. Umgekehrt fordert die technische Realisierung lebensähnlicher Eigenschaften unser bisheriges Bild vom Leben und unser Verständnis von Lebendigkeit heraus. Im Zentrum der Konvergenz des Natürlichen mit dem Artifiziiellen stehen »formale Selbststrategien«, das sind selbstreferenzielle Funktionen, wie wir sie beispielsweise zur Beschreibung der Selbstmontage, der Selbsterhaltung, der Selbstreproduktion und der Selbstmodifikation benötigen. Vergleichbar zu den Forschungen der Künstlichen Intelligenz, die unsere Auffassung von der menschlichen Intelligenz verändert hat, wird die Synthetische Biologie unser Bild vom Leben verändern. Wir haben gelernt, dass der Computer eine bestimmte Klasse logischer Operationen reproduzieren kann und dadurch in der Lage ist, geistige Tätigkeiten abzubilden. Gleichzeitig haben wir verstanden, dass menschliches Denken über diese spezielle Form der Rationalität hinausgeht. Ein formales Modell für logisches Schließen ist nicht gleichzusetzen mit menschlicher Vernunft.

Synthetische Biologie und biologisches Rechnen haben gemeinsam, dass sie mit lebendem Material arbeiten. Ingenieure haben begonnen, Systeme auf der Basis existierender organischer Elemente zu bauen oder mechanische, elektronische und chemische Komponenten zu nutzen und so zu organisieren, dass sie organische Eigenschaften zeigen. Dadurch geraten Methoden zur Realisierung biologischer Maschinen nicht nur in tiefe ethische Probleme, sondern auch in grundlegende Probleme bezüglich der Reichweite der involvierten formalen Modelle. Die Stärke des formalen Ansatzes ist seine Fähigkeit, menschliche Logik und Erfahrung auf der Basis sukzessiver Regeln zu erfassen. Aber diese Regeln sind immer externe Modellierungen. Ein Kuchenrezept enthält nur Regeln für die Behandlung der Zutaten des Kuchens und Werkzeuge für seine Herstellung. Sofern wir aber die Instruktionen genau befolgen, wird der Kuchen gelingen. Obwohl das Rezept keine direkten Informationen über den Geschmack des Kuchens enthält, wird es diese indirekt mit übertragen. Der Geschmack des Kuchens ist ein Zusammenspiel der beteiligten Zutaten und der Geschmacksnerven, nicht eine Eigenschaft des Rezeptes. Trotzdem, wenn wir die Instruktionen ändern, ändert sich auch der Geschmack. Algorithmen sind eine mächtige Methode, die menschliche Erfahrung in mechanische Handlungen in Zeit und Raum zu transformieren. Aber Algorithmen und andere formale Beschreibungen sind immer auch Reduktionen. Natürlich können wir versuchen, die algorithmische Beschreibung durch zusätzliche Modellierungen immer weiter ausdehnen, zum Beispiel

durch die Beschreibung der Interaktionen zwischen den Geschmacksnerven und den Kuchenbestandteilen. Wir haben gelernt, dass wir für unterschiedliche Phänomene auf unterschiedliche Modellierungsebenen gehen müssen. Die grundlegende Annahme des Artificial Life-Ansatzes war ja gerade, dass am Ende jedes Phänomen durch adäquate logische Strukturen ohne jeden Rückgriff auf subjektive Erfahrung oder nicht-formale Eigenschaften erfasst werden kann.

Die Formalisierungen, die wir bisher betrachtet haben, sind Objektivierungen die Systeme von außen beschreiben. Diese Perspektive ist hinreichend für klassische Maschinen, aber bei biologischen Maschinen muss sie ergänzt werden durch Innenperspektiven und interne Beschreibungen. Hier begegnen wir einer in der Philosophie etablierten Frage nach dem subjektiven Charakter der Erfahrung. Der Philosoph Thomas Nagel behauptet,²⁶ dass »ein Organismus von Bewusstsein begleitete Geisteszustände dann und nur dann [hat], wenn es etwas gibt, das zu sein so ist, als ob man dieser Organismus wäre – etwas, das so ist, wie es für den Organismus ist.« Er behauptet weiterhin, dass der subjektive Aspekt der Erfahrung durch objektive Methoden nie hinreichend erklärbar sein wird. Was die Philosophie als Qualia bezeichnet, würde deshalb nie durch reduktive formale Methoden beschreibbar sein, der AL-Ansatz müsste scheitern. Für biologische Maschinen stellt sich die Frage neu, ab welchem Punkt wir neue subjektive Welten generieren, wenn wir Maschinen auf der Basis von Organismen und biologischem Material herstellen.

Aus der biologischen Forschung und insbesondere physiologischen Experimenten wissen wir seit Langem, dass Organismen typischerweise in unterschiedlichen »Milieus« leben, obwohl sie sich die gleiche Umgebung teilen.²⁷ Das Verhältnis eines Organismus zu seiner Umgebung wird durch einen funktionalen Kreislauf bestimmt, der unteilbar seine innere Welt mit der äußeren verbindet. Organismen erzeugen ihre Umwelt und gestalten sie um, indem sie mit ihren »Rezeptoren« und »Effektoren« mit der Umgebung interagieren, die zentrale Einheiten eines geschlossenen Feedbackkreislafs sind. Da die Rezeptoren und Effektoren der verschiedenen Spezies und ihre typische Umgebung normalerweise unterschiedlich sind, werden sich auch die Milieus der Organismen stark unterscheiden. Jakob von Uexküll hat gezeigt, dass unterschiedliche Spezies in unterschiedlichen Welten leben. Er hat argumentiert, dass Raum und Zeit subjektive Produkte von Organismen sind, die von ihren physiologischen Charakteristiken abhängen. Der Raum eines Wurms unterscheidet sich vom Raum des Vogels. Während für die Schnecke alle Bewegungen in ihrer Umwelt schneller ablaufen

26 | Vgl. Thomas Nagel: Wie es ist, eine Fledermaus zu sein?, in: Douglas R. Hofstadter, D. Dennett (Hg.): *Einsicht ins Ich: Fantasien und Reflexionen über Selbst und Seele*, Stuttgart: Klett-Cotta 1986, 375-387, S. 376.

27 | Vgl. beispielsweise: Jacob von Uexküll, G. Kriszat: *Streifzüge durch die Umwelten von Tieren und Menschen*, Berlin: Springer 1934; Jacob von Uexküll: *Umwelt und Innenwelt der Tiere*, Berlin: Springer 1909.

als in unserer menschlichen Wahrnehmung, bewegt sich die Umwelt für Raubfische, die von schneller Beute leben, verglichen mit unserer Wahrnehmung in Zeitlupe. Die Milieus von Lebewesen sind untrennbar verbunden mit ihren inneren Welten. Wie aber sehen dann die Milieus biologischer Maschinen aus?

Wir sind bereits jetzt in der Lage mit relativ einfachen technischen Mitteln neue Erfahrungen der Selbstwahrnehmung zu erzeugen. Die Montage einer First-Person-View-Kamera (FPV) auf einem Modellflugzeug ermöglicht die subjektive Erfahrung der Vogelperspektive, während man mit beiden Beinen fest am Boden steht. Es ist möglich, sich in alle Richtungen umzusehen und es fühlt sich an, als ob man selbst von oben über die Landschaft schaut. Sieht man sich dann plötzlich selbst weit unten auf einem Feld stehen, stellt sich spontan ein, dass man sich als räumlich verteiltes Individuum wahrnimmt. Solche einfachen Beispiele machen klar, dass wir unsere Beziehungen zwischen Umwelt und innerer Welt für echte biologische Maschinen, d.h. Maschinen die Lebewesen sind und nicht nur tote Biomasse, neu überdenken müssen. Es fällt uns normalerweise leicht, die räumliche Grenze eines Lebewesens zu bestimmen. Wo aber verläuft die Grenze einer biologischen Maschine? Was gehört zur Maschine und was zur Umgebung? Jede modular konstruierte Maschine kann leicht um Teile erweitert werden, sogar um Teile, die ihre eigenen Kontrolleinheiten besitzen und nur über vorhandene Kontrolleinheiten miteinander kommunizieren, um eine übergeordnete Funktion zu verwirklichen. Die Festlegung der exakten Grenze und der Innen-Außen-Relationen ist in der Welt klassischer Maschinen nicht zuletzt eine Frage der Perspektive. Was bedeuten die Möglichkeiten der Rekonfiguration für lebendige Maschinen? Unter welchen Umständen macht es Sinn, vom Milieu einer Maschine zu sprechen? Wie können wir Milieus systematisch erzeugen und wie sind sie mit dem Konstruktionsplan der Maschine verbunden? Da biologische Maschinen auf der Basis formaler Beschreibungen implementiert werden, können wir erwarten, dass unsere leistungsfähigen technischen Organisationsprinzipien verschmelzen werden mit typischen biologischen Merkmalen. Zu den wichtigsten Organisationsprinzipien klassischer Maschinen gehören die mehrfach genannten Prinzipien der modularen und hierarchischen Organisation. Was heißt es, wenn das Modularitätsprinzip in Zukunft auch für biologische Maschinen gilt? Wie bei klassischen Maschinen werden sich dann einzelne Module problemlos auswechseln lassen. Aber was bedeutet es aus der subjektiven Perspektive einer Maschine, wenn wir im Betrieb Rezeptoren und Effektoren austauschen und dadurch neue *Milieus* für die Maschine erzwingen können? In Konsequenz müssen wir auch fragen, ob biologische Maschinen einen An-Aus-Schalter haben können. Oder müssen sie sterben wie alle Lebewesen? Die Biotechnologien werden unvermeidlich Artefakte hervorbringen, die eine Mischung aus technischen und organischen Organisationsprinzipien aufweisen und denen wir eine subjektive Weltwahrnehmung, d.h. ein eigenes maschinelles Milieu schwerlich werden absprechen können.

11. ›Synthesis Candidates‹

Spielen mit Zweck in der Molekularbiologie

Kathrin Friedrich

»In EteRNA you are going to design your own RNA, a fundamental part of living cells.«¹

Aktuelle Softwareanwendungen und Onlinespiele schaffen neue Terrains molekularbiologischen Experimentierens. Im Zuge des ›Big Data‹ Hype und doch scheinbar ganz fern davon, werden Internetspiele zu Orten molekularbiologischen Probierens, an denen sich Massen geübter Spieler zusammenfinden. Web-basierte Videogames wie *EteRNA* oder *Foldit* versprechen, durch das Lösen von Puzzeln an der Optimierung und Konstruktion von synthetischer RNA mitzuarbeiten. Das interaktiv spielende Gestalt- und Raumdenken der Spieler verhilft den Spielentwicklern zu optimal gefalteten RNA-Molekülstrukturen und zur Weiterentwicklung der eigenen Forschung. Die Spieler selbst müssen nicht notwendigerweise biologische Kenntnisse besitzen, vielmehr müssen sie ›berechnen‹, was Computer immer noch nicht leisten können – qualitative Entscheidungen zu treffen und gestalterisch sinnvolle Kombinationen zu erkennen. Der Anreiz dieser Spiele liegt neben allem spielerischen Vergnügen auch in möglichem ›wissenschaftlichen Ruhm‹. Die ›winning condition‹ von *EteRNA* stellt in Aussicht,² dass die ›eigenen‹ erspielten molekularen Strukturen als ›synthesis candidates‹ im Labor synthetisiert bzw. materialisiert werden und dies gar zur Erlangung des Nobelpreises für Medizin führen könnte.³

1 | <http://eterna.cmu.edu/game/puzzle/13375/> (Abruf 22.01.2013)

2 | Luis von Ahn, L. Dabbish: Designing Games With A Purpose, in: *Communications of the ACM*, 51(8), 2008, 58-67, S. 61.

3 | So führt einer der *Foldit*-Entwickler Zoran Popović in einem Interview aus: »Our ultimate goal is to have ordinary people play the game and eventually be candidates for winning the Nobel Prize.« Hannah Hickey: Computer game's high score could earn the Nobel Prize in medicine, 2008, www.washington.edu/news/2008/05/08/computer-games-high-score-could-earn-the-nobel-prize-in-medicine/ (Abruf 22.12.2012).

Diese sogenannten *Games with a Purpose* (GWAP), wie etwa das an der Carnegie Mellon University und der Stanford University entwickelte *EteRNA*⁴ sowie sein an der University of Washington konstruierter Vorgänger *Foldit*, erfreuen sich wachsender Beliebtheit. Euphorisch und marketingorientiert berichten die Entwickler des Spiels *Foldit* in *Nature Biotechnology* vom ersten Erfolg der *Foldit*-Spieler, denen es gelungen sein soll, ein ›de novo‹ Enzym zu ›erspielen‹, das eine 18fach höhere Faltungsaktivität als das ursprüngliche Enzym aufweist.⁵ Bei diesen ›zweckhaften Spielereien‹ werden nicht nur die Grenzen wissenschaftlicher Kompetenzen und experimenteller Medientechnologien durchlässiger, auch die scheinbare Übermacht computergestützter Verfahren zur Problemlösung und Konstruktion in der Molekularbiologie wird relativiert.⁶

Insbesondere die ›ästhetische Kombinatorik‹ der SpielerInnen ist eine der Voraussetzungen zum erfolgreichen Einsatz dieser Online-Spiele im Bereich der Molekularbiologie. Das Spiel und seine graphische Benutzeroberfläche werden dabei vor aller versprochenen materiellen Synthese im Labor zu einem massenhaften Spielplatz, der Rechenleistung, ästhetisches Erkennen und qualitative Entscheidungsfähigkeit verschränkt. Während bestehende forschungspraktische, diskursive und auch metaphorische Verbindungen zwischen Molekularbiologie und digitalen Medien sich bislang etwa an der Allgegenwart von Computern in Laboren oder der diskursiven Gleichnisbildung zwischen den inneren Logiken des Molekularen und des Computablen zeigten,⁷ soll nun eine quasi innerliche

4 | Finanziert wird das Projekt zudem von der *National Science Foundation*, der *National Health Foundation*, weiteren Partnern des öffentlichen Bereichs sowie von *Google Inc.* Das Interesse an der kommerziellen Nutzung des Crowdsourcing steigt zunehmend und erfordert die Weiterentwicklung entsprechender technischer Lösungen, die die Aktionen der Crowd in maschinenlesbare Anwendungen rückübersetzen.

5 | Christopher B. Eiben, J.B. Siegel, J.B. Bale, et al.: Increased Diels-Alderase activity through backbone remodeling guided by Foldit players, in: *Nature Biotechnology*, 30(2), 2012, 190-192.

6 | »The last few years, however, have witnessed the emergence of projects that do not fit the mold of traditional science and that appear to follow distinct organizing principles. Foldit, for example, is a large-scale collaborative project involving thousands of participants who advance our understanding of protein folding at an unprecedented speed, using a computer game as their platform.« Chiara Franzoni, H. Sauermann: *Crowd Science: The Organization of Scientific Research in Open Collaborative Projects*, 2012, <http://ssrn.com/abstract=2167538> (Abruf 21.01.2013).

7 | Als Laborstudie etwa Karin Knorr Cetina: *Wissenskulturen. Ein Vergleich naturwissenschaftlicher Wissensformen*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 2002, insb. S. 121-162; zur strukturellen Ähnlichkeitsbildung zwischen Biologie und Medientechnologie vgl. Kate O'Riordan (Hg.): *The Genome Incorporated, Constructing Biodigital Identity*, Farnham: Ashgate 2010, insb. S. 25-51; Eugene Thacker: *Biomedica*, Minneapolis: University of Minnesota Press 2004.

Verbindung zwischen beiden geschaffen werden.⁸ Dafür binden neuere Softwareanwendungen die ästhetischen und kombinatorischen Fertigkeiten menschlicher ›Experimentatoren‹ ein, um deren qualitative Erkenntnisfähigkeit zu nutzen. Neben der nahtlosen Einheit von Mensch-Computer-Systemen, die idealiter gegenseitig und untrennbar Problemlösungsstrategien entwickeln, sind es die Spielstrategien selbst, die auf konzeptionelle und materielle Synthesen ausgerichtet sind.⁹ So entstehen durch und in digitale(n) Medientechnologien auf mehreren Ebenen Verbindungen, die mit diffusen Begriffen des Synthetischen und Symbiotischen arbeiten. Dabei verweisen sie auf grundlegende medientheoretische und epistemologische Fragen, etwa nach den forschungspraktischen Verbindungen und Verbindlichkeiten dieses ›spielerischen Experimentierens‹. Wie wirken etwa im Onlinespiel *EteRNA* Spielregeln, menschliche Wahrnehmung, kollektive Intelligenz und deterministische Algorithmen zusammen, um ›Synthese Kandidaten‹ zu konstruieren? Kann man hier eine epistemologische Qualitätssteigerung im Sinne einer synthetischen Verbindung beobachten, die über kombinatorische Medienpraktiken konzeptionell verhandelt, was sich als stoffliche Synthese vollziehen soll? Die Onlinespiele *EteRNA* und *Foldit* bieten Beispiele, um die verschiedenen Instanzen des Synthetischen und Symbiotischen innerhalb der Benutzeroberfläche und der Spielprinzipien dieser Spiele zu skizzieren und aktuellen Entwicklungen molekularbiologischen Forschens nachzugehen. Als *Games with a Purpose* (GWAP) werfen sie die Frage auf, welcher Purpose, welcher Zweck, durch ihren Einsatz noch verfolgt werden soll, außer die versprochenen Synthese-Kandidaten zu produzieren.

11.1 SPIELEN MIT (SYNTHETISCHEM) ZWECK: ›PLAYED BY HUMANS, SCORED BY NATURE‹

Games with a Purpose und *Serious Games* geraten zunehmend in den Fokus wissenschaftlichen Interesses.¹⁰ In verschiedenen Disziplinen scheinen sie geeignet,

8 | Vgl. Kevin Channon, E.H.C. Bromley, D.N. Woolfson: Synthetic biology through biomolecular design and engineering, in: *Current Opinion, in Structural Biology*, 18, 2008, 491-498; Yukiko Matsuoka, S. Ghosh, H. Kitano: Consistent design schematics for biological systems: standardization of representation in biological engineering, in: *Journal of the Royal Society Interface*, 6, 2009, 393-404.

9 | Zum ›simplified‹ und ›complete concept of a game‹ vgl. John von Neumann, O. Morgenstern: *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton: Princeton University Press, 1953 (3. Auflage), 48-60.

10 | Vgl. beispielsweise: Steve Hutchinson, H. Lawrence: *Playing With Purpose. How Experiential Learning Can Be More Than a Game*, Farnham: Ashgate 2011; Edith Law, L. von Ahn (Hg.): *Human Computation*, (Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning), San Rafael: Morgan & Claypool 2011; David Michael, S. Chen: *Serious games*.

vielfältige Aufgaben, Problemstellungen und Lerninhalte zu simulieren, die spielerisch bearbeitet werden können.¹¹ Auch Onlinegames wie *Phylo*¹² und *EyeWire*¹³ nutzen die ästhetischen Fähigkeiten menschlicher Massen zur Lösung naturwissenschaftlicher Probleme, denen auch Hochleistungsrechner nicht Herr werden können. In der Molekularbiologie soll sich diese Form des Crowdsourcings über Onlinespiele vorrangig als praktikable und ökonomische Variante erweisen, biologische Systeme konzeptionell zu verbessern, die Spielertaktiken über interaktive machine-learning Prozesse in maschinenlesbare Codierungen rückzuführen und dadurch Algorithmen zu trainieren.¹⁴ Statt Hochleistungsrechnern und ausgeklügelten Softwareanwendungen übernehmen Laien, deren ›Spieltrieb‹ auf Proteinfaltung oder die Konstruktion komplexer RNA Moleküle umgelenkt wird, die Optimierung digital verfasster biologischer Systeme, die im Gewinnfall im Labor hergestellt werden sollen.¹⁵ Was Computermodelle und Softwareanwendung nur sehr mühsam leisten können, entfaltet sich buchstäblich vor den Augen der SpielerInnen. Die optimale Proteinfaltung erschließt sich etwa bei *Foldit* erst im spielerischen Probieren auf dem Bildschirm und in der klickenden Interaktion mit dem Spiel. Die visuellen und logischen Problemlösungskapazitäten des Menschen scheinen in diesem Feld besser geeignet als rein digitale Simulations- und Modellierungsverfahren. So sind es nicht vorrangig die Rechnerleistungen, die in die Crowd ausgelagert werden, sondern die Crowd als Masse mit qualitativer

Games that educate, train, and inform, Boston: Thomson 2006; Ute Ritterfeld, M. Cody, P. Vorderer: *Serious Games. Mechanisms and Effects*, New York/London: Routledge 2009.

11 | Vgl. Tim Marsh: Serious games continuum. Between games for purpose and experiential environments for purpose, in: *Entertainment Computing*, 2/2, (Special Issue ›Serious Games Development and Applications‹), 2011, 61-68.

12 | In *Phylo* sind die SpielerInnen herausgefordert, möglichst sinnvolle Sequenzalignments zu erpuzzeln. Vgl. Alexander Kawrykow, G. Roumanis, A. Kam, et al.: Phylo: A Citizen Science Approach for Improving Multiple Sequence Alignment, in: *PLoS ONE*, 7(3), 2012, e31362.

13 | *EyeWire* wurde von Neurowissenschaftlern des MIT im Rahmen des Human Connectome Projekts entwickelt, welches die neuronalen Verbindungen des menschlichen Gehirns erfassen soll. Das Online-Game *EyeWire* wird mittels Crowdsourcing insbesondere zum 3D-Mapping der Neuronen der Retina eingesetzt. Vgl. <http://blog.eyewire.org/about-eyewire> (Abruf 17.01.2013).

14 | Vgl. Seth Cooper, A. Treuille, J. Barbero, et al. and >57,000 Foldit players: The challenge of designing scientific discovery games, in: *Proceedings of the Fifth International Conference on the Foundations of Digital Games*, New York: ACM, 2010, 40-47, S. 40; vgl. dazu auch: Clare Sansom: The Power of Many, in: *Nature Biotechnology*, 29(3), 2011, 201-203.

15 | Vgl. Benjamin M. Good, A.I. Su: Games with a Scientific Purpose, in: *Genome Biology*, 12:135, 2011.

Entscheidungsfähigkeit und intuitiver Mustererkennung wird als Quelle der Erkenntnis genutzt.

Dennoch spielt der algorithmische ›Unterbau‹ eine entscheidende Rolle für die produktive Nutzung solcher Spiele. Im Fall von *Foldit* wurde bereits das Projekt *Rosetta@Home*¹⁶ am Lab des Entwicklers David Baker verwirklicht. Die Auslagerung von Berechnungsprozessen zu Proteinstrukturen auf Heimcomputer machte sich dabei das Prinzip des verteilten Rechnens zunutze, war jedoch allein auf ›passives Crowdsourcing‹ ausgelegt.¹⁷ Dreidimensionale Visualisierungen der Berechnungsvorgänge sollten dabei lediglich als illustrativer Bildschirmhintergrund für die Besitzer der PCs dienen. Diese erkannten jedoch intuitiv, wie eine Struktur optimaler gestaltet werden könnte.¹⁸ Auf Grundlage der Rosetta Algorithmen haben David Baker und sein Team die Funktion und das Graphical User Interface für *Foldit* gestaltet und so eine aktive Crowdsourcing-Variante entwickelt.¹⁹ Die rein maschinelle Berechnung aller möglichen Proteinfaltungen würde zu viel finanzielle und zeitliche Ressourcen binden, die die ›humanen Rechner‹ freiwillig zur Verfügung stellen. Während die Computation immer leiser und verteilter im Hintergrund arbeitet, wird das Geschick der Mustererkennung an menschliche Aktanten delegiert, die dank spielerischer Anreize eine sozial und ökonomisch optimale Zielgruppe darstellen. Doch welchen besonderen Zweck erfüllen diese Spiele für Forscher und Spieler?

Für die Spieler ist es neben der Unterhaltung im Falle der wissenschaftlichen *Games with a Purpose* vor allem die Aussicht auf die materielle Synthese ihrer eigenen Designs im Labor oder auf wissenschaftliche Anerkennung als Mitautor in einer Fachpublikation. Die ›winning condition‹ von *EteRNA*, das Herausspielen sogenannter Synthese-Kandidaten, wird durch ›Lab Puzzles‹ in Aussicht gestellt.²⁰ Das Lösen dieser komplexeren Puzzles bedingt, dass der Spieler vorher eine erhebliche Anzahl einfacher Puzzles gelöst hat. Die operativ-proaktive ›Synthese‹ von Software und Experimentator vor der materiellen Synthese im Labor optimiert den Herstellungsprozess auf beiden Seiten – durch die menschlichen Spielstrategien werden Algorithmen trainiert und durch die Rückmeldung des Spielsystems optimiert der Spieler seine Strategien. In beständigen iterativen

16 | Vgl. <http://boinc.bakerlab.org/rosetta/> (Abruf 22.11.2012).

17 | Sansom, *The Power of Many*, 2011, S. 201.

18 | Vgl. Neil Savage: Gaining Wisdom from Crowds, in: *Communications of the ACM*, 55(3), 2012, 13-15, S. 14.

19 | Vgl. Eric Hand: People power: Networks of human minds are taking citizen science to a new level, in: *Nature*, 466(5), 2010, 685-687, S. 685.

20 | »The key challenge for these efforts to succeed is to inspire the required numbers of volunteers. The motivations for individuals to voluntarily contribute to crowdsourcing initiatives have been widely debated, but they range from altruism, to ego, to a shared sense of purpose. One emerging trend expands that list of motivations to include the pursuit of fun and enjoyment through games.« Good, Su, *Games with a Scientific Purpose*, 2011.

Optimierungsschleifen nähern sich Algorithmik und Ästhetik potenziellen Synthese-Kandidaten an. Diese Computermodelle sollen sich nach einem Test durch Simulationen gemäß des Slogans »played by humans, scored by nature« als materiell herstellbar und erfolgreich erweisen.²¹

Die Informatiker Luis von Ahn und Laura Dabbish haben in ihrem 2008 erschienenen Text grundlegende Designprinzipien von *Games with a Purpose* zusammengefasst, die weitere Voraussetzungen und Faktoren des wissenschaftlichen Spielens aufzeigen. Sie definieren GWAP zunächst als »a class of games [...] in which people, as a side effect of playing, perform tasks computers are unable to perform.«²² Solche Aufgaben, die als »Nebeneffekt« durch menschliche Computation gelöst werden, sind vor allem auf bildliches Erkennen und Beschreiben gerichtet. Spiele wie das *ESP Game*, auch *Google Image Labeler* genannt, nutzen die menschliche Fähigkeit, Bilder über Schlagworte qualitativ zu beschreiben: »Rather than using computer-vision techniques that do not work well enough, the ESP Game constructively channels its players to do the work of labeling images in a form of entertainment.«²³ Entertainment sehen von Ahn und Dabbish als einen entscheidenden Faktor im Spiel um verwertbare Ergebnisse. Um die Balance zwischen Entertainment und Problemlösung massentauglich zu halten, schlagen sie die Integration verschiedener bisheriger spieltheoretischer und anwendungsorientierter Ansätze vor, um »a general method for harnessing human processing skills through computer games« zu entwickeln.²⁴ Dabei wird deutlich, dass insbesondere die intuitive Erkenntnisfähigkeit des Menschen von einem GWAP so angeregt und abgegriffen werden muss, dass sie in maschinenlesbare Formalisierungen zu übersetzen ist. Drei Faktoren der Spiele scheinen für dieses Unterfangen besonders wichtig: a) das Anregen einer Kombinatorik, die das Wechselspiel von Erscheinung und Wahrnehmung ermöglicht, um die Problemlösungsstrategien des Spielers zu nutzen, b) Graphical User Interfaces (GUIs) als

21 | Dieser Slogan hat die Besucher der Eterna Webseite unter <http://eterna.cmu.edu/web/bis> etwa Mitte 2012 begrüßt. Vgl. dazu auch das Interview mit dem Entwickler Adrien Treuille: »You say that Eterna is played by humans but scored by nature, why is that important? [darauf Treuille] It captures the fact that it is a game based on experimental data and nothing has been tried like that before. More fundamentally, most games have arbitrary rules set by humans. But what's exciting about science is that fundamentally it's a game played against rules that we don't know. We're trying to figure out how the knights move and how the bishops move. Eterna gets right to the heart of that. In some sense we've taken away what might be the man-made rules of the game and we allow people to play directly against nature and see how well they can do.« www.cmu.edu/piper/piper/2011/february/qa_treuille.html (Abruf 08.01.2013).

22 | Ahn, Dabbish, *Designing Games With A Purpose*, 2008, S. 58.

23 | Ahn, Dabbish, *Designing Games With A Purpose*, 2008, S. 60; vgl. auch Savage, *Gaining Wisdom from Crowds*, 2012, S. 14.

24 | Ahn, Dabbish, *Designing Games With A Purpose*, 2008, S. 60.

symbiotische Schnittstelle zwischen maschinellem und humanem Kombinieren, und c) die Formalisierung der Lösungsstrategien der spielenden Masse über verschiedene Kontrollmechanismen.

11.2 SINNHAFTES ERKENNEN ALS ÄSTHETISCHE KOMBINATORIK

»We're collecting data to find out if humans' pattern-recognition and puzzle-solving abilities make them more efficient than existing computer programs at pattern-folding tasks. If this turns out to be true, we can then teach human strategies to computers and fold proteins faster than ever!«²⁵ Mit diesem Forschungsziel ist eine grundlegende Strategie der Spiele angesprochen, die zudem auf einen Begriff von Ästhetik verweist, die sich im Wechselspiel von Wahrnehmung und Erscheinung konstituiert. Die ›puzzle-solving abilities‹ der Spieler entfalten sich zirkulierend zwischen der Darstellung der Puzzle und dem Erkennen der Spieler in einem ästhetischen Raum. Menschliche Intuition, Kreativität und Iterationsfähigkeit bilden damit eine der Grundlagen für die Optimierung biologischer Systeme mittels *Games with a purpose*.²⁶ Da maschinelle Berechnungsprozesse nicht oder nur in sehr beschränktem Rahmen über qualitative Fertigkeiten verfügen, sind Menschen und ihre ästhetische Kombinationsgabe prädestiniert vor allem visuell wahrnehmbare, räumliche Problemlagen zu lösen. Insbesondere die in *EteRNA* eingesetzten 3-D-Puzzle, anhand derer die optimale Faltung erkannt werden soll, rekurren auf die räumlichen Wahrnehmungsfähigkeiten menschlicher Aktanten.²⁷ Auf diese Fertigkeit hat schon die Gestaltpsychologie hingewiesen und grundlegende Prinzipien herausgearbeitet, denen Gestaltwahrnehmung und -erkennen folgen.²⁸

Im Fall des Designs optimaler Faltungen oder enzymatischer Verbindungen ist es nun die Verschränkung dieser Gestaltwahrnehmung mit den Operationen digitaler Medientechnologien und den besonderen Spielprinzipien, die nicht bloß

25 | Vgl. <http://fold.it/portal/info/science> (Abruf 02.06.2012).

26 | Eiben, et al., Increased Diels-Alderaseactivity, 2012, S. 190.

27 | »To explore this space, we focused on human ability to reason about 3D structures and on the biochemistry domain, where many problems tend to be structural. [...] We believe that humans' innate spatial reasoning ability makes it possible for non-experts to make useful contributions to this problem.« Cooper, et al., The challenge of designing scientific discovery games, 2010, S. 40.

28 | Vgl. Rudolf Arnheim: *Visual Thinking*, Berkeley: University of California Press 1969; Kurt Koffka: Perception. An introduction to gestalt theory, in: *Psychological Bulletin*, 19(10), 1922, 531-581; Max Wertheimer: Experimentelle Studien über das Sehen von Bewegung, in: *Zeitschrift für Psychologie*, 61, 1912, 161-265.

ein Erkennen, sondern auch die Teilhabe an Wissenschaft versprechen.²⁹ Als *Foldit* Spieler kann man beispielsweise einer von über 57.000 Co-Autoren eines wissenschaftlichen Artikels der Entwickler werden.³⁰ Bei *EteRNA* ist es nicht allein der Ruhm als ›Entwickler‹ bestimmter Lösungsstrategien, sondern die Aussicht auf die materielle Synthese der online konstruierten Designs. Diese Synthesekandidaten verknüpfen die spielerischen Errungenschaften der biologischen Laien mit einer materiellen Laborpraktik, die die wissenschaftlichen Beiträge der SpielerInnen ›fassbar‹ machen.³¹ ›Lab Puzzles‹, die erfahrenere Spieler lösen und selbst erstellen können, schaffen die modellhafte Verbindung hierfür, denn

»Lab Puzzles are how Nature scores in *EteRNA*. The Lab asks you to solve the real RNA design problem. By actually creating your solutions, experimentally testing how they fold, and then giving you access to experiment results, the Lab exposes the gap between current computational models and reality. [...] By advancing and testing hypotheses about when RNAs correctly fold in vitro, you are helping scientists understand the mysteries surrounding RNA folding and eventually paving the way towards new, complex, and medically useful biomolecules out of RNA.«³²

Einen noch viel nachhaltigeren Beitrag zu zeitgenössischer Forschung leisten die Spieler jedoch, indem ihre Taktik und die Strategien der Problemlösung abge-

29 | So weisen die Entwickler von *EteRNA* auf der Webseite des Spiels selbst darauf hin, dass die Gestaltwahrnehmung und Spielfertigkeit trainiert werden müsse. Daher gilt es vor dem Lösen und Erstellen s.g. Lab Puzzles erst an einfacheren Formen, den Challenge Puzzles, zu üben: »*EteRNA* is starting with simple shapes like ›The finger‹ and ›The cross‹ to make sure you can nail the fundamentals. And then we'll be moving on to elaborate shapes like trees. And then molecules that switch folds when they sense a specific other piece of RNA. This might take a few weeks, or it might take a year – we want to make sure we can ace these exercises. [...] Finally, you'll start seeing a few other kinds of puzzles popping up in later stages: The ability to play with RNAs in three dimensions. The ability to see natural RNAs from bacteria, viruses, and humans; and challenges to predict their properties. Stay tuned.« <http://eterna.cmu.edu/web/about/> (Abruf 22.01.2013).

30 | Vgl. Cooper, Khatib, Makedon, *Analysis of Social Gameplay Macros in the Foldit Cookbook*, 2010, S. 40.

31 | Um diesen materiellen Aspekt zu suggerieren sowie Intuitivität und Spaß anzuregen, folgten die Entwickler »the concept of touchability – being able to directly interact with the protein as though you could actually touch it. Before embracing this concept, our designs only manipulated the protein through indirect sliders, buttons, and plots. However, we soon changed the design to cause things to occur by clicking on the protein itself. While the major optimizations are still launched by buttons, actions like pulling, attaching bands, freezing, tweaking, and others are performed directly on the protein.« Cooper, et al., *The challenge of designing scientific discovery games*, 2010, S. 40.

32 | Vgl. <http://eterna.cmu.edu/web/about/> (Abruf 22.01.2013).

griffen und wieder in das Computersystem eingespeist werden. Somit geht es nicht allein um einen synthetischen Zweck, der in Stoffliches gerinnt, sondern auch um eine Form der Synthese von menschlicher und maschineller Berechnung, die aus einer ästhetischen Kombinatorik entstehen.³³ Sowohl maschinelles Kalkül wie auch ästhetische Strategie münden in Softwareprozessen, die im Hintergrund synthetisieren, was scheinbar nicht zusammengeht. Die Rolle der Software kann dabei mit Matthew Fuller unter Bezug auf Deleuze und Guattari als programmatischer »thought synthesiser« beschrieben werden:

»By assembling modules, source elements, and elements for treating concepts (oscillators, generators, and transformers), by arranging microintervals, the synthesiser makes conceptualisable the philosophical process, the production of that process itself, and puts us in contact with other elements of matter. In this machine composed by its materiality and force, thought travels, becomes mobile, synthesises.«³⁴

Software, gleich ob in Form online-basierter Spiele oder als stationäre PC-Anwendung, schafft den konzeptionellen und funktionalen Rahmen, in dem eine Spielfläche geschaffen wird, die gleichsam tiefenwirksame Verbindungen zwischen Berechenbarkeit, Sichtbarkeit und Gestaltbarkeit herstellt und die eine gedankliche vor einer stofflichen Synthese ermöglicht. Durch diese »epistemische Tiefenwirksamkeit«, die bis auf die algorithmischen Prozesse der Maschine durchschlägt, wird über »machine-learning« dem Formalisierungsvorgang visuellen Kombinierens eine weitere Abstraktionsstufe hinzugefügt. Kombinatorik bedeutet in dieser Hinsicht nicht allein, visuell repräsentierte Elemente zu sinnhaften Strukturen zusammenzufügen, sondern auf einer anderen Ebene eine neue Qualität in Form optimierter Algorithmen zu erzeugen. Ohne die ästhetischen Fertigkeiten der Spieler blieben die computationalen Prozesse in einer durchführbaren, aber wenig komplexen maschinellen Kombinatorik verhaftet, die keine qualitativ-sinnhaften, sondern nur quantitativ-logistische Steigerungen kennt.

Ästhetische Formierung in Verbindung mit einem kombinatorischen Prinzip sind daher die entscheidenden Qualitäten der spielenden Masse, die den wissenschaftlich-experimentellen Zweck der *Games with a Purpose* begründen. Durch die Verschmelzung menschlicher Fähigkeiten und maschineller Formalisierungen können für die biologische Forschung »sinnhaftere« Algorithmen abstrahiert

33 | Das Verfahren der Kombinatorik ist vor allem in der Synthetischen Biologie ein häufig verwendeter Topos. So beschreibt Craig Venter seine »Methode« als »combinatorial genomics«, die großangelegte Genomdatenbanken nutzt, um durch die automatisierte Kombination dieser »design components of the future« synthetische Genom-Sequenzen herzustellen und zu testen. Craig Venter: TED Talk Februar 2008, unter www.ted.com/talks/craig_venter_is_on_the_verge_of_creating_synthetic_life.html (Abruf 12.01.2013).

34 | Matthew Fuller: *Behind the Blip. Essays on the Culture of Software*, New York: Autonomedia, 2003, S. 20-21.

und gewonnen werden, die zukünftige Aufgaben wieder maschinisiert lösen sollen. So entsteht durch ernsthaftes Spielen eine Medienpraktik, die es ermöglicht, komplexe Rückkopplungen zwischen Algorithmen, Daten und Kognition auf ästhetischer und operativer Ebene zu erzeugen. Nicht mehr das Digitale bietet die unumgängliche Optimierung des ›human intellect‹, erst in der kombinatorischen Synthese beider entsteht ein epistemologischer Mehrwert. Human Computation bzw. menschliche Ressourcen werden nicht als ›Endnutzer‹ betrachtet, sondern als ein ›Kalkül‹ in einem epistemischen Prozess. In dieser synthetisierenden Funktion der Software nimmt das GUI eine besondere Rolle ein, da es sowohl die ästhetische Arena der Human Computation bildet wie auch durch graphische Darstellungen und Manöver zum Idealfall einer »Man-Machine Symbioses« beitragen kann.³⁵

11.3 SYMBIOTISCHE GUIs – ÄSTHETISCHES KALKÜL

Auf diese graphisch-operative Symbiose zwischen Spieler und Computer rekurriert auch der *Foldit*-Entwickler Zoran Popović, wenn er von einer »symbiotic architecture between humans and computers« spricht,³⁶ ohne jedoch seine Referenz zu nennen. Bereits 1960 hatte J.C.R. Licklider auf die integrale Funktion des Nutzers in einer symbiotischen Mensch-Computer Beziehung hingewiesen: »Men will fill in the gaps, either in the problem solution or in the computer program, when the computer has no mode or routine that is applicable in a particular circumstance.«³⁷ Eine strikte Trennung der Beiträge von Computer oder Mensch zu einer komplexen Problemlösung wäre demnach analytisch nicht mehr möglich. Was an die deterministische Berechnung des Computers delegiert wird und was an die ästhetische Intuition des Nutzers lässt sich am Ende des Prozesses nicht mehr sagen. Im Fall der experimentell eingesetzten GWAP kann jedoch nicht von einem schlichten ›Lückenfüllen‹ menschlicher Computation ausgegangen werden, vielmehr ist es genau diese ästhetische Kombinatorik, die den besonderen Mehrwert der Spiele ausmacht. Um sie jedoch abrufen und in maschinelle Formalisierungen übersetzen zu können, braucht es eine adäquate Schnittstelle, die beide Faktoren operativ zusammenbringt und ihre symbiotische Verbindung in einen synthetischen Mehrwert wandelt. Diese Schnittstelle besteht bei GWAP im Graphical User Interface (GUI), in dem nicht allein Repräsentationen und Ein-

35 | Joseph C.R. Licklider: Man-Computer Symbiosis (1960), in: Noah Wardrip-Fruin, N. Montfort: *The New Media Reader*, Cambridge: MIT Press 2003, 74-82.

36 | Savage, *Gaining Wisdom from Crowds*, 2012, S. 15.

37 | Licklider, *Man-Computer Symbiosis*, 2003, S. 77.

gabehilfen softwaregetriebener Rechenprozesse erscheinen, sondern Symbole zu ›Feedback-Triggern‹ in einem symbiotischen Sinn werden.³⁸

Bei *EteRNA* etwa findet sich die Masse der Spieler auf einer überschaubaren graphisch gestalteten Webseite zusammen, die die Absicht des Spiels in dem einfachen Slogan: »You play by designing RNAs, tiny molecules at the heart of every cell« zusammenfasst. Entscheidet sich der Nutzer mit dem Spiel zu beginnen, erwartet ihn ein dunkelblauer Bildschirmhintergrund vor dem fortwährend virtuelle Blasen aufsteigen, die wohl das Innere einer Zelle suggerieren sollen. In der Bildschirmmitte baut sich das eigentliche Spielfeld auf, das im Anfangsstadium des Spiels aus den vier graphisch dargestellten Nukleotiden besteht. Das Spiel liefert eingblendete Erklärungen und Aufgaben in kleinen Fenstern, die der Nutzer jedes Mal per Click bestätigen muss, um zu signalisieren, dass er sie auch wahrgenommen hat. Die einfachen Manöver zu Beginn des Spiels bestehen vor allem aus Click oder Drag&Drop Aufgaben, die Basenpaare bilden oder einzelne Basen mutieren lassen, sodass neue Paarungen gebildet werden können. Komplexere Molekülstrukturen lassen sich erst im Verlauf des Spiels herstellen. Nach jeder Aufgabe erhält der Spieler eine direkte Rückmeldung zu seinem Erfolg in Form seines persönlichen Punktestandes und visueller Effekte. In der oberen Ecke des Bildschirms findet sich während der gesamten Spielaktivitäten ein offenes Chatfenster, in dem die Kommunikation zwischen anderen Benutzern mitge-
loggt wird. So wird dem Spieler fortwährend verdeutlicht, dass er ebenfalls gegen andere Spieler spielt.³⁹

38 | Auf die integrative Rolle der graphischen Gestaltung der Spielfläche und die der Visualisierungen machen auch Cooper et al. aufmerksam: »The visualizations in a scientific discovery game must achieve several purposes in order to allow players to apply their problem-solving skills. *They must reflect and illuminate the natural rules of the system*, in a way that makes state of the system evident to the player and directs them to where their contribution will be most useful. At the same time, the visualizations need to *manage and hide the complexity of the system*, so that players are not immediately overwhelmed by information. They must be *approachable by players* who have no knowledge of the scientific problem at hand. Thus, they should look inviting and fun, and not bring back memories of high school textbooks.« Cooper, et al., The challenge of designing scientific discovery games, 2010, S. 43 (Hervorhebungen im Original).

39 | »Foldit gives continuous feedback to the player about the quality of their folding attempts through a real-time score derived from the Rosetta free energy function. As more hydrophobic residues are buried and more hydrogen bonds established, the player's point total increases. In addition, the interface provides visual cues that highlight, for example, steric clashes that need to be resolved. The process of manually folding the protein provides players with the visual satisfaction of solving a puzzle, which, in addition to improving their numeric score, provides some of the psychological rewards of gameplay.« Good, Su, Games with a Scientific Purpose, 2011.

Durch die visuell-klickende Interaktion mit einem Puzzle kommt es neben reaktiven Berechnungen und Feedbacks seitens des Computers zu nachgelagerten Lernprozessen auf beiden Seiten der Schnittstelle, die letztlich in einem optimierten Spielverhalten und biologischen Systemen münden sollen. Indem die Spielaktivität im GUI nicht als reaktiv auf eine Darstellung der Algorithmen geschieht, sondern als programmatische Eingabe gewertet wird, die sich auf die lernenden Algorithmen auswirkt und diese auch zu einem dem System Software-Spiel-Spieler äußeren Zweck trainiert, verlagert sich die symbiotische Verschränkung von Computer und Human im Sinne Lickliders idealerweise zu einer synthetischen Verbindung höherer Qualität.

11.4 CROWD CONTROL: ›COOKBOOKS‹ ALS FORMALISIERUNGSHILFEN

»By interacting with thousands of players and learning from real experimental feedback, you will be pioneering a completely new way to do science. Join the global laboratory!«⁴⁰ Das globale Labor der zeitgenössischen Biologie verteilt sich bereits seit einiger Zeit auf Online-Datenbanken wie die *Registry of Standardized Biological Parts* oder die *Biomodels Database*. Doch während diese Datenbanktechnologien vor allem der Archivierung und Distribution biologischer Modelle nützlich sind, wird durch das zweckhafte Spielen bereits die Erzeugung und Optimierung molekularer Strukturen an eine unübersichtliche Anzahl von Menschen delegiert. Menschenmassen als Experimentatoren haben sich bislang im Fall der Proteinmodellierung mittels *Foldit* als erfolgreich erwiesen: »Recent work has demonstrated that crowdsourcing protein modeling problems to an online community through the game Foldit, which develops players' structure prediction skills, is an effective way to solve difficult protein structure modeling problems.«⁴¹ Bisherige rechnergestützte Methoden des Enzym-Design hatten die Hauptkette, den ›backbone‹ des Enzyms, unverändert gelassen, da Form und Struktur von Proteinen relativ wenig erforscht sind.⁴²

40 | Vgl. <http://eterna.cmu.edu/web/about/> (Abruf 15.01.2013).

41 | Firas Khatib, F. DiMaio, Foldit Contenders Group, et al.: Crystal structure of a monomeric retroviral protease solved by protein folding game players, in: *Nature Structural & Molecular Biology*, 18, 2011, 1175-1177, S. 1176; vgl. dazu auch: Jessica Marshall: Victory for crowdsourced biomolecule design: players of the online game Foldit guide researchers to a better enzyme, in: *Nature News*, 22.1.2012.

42 | »Players of the online game Foldit were challenged to remodel the backbone of a computationally designed bimolecular Diels-Alderase to enable additional interactions with substrates. Several iterations of design and characterization generated a 24-residue helix-turn-helix motif, including a 13-residue insertion, that increased enzyme activity >18-fold. X-ray crystallography showed that the large insertion adopts a helix-turn-helix structure positioned as in the Foldit model. These results demonstrate that human creativ-

»Shape is important because it explains the way in which proteins function and interact with cells, viruses or proteins of the human body. [...] Conventional methods to determine protein shapes include X-ray crystallography, nuclear magnetic resonance spectroscopy, and electron microscopy. Unfortunately, these methods are extremely expensive, costing up to 100,000 dollars for a single protein and there are millions of protein structures yet to be determined.«⁴³

Auch durch ungerichtete Remodellierungsstrategien könnten enzymatische Funktionen verbessert werden, doch stellen unzureichende Computerkapazitäten ein Hauptproblem dar, denn die steigende Anzahl der Möglichkeiten für ein »undirected remodeling [...] is too large to be systematically searched by automated methods.«⁴⁴

Um ästhetische Kombinatorik als nicht automatisierte, ungerichtete Modellierungsstrategie kostengünstig einzusetzen und zu formalisieren, haben die Entwickler von *Foldit* ein ›Kochbuch‹ entwickelt, das den Spielern die Möglichkeit gibt, ihre Spielstrategien mit anderen in standardisierter Weise zu teilen. Damit wird neben den Proteinen und den zu trainierenden Algorithmen auch die Crowd als intuitiv entscheidende Masse in ihrem Spielverhalten als optimierbar betrachtet. Ein großes Problem zur Formalisierung der menschlichen Strategie begründet sich paradoxerweise aus dem spielerischen Vorteil der menschlichen Masse, nämlich aus ihrer Intuition und dem stillen Wissen, welches bei der Lösung der Puzzel angewendet wird. So begann die Diskussion um die spielerischen Taktiken im Fall von *EteRNA* innerhalb der Foren des Spiels mit relativ unpräzisen Beschreibungen der eigenen Vorgehensweise.⁴⁵ Der Spieler ›Mummiebrain‹ reagiert auf die Idee eines andern Spielers zu einer spezifischen Lösungsstrategie etwa mit folgender Antwort: »I use exactly the same strategy – developed by trial and error. It would be good if we could see our solution after the fantastic winning display is finished. I often can't remember exactly what I've done to win.«⁴⁶ Andere Spieler können einige ›Regeln‹ benennen, z.B. zum Energieverhältnis oder zur Orientierung der Basenpaare, jedoch keinen allgemeinen ›Spielplan‹ anbieten.

ity can extend beyond the macroscopic challenges encountered in everyday life to molecular-scale design problems.« Eiben, et al., Increased Diels-Alderaseactivity, 2012, S. 190; vgl. Marshall, Victory for crowdsourced biomolecule design, 2012.

43 | Chiara Franzoni, Henry Sauermann: Crowd Science: The Organization of Scientific Research in Open Collaborative Projects, 2012 <http://ssrn.com/abstract=2167538> (Abruf 22.11.2012).

44 | Eiben, et al., Increased Diels -Alderaseactivity, 2012, S. 190.

45 | Auf der *EteRNA* Webseite wird angeregt, die eigene Methode zu publizieren, »which we can code up as an automated algorithm and test against existing computer programs.« <http://eterna.cmu.edu/web/about/> (Abruf 22.01.2013).

46 | Vgl. https://getsatisfaction.com/eternagame/topics/the_strategy_guide_to_solve_eterna_puzzles (Abruf 22.11.2012).

Doch nicht nur die Spieler selbst sollen ihre Leistungen auf ein Spiel optimieren können, um dem Ziel, potenzielle Synthese-Kandidaten zu erspielen, näherzukommen, vor allem die Entwickler von *EteRNA* versuchen die oft impliziten Spielstrategien zu formalisieren. So schreibt Adrien Treuille in einem Forumsbeitrag:

»In fact, we are planning to study and formalize player strategies to test them against existing algorithms for RNA design. [...] The heart of EteRNA is The Lab, where player designs are scored based on real experimental synthesis and validation. [...] There has never been a game quite like EteRNA before. It's going to be an exciting ride, and we're just beginning!«⁴⁷

Dass dieser »exciting ride« nicht nur von wissenschaftlichen, sondern auch ökonomischen Interessen getrieben ist, zeigt sich an der Rhetorik, die *Foldit* Entwickler David Baker in *Nature* bemüht: »There's this incredible amount of human computing power out there that we're starting to capitalize on.«⁴⁸ Die Kapitalisierung setzt die Formalisierung und Algorithmisierung der erfolgreichen Spielstrategien voraus. In *Foldit* geschieht dies mittlerweile auch auf Spielerebene durch das sogenannte »Cookbook«, da sich die Entwickler entschieden haben »to rely on a superior learning machine: Foldit players themselves.«⁴⁹ Damit können Spieler ihre Lösungsstrategien sowohl als »schriftliche Rezepte« wie auch durch visuelles Programmieren als Anleitungen codieren.⁵⁰

»To determine whether high performing player strategies could be collectively codified, we augmented the Foldit gameplay mechanics with tools for players to encode their folding strategies as »recipes« and to share their recipes with other players, who are able to further modify and redistribute them.«⁵¹

47 | Vgl. https://getsatisfaction.com/eternagame/topics/the_strategy_guide_to_solve_eterna_puzzles (Abruf 22.11.2012).

48 | David Baker zitiert in: Hand, People power, 2010, S. 685.

49 | Firas Khatib, S. Cooper, M.D. Tyka, et al.: Algorithm discovery by protein folding game players, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(47), 2011, 18949-18953, S. 18949.

50 | Seth Cooper, F. Khatib, I. Makedon, et al.: Analysis of Social Gameplay Macros in the Foldit Cookbook, in: *Proceedings of the 6th International Conference on Foundations of Digital Games*, ACM 2011, 9-14; »Recipes can be constructed using either a scripting language or a graphical interface that allows players to drag and drop different folding actions together into a workflow. These recipes can be shared with and extended by other players in much the same manner that code from open source software projects can be mixed and matched by developers. During a 3.5 month study period, 568 Foldit players wrote 5,202 folding recipes, which were collectively executed more than 150,000 times. Sharing between players resulted in the social evolution of the best strategies.« Good, Su, *Games with a Scientific Purpose*, 2011.

51 | Khatib, Cooper, Tyka, et al., Algorithm discovery by protein folding game players, 2011, S. 18949.

So wird nicht nur das eigentliche Design der Synthese Kandidaten an Spieler delegiert, auch die algorithmische Formalisierung erhält eine reflexive und kollektive Vorstufe in der spielenden Masse. Diese Aufgabe scheinen die Spieler ebenfalls mit einem gewissen Enthusiasmus zu verfolgen, denn »[p]layers developed over 5,400 different recipes, both by creating new algorithms and by modifying and recombining successful recipes developed by other players.«⁵² Die beiden erfolgreichsten ›Rezepte‹ und die darin verborgenen Algorithmen zeigten eine auffällige Ähnlichkeit zu noch nicht veröffentlichten Algorithmen, die Experten in der gleichen Zeit entwickelt hatten.⁵³ Trotz des Trainings im Spiel ist es der biologische Laienstatus der meisten Spieler, der sie als ästhetisch kombinierende Masse so interessant macht,

»because their creativity isn't constrained by what they think a correct answer should look like«, Treuille says. And that's precisely the value of crowdsourcing, he notes. ›It's not a linear thing to get the public involved in science,‹ Treuille says. ›It's incredibly nonlinear and all sorts of crazy things come out, some of it brilliant.«⁵⁴

Die Brillanz der kollektiven Intelligenz der Spieler zeigt sich in über 300 Designs, die tatsächlich im Labor synthetisiert wurden. Ob diese zu einer nachhaltigen Kapitalisierung der massenhaften Wissenschaftsbeteiligung führen, lässt sich bislang nicht abschätzen, doch kommt hinzu, dass sich die Idee oder Entwicklung eines erfolgreichen Designs oder Algorithmus nicht mehr auf nur eine Person oder geschlossene Gruppe zurückführen lässt, was zudem Fragen des Patentrechts aufwirft.⁵⁵

11.6 FAZIT

Das zweckhafte ästhetische Kombinieren im Fall der vorgestellten *Games with a Purpose* hat zwei synthetische Aspekte – einen stofflichen sowie einen algorithmi-

52 | Khatib, Cooper, Tyka, et al., Algorithm discovery by protein folding game players, 2011, S. 18949.

53 | Khatib, Cooper, Tyka, et al., Algorithm discovery by protein folding game players, 2011, S. 18949.

54 | Adrien Treuille zitiert in Michael Price: Will NIH Embrace Biomedical Research Prizes?, in: *ScienceInsider*, 19.7.2011. <http://news.sciencemag.org/scienceinsider/2011/07/will-nih-embrace-biomedical-research.html?ref=hp> (Abruf 15.01.2013).

55 | Vgl. Alain Pottage: The socio-legal implications of the new biotechnologies, in: *Annual Review of Law and Social Science*, 3, 2007, 321-344; Arti K. Rai, J. Boyle: Synthetic biology: caught between property rights, the public domain, and the commons, in: *PLoS Biology*, 5(3), 2007, e58; Gary Stix: Owning the stuff of life, in: *Scientific American*, 294, 2006, 76-83.

schen. Funktional und pragmatisch bedingen sich diese, doch in einer epistemologischen Betrachtung lassen sie die synthetischen Instanzen aufscheinen, derer sich eine ästhetische Kombinatorik bedient. Ein synthetischer Aspekt zeigt sich in den ›winning conditions‹ der Spiele, die die materiell-experimentelle Verwirklichung des Spielerfolgs versprechen. Konzeptionell lässt sich die Konstruktion dieser Synthese-Kandidaten jedoch nicht ohne die symbiotische Verschränkung von menschlichen und computationalen Prozessen auf der Ebene des GUI und seiner Visualisierungen denken, welche wiederum in optimierte algorithmische Prozesse überführt werden, die zudem auf die lange gemeinsame Vorgeschichte von Kombinatorik und Computation verweisen.⁵⁶ Insbesondere die iterative Verschmelzung des intuitiv-sinnlichen Erkenntnisvermögens mit algorithmischen Lernprozessen führt zu einer ästhetischen Kombinatorik, die symbiotische Koppungen voraussetzt, aber vor allem auf eine konzeptionelle Synthese gerichtet ist. Kombinieren wird in dieser Hinsicht zu einem Prozess, der sowohl das sinnhafte und sinnvolle Zusammenfügen disparater Elemente meint, wie auch, auf einer anderen Ebene, die Kombinationsstrategien als solche nutzt. Diese Zusammenführung menschlich-qualitativen Agierens und Erkennens mit der formalisierten Logik des Maschinellen führt zu einer höherwertigen Verbindung, die sich als konzeptionelle Synthese beschreiben lässt. Logisches Denken und dessen Formalisierung ist im Fall der *Games with a Purpose* eine nachrangige Fertigkeit, vielmehr geht es um das Sinnhafte des kombinatorischen Schließens. Nicht mehr nur die logische Abfolge eines Prozesses muss formalisiert werden, sondern die intuitive Abschätzung des erfolgreichen Wählens anhand inhaltlicher Kriterien.

Der nachhaltige Erfolg von *Games with a Purpose* zur Konstruktion von Synthese-Kandidaten in der Molekularbiologie kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht überblickt werden. Die Entwickler von *Foldit* planen Weiterentwicklungen und die Ausdehnung des Ansatzes auf andere Wissenschaftsgebiete, insbesondere solche, die räumliches Wahrnehmen und Vorstellungsvermögen zur Problemlösung voraussetzen und es Spielern erlauben »to contribute to advancing the frontiers of knowledge.«⁵⁷ Doch zeichnet sich bereits jetzt eine neue Form der Wissenschaftsbeteiligung ab, die digitale Medientechnologien als ›synthetische Vorstufe‹ in den experimentellen Prozess einschaltet, um menschliche Ressourcen als ›ästhetisches Kalkül‹ zu nutzen.

56 | Vgl. Peter Bexte, Werner Künzel: *Allwissen und Absturz. Der Ursprung des Computers*, Frankfurt a.M.: Insel Verlag 1993.

57 | Cooper, *The challenge of designing scientific discovery games* 2010, S. 47.

12. Converging Technologies

Christopher Coenen

12.1 EINLEITUNG

Die Debatte über ›Converging Technologies‹ (CT) hat sich seit Ende der 1990er Jahre hauptsächlich aus dem politischen Diskurs über Nanotechnologie entwickelt, wobei der Ausgangspunkt in den USA lag, seit Mitte der 2000er Jahre aber auch verstärkte Aktivitäten in Europa und anderswo festzustellen waren. Zum Teil äußerst kontrovers wird in dieser Debatte diskutiert, inwieweit verschiedene Technologien und Wissenschaften derzeit ›konvergieren‹ oder synergetisch zusammenwirken und welche Folgen solche Konvergenzprozesse kurz-, mittel- und langfristig haben könnten. Im Mittelpunkt stehen dabei die Nano-, Bio-, Informationstechnologien und -wissenschaften sowie die Kognitionswissenschaft, die zusammen oft als NBIC (nano, bio, info, cogno) abgekürzt werden, wobei die sogenannte NBIC-Initiative in den USA eine zentrale Rolle spielte.¹ Hirnforschung

1 | Auslöser der Debatte war der erste Workshop dieser Initiative, der im Oktober 2001, unterstützt von der National Science Foundation und dem US-Handelsministerium, durchgeführt wurde. Vgl. Mihail C. Roco, William S. Bainbridge (Hg.): *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology, and Cognitive Science*, Arlington: National Science Foundation 2002. Bis Mitte der 2000er Jahre legten die Initiatoren eine Reihe von weiteren Konferenzbänden vor und warben auch anderweitig für die Initiative, die aber nicht, wie geplant, eine offizielle forschungspolitische Initiative wurde. Vgl. dazu Christopher Coenen: *Deliberating visions: The case of human enhancement in the discourse on nanotechnology and convergence*, in: Mario Kaiser, M. Kurath, S. Maasen, C. Rehmann-Sutter (Hg.): *Governing future technologies. Nanotechnology and the rise of an assessment regime*, (Sociology of the Sciences Yearbook 27), Dordrecht u.a.: Springer 2010, 73-87. Sie inspirierte aber Initiativen in anderen Ländern und löste u.a. einen politisch-akademischen Diskurs über denkbare zukünftige Möglichkeiten eines ›Human Enhancement‹ und die Rolle des Transhumanismus in der Forschungspolitik und anderen Bereichen aus. Seit 2012 haben, nach einer längeren Pause mit nur geringen Folgeaktivitäten, einige der Initiatoren neue Aktivitäten zur NBIC-Thematik gestartet.

und Neurotechnologien und die Forschung zu ›Künstlicher Intelligenz‹ (KI) spielen in der Debatte eine besondere Rolle, aber auch andere Disziplinen (z.B. Sozialwissenschaften) und Technologiefelder (z.B. die Robotik) finden häufig Berücksichtigung.

Zur unmittelbaren Vorgeschichte dieser Konvergenzdebatte zählt der Diskurs über informationstechnologische und Medienkonvergenzen, wobei bereits von Manuel Castells, der die US-amerikanischen Initiatoren inspirierte, eine Ausweitung auf andere NBIC-Felder vorgenommen wurde.² Castells führt die Konvergenz zwischen den NBIC-Feldern und anderen Technologie- und Forschungsbereichen – vor allem Robotik und KI-Forschung – auf eine ihnen gemeinsame ›Logik der Informationserzeugung‹ zurück. Aufgrund dieser befruchteten sich Erkenntnisse über biologische Prozesse (insbesondere auch hinsichtlich des menschlichen Gehirns) und Fortschritte im informationstheoretischen Bereich (sowie insbesondere auch die KI-Forschung) gegenseitig. Konvergenzen zwischen den NBIC-Feldern fänden daher – in Bereichen wie der materiellen Integration von Biologie und Elektronik (z.B. Einsatz biologischer Materialien in der Mikroelektronik) und den Gehirn-Maschine-Schnittstellen – innerhalb des ›Informationsparadigmas‹ statt. Konvergenzen zwischen den NBIC-Feldern innerhalb des Informationsparadigmas durchdringen demnach den Kern menschlichen Lebens und Verstandes, was zu weitreichenden Visionen und starken Thesen (insbesondere in der Genetik und Hirnforschung) geführt habe. Die Entwicklung konvergierender Technologien und die »komplexe Matrix der Interaktion zwischen den technologischen Mächten, die unsere Spezies entfesselt hat, und der Spezies selber« seien aber Gegenstände der Forschung und »bewussten sozialen Handelns« – und nicht als schicksalhaft aufzufassen.³ Die alte Medienkonvergenzdebatte diene in der Folgezeit als Inspiration für einige Schlüsselfiguren des neuen NBIC-Konvergenzdiskurses.⁴

2 | Vgl. Manuel Castells: *Die Informationsgesellschaft* (1996), Bd. 1, Opladen: Leske + Budrich 2001.

3 | Castells, *Die Informationsgesellschaft*, Bd. 1, 2001, S. 82.

4 | Der renommierte – aber mit seinen weitreichenden Thesen zu einer Synthese von Sozial- und Biowissenschaften (›Soziobiologie‹) und einer neuen ›Einheit des Wissens‹ auch umstrittene – Biologe Edward O. Wilson zählt ebenfalls zu den wichtigsten akademischen Bezugspunkten der US-amerikanischen NBIC-Initiative. Die Vision einer neuen Einheit des Wissens hat aber nicht nur in der politisch-wissenschaftlichen Konvergenzdebatte im engeren Sinn Beachtung und Kritik erfahren. So wurde z.B. von Mario Bunge (2003), Philosoph und Physiker, der Versuch unternommen, einen nichtreduktionistischen Konvergenzansatz zu entwickeln, bei dem auch das Wechselspiel zwischen der Konvergenz und Ausdifferenzierung von Forschungsbereichen analysiert wird. Er kritisiert Wilsons Ansatz als reduktionistisch, weil dieser die Sozialwissenschaften zu einseitig im Rückgriff auf die Biologie zu reformieren trachte. Die Einheit der Wissenschaften sei zwar das Ziel, aber vor allem im Sinn konzeptioneller Einheit – ohne vorschnelle Einebnung von unterschiedli-

Als einigendes Charakteristikum der angesprochenen Technologie- und Wissenschaftsfelder werden oft Tendenzen der Miniaturisierung und die zunehmende Bedeutung der Mikro- und Nanoebene in Forschung und Entwicklung (FuE) genannt. Darüber hinaus wird argumentiert, dass es zahlreiche Beispiele für die gegenseitige Befruchtung der infrage stehenden Forschungsbereiche und für ihre Abhängigkeit voneinander gäbe. Deren Zusammenhang wurde von der NBIC-Initiative z.B. auf folgende Formel gebracht: »If the cognitive scientists can think it, the nano people can build it, the bio people can implement it, and the IT people can monitor and control it.«⁵ Neben solch eher plakativen Äußerungen wird oft auf konkrete aktuelle oder kurz- bis mittelfristig zu erwartende Beispiele für die gegenseitige theoretische und methodische Befruchtung und einander ermöglichende (»enabling«) Funktionen von Technologien und Wissenschaften hingewiesen.⁶

Der Konvergenzbegriff mutet allerdings hypertroph und wenig trennscharf an, und es gibt recht zahlreiche konkurrierende Konzeptionen. So uneinheitlich sich die Definitionen des Gegenstandes CT darstellen, so heterogen muten auch die Zielbestimmungen von Konvergenzprozessen an. Das Spektrum reicht hier von allgemeinen Leitbildern – z.B. die Verbesserung und Ausweitung menschlicher Fähigkeiten (»Human Enhancement«) oder die Weiterentwicklung der »Wissensgesellschaft« – über die Nutzbarmachung der CT für ganze gesellschaftliche und politische Handlungsfelder – z.B. Umwelt, Gesundheit oder Sicherheit – bis hin zu mehr oder weniger kleinteiligen einzelnen Anwendungsbereichen wie z.B. intelligentes Wohnen, besser ausgerüstete und physisch modifizierte Soldaten,

chen Erkenntnisansätzen und im Bewusstsein des dynamischen, nichtlinearen Charakters wissenschaftlicher Emergenz-, Konvergenz- und Ausdifferenzierungsprozesse. Vgl. Mario Bunge: *Emergence and Convergence: Qualitative Novelty and the Unity of Knowledge*, Toronto u.a.: University of Toronto Press 2003. Wie so oft in der NBIC-Debatte und dem durch sie maßgeblich geprägten neueren Diskurs über Human Enhancement und Transhumanismus, wird man auch hier wieder auf John Desmond Bernal zurückverwiesen. Dieser schrieb im Jahr 1965, dass im 20. Jahrhundert eine »general convergence of all sciences« festzustellen sei und dass dadurch die »connexion between microcosm and macrocosm has been transferred from the mystic imaginations of astrology to experimental, controllable facts«. John Desmond Bernal: *Science in History, Volume 1: The Emergence of Science*, (Preface to the Third Edition), London: C.A. Watts & Co. Ltd 1965 (revised third edition; orig. 1954), S. 14. Eine sehr ähnliche Einbettung der Konvergenzthese in eine Vision eines umfassenden wissenschaftlichen Weltverständnisses von der Mikro- bis zur kosmischen Ebene findet sich auch im ersten Bericht der NBIC-Initiative.

5 | Roco, Bainbridge, *Converging Technologies for Improving Human Performance*, 2002, S. 11.

6 | Vgl. Alfred Nordmann (als Rapporteur für die EU High Level Expert Group Foresighting the New Technology Wave): *Converging Technologies: Shaping the Future of European Societies*, Luxemburg: European Communities 2004.

Verbesserung der Trinkwasserqualität oder die Herstellung neuartiger Implantate.

Hinzu kommen, insbesondere unter dem Einfluss der NBIC-Initiative und der mit ihr z.T. kooperierenden transhumanistischen Bewegung, weitreichende Erwartungen an die technowissenschaftliche Entwicklung, die wie (quasi)religiöse Heilserwartungen, utopische Hoffnungen oder Ideen aus der Sciencefiction anmuten und in technikethischen Debatten der letzten Jahre einige Aufmerksamkeit erfahren haben (z.B. Vorstellungen eines paradiesischen Überflusses, von Mensch-Maschine-Mischwesen oder einer perfektionierten, »sozialtechnologischen« Steuerung gesellschaftlich-kultureller und politischer Prozesse). Neben den weniger spektakulären Visionen bzw. Möglichkeiten des »Human Enhancement« (z.B. durch Drogen) werden gerade auch diese futuristischen Ideen in letzter Zeit vermehrt kritisiert u.a. von religiöser Seite. Solch weitreichende Visionen sind technik(ideen)geschichtlich keineswegs neu, sie haben aber in den letzten Jahren eine andere Qualität gewonnen u.a. durch die neue Art und Weise, wie Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und gesellschaftliche Interessensgruppen (seit dem Ende des Ost-West-Gegensatzes) mit visionären Erwartungen an die wissenschaftlich-technologische Entwicklung umgehen, sowie durch die Entstehung soziokultureller Bewegungen, die stark umstrittene, optimistische oder pessimistische Extrempositionen zu diesen Erwartungen einnehmen. Der Disziplinen und Technologien übergreifende Anspruch des CT-Konzepts befördert offensichtlich das Zusammenwachsen verschiedener futuristischer Diskussionsstränge, gleichsam eine Konvergenz von Visionen zu Computernetzwerken, Künstlicher Intelligenz, Genetik, Nanotechnologie, Robotik, Weltraumtechnologien und anderen FuE-Feldern und -Bereichen.⁷ Vor dem Hintergrund unterschiedlicher, zum Teil gegensätzlicher Menschen- und Gesellschaftsbilder werden in diesem technikvisionären Diskurs aktuelle politische, gesellschaftliche, wissenschaftliche und ethische Probleme mit fantastisch anmutenden Zukunftsbildern vermengt.⁸

Die Diskussionen über CT erscheinen so insgesamt gesehen als eine schillernde Debatte mit u.a. folgenden Merkmalen:

- Sie besitzt potenziell eine hohe Relevanz für zahlreiche neuere Wissenschafts- und Technologiebereiche und für andere forschungspolitische oder akademische Diskussionen (z.B. über Multi-, Inter- und Transdisziplinarität,

7 | Vgl. Herbert Paschen, C. Coenen, R. Grünwald, et al.: *Nanotechnologie. Forschung, Entwicklung, Anwendung*, Berlin u.a.: Springer 2004; Christopher Coenen: Extreme Technikvisionen als Verantwortungsproblem, in: Ulrich Bartosch, G. Litfin, R. Braun, G. Neun-eck, G. (Hg.): *Verantwortung von Wissenschaft und Forschung in einer globalisierten Welt. Forschen – Erkennen – Handeln*, (Weltinnenpolitische Colloquien 4), Berlin u.a.: LIT, 2011, 231-255.

8 | Vgl. Jürgen Habermas: *Die Zukunft der menschlichen Natur*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 2001, 75f.

Innovationssysteme oder das Verhältnis zwischen Sozial- und Geisteswissenschaften und der Philosophie einerseits und Natur- und Ingenieurwissenschaften andererseits).

- Sie weist eine Vielfalt von Berührungspunkten mit ethischen sowie geistes-, kultur- und sozialwissenschaftlichen Debatten auf (z.B. über das Auflösen von Grenzen zwischen Mensch und Maschine sowie Natur und Technik, die Steigerung oder Ausweitung menschlicher Fähigkeiten bzw. »Human Enhancement« sowie Grundsatzfragen des Verhältnisses von gesellschaftlicher Entwicklung und technowissenschaftlichem Fortschritt).
- Sie hat Affinitäten zu populärkulturellen und literarischen Traditionen (z.B. Science Fiction und Technikutopien) sowie zum Technofuturismus, also zu jenen intellektuellen Strömungen, die weitreichende und radikal technikfokussierte Zukunftsvisionen propagieren.⁹ Der Technofuturismus hat in den letzten 10 bis 20 Jahren in Wissenschaft und Politik wieder an Bedeutung gewonnen, ist soziokulturell stärker verankert und wurde inhaltlich modernisiert. Er hat eine breitgefächerte Kritik auf sich gezogen, bei der es u.a. um das öffentliche Ansehen der infrage stehenden Forschungsbereiche, um Standards natur-, geistes- und sozialwissenschaftlicher Seriosität, um eine nachhaltige, sozial inklusive Technikentwicklung und rationale Forschungspolitik sowie um die Verteidigung säkular humanistischer oder religiöser Menschen- und Weltbilder geht.
- Sie hat einen Fokus auf den NBIC-Konvergenzen, wobei neue und denkbare »Human-Enhancement«-Technologien besondere Aufmerksamkeit erfahren. Eher in den Hintergrund getreten sind die Zukunftsvorstellungen des Nanotechnologievisionärs und -promotors Eric Drexler, der den frühen Diskurs über Nanotechnologie stark geprägt hatte, seit der politisch-wissenschaftlichen Etablierung des Forschungsfelds aber vor allem als Beispiel für eine extreme visionäre Position zitiert wird.¹⁰

Es lässt sich feststellen, dass die Konvergenzthematik auch in wissenschaftlichen Zeitschriften und auf wissenschaftlichen Konferenzen bereits in der Mitte der 2000er Jahre einige Beachtung gefunden hat, wobei sich – der ethischen und gesellschaftlichen Brisanz einiger Visionen und dem Technologiefelder übergrei-

9 | Vgl. z.B. Christopher Coenen: Utopian Aspects of the Debate on Converging Technologies, in: Gerhard Banse, A. Grunwald, I. Hronszky, G. Nelson (Hg.): *Assessing Societal Implications of Converging Technological Development*, Berlin/Karlsruhe: edition sigma 2007, 141-172.

10 | Vgl. Christopher Coenen: Nanofuturismus: Anmerkungen zu seiner Relevanz, Analyse und Bewertung, in: *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis*, 13(2), 2004, 78-85; Paschen, et al., *Nanotechnologie*, 2004.

fenden Charakter der CT entsprechend – unterschiedliche Disziplinen an der Diskussion beteiligt haben.¹¹

12.2 KONVERGENZDEBATTE

Auch wenn eine Vielzahl von wissenschaftlich-technologischen Feldern in der CT-Debatte thematisiert worden ist, so ist doch die ursprünglich von der NBIC-Initiative in den USA vorgenommene Fokussierung auf vier Felder weiterhin vorherrschend. Bei diesen Feldern handelt es sich um die Nano-, Bio- und Informationstechnologien (samt der zugehörigen Wissenschaften) sowie die Kognitionswissenschaft (>cognitive science<), einschließlich der angewandten Hirnforschung und der Neurotechnologien. Obwohl in der Konvergenzdebatte regelmäßig betont wird, dass es auch um Konvergenzprozesse zwischen Wissen-

11 | Vgl. William S. Bainbridge: Converging Technologies and Human Destiny, in: *Journal of Medicine and Philosophy*, 32(3), 2007, 197-216; Bernd Beckert, C. Blümel, M. Friedewald: Visions and Realities in Converging Technologies, in: *Innovation*, 20(4), 2007, 375-394; Jean-Pierre Dupuy: Some Pitfalls in the Philosophical Foundations of Nanoethics, in: *Journal of Medicine and Philosophy*, 32(3), 2007, 237-261; Liana Giorgi, J. Luce: Converging Science and Technologies, in: *Innovation*, 20(4), 2007, 307-311; Armin Grunwald: Orientierungsbedarf, Zukunftswissen und Naturalismus. Das Beispiel der ›technischen Verbesserung‹ des Menschen, in: *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*, 55(6), 2007, 949-965; Karen Kastenhofer: Converging Epistemic Cultures?, in: *Innovation*, 20(4), 2007, 359-373; George Khushf: The Ethics of NBIC Convergence, in: *Journal of Medicine and Philosophy*, 32(3), 2007a, 185-196; Brice Laurent: Diverging Convergences. Competing meanings of nanotechnology and converging technologies in a local context, in: *Innovation*, 20(4), 2007, 343-357; Ramon Malanowski, R. Compano: Combining ICT and cognitive science: opportunities and risks, in: *Foresight*, 9(3), 2007, 18-29; Alfred Nordmann: If and Then: A Critique of Speculative NanoEthics, in: *NanoEthics*, 1(1), 2007a, 31-46; Ingrid Ott, C. Papilloud: Converging Institutions: Shaping Relationships Between Nanotechnologies, Economy, and Society, in: *Bulletin of Science, Technology and Society*, 27(6), 2007, 455-466; Richard Saage: Politik und Konvergenztechnologien in den USA, in: *Leviathan*, 35(4), 2007, 540-559; Greg Tegart: Converging technologies and their implications for technology transfer: the cases of European networks (N EuroNet) and NBIC (nano-bio-info-cogno) technologies as drivers of convergence, in: *Innovation: Management, Policy & Practice*, 7(4), 2005, 468-476; Jim Whitman: The Challenge to Deliberative Systems of Technological Systems Convergence, in: *Innovation*, 20(4), 2007, 329-342. Auch in jüngster Zeit besteht noch, insbesondere im Bereich der Technik- und Bioethik, einiges Interesse an der NBIC-Konvergenz, wobei jedoch das Thema, vor allem für wenig visionär ausgerichtete Forschungen, sperrig bleibt. Vgl. z.B. Sonia Desmoulin-Canselier: What Exactly Is It All About? Puzzled Comments from a French Legal Scholar on the NBIC Convergence, in: *NanoEthics*, 6(3), 2012, 243-255.

schaften gehe, werden diese vier sogenannten ›NBIC‹-Felder zumeist unter dem Begriff ›CT‹ angesprochen.

Der Fokus auf die NBIC-Felder ist allerdings nicht überall akzeptiert worden. Auch die NBIC-Initiative selbst hat ihn immer wieder ausgeweitet. Zudem wird oft nur ein NBI-Konvergenzkonzept genutzt, also der Kognitionswissenschaft und Hirnforschung keine besondere oder gar herausragende Bedeutung beigemessen. Vor allem in der öffentlichen Diskussion, jedoch auch in politischen oder akademischen Initiativen oder Einzelbeiträgen, werden aber oft zudem die Robotik, die KI-Forschung und diverse sozial- und umweltwissenschaftliche Disziplinen zu den einander beeinflussenden Schlüsselfeldern gezählt. Je nachdem in welchem forschungs- und technologiepolitischen Zusammenhang auf Konvergenzprozesse Bezug genommen wird, finden sich überdies unterschiedliche Schwerpunktsetzungen hinsichtlich der FuE-Felder oder der Anwendungsbereiche. Und selbst bei der US-amerikanischen National Science Foundation (NSF), aus der die NBIC-Initiative hervorgegangen ist, finden sich vom NBIC-Konzept abweichende Konzeptionen.

Sowohl in Bezug auf die Konvergenzperspektive als auch hinsichtlich der stark visionären Perspektiven brachten die Initiativen zur Nanotechnologie eine neue Qualität des forschungs- und technologiepolitischen Diskurses hervor: Zum einen wurden die Konvergenzen zwischen der Physik, Chemie und Biologie noch einmal verstärkt betont, insbesondere auch in Bezug auf technologische Anwendungen und die Materialwissenschaft.¹² Zum anderen ist in den Diskussionen über Nanotechnologie um den Jahrhundertwechsel bereits die eigentümliche Doppelung der Konvergenzperspektive festzustellen, der die CT-Debatte bis heute stark prägt: Die Nanotechnologie wird sowohl als ein zentraler Bereich des Zusammenwachsens der drei klassischen Disziplinen sowie von Bio- und Informationstechnologien angesehen als auch als eines von drei, vier oder mehr konvergierenden Feldern, wobei neben den NBIC-Feldern z.B. die Mikrosystemtechnik oder auch Sozialwissenschaften genannt werden. Bedeutende Innovationen werden nun nicht mehr in den klassischen Disziplinen bzw. ›Kernwissenschaften‹ erwartet, sondern in den Verschmelzungs- und ›Grenzbereichen‹, die durch »solche Disziplinen wie Biotechnologie, Nanotechnologie, IuK-Technologien und auch Kognitionswissenschaften« markiert werden.¹³ Zugleich verbreitete sich, ausgehend vor allem von den USA, eine Rhetorik, die das Zusammenfließen zentraler Wissenschaften und Technologien auf der Nanoebene mit starken Visionen verbindet, bis hin zur Voraussage eines neuen, ›hierarchischen‹ Verständnisses der Wirklichkeit ›von der Nanoebene bis zur kosmischen Ebene‹. Dabei erlangen

12 | Vgl. European Commission (Research Directorate-General): *Joint EC/NSF Workshop on Nanotechnologies*, Luxemburg: European Commission 2001, S. 3; Paschen, et al., *Nanotechnologie. Forschung, Entwicklung, Anwendung*, 2004.

13 | BMBF Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Mikrosystem. Rahmenprogramm zur Förderung 2006-2009*, Bonn: BMBF 2006, S. 33.

die Visionen des Nanofuturismus und Posthumanismus stärkere Beachtung. Sie reichen von Bildern eines paradiesischen Zustands globalen Wohlstands und des Weltfriedens bis hin zur Idee einer Ergänzung, Ersetzung oder Abschaffung der Menschheit durch posthumane Wesen.

Selbst wenn – wie z. B. in einer Definition des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) – zur Nanotechnologie vor allem »Forschungsgebiete aus der belebten und unbelebten Natur« gezählt werden,¹⁴ die zu Anwendungen in der Energie-, Umwelt- und Informationstechnik führen (also unter Ausblendung der medizinischen Nanobiotechnologie, der Hirnforschung und stark visionärer Aspekte), handelt es sich bei »Nanotechnologie« um einen größenbezogenen Oberbegriff, in diesem Fall für unterschiedlichste Arten der Analyse und Bearbeitung von Materialien. Der Charakter als Oberbegriff hat konsequenterweise auch dazu geführt, dass mittlerweile oft von »Nanotechnologien und -wissenschaften« (also im Plural) die Rede ist. In der CT-Debatte erscheint nun aber nicht nur, in eigentümlicher Dopplung, die Nanotechnologie als ein konvergierendes Feld, sondern überdies noch die »Kognitionswissenschaft«, wobei es sich ebenfalls um einen Oberbegriff für ein stark multidisziplinäres Feld handelt.¹⁵ »Konvergierende Technologien« fungieren somit als ein Sammelbegriff für den weitreichenden Oberbegriff »Nanotechnologie« und drei andere Begriffe, von denen zumindest einer, die »Cognitive Science«, ebenfalls ein weitreichender Oberbegriff ist. Diese Konzeption hat zu einer gewissen Unübersichtlichkeit der Konvergenzdebatte beigetragen, die durch weitere Spezifika des kognitionswissenschaftlichen Feldes noch verstärkt wurde. Man mag die daraus oftmals resultierende Verwirrung als produktiv begrüßen, da gerade durch sie international eine vielfältige politisch-akademische Diskussion über gesellschaftliche und ethische Aspekte aktueller wissenschaftlich-technologischer Entwicklungen in Gang gesetzt wurde. Es stellt sich aber dennoch zumindest die Aufgabe, die Rolle der »Kognitionswissenschaft« in der NBIC-Konvergenz näher zu bestimmen, unter Berücksichtigung der Vielfalt des Feldes. Diese Aufgabe wird weithin als Schlüsselproblem der Konvergenzthematik angesehen.¹⁶ Von besonderer Bedeutung erscheinen in dieser Hinsicht

14 | BMBF Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Nanotechnologie. Eine Zukunftstechnologie mit Visionen*, Bonn: BMBF o.J.

15 | Vgl. Daniel Andler, V. Pagarde: *Cognitive science within Convergence: A first attempt at delineating the field in Europe*, (Deliverable D1.1 – Part B. Bericht des CONTECS-Konsortium an die Europäische Kommission gemäß Vertrag 028837), Brüssel: Europäische Kommission 2006.

16 | Vgl. Paradiso Coskina, Y. Kaminorz: *Converging Technologies – Potentiale für Deutschland*, in: GMM/VDE/VDI(Hg.): *Mikrosystemtechnik Kongress 2005*, (10.-12. Oktober 2005, Freiburg), Berlin: VDE Verlag 2005, 313-316; Nordmann, *Converging Technologies*, 2004; Lars Heinze: *Converging Technologies for Smart Systems Integration. The Reinvention of the Engineering Sciences*, in: *MST News*, 2, 2007, 38-40.

die für Kognition relevanten Technologien, vor allem die Neurotechnologien, da sie gleichsam ein Bindeglied zwischen allen vier NBIC-Feldern sind.¹⁷

Auf jeden Fall wurde durch die in den USA erfolgte Aufnahme der ›Cognitive Science‹ in die NBIC-Quadrige zweierlei ausgelöst: Zum einen rückten bestimmte Bereiche der Hirnforschung und Neurotechnologien in den Mittelpunkt der Diskussion, z.B. neue Hirn-Computer-Schnittstellen (Brain-Computer Interfaces, BCI).¹⁸ Zum anderen kamen – in Zurückweisung dieser Schwerpunktsetzung oder in Anknüpfung an sozial- und geisteswissenschaftliche Elemente der Kognitionswissenschaft – die Sozial- und Geisteswissenschaften sowie die Philosophie ins Spiel. Die dadurch erfolgte Betonung gesellschaftlicher und ethischer Aspekte naturwissenschaftlich-technologischer Konvergenzen und die Konzentration der CT-Debatte auf Anwendungen am Menschen kennzeichnen die wichtigsten Initiativen diesseits wie jenseits des Atlantiks.

Ein umfassendes Konzept konvergierender Technologien und Wissenschaften (bzw. ›Wissenssysteme‹) wurde von der hochrangigen Expertengruppe vorgelegt, die sich als erste Forschergruppe im Auftrag der EU mit der CT-Thematik befasst hat: Dabei stehen zwar immer noch die NBIC-Felder im Mittelpunkt des Interesses, aber deren Konvergenzen werden in einem Rahmen analysiert, der die ganze Vielfalt gegenseitig ›ermöglichender‹ (›enabling‹) Qualitäten und Funktionen moderner Wissenschaften und Technologien berücksichtigen will.

12.3 KONVERGENZBEREICHE

Im Folgenden wird – in enger Anlehnung an die Arbeit der erwähnten EU-Expertengruppe¹⁹ – ein Überblick über angenommene Wechselwirkungen und einander ermöglichende (›enabling‹) Qualitäten konvergierender Wissenschaften und Technologien geboten. Überdies wird bereits kurz dargelegt, welche Beziehungen zwischen politischen Prioritäten der CT-Promotoren in den USA, dem Ursprungsland der Debatte, und der Annahme bestimmter Konvergenzen bestehen könnten.

17 | Vgl. Torsten Fleischer, Michael Decker: Converging Technologies. Verbesserung menschlicher Fähigkeiten durch emergente Techniken?, in: Alfons Bora, Michael Decker, Armin Grunwald, et al. (Hg.): *Technik in einer fragilen Welt. Die Rolle der Technikfolgenabschätzung*, Berlin: edition sigma 2005, 121-132.

18 | Vgl. Reinhard Merkel, G. Boer, J. Fegert, et al.: *Intervening in the Brain. Changing Psyche and Society*, Berlin u.a.: Springer 2007; Thomas Stieglitz, Stefan Rosahl: *Neuroelektrische Schnittstellen zum zentralen Nervensystem des Menschen*, Gutachten im Auftrag des Deutschen Bundestages, Freiburg, 2005; Leonhard Hennen, R. Grünwald, C. Revermann, A. Sauter: *Einsichten und Eingriffe in das Gehirn. Die Herausforderung der Gesellschaft durch die Neurowissenschaften*, Berlin: edition sigma, 2008.

19 | Vgl. Nordmann, *Converging Technologies*, 2004.

Nanotechnologie

Die Nanotechnologie macht sich charakteristische Effekte und Phänomene zunutze, die im Übergangsbereich zwischen atomarer und mesoskopischer Ebene auftreten.²⁰ Auf der einen Seite gibt es den sog. ›Top-down‹-Ansatz, der vor allem in der Physik und physikalischen Technik dominiert: »Hier werden von der Mikrosystemtechnik ausgehend Strukturen und Komponenten immer weiter miniaturisiert. Dementsprechend wird die Mikrosystemtechnik von der Bundesregierung und anderen Akteuren als eine entscheidende ›ermöglichende‹ (›enabling‹) Technologie im Zusammenhang mit der NBIC-Konvergenz aufgefasst. Auf der anderen Seite steht der ›Bottom-up‹-Ansatz,

»bei dem immer komplexere Strukturen gezielt aus atomaren bzw. molekularen Bausteinen aufgebaut werden. Dieser Ansatz wird bislang eher durch die Chemie und Biologie repräsentiert, in denen der Umgang mit Objekten in der Nanometerdimension seit Langem vertraut ist. Charakteristisch ist beim Übergang auf die Nanometerskala, neben der zunehmenden Dominanz quantenphysikalischer Effekte, dass Oberflächen- bzw. Grenzflächeneigenschaften gegenüber den Volumeneigenschaften des Materials eine immer größere Rolle spielen.«²¹

Die Nanotechnologie erfordert somit einen hohen Grad an inter- und transdisziplinärer Kooperation und Kommunikation, da Konzepte aus der Physik, Chemie und Biologie ineinander greifen sowie die Methoden einer einzelnen Disziplin durch Verfahren und Fachkenntnisse aus den anderen Fachrichtungen ergänzt werden müssen.²² Von ihrem Konzept her befruchtet die Nanotechnologie andere Technologien,

»weil sie einen gemeinsamen Rahmen für alle Konstruktionsprobleme bietet: Alles, was aus Molekülen besteht, kann grundsätzlich integriert werden. [...] Die Nanotechnologie befruchtet die Biotechnologie durch Entwicklung neuer Bildgebungsverfahren, Sonden und Sensoren. Sie erfüllt auch die Miniaturisierungsanforderungen der Informationstechnologie. Nanochips und Nanosensoren werden auch zu weiteren Fortschritten in der Bioinformatik führen.«²³

Informations- und Kommunikationstechnologien

Die Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) mit den zugehörigen Wissenschaften und Forschungsbereichen sind zusammen sowohl in theoretischen

20 | Vgl. dazu und zum Folgenden: Paschen, et al., *Nanotechnologie*, 2004, S. 1ff.

21 | Vgl. Paschen, et al., *Nanotechnologie*, 2004, S. 1f.

22 | Paschen, et al., *Nanotechnologie*, 2004, S. 2.

23 | Nordmann, *Converging Technologies*, 2004, S. 16.

schers als auch in praktischer Hinsicht für die anderen konvergierenden Felder relevant. Die Befruchtungen und ›Enabling‹-Funktionen zwischen den Info- und Biofeldern sind zahlreich. Ohne Zweifel basieren z.B. viele Fortschritte in der Biotechnologie und Hirnforschung auf den Möglichkeiten computertechnologischer Modellierung, Simulation und Visualisierung.²⁴ Oft konstatiert wird auch der disziplinenübergreifende Einfluss von Informationsbegriffen aus dem Bereich der Nachrichtentechnik, Kybernetik und Informatik, der Voraussetzung für viele dieser Einflüsse ist. Diese Begriffe haben z.B. maßgeblich die Entwicklung der Genetik mitbestimmt und spielen auch in den Neurowissenschaften sowie in der ›Synthetischen Biologie‹ noch eine wichtige Rolle, obwohl sie in der Biologie allgemein schon seit Längerem oft als rein metaphorisch eingestuft werden. Insbesondere hinsichtlich ihrer Nutzung in sozial- und geisteswissenschaftlichen Feldern werden auch grundsätzliche Einwände erhoben. Diese Einwände klingen in der CT-Debatte vielfach an,²⁵ z.B. was eine visionär aufgeladene Reduktion aller biologischen und sozialen Prozesse auf Information betrifft oder mit Blick auf die in den extremen Visionen aufscheinenden Selbstwidersprüche.²⁶

Biotechnologien und -wissenschaften

Die Biotechnologien und -wissenschaften befruchten in vielfältiger Weise andere FuE-Bereiche, insbesondere durch die Identifikation von chemischen und physikalischen Prozessen sowie algorithmischen Strukturen in lebenden Systemen, die auf ihre materielle Basis in Zellen und Genen zurückgeführt werden.²⁷ Es wird damit gerechnet, dass sie die IKT, z.B. durch Entwicklung der Grundlagen für DNA-gestützte Computersysteme befruchten. Die Nanobiotechnologie hat sich als disziplinenübergreifendes Teilgebiet der Nanotechnologie etabliert und dabei auch in der FuE-Förderung Relevanz erlangt.²⁸ Als ›Bionik‹ werden die vielfältigen Aktivitäten zur Übertragung von biologischen Lösungen auf technische Probleme bezeichnet, ein Feld, in dem sozusagen ›naturgemäß‹ eine Vielzahl von NBIC-Konvergenzprozessen feststellbar ist.²⁹ Im selbst stark visionären Diskurs

24 | Vgl. Nordmann, *Converging Technologies*, 2004, S. 16.

25 | Vgl. Nordmann, *Converging Technologies*, 2004, S. 16.

26 | Vgl. Jaron Lanier: One-Half of a Manifesto. Why stupid software will save the future from neo-Darwinian machines, in: *Wired*, 8(12), 2000. URL: www.wired.com/wired/archive/8.12/lanier_pr.html; Jean-Pierre Dupuy: *The Mechanization of Mind*, Princeton/Oxford: Princeton University Press 2000; Dupuy, *Some Pitfalls in the Philosophical Foundations of Nanoethics*, 2007.

27 | Vgl. Nordmann, *Converging Technologies*, 2004.

28 | Vgl. Paschen, et al., *Nanotechnologie*, 2004.

29 | Vgl. Dagmar Oertel, A. Grunwald: *Potenziale und Anwendungsperspektiven der Bionik*, TAB-Arbeitsbericht Nr. 108, Berlin: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag 2006.

über die Genetik und Biotechnologie spielen Ideen zu einer weitreichenden Konvergenz mit den anderen NBIC-Feldern schon seit Längerem eine Rolle.³⁰

Über diese Aspekte hinaus ist hier noch eine übergreifende Perspektive von Belang, die das Verhältnis zwischen den physikalischen und biologischen Wissenschaften betrifft: War lange Zeit die Physik Leitwissenschaft, sozusagen das ›Maß der Naturwissenschaft‹, wird seit geraumer Zeit häufig die Biologie,³¹ wenn nicht als ›Leitwissenschaft‹ des 21. Jahrhunderts,³² so doch wenigstens als die konzeptionell relevanteste Naturwissenschaft angesehen und entsprechend gefördert. Die Neurowissenschaften wiederum werden oft – zusammen mit der Molekularbiologie – als ein entscheidender Faktor in diesem Bedeutungszuwachs der Biologie betrachtet. Hieran knüpfen sich zum Teil mehr oder minder reduktionistische Vorstellungen an, dass die Analyse kognitiver wie auch soziokultureller Prozesse (also die »Erforschung des Menschen« im umfassenden Sinn) verstärkt auf biologisch-neurologischer Basis erfolgen kann.³³ Zumindest ein stark reduktionistischer Biologismus, wie er in der CT-Debatte von einem Hauptakteur der NBIC-Initiative in den USA vertreten wird,³⁴ stößt in großen Teilen der Sozial- und Geisteswissenschaften und Philosophie allerdings auf noch schärfere Kritik als der kybernetisch-informationstheoretische Reduktionismus.³⁵ Die NBIC-Initiative in den USA verband diese Reduktionismen mit den Visionen einer ›sozial-technologisch‹ einsetzbaren, sich der Hirnforschung und neuer IKT bedienenden empirischen Sozial- und Kulturwissenschaft sowie einer Art ›global brain‹ zusammenwachsenden Menschheit.

Neurowissenschaften und -technologien

Neben diesen außerhalb der NBIC-Initiative wissenschaftlich eher randständigen Visionen werden mit den Neurowissenschaften und -technologien aber zudem Visionen verbunden, die durchaus auch im Mainstream des wissenschaftlichen

30 | Vgl. z.B. Ernst & Young: *Convergence – The Biotechnology Industry Report (Millennium Edition)*, 2000.

31 | Ernst Mayr: *Die Entwicklung der biologischen Gedankenwelt. Vielfalt, Evolution und Vererbung*, Berlin u.a.: Springer 1984, S. 35.

32 | Vgl. BMBF Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Rahmenprogramm Biotechnologie – Chancen nutzen und gestalten*, Bonn: BMBF 2001.

33 | Mayr, *Die Entwicklung der biologischen Gedankenwelt*, 1984, S. 35.

34 | Vgl. William S. Bainbridge: *Converging Technologies*, (Präsentation auf dem Workshop ›Nanotechnology, Biotechnology, and Information Technology: Implications for Future Science at EPA‹ des U.S. Environmental Protection Agency Science Advisory Board, 01./02.12.2004), Washington 2004. URL: www.epa.gov/sab/pdf/sab_workshop_bainbridge.pdf.

35 | Vgl. z.B. Bunge, *Emergence and Convergence*, 2003.

und politischen Diskurses verbreitet sind.³⁶ Die Erforschung des menschlichen Gehirns, als des angeblich komplexesten bisher bekannten Systems, wird hier gleichsam zum Modell für FuE in den konvergierenden Wissenschaften und Technologien insgesamt. Dabei an Bereiche wie die KI-Forschung, Neuroinformatik und -robotik sowie Neurobionik kann angeknüpft werden, die selbst schon aus NBIC-Konvergenzprozessen hervorgegangen sind. Problematisch erscheint mit Blick auf die forschungspraktische und politische Relevanz des NBIC-Konzepts, dass durch die ›Herauslösung‹ des Neurobereichs aus dem Feld der Biowissenschaften und -technologien eine neue Konvergenz proklamiert wird, die nicht nur quer zu den meisten politischen Strukturierungen der FuE-Felder steht, sondern inhaltlich auch nur gerechtfertigt wäre, wenn man mit der Einbettung der Hirnforschung und Neurotechnologien in ein weites Konzept der Kognitionswissenschaften ernst machte.

Kognitionswissenschaft

Die Kognitionswissenschaft in einem umfassenden Sinn verstanden, also unter Einbeziehung von Sozialwissenschaften, Psychologie und geisteswissenschaftlichen Disziplinen, wurde in der CT-Debatte zwar tatsächlich von verschiedenen Seiten als Schlüsselement wissenschaftlich-technologischer Konvergenzprozesse ins Spiel gebracht. Mit der Aufwertung der Kognitionswissenschaft zu einem von vier konvergierenden FuE-Schlüsselfeldern handelt man sich aber zum einen das Problem ein, dass ein Großteil der angestrebten sozial- und geisteswissenschaftlichen Forschung zu naturwissenschaftlich-technischen Konvergenzprozessen in Anknüpfung an die kognitionswissenschaftliche Tradition erfolgen müsste, die zwar in sich sehr vielfältig ist, gleichwohl methodisch, thematisch und hinsichtlich ihrer theoretischen Ressourcen keineswegs die Sozial- und Geisteswissenschaften in ihrer Breite abbildet.³⁷ Zum anderen ist zu beachten, dass das Konzept der ›cognitive science‹, das die US-amerikanische NBIC-Initiative vertritt, nicht nur die Neurotechnologien sehr stark betont, sondern überdies von dieser dazu genutzt wurde, fragwürdige Ideen zu einer sozialtechnologischen Steuerung gesellschaftlicher und kultureller Prozesse in ihr visionäres Programm zu integrieren.

Sozial- und Geisteswissenschaften sowie Philosophie

Auf jeden Fall wird, nicht nur bezogen auf die Kognitionswissenschaften, in der Konvergenzdebatte den Sozial- und Geisteswissenschaften und der Philosophie eine konzeptionell hohe Bedeutung beigemessen. Dies war bei verschiedenen

36 | Vgl. Merkel, et al., *Intervening in the Brain*, 2007; Hennen, et al., *Hirnforschung*, 2007.

37 | Vgl. Andler, Pagarde, *Cognitive science within Convergence*, 2006.

internationalen Akteuren der Fall – z.T. (wie in den USA) unter besonderer Betonung der Systemanalyse und Komplexitätsforschung –, insbesondere aber auf EU-Ebene. So wurde in der für die EU-Aktivitäten zentralen CTEKS-Agenda³⁸ die Liste von sich gegenseitig befruchtenden Schlüsseltechnologien und Wissenssystemen, um die Kognitionswissenschaft, die Umweltwissenschaft, die Systemtheorie und die Sozial- und Geisteswissenschaften einschließlich Philosophie, Wirtschaft und Recht erweitert.³⁹ Von ihrem Konzept her könnten die Geistes-, Sozial- und Humanwissenschaften auf verschiedene Weise befruchtend wirken: Bekannte Beispiele seien die Spieltheorie, Strategien zur Maximierung von Gewinnen und zur Minimierung von Kosten, Modelle zu wirtschaftlichen Formen des Austauschs, Mustererkennung durch den Menschen oder durch Maschinenintelligenz sowie die Semiotik als allgemeine Zeichentheorie der vom Menschen und durch die Natur produzierten Zeichen. Diese Wissenschaften böten Verfahren zum probabilistischen Schließen und zu statistischen Schlussfolgerungen, Methodologien für qualitative Forschung und ein Verständnis der Gesellschaftsdynamik bei der Schaffung und Verbreitung von technologischen Innovationen. Wirtschaft und Recht befruchteten Forschung und Entwicklung, indem sie die Anreize für die Unterstützung und Verbreitung definieren. Und Philosophie, Kulturwissenschaften und Ethik böten Orientierung, wenn neue Technologien traditionelle Lebensweisen zerstören. Überlegungen dieser Art führen zu einer Konzeption wissenschaftlich-technologischer Konvergenz, in der die Sozial-, Geistes- und Kognitionswissenschaften gleichsam den Rahmen für NBIC-Konvergenzen und deren gesellschaftliche Anwendungen bilden.

12.4 KONVERGENZANWENDUNGEN

Biomedizinischer Bereich

Seit Beginn der 2000er Jahre wurden auch in Bezug auf den biomedizinischen Bereich neue Konvergenzkonzepte thematisiert, insbesondere in kanadischen Aktivitäten.⁴⁰ In diesem Bereich werden oft besonders große sozioökonomi-

38 | Nordmann, *Converging Technologies*, 2004; Alfred Nordmann: European Experiments, in: *Osiris* 24(1), 2009, 278-302.

39 | Vgl. Nordmann, *Converging Technologies*, 2004, S. 16f.

40 | Vgl. z.B. Michael Mason, S. Fantechi, R. Tomellini: *EuroNanoForum 2005. Nanotechnology and the Health of the EU Citizen in 2020*, (European and International Forum on Nanotechnology), Edinburgh 2006. URL: ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/euronanoforum2005_proceedings.pdf; Ascher Shmulewitz, R. Langer, J. Patton: Convergence in Biomedical Technology, in: *Nanobiotechnology*, 24(3), 2006, 277-281.

sche Potenziale gesehen, z.B. mit Blick auf die sog. ›alternden Gesellschaften‹.⁴¹ Unter dem Label ›Convergent Medical Technologies‹ (CMT) – mit Bezügen zu den Labels ›Kombinationsprodukte‹ und ›Biodevices‹ – wurden z.B. von einigen privatwirtschaftlichen und universitären Akteuren in Kanada und in rein angelsächsischen Ländern die Implikationen von Konvergenzprozessen der Biowissenschaften und -technologien mit der Nanotechnologie, den IKT, der Robotik, der Materialwissenschaft und anderen Bereichen diskutiert. Sie sind insofern hinsichtlich der Strukturierung von technologischen Konvergenzbereichen von Interesse, weil sie im Gegensatz zu zentralen Akteuren der CT-Debatte auf EU-Ebene und in den USA den Fokus auf das biotechnologische und -wissenschaftliche Feld legen. Die CMT werden z.B. definiert als Resultate von Synergien von zwei oder mehr Technologien, durch die neue, hybride Geräte, Prozesse oder Produkte entstehen, die in den Bereichen Gesundheitsvorsorge und -überwachung, Diagnose, Therapie, oder ›funktionelles Enhancement‹ eingesetzt werden können.⁴² Dabei gehe es nicht um einfache Kombinationsprodukte, sondern tendenziell um ›disruptive‹, also schnell massive Veränderungen auslösende Technologien. In diesen Aktivitäten wie auch in Foresight-Aktivitäten der kanadischen Regierung stellt man eine Distanz bzw. ein partielles Abrücken vom NBIC-Konvergenzkonzept fest, zugunsten einer Strukturierung technologischer Felder nach NBI-Konvergenzen, in die neurotechnologische Anwendungen und Visionen integriert werden. Genau dieses Konzept wurde auch von dem Ingenieur und Raketenexperten Abdul Kalam im Jahr 2006, also während seiner Amtszeit (2002-2007) als Staatsoberhaupt Indiens, propagiert. Dabei wird der Ansatz, sich kognitionswissenschaftlicher Erkenntnisse für die medizintechnische Entwicklung zu bedienen nicht ausgeschlossen, findet aber in der Systematik keinen Platz.⁴³ Kritisch wird in Bezug auf die Nutzung des Konvergenzkonzepts im biomedizinischen Bereich u.a. angemerkt, dass technologische Konvergenzprozesse in den Life Sciences und der Medizin schon immer entscheidend für Innovationen gewesen seien, dass durch ein Schüren von Erwartungen an Konvergenz womöglich ein übertrieben optimistisches Bild der Zukunft entstehe (für einen stark visionären

41 | Vgl. EC IPTS European Commission Directorate-General Joint Research Centre Institute for Prospective Technological Studies: *Foresight on Information Society Technologies for The European Research Area (FISTERA). Key Findings*, IPTS Technical Report EUR 22319 EN, Brüssel: Europäische Kommission 2006.

42 | Vgl. John Soloninka: *Convergent Medical Technologies. Local Impacts, Global Opportunities*, (Präsentation auf dem YORKBiotech Inaugural Meeting, York University, Toronto), 2005. URL: www.htx.ca/downloadfile.aspx?id=7bfe1aa8-b3a9-4cc6-9c55-50832f5fffe2.

43 | Vgl. Klaus-Peter Hoffmann, M. Schweigmann: The Convergence of Nano, Bio, Information Technologies and Cognitive Sciences in Biomedical Engineering, in: *MST News*, 2, 2007, 40-43.

Optimismus)⁴⁴ und dass dadurch wiederum die Komplexität menschlicher Biologie und konkrete Anwendungsmöglichkeiten aus dem Blick geraten könnten.⁴⁵

Bionik

Wenn man Bionik als die Gesamtheit der Versuche begreift, »mit wissenschaftlichen Mitteln ›von der Natur‹ für technische Problemlösungen zu lernen« so kann mit den neuen NBIC-Konvergenzen auch die Entstehung einer ›neuen Bionik‹ konstatiert werden.⁴⁶ (Durch ihr besonderes Interesse an Mensch-Maschine-Schnittstellen, Robotik und Prothetik ist zudem die FuE, die im englischen Sprachraum unter den Begriffen ›bionics‹ bekannt ist, auf das Engste mit NBIC-Konvergenzen verbunden.) Bionische Prinzipien sollen nun zu verschiedensten Zwecken auf der Nanoskala erneut zur Anwendung kommen. Die neue Bionik umfasst dabei u.a. Nanobionik, Neurobionik und Prothetik sowie das Natural Computing. Auch hier lässt sich der Trend feststellen, dass durch Fortschritte in der NBIC-Konvergenz und insbesondere durch die Etablierung der Nanotechnologie als ein zentrales FuE-Feld interne Umgruppierungen oder ›Neuerfindungen‹ älterer FuE-Bereiche stattfinden (wie z.B. auch im Fall der Toxikologie).⁴⁷

Die Nanobionik, bei der Abgrenzungsschwierigkeiten nicht nur hinsichtlich der (noch weitgehend aus Grundlagenforschung bestehenden) Nanobiotechnologie, sondern auch hinsichtlich der Gentechnik existieren, ist vor allem für den sog. ›Nano2Bio‹-Bereich relevant, der u.a. das ›Natural Computing‹ und die Konstruktion technisch-biologischer Schnittstellen, z.B. auch für Neuroimplantate und Prothesen, voranbringen soll. Zwar ist die Prothetik für die deutsche Bionik mehrheitlich immer noch ein Grenzbereich, tatsächlich bedienen sich aber zahlreiche Forschungsprojekte in diesem Anwendungsbereich der bionischen Prinzipien, auch einige in der CT-Debatte im Zentrum Stehenden. Auch in der öffentlichen Wahrnehmung und bei Firmen, die entsprechende Produkte anbieten, werden Prothesen häufig mit der Bionik assoziiert. Die Neurobionik ist ebenfalls ein unklar definiertes Konzept. Es bezieht sich in der Forschung zumeist auf die inspirierende Funktion der Neurobiologie und biologischen Kybernetik für die

44 | Vgl. z.B. Ernst & Young, *Convergence – The Biotechnology Industry Report (Millennium Edition)*, 2000.

45 | Shmulewitz, Langer, Patton, *Convergence in Biomedical Technology*, 2006, S. 280f.

46 | Vgl. Oertel, Grunwald, *Potenziale und Anwendungsperspektiven der Bionik*, 2006, 5; vgl. dazu und zum Folgenden Rüdiger Haum, O. Levina, U. Petschow, et al.: *Potenziale und Anwendungsperspektiven der Bionik, Themenfeld 2: Die Nähe zur Natur als Chance und als Risiko*, (Gutachten im Auftrag des Deutschen Bundestages Berlin), IÖW, GL Institut für ökologische Wirtschaftsforschung gGmbH, Universität Bremen, Technikgestaltung und Technologieentwicklung, 2005.

47 | Vgl. Monika Kurath, S. Maasen: *Toxicology as a nanoscience? – Disciplinary identities reconsidered*, in: *Particle and Fibre Toxicology*, 3:6, 2006.

Robotik, also auf die mögliche Vorbildfunktion natürlicher Informationsverarbeitung für technische Systeme. Schließlich erlebt die Bionik auch durch das ›Natural Computing‹ einen starken Schub, da dort auf verschiedene Weise bionische Prinzipien zur Verbesserung von IKT eingesetzt werden. Neben zwei älteren FuE-Bereichen – dem ›evolutionary computing‹, das seine Algorithmen an Evolutionsmechanismen orientiert, und dem ›neural computing‹, bei dem neuronale Netze imitiert werden – erscheint aus der Konvergenzperspektive auch das relativ neue ›DNA computing‹ relevant. Bei diesem werden DNA-Moleküle als Hardwarebestandteile genutzt. Aus Sicht der Bionik, so wie sie im deutschen Sprachraum begriffen wird, lässt sich also durch NBIC-Konvergenzprozesse sowohl eine Zunahme der Nutzung bionischer Prinzipien feststellen als auch ein Hinausgehen über diese: Mit dem Aufkommen der ›neuen Bionik‹ im Kontext von NBIC-Konvergenzen und anderen Entwicklungen (wie der ›Synthetischen Biologie‹) wird aus dem Lernen von der Natur und ihrer Imitation für die Herstellung unbelebter Artefakte zunehmend ein Bauen neuer Brücken zwischen Belebtem und Unbelebtem oder eine Modifikation natürlicher Prozesse und Strukturen für Designzwecke bis hin zur Vision einer technischen Erschaffung biologischer Entitäten gleichsam ›von Grund auf‹.

Neurotechnologien

Die Visionen und neuen Möglichkeiten im Bereich der Neurotechnologien haben sich im Wesentlichen außerhalb des Bionikkontexts (im Sinn des deutschen Begriffs der Bionik) entwickelt⁴⁸ – auch wenn das ›Lernen von der Natur‹ in verschiedenen Traditionen und neuen Entwicklungen der Info-Neuro-Konvergenz eine zentrale Rolle spielt. Im neurotechnologischen Feld stehen z.T. bereits seit Langem eingeführte neuroprothetische Hilfsmittel für Personen mit Behinderungen neben Neuentwicklungen (insbesondere für den Ersatz sensorischer Leistungen) sowie Ansätzen und Visionen zur Realisierung komplexer Mensch-Maschine-Schnittstellen, die sozusagen das biologische System Gehirn direkt mit informationstechnischen Systemen koppeln sollen. Neue Hirn-Maschine-Schnittstellen, Prothesen zur Kompensation sensorischer Einschränkungen und Verbesserung motorischer Fähigkeiten sowie Visionen zu kognitiv leistungssteigernden Implantaten gehören zugleich – insbesondere vor dem Hintergrund der ›Human-Enhancement‹-Thematik – zu den zentralen Themen der CT-Debatte (Schaper-Rinkel 2008). Die weitreichenden Visionen überschatten dabei hinsichtlich der ethisch-gesellschaftlichen Implikationen oft die aktuellen oder weniger futuris-

48 | Vgl. zum Folgenden z.B. Thomas Stieglitz, Stefan Rosahl: *Neuro-elektrische Schnittstellen zum zentralen Nervensystem des Menschen*, (Gutachten im Auftrag des Deutschen Bundestages), Freiburg 2005.

tischen Eingriffsmöglichkeiten.⁴⁹ Neuroelektrische Schnittstellen sind im Konvergenzzusammenhang relevant, weil mit ihnen eine vor allem informationstechnische Unterstützung oder der technische Ersatz motorischer, sensorischer und kognitiver menschlicher Funktionen angestrebt werden kann. Invasive Brain-Machine Interfaces (BMI), bei denen Elektroden in das Gehirn implantiert werden, ermöglichen zumindest derzeit noch eine wesentlich höhere Flexibilität und Präzision von Bewegungen als beim Einsatz von Oberflächen Elektroden. Es wird sogar vermutet, dass besonders effektive, zukünftige Technologien zur Verbesserung kognitiver Fähigkeiten Neuroimplantate (trotz ihrer Risiken) auch für sensorisch oder psychisch unbeeinträchtigte Menschen attraktiv machen könnten.

Insbesondere auch in der NBIC-Initiative wurde die Erwartung geäußert, dass die neuro-technologische FuE von Fortschritten der Nanotechnologie profitieren werde.⁵⁰ Miguel Nicolelis, ein frühzeitig an der NBIC-Initiative beteiligter Wissenschaftler, hat z.B. Pionierforschung mit dem Ziel betrieben, Gelähmten oder Amputierten für ihre Prothesen ein vollständig implantierbares Aufzeichnungssystem zur Verfügung zu stellen, das drahtlos multiple Ströme elektrischer Signale von Tausenden Neuronen zu einer avancierten Brain-Computer-Schnittstelle (brain-computer interface, BCI) überträgt.⁵¹ Fraglich ist allerdings noch, ob größere ökonomische Potenziale im BCI-Bereich und anderen Neurotechnologien bestehen,⁵² selbst wenn man die umstrittene visionäre Möglichkeit eines Marktes für nichttherapeutische Zwecke (»Human Enhancement«) berücksichtigte. Aus NBIC-Konvergenzperspektive erscheinen verschiedene Neurotechnologien als avancierte Formen der BIC-Konvergenz, bei denen eine Integration nanotechnologischer und -wissenschaftlicher Elemente für möglich gehalten wird. Die Neurotechnologien können so als ein Schlüssel zum Verständnis der CT-Debatte begriffen werden, insbesondere wenn man sie innerhalb eines weit gefassten Konzepts der Kognitionswissenschaften situiert.

49 | Vgl. z.B. Martha J. Farah, J. Illes, R. Cook-Degan, et al.: Neurocognitive enhancement: what can we do and what should we do?, in: *Nature Reviews Neuroscience*, 5, 2004, 421-425.

50 | Vgl. z.B. Rodolfo Llinás, K. Walton, M. Nakao, et al.: Neuro-vascular central nervous recording/stimulating system: Using nanotechnology probes, in: *Journal of Nanoparticle Research*, 7(2-3), 2005, 111-127.

51 | Vgl. Mikhail A. Lebedev, M.A.L. Nicolelis: Brain-machine interfaces: past, present and future, in: *Trends in Neurosciences*, 29(9), 2006, 536-546.

52 | Vgl. Norbert Malanowski: Converging Applications, in: *MST News*, 2, 2007, 43-45; Leonhard Hennen, C. Coenen: *ITA-Monitoring »Nichtmedizinische Anwendungen der Neurowissenschaften«*, (Pre-Print) Karlsruhe: ITAS 2011; www.itas.fzk.de/deu/lit/epp/2011/heco11-pre01.pdf.

12.5 AKTUELLE ENTWICKLUNGEN UND AUSBLICK

Zum Teil im direkten Anschluss an die frühe Konvergenzdiskussion der ersten Hälfte und Mitte der 2000er haben – neben verschiedenen Forschungsprojekten (auf EU- und nationaler Ebene) und wissenschaftlichen Konferenzen (insbesondere in der Philosophie und in der Technikfolgenabschätzung) – verschiedene Initiativen das NBIC-Konzept oder ähnliche Konvergenzkonzepte in jüngerer Zeit genutzt.⁵³ Zudem hat die Konvergenzdebatte zur Entstehung eines selbstreflexiven Diskurses in der politikberatungsnahen Forschung zu stark visionär aufgelaadenen neuen und emergierenden Technologiefeldern beigetragen.⁵⁴

Mit Blick auf die in den letzten Jahren verstärkt untersuchte Rolle von Zukunftsvisionen in Diskursen über Naturwissenschaft und Technik ist das Beispiel der Synthetischen Biologie von besonderem Interesse. Bereits im Jahr 2007 hatten sich zu den Communities der Synthetischen Biologie oder der Nanotechnologie zählende Wissenschaftler unter dem Titel *The Merging of Bio and Nano: Toward Cyborg Cells* mit den möglichen Implikationen einer Konvergenz von Nanotechnologie und Synthetischer Biologie auseinandergesetzt, u.a. unter Beteiligung von Steven Chu, Nobelpreisträger für Physik und seit 2009 US-Energieminister, Phillip Ball, einem einflussreichen Wissenschaftsjournalisten, sowie des renommierten, auch als Politikberater tätigen Physikers Freeman Dyson, der als eine Schlüsselfigur des modernen technikvisionären Denkens gelten kann. Ergebnis des Symposiums war das Ilulissat Statement, dessen Untertitel wiederum *Synthesizing the Future. A vision for the convergence of synthetic biology and nanotechnology* lautet.⁵⁵ Die Unterzeichner betonten, dass wir derzeit eine Konvergenz erleben, in der die Molekularbiologie die Nanotechnologie inspiriere und ihr Komponenten bereitstelle, während durch die Nanotechnologie der Zellbiologie neue Werkzeuge und Techniken zur Verfügung ständen. Hierbei handle es sich nicht um bloß akademische Themen: Für globale Probleme wie den Klimawandel und für die Herausforderungen in zentralen Bereichen wie Energie, Gesundheit

53 | Besonders bemerkenswert war hier die erstaunlich unreflektierte Übernahme der US-amerikanischen und anderer, auch transhumanistischer Visionen in der 2009 durchgeführten, bedeutenden deutschen Wissenschaftskommunikationsinitiative »Expedition Zukunft«. Vgl. dazu Christopher Coenen: Zauberwort Konvergenz, in: *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis*, 18(2), 2009, 44-50.

54 | Vgl. z.B. Armin Grunwald: Converging technologies: visions, increased contingencies of the condition humana, and search for orientation, in: *Futures* 39(4), 2007, 380-392; Karen Kastenhofer: Do we need a specific kind of technoscience assessment? Taking the convergence of science and technology seriously, in: *Poiesis & Praxis* 7, 2010, 37-54; Alfred Nordmann: European Experiments, in: *Osiris*, 24, 2009, 278-302.

55 | Vgl. zu Informationen über das Treffen: www.kavlifoundation.org/kavli-futures-symposium-report-2007.

und Wasser biete die Synthetische Biologie Lösungen, dabei von der Nano-Bio-Konvergenz profitierend.

Auch im Bereich der Protozellen-Forschung, einem nicht unumstrittenen Bereich der Synthetischen Biologie, spielt das Konvergenzkonzept eine gewisse Rolle. Dies hat wiederum dazu beigetragen, dass im Feld der Technikfolgenabschätzung Versuche unternommen wurden, das NBIC-Konzept zur Analyse umfassender Entwicklungen im naturwissenschaftlich-technischen Bereich einzusetzen.⁵⁶ Hierbei lag der Fokus auf Tendenzen, die eine zunehmende Annäherung bis hin zu einer Verschmelzung von Leben und Technik signalisieren könnten. Die NBIC-Konvergenz wurde als ein Schlüsselfaktor in der Entwicklung und Organisation der Naturwissenschaften gedeutet, da sie eine zunehmende Interaktion der physikalischen und biologischen Wissenschaften signalisiere. Dieser Prozess lasse sich mit Blick auf zwei Megatrends im ›bio-engineering‹ analysieren,⁵⁷ die zusammengenommen eine neuartige ingenieurswissenschaftliche Herangehensweise an das Leben darstellten: Biologie werde Technologie, und Technologie werde Biologie. Der erstgenannte Trend impliziere oder verspreche neue Eingriffsarten, mit denen die Manipulierbarkeit lebender Organismen, einschließlich des menschlichen Körpers und speziell des Gehirns, noch weiter zunehme. Der Trend ›technology becoming biology‹ signalisiere hingegen einen aktuellen sowie zukünftig zu erwartenden Zuwachs an lebensartigen oder -ähnlichen Artefakten, einschließlich neuartiger Implantate. Beide Trends trügen dazu bei, dass vertraute Grenzen zwischen Wissenschaft und Ingenieurwesen, Lebendem und Leblosem, Therapie und Enhancement, Technik und Natur sowie Mensch und Maschine verwischen. Weil die NBIC-Konvergenz eine Herausforderung für grundlegende Kategorien des Weltverständnisses und des menschlichen Selbstverständnisses darstelle, verursache sie in Teilen der Gesellschaft Unbehagen und die Diskussion über sie berühre zentrale Wertvorstellungen. Die These einer Konvergenz von Biologie und Technologie stellt indes eine weitere Verallgemeinerung dar, die, obwohl in mancherlei Hinsicht nützlich, nicht den Blick auf den Umstand verstellen sollte, dass in vielen der angesprochenen Entwicklungen, z.B. der Robotik, nicht Leben technisch erzeugt wird, sondern Leben höchstens imitiert wird, und dass mehrere Ansätze, deren Existenz die These stützen, z.B. das Verständnis der Biologie als künftiger Ingenieurswissenschaft, in den jeweils betroffenen Disziplinen keineswegs unumstritten sind.

Es bleiben zudem bereits Schwierigkeiten bei der Konzeption der NBIC-Felder als konvergierenden Technologien und Wissenschaften bestehen: Zum einen ist

56 | Rinie Van Est, D. Stermerding (Hg.): *Making Perfect Life. European Governance Challenges in 21st Century Bio-engineering*, Brüssel: Europäische Union 2012; www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2012/471574/IPOL-JOIN_ET%282012%29471574_EN.pdf.

57 | Hierbei beziehen sich Van Est und Stermerding auf: W. Brian Arthur: *The Nature of Technology: What It Is and How It Evolves*, London: Allen Lane 2009.

die Abgrenzung der Nanotechnologie von den CT schwierig, da die Nanotechnologiediskussion Pate für die Konvergenzdebatte stand und insofern vieles, was die CT auszeichnen soll, bereits für »die Nanotechnologie« behauptet wurde. Zum anderen bringt die Aufnahme der Kognitionswissenschaft unter die vier konvergierenden FuE-Schlüsselfelder, unter starker Betonung der Hirnforschung und Neurotechnologien, eine Reihe konzeptioneller Probleme mit sich. Insgesamt gesehen stellt sich hier die Frage, was das NBIC-Konzept für Vorteile gegenüber einem Verständnis des Zusammenspiels der vier Felder aufweist, bei dem die B-I-Konvergenz im Mittelpunkt steht, die Tendenzen zunehmender Miniaturisierung und des Bedeutungszuwachses der Mikro- und Nanoebene berücksichtigt werden und die nicht auf das Biologische reduzierbare Besonderheit menschlicher Hirntätigkeit anerkannt bleibt. Überdies sollte nicht aus dem Blickfeld geraten, dass sich Konvergenzen mit hochinnovativen Resultaten auch weitgehend innerhalb eines NBIC-Feldes oder unter maßgeblicher Beteiligung anderer Felder (wie z.B. der Materialwissenschaft) vollziehen können.⁵⁸

Ebenfalls oft unklar bleibt, was eigentlich Konvergenzen ausmacht. Kritisch wurde z.B. angemerkt, dass schon allein die im Diskurs über Nanotechnologie verwendeten Konzepte von Inter- und Transdisziplinarität vage blieben, weshalb die NBIC-Vision der US-Initiative gänzlich naiv sei.⁵⁹ Spekulative Interdisziplinarität wurde als eine spezifische Schwäche der NBIC-Debatte und ähnlicher Diskussionen kritisiert.⁶⁰

Die Unschärfe vieler Konvergenzkonzepte dürfte zum Teil gewollt oder zumindest billigend in Kauf genommen worden sein, um erst einmal eine politisch relevante Breite des Diskurses zu erreichen. Zugleich dienen auch die mehr oder weniger diffusen Hoffnungen, Ängste oder Bedenken hinsichtlich der anthropologischen und gesellschaftlichen Implikationen der NBIC-Technologie (einschließlich der weitreichenden transhumanistischen Visionen) zur Erzeugung von Aufmerksamkeit, in einer Art von technikvisionärem Marketing.⁶¹

Vor diesem Hintergrund könnte es sinnvoll sein, eine Hierarchisierung vorzunehmen, bei der zum einen zwischen klassischen Disziplinen (z.B. Chemie), etablierten interdisziplinären FuE-Feldern (z.B. Biotechnologie) sowie neueren

58 | Vgl. z.B. Maurits Doorn (Hg.): *Converging Technologies*, (STT 71), Den Haag: Study Centre for Technology Trends 2006.

59 | Vgl. Joachim Schummer: Interdisciplinary Issues in Nanoscale Research, in: Davis Baird, A. Nordmann, J. Schummer (Hg.): *Discovering the Nanoscale*, Amsterdam: IOS Press 2004, 9-20.

60 | Michael Rader: The jobs of others: »speculative interdisciplinarity« as a pitfall for impact analysis, in: *Journal of Information, Communication and Ethics in Society* 10(1), 2012, 4-18.

61 | Vgl. Christopher Coenen: Extreme Technikvisionen als Verantwortungsproblem, in: Bartosch, Litfin, Braun, et al., *Verantwortung von Wissenschaft und Forschung in einer globalisierten Welt*, 2011, 231-255.

konvergenten FuE-Bereichen (z.B. Neuroinformatik) unterschieden wird, zum anderen zwischen ›starken‹ und ›schwachen‹ Konvergenzen. Zu Letzteren könnte z.B. der Einsatz von IKT als bloßen Hilfsmitteln in anderen Feldern gezählt werden, während die Nutzung von Informationstechnik für neuroelektrische Schnittstellen ein Beispiel für starke Konvergenz wäre. Daneben ließe sich eine Konvergenz per Inspiration berücksichtigen, bei der z.B. Konzepte aus einem Feld Bedeutung in einem anderen Feld erlangen. Besonderes Interesse verdient auch die Dialektik von Konvergenzen und Divergenzen, also die Dynamik von Synergien, Fusionen und Ausdifferenzierungen in und zwischen FuE-Bereichen.⁶²

Schließlich stellt sich die Frage, ob nicht – insbesondere eingedenk des weiterhin angestrebten Ziels der Förderung innovativer inter- und transdisziplinärer bzw. felderübergreifender FuE – ein allgemeines Konvergenzkonzept politisch nützlicher wäre als ein auf bestimmte Felder beschränktes (wie das NBIC-Konzept). So böte ein gleichsam technologieneutrales und disziplinenunabhängiges Konzept – z.B. auf Basis des auf gegenseitig ›ermöglichende‹ (›enabling‹) Funktionen und Qualitäten abstellenden CTEKS-Konzepts – womöglich den Vorteil, dass ein von partikularen Interessen an Förderung und von ›Hypes‹ wenig tangiertes Instrument eingesetzt würde. Die Gefahr wäre dann geringer, dass Innovationen in bestimmten Bereichen in ihrer Bedeutung überschätzt und in anderen unterschätzt oder ignoriert werden. Dies gilt insbesondere hinsichtlich der US-amerikanischen NBIC-Initiative, die anscheinend weniger ein Vorstoß zur Analyse und Beförderung wissenschaftlich-technischer Innovationen und ihrer gesellschaftlichen Nutzbarmachung war als vielmehr ein Vehikel zur Akzeptanzbeschaffung für eine spezifische technofuturistische Weltanschauung. Im Rahmen eines problemorientierten Interdisziplinaritätskonzepts, wie es auch der CTEKS-Agenda zugrundeliegt,⁶³ könnte ein Konvergenzparadigma – befreit von weltanschaulich grundierten Einheitswissenschaftsvisionen – eine nützliche Rolle spielen. Konkretion würde dann nicht durch den in vielerlei Hinsicht fragwürdigen Fokus auf die NBIC-Felder erreicht, sondern durch eine sorgfältige, anwendungsorientierte Relevanzprüfung der vielfältigen Konvergenzprozesse.

62 | Vgl. z.B. Bunge, *Emergence and Convergence*, 2003.

63 | Vgl. Nordmann, *Converging Technologies*, 2004; Jan C. Schmidt: Knowledge Politics of Interdisciplinarity, in: *Innovation*, 20(4), 2007, 313-328.

Bildnachweise

Abbildung 2.1: Kurt Schwitters: *Das Unbild* (1919). 35,8 x 28 cm, Collage aus div. Materialien, Gouache auf Pappe. Bildnachweis: Staatsgalerie Stuttgart, Inv. Nr. 3067.

Abbildung 2.2: Titelbild von: *Idempotent Vector Design for the Standard Assembly of Biobricks*, Tom Knight, Randall Rettberg, Leon Chan, Drew Endy, Reshima Shetty, Austin Che, MIT Artificial Intelligence Laboratory, MIT Department of Biology, MIT Division of Biological Engineering, 2003. Bildnachweis: <http://web.mit.edu/synbio/release/docs/biobricks.pdf>.

Abbildung 5.1: Edmund Husserl: *Diagramm der Zeit*. Bildnachweis: Edmund Husserl: Vorlesungen zur Phänomenologie des inneren Zeitbewusstseins, (hg. von Martin Heidegger), in: *Jahrbuch für Philosophie und phänomenologische Forschung*, Bd. IX, Halle a.D. Saale: Niemeyer 1928, 367-496, S. 389.

Abbildung 7.1: Walter Gropius: Entwurfszeichnung für acht Teekannen aus Aluminium, 1935. Bildnachweis: Bauhaus Archiv Berlin, Inv. Nr. 5886.

Abbildung 7.2: Walter Gropius: Teekanne (Entwurf). The London Aluminium Co. Ltd., Birmingham. Bildnachweis: Bauhaus Archiv Berlin, Inv. Nr. 7186.

Autorinnen und Autoren

Peter Bexte ist Professor für Ästhetik an der Kunsthochschule für Medien Köln. WS 2011/12 Senior Fellow am Internationalen Kolleg für Kulturtechnikforschung und Medienphilosophie IKKM in Weimar; 2009-2012 Leiter des Kölner Teilprojektes im BMBF-Forschungsverbund *Verkörpernte Information. ›Lebendige‹ Algorithmen & Zelluläre ›Maschinen‹* der Freien Universität Berlin und der Kunsthochschule für Medien Köln; 2012-2015 Projektleitung des DFG-Forschungsprojektes *An den Grenzen der Archive*. Forschungsschwerpunkte: das Dreieck Bild – Medium – Wahrnehmung; Kybernetik und Topologie.

Peter Bexte: *Wo immer vom Sehen die Rede ist ...*, München: Fink 2013.

Peter Bexte: Michel Serres, in: Kathrin Busch, Iris Därmann (Hg.): *Bildtheorie aus Frankreich: ein Handbuch*, München: Fink 2011, S. 361-369.

Peter Bexte: Sicht und Einsicht. Zum Topos des blinden Mathematikers, in: Horst Bredekamp, Wladimir Velminski (Hg.): *Mathesis & Graphé. Leonard Euler und die Entfaltung der Wissenssysteme*, Berlin: Akademie 2009, S. 67-83.

Peter Bexte: *Blinde Seher. Wahrnehmung von Wahrnehmung in der Kunst des 17. Jahrhunderts. Mit einem Anhang zur Entdeckung des Blinden Flecks im Jahre 1668*, Dresden: Verlag der Kunst 1999.

Christopher Coenen ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Forschungsschwerpunkte: Neue und entstehende Technowissenschaften, Digitale Informations- und Kommunikationstechnologien. Themen: Human Enhancement, Internet und Gesellschaft, Nanotechnologie und Converging Technologies, Synthetische Biologie. Herausgeber der Zeitschrift *NanoEthics* (Springer).

Christopher Coenen, S. Gammel, R. Heil, A. Woyke (Hg.): *Die Debatte über ›Human Enhancement‹. Historische, philosophische und ethische Aspekte der technologischen Verbesserung des Menschen*, Bielefeld: transcript 2010.

- Harald König, D. Frank, R. Heil, C. Coenen: Synthetic genomics and synthetic biology applications between hopes and concerns, in: *Current Genomics*, 14 (1), 2013, 11-24.
- Christopher Coenen: Human enhancement, in: Richard Fischer, T. Boer (Hg.): *Human enhancement: Scientific, ethical and theological aspects from a European perspective* (Kapitel 4), Strasbourg: Church and Society Commission of CEC 2013, S. 57-79.
- Franc Mali, T. Pustovrh, B. Groboljsek, C. Coenen: National ethics advisory bodies in the emerging landscape of responsible research and innovation, in: *NanoEthics*, 6(3), 2012, 167-184.

Michael Cuntz ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Internationalen Kolleg für Kulturtechnikforschung und Medienphilosophie der Bauhaus Universität Weimar sowie Redakteur der *Zeitschrift für Medien- und Kulturforschung* (ZMK). Promotion 2001 über Blaise Pascals Schriften an der Universität zu Köln. Aktuelle Forschungsschwerpunkte: Französische Kultur- und Techniktheorie, Theorien verteilter Handlungsmacht, Mensch-Ding-Relationen, (Audio)Visuelle Narrative, Übersetzung von Gilbert Simondon (*Tier und Mensch. Zwei Vorlesungen* sowie *Die Existenzweise technischer Objekte*).

Ilka Becker, Michael Cuntz, Astrid Kusser (Hg.): *Unmenge – Wie verteilt sich Handlungsmacht?*, München: Fink 2008.

Ilka Becker, Michael Cuntz, Michael Wetzl (Hg.): *Just not in time. Inframedialität und nonlineare Zeitlichkeiten in Kunst, Film, Literatur und Philosophie*, München: Fink 2011.

Michael Cuntz: Kommentar zur Einleitung aus Gilbert Simondons *Die Existenzweise technischer Objekte*, in: *Zeitschrift für Medien- und Kulturforschung*, 1, 2011, 83-92.

Michael Cuntz: Agency, in: Christina Bartz, Ludwig Jäger, Erika Linz, Marcus Krause (Hg.): *Handbuch der Mediologie – Signaturen des Medialen*, München: Fink 2012, 28-40.

Kathrin Friedrich ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Humboldt-Universität zu Berlin im DFG-Exzellenzcluster *Bild Wissen Gestaltung*. Davor von Juni 2009 bis April 2013 künstlerisch-wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Kunsthochschule für Medien Köln, vorrangig im BMBF-Forschungsverbund *Verkörperte Information. »Lebendige« Algorithmen & Zelluläre »Maschinen«*. Forschungsschwerpunkte: Computer-Aided Design, Diagrammatik und Crowdsourcing in der Synthetischen Biologie, digitale Bildgebungsverfahren in der Medizin sowie Software Studies.

- Kathrin Friedrich: Digital ›Faces‹ of Synthetic Biology, in: *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44, 2013, (Special Issue ›Philosophical Perspectives in Synthetic Biology‹), 217-224.
- Kathrin Friedrich, Gabriele Gramelsberger: Techniken der Überschreitung. Fertigungsmechanismen ›verlässlich lebensfähiger‹ biologischer Entitäten, in: *Zeitschrift für Medienwissenschaft*, 4(1), 2011, (Special Issue ›Menschen & Andere‹), 15-21.
- Kathrin Friedrich: ›Sehkollektiv‹ – Sight Styles in Diagnostic Computed Tomography, in: *Medicine Studies*, 2, 2010, (Special Issue ›Medical Imaging: Philosophy and History‹), 185-195.

Gabriele Gramelsberger ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Kunsthochschule für Medien Köln und Lehrbeauftragte am Institut für Philosophie der Freien Universität Berlin. Davor von 2009 bis 2012 Gesamtvorhabenleiterin des BMBF-Forschungsverbundes *Verkörperte Information. ›Lebendige‹ Algorithmen & Zelluläre ›Maschinen‹* der Freien Universität Berlin und der Kunsthochschule für Medien Köln. Forschungsschwerpunkte: Wandel der Wissenschaft durch den Computer, Modellierung und Simulation in Biologie und Meteorologie, mathematische Medien, Wissenschafts- und Technikphilosophie.

- Gabriele Gramelsberger, Tarja Knuuttila, Axel Gelfert (Hg.): Philosophical Perspectives on Synthetic Biology, Special Issue, *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44(2), 2013.
- Gabriele Gramelsberger; Johann Feichter (Hg.): *Climate Change and Policy. The Calculability of Climate Change and the Challenge of Uncertainty*, Heidelberg, Berlin, New York: Springer 2011.
- Gabriele Gramelsberger (Hg.): *From Science to Computational Sciences. Studies in the History of Computing and its Influence on Today's Sciences*, Zürich, Berlin: diaphanes 2011.
- Gabriele Gramelsberger: *Computerexperimente. Zum Wandel der Wissenschaft im Zeitalter des Computers*, Bielefeld: transcript 2010.

Stephan Günzel ist Professor für Medientheorie an der Berliner Technischen Kunsthochschule. Seit 2012 Gastdozentur im DFG-Graduiertenkolleg *Dynamiken von Raum und Geschlecht* der Universitäten Kassel und Göttingen. Aktueller Forschungsschwerpunkt: Ästhetik, Geschichte und Praktiken des Raums.

- Stephan Günzel: *Egoshoooter. Das Raumbild des Computerspiels*, Frankfurt a.M./New York: Campus 2012.
- Stephan Günzel: *Raum/Bild. Zur Logik des Medialen*, Berlin: Kadmos 2012.
- Stephan Günzel: *Maurice Merleau-Ponty – Werk und Wirkung. Eine Einführung*, Wien: Turia + Kant 2007.
- Stephan Günzel (Hg.): *Texte zur Theorie des Raums*, Stuttgart: Reclam 2013.

Karin Harrasser ist Professorin für Kulturwissenschaft an der Kunstuniversität Linz. Ihre Habilitation widmete sich der Kultur- und Theoriegeschichte der Prothese. Neben ihrer wissenschaftlichen Tätigkeit war sie immer wieder in künstlerisch-kuratorische Projekte eingebunden. Sie ist mit Elisabeth Timm die Herausgeberin der *Zeitschrift für Kulturwissenschaften*. Forschungsschwerpunkte: Kultur- und Medientheorie, Theorien des Subjekts/der Objekte, Poetik der Geschichtsschreibung (S. Kracauer, A. Kluge).

Karin Harrasser: *Körper 2.0. Über die technische Erweiterbarkeit des Menschen*, Bielefeld: transcript 2013.

Karin Harrasser: Abstraktion zum Konkreten. Siegfried Kracaues Geschichtsbuch als Anleitung zum stolpernden Gang zu den Dingen, in: Drehli Robnik, Amália Kerikes, Katalin Teller (Hg.): *Film als Loch in der Wand. Kino und Geschichte bei Siegfried Kracauer*, Wien/Berlin: Turia + Kant 2013.

Karin Harrasser: Sensible Prothesen. Medien der Wiederherstellung von Produktivität, in: *Body Politics*, 1(1), 2013, 99-117, online unter: www.bodypolitics.de.

Karin Harrasser: Treue zum Problem. Situiertes Wissen als Kosmopolitik, in: Astrid Deuber-Mankowsky, Christoph Holzhey (Hg.): *Situiertes Wissen und regionale Epistemologie. Zur Aktualität Georges Canguilhem und Donna J. Haraways*, Wien/Berlin: Turia + Kant 2013, 241-259.

Martin Jansen ist Mitglied der Leopoldina, Nationale Akademie der Wissenschaften, und der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Er ist Direktor Emeritus des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung Stuttgart und Honorarprofessor an der Universität Stuttgart. Seine Forschungsschwerpunkte sind: Rationale Syntheseplanung in der Festkörper- und Materialchemie.

Martin Jansen: Ein Konzept zur Syntheseplanung in der Festkörperchemie, in: *Angewandte Chemie*, 114, 2002, 3896-917.

Ulrich Wedig, Martin Jansen: Das Teil im Ganzen – Missverständnisse um chemische Konzepte, in: *Angewandte Chemie*, 120, 2008, 10176-10180.

Martin Jansen: The Deductive Approach to Chemistry, a Paradigm Shift, in: Kenneth M. Harris, Peter P. Edwards (Hg.): *Turning points in Solid-State, Materials and Surface Science*, Cambridge: RSC Publishing, 2008, 22-50.

Martin Jansen, Klaus Doll, J. Christian: Addressing chemical diversity by employing the energy landscape concept, in: *Acta Crystallographica*, A66, 2010, 518-534.

Werner Kogge lehrt als PD Philosophie an der Freien Universität Berlin und ist Mitarbeiter in theoretischer Netzwerkfunktion im Exzellenzcluster *Topoi: The Formation and Transformation of Space and Knowledge in Ancient Civilizations* an der FU-Berlin (TopoiLab). Zuvor war er am Institut für Informatik FU Berlin mit der Erstellung von Lehrbriefen zur Informationsethik betraut und arbeitete im

Forschungsprojekt *Verkörpernte Information – ›Lebendige‹ Algorithmen & Zelluläre ›Maschinen‹. Konzepte und Bilder der ›Converging Technologies‹* tätig.

Werner Kogge: *Intervention durch Begriffsforschung. Experimentelle Konkretion molekularbiologischer Konzepte nach Wittgenstein* (Habilitationsschrift; Publikation in Vorbereitung).

Werner Kogge, Michael Richter: Synthetic biology and its alternatives: Descartes, Kant and the Idea of Engineering Biological Machines, in: *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44(2), 2013, 181-190.

Werner Kogge: Script, Code, Information: How to Differentiate Analogies in the ›Prehistory‹ of Molecular Biology, in: *History and Philosophy of the Life Sciences*, 34, 2012, 595-626.

Werner Kogge: Technologie des 21. Jahrhunderts. Perspektiven der Technikphilosophie. In: *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*, 6/2008, 935-956.

Michael Richter studierte Chemie an den Universitäten Mainz und Freiburg i.Br. Nach seiner Promotion in Chemie an der Universität Leipzig und einem Postdoc-Aufenthalt wiederum an der Universität Freiburg i.Br. am Institut für Pharmazeutische Wissenschaften ging er an die Empa und leitet dort seit 2011 die Gruppe Biokatalyse im Laboratory for Biomaterials. Ihn fasziniert das Grenzgebiet zwischen Chemie, Biologie und Materialwissenschaften. Er sieht klassisch chemische und biologische Disziplinen als komplementär an.

Michael Richter: Functional Diversity of Organic Molecule Enzyme Cofactors, Natural Product Reports, in: *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2013, 30, 2013, 1324-1345.

Werner Kogge, Michael Richter: Synthetic biology and its alternatives. Descartes, Kant and the idea of engineering biological machines, in: *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 2013, 44(2), 181-189.

Carola Dresen, Michael Richter, Martina Pohl, Steffen Lüdeke, Michael Müller: The Enzymatic Asymmetric Conjugate Umpolung Reaction, in: *Angewandte Chemie*, (Int. Edition), 122(37), 2010, 6750-6753.

Patrizia Lehwald, Michael Richter, Caroline Rhr, Hung-wen Liu, Michael Müller: Enantioselective Inter-molecular Aldehyde-Ketone Cross-Coupling through an Enzymatic Carbonylation Reaction, in: *Angewandte Chemie*, (Int. Edition), 122(13), 2010, 2439-2442.

J. Christian Schön ist Senior Scientist am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung und apl. Professor im Fachbereich Chemie der Universität Bonn. Seine Forschungsschwerpunkte sind: Theorie komplexer Energielandschaften, Finite-Time Thermodynamik und Modellierung chemischer Prozesse.

- J. Christian Schön, M. Jansen: Ein Ansatz zur Syntheseplanung in der Festkörper- und Materialchemie, in: *Angewandte Chemie*, 108(12), 1996, 1358-1377.
- J. Christian Schön, M. Jansen: Prediction, determination and validation of phase diagrams via the global study of energy landscapes, in: *International Journal of Materials Research*, 100, 2009, 135-152.
- J. Christian Schön : Finite-Time Thermodynamics and the Optimal Control of Chemical Syntheses, in: *Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie*, 635(12), 2009, 1794-1806.

Georg Trogemann ist seit 1994 Professor für Experimentelle Informatik an der Kunsthochschule für Medien Köln. Studium der Informatik und Mathematik an der Universität Erlangen-Nürnberg. 1977 Gesellenprüfung als Schreiner. 1990 Promotion zum Thema der Modellierung von Algorithmen für massiv parallele Rechner. Von 1997 – 1999 und 2004 – 2006 Prorektor für Forschung und Infrastruktur der Kunsthochschule für Medien Köln.

Georg Trogemann: *CodeArt – Eine elementare Einführung in die Programmierung als künstlerische Praktik*, Wien: Springer 2005.

Georg Trogemann (Hg.): *Code und Material – Exkursionen ins Undingliche*, Wien: Springer 2010.

Jan Wöpping ist Vorstandsreferent im Forschungsverbund Berlin. 2012 Promotion in Philosophie und davor 2008-2012 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Exzellenzcluster *Topoi* und am Institut für Philosophie der FU Berlin, danach als Postdoctoral Fellow erneut bei *Topoi*. Derzeitige Arbeitsschwerpunkte: Philosophie der Mathematik und Diagramme, der Ökonomie und der Bilder.

Jan Wöpping: Raum und Begriff. Zur Wiederentdeckung der epistemischen Bedeutung von Diagrammen in der Geometrie, in: Christoph Ernst, Peter Isenböck, Joachim Renn (Hg.): *Konstruktion und Geltung. Beiträge zu einer postkonstruktivistischen Sozial- und Medientheorie*, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2012, 233-258.

Jan Wöpping: Logoklasmus? Konrad Fiedler über Sprache und Sichtbarkeit, in: Cornelia Temesvári, Roberto Sanchino Martinez (Hg.): *Wovon man nicht sprechen kann... Ästhetik und Mystik im 20. Jahrhundert*, Bielefeld: transcript 2010, 175-204.

Jan Wöpping: Space. Structure, Similarity. On Representationalist Theories of Diagrams, in: Olga Pombo, Alexander Gerner (Hg.): *Studies in Diagrammatology and Diagram Praxis*, London: College Publications 2010, 39-56.

Verkörperungen/MatteRealities – Perspektiven empirischer Wissenschaftsforschung



KATRIN AMELANG

Transplantierte Alltage

Zur Produktion von Normalität
nach einer Organtransplantation

Januar 2014, ca. 290 Seiten, kart., ca. 32,80 €,
ISBN 978-3-8376-2480-9



CHRISTOPH KEHL

Zwischen Geist und Gehirn

Das Gedächtnis als Objekt
der Lebenswissenschaften

2012, 352 Seiten, kart., 34,80 €,
ISBN 978-3-8376-2113-6



MARTIN LENGWILER, JEANNETTE MADARÁSZ (HG.)

Das präventive Selbst

Eine Kulturgeschichte moderner
Gesundheitspolitik

2010, 390 Seiten, kart., zahlr. Abb., 32,80 €,
ISBN 978-3-8376-1454-1

**Leseproben, weitere Informationen und Bestellmöglichkeiten
finden Sie unter www.transcript-verlag.de**

Verkörperungen/MatteRealities – Perspektiven empirischer Wissenschaftsforschung



JÖRG NIEWÖHNER, CHRISTOPH KEHL,
STEFAN BECK (HG.)

Wie geht Kultur unter die Haut?

Emergente Praxen an der Schnittstelle
von Medizin, Lebens- und Sozialwissenschaft

2008, 246 Seiten, kart., 25,80 €,
ISBN 978-3-89942-926-8



TINO PLÜMECKE

Rasse in der Ära der Genetik

Die Ordnung des Menschen
in den Lebenswissenschaften

Juni 2013, 320 Seiten, kart., 29,80 €,
ISBN 978-3-8376-2145-7



WILLY VIEHÖVER, PETER WEHLING (HG.)

Entgrenzung der Medizin

Von der Heilkunst zur Verbesserung
des Menschen?

2011, 312 Seiten, kart., zahlr. Abb., 29,80 €,
ISBN 978-3-8376-1319-3

**Leseproben, weitere Informationen und Bestellmöglichkeiten
finden Sie unter www.transcript-verlag.de**

Verkörperungen/MatteRealities – Perspektiven empirischer Wissenschaftsforschung

SUSANNE BAUER,
CHRISTINE BISCHOF,
STEPHAN GABRIEL HAUFE,
STEFAN BECK,
LEONORE SCHOLZE-IRRLITZ (HG.)

Essen in Europa

Kulturelle »Rückstände« in Nahrung
und Körper

2010, 196 Seiten, kart., 24,80 €,
ISBN 978-3-8376-1394-0

STEFAN BECK, JÖRG NIEWÖHNER,
ESTRID SÖRENSEN

Science and Technology Studies

Eine sozialanthropologische
Einführung

2012, 364 Seiten, kart., 29,80 €,
ISBN 978-3-8376-2106-8

SASCHA DICKEL, MARTINA FRANZEN,
CHRISTOPH KEHL (HG.)

Herausforderung Biomedizin

Gesellschaftliche Deutung
und soziale Praxis

2011, 368 Seiten, kart., 32,80 €,
ISBN 978-3-8376-1946-1

MICHALIS KONTOPODIS,
JÖRG NIEWÖHNER (HG.)

Das Selbst als Netzwerk

Zum Einsatz von Körpern
und Dingen im Alltag

2010, 228 Seiten, kart., 24,80 €,
ISBN 978-3-8376-1599-9

KATHARINA LIEBSCH,
ULRIKE MANZ (HG.)

Leben mit den Lebenswissenschaften

Wie wird biomedizinisches Wissen
in Alltagspraxis übersetzt?

2010, 282 Seiten, kart., 28,80 €,
ISBN 978-3-8376-1425-1

THOMAS MATHAR

Der digitale Patient

Zu den Konsequenzen eines
technowissenschaftlichen
Gesundheitssystems

2010, 284 Seiten, kart., zahlr. Abb., 28,80 €,
ISBN 978-3-8376-1529-6

JÖRG NIEWÖHNER, JANINA KEHR,
JOËLLE VAILLY (HG.)

Leben in Gesellschaft

Biomedizin – Politik –
Sozialwissenschaften

2011, 366 Seiten, kart., 32,80 €,
ISBN 978-3-8376-1744-3

SONJA PALFNER

Gen-Passagen

Molekularbiologische und
medizinische Praktiken im Umgang
mit Brustkrebs-Genen. Wissen –
Technologie – Diagnostik

2009, 390 Seiten, kart., 33,80 €,
ISBN 978-3-8376-1214-1

**Leseproben, weitere Informationen und Bestellmöglichkeiten
finden Sie unter www.transcript-verlag.de**

