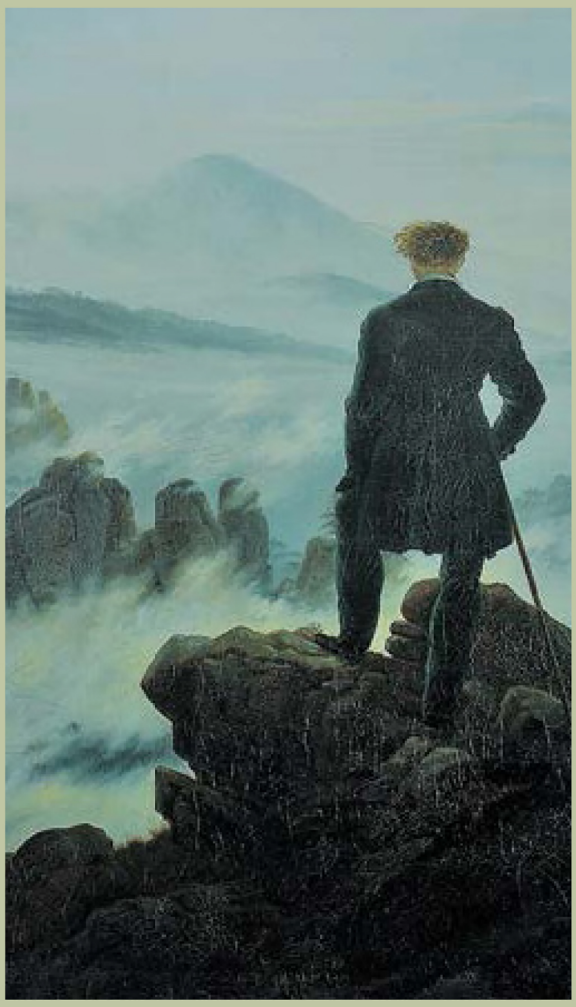
Biologische Transformation – Interdisziplinäre Grundlagen für die angewandte Forschung

Herausgegeben von

Thomas Marzi
Hans Werner Ingensiep
Heike Baranzke



Verlag Karl Maria Laufen

Biologische Transformation – Interdisziplinäre Grundlagen für die angewandte Forschung

Herausgegeben von

Thomas Marzi
Hans Werner Ingensiep
Heike Baranzke

Verlag Karl Maria Laufen

Die Texte in diesem Buch sind schriftliche Fassungen von Beiträgen der Tagung »*Biologische Transformation – Interdisziplinäre Perspektiven für die angewandte Forschung*«.
Die von der Fraunhofer-Gesellschaft unterstützte Veranstaltung fand am 21. und 22.11.2019 im Museum für Naturkunde Berlin statt. Der Veranstaltung war bzw. ist ebenso wie der vorliegende Band eine wissenschaftliche Kooperation der Partner

Fraunhofer UMSICHT
Zentrum für medizinische Biotechnologie der Universität Duisburg-Essen
Museum für Naturkunde Berlin

Kontakt:
Dr. Thomas Marzi
Fraunhofer-Institut für Umwelt-,
Sicherheits- und Energietechnik
UMSICHT
Osterfelder Str. 3
46047 Oberhausen
Telefon 0208 8598-1230
E-Mail thomas.marzi@umsicht.fraunhofer.de

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.

ISBN print: 978-3-87468-436-1
ISBN pdf: 978-3-87468-433-0
ISBN mobi: 978-3-87468- 434-7
ISBN epub: 978-3-87468-435-4

Warenzeichen und Handelsnamen in dieser Publikation sind geschützt.
Für Zitate und Bezugnahmen direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien übernimmt der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität.

Autorinnen, Autoren und Herausgebende haben sich bemüht alle Bildrechte zu klären. Sollte dies im Einzelfall nicht oder nichtzutreffend gelungen sein, wird um Nachricht an den Verlag gebeten.

Titel: Bildausschnitt aus »Der Wanderer über dem Nebelmeer«, Caspar David Friedrich, ca. 1817

© Verlag Karl Maria Laufen
Oberhausen 2021
www.laufen-online.com

»Wie oft ist das, was in der Maske einer Antwort daherkommt, in Wirklichkeit eine Frage.«

Richard David Precht[1]

Wir danken Frau Astrid Pohlig und Frau Kerstin Hölscher für ihre Unterstützung bei der Erstellung dieses Buches.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Eckhard Weidner, Frau Cornelia Reimoser, Herrn Dr. Christoph Häuser, Herrn Volker Knappertsbusch, Frau Sandra Naumann, Frau Astrid Pohlig, Frau Ute Gessner, Frau Leandra Hamann, Frau Anja Gerstenmeier, Frau Kerstin Hölscher und Herrn Dr. Jörg Freyhof sind wir für ihre Unterstützung bei der Veranstaltung, die diesem Buch zugrunde liegt, dankbar.

[1] Precht, Richard David (2018): Jäger, Hirten, Kritiker. Eine Utopie für die digitale Gesellschaft. Originalausgabe, 1. Auflage. S. 207

Inhalt

Thomas Marzi
1 Zur Einleitung:Lernen von der Natur? 1

Markus Wolperdinger, Thomas Bauernhansl
2 Die Biologische Transformation der Produktion –
Einführung einer biointelligenten Wertschöpfung 15

Oliver Schwarz
3 Vorbilder aus der Natur – worin besteht der Mehrwert? 27

Thomas Marzi
4 Was ist »Biologische Transformation«? 41

Alfred Nordmann, Janine Gondolf
5 Biotheorie und Bioparodie –
Zur Transformation literarischer und biologischer Gattungen 63

Ulrich Krohs
6 Evolution und Entwicklung – universelle Konzepte? 77

Marco Lehmann-Waffenschmidt
7 Zur Analyse der Evolution der Wirtschaft –
Kontingenz, kontrafaktische Methode und Kausalität 91

Klaus-Stephan Otto
8 Transformationsprozesse in Natur und Wirtschaft 109

Joachim Boldt
9 Biologische Technik – Technische Biologie.
Ethische Einordnungen 125

Heike Baranzke
10 Anstelle eines Schlusswortes I:
Die Sehnsucht nach der guten Technik. Zur Urteilsbildung über die
biologische Transformation der Technik 139

Hans Werner Ingensiep
11 Anstelle eines Schlusswortes II:
Natur, Technik & Ethik –
Reflexionen und Fragen zur Natur als Vorbild 149

Zur Einleitung:

1 Lernen von der Natur?

Thomas Marzi, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

Ist Natur kreativ?

Obwohl er eine der herausragenden Persönlichkeiten der Nachkriegszeit war, werden die meisten der heute unter Vierzigjährigen mit dem Namen Hoimar von Ditfurth nicht mehr viel anfangen können. Viele Ältere werden sich jedoch an den 1989 verstorbenen Mediziner, Wissenschaftsjournalisten, Philosophen und Autor mehrerer Bestseller erinnern, weil er mit seinem Wirken ihr eigenes Interesse an Wissenschaft und Ökologie weckte. (Löhr 2014) Besondere Aufmerksamkeit erzielte von Ditfurth mit einer populärwissenschaftlichen Fernsehreihe, die von ihm gemeinsam mit dem Physiker und Wissenschaftsjournalisten Volker Arzt gestaltet wurde. »Querschnitt«, so der Titel der Reihe, wurde von 1971-1989 im ZDF ausgestrahlt. Die Inhalte einiger ihrer Folgen sind heute noch aktuell, wie eine Folge aus dem Jahr 1978 »Der Ast, auf dem wir sitzen - Die Balance der Biosphäre«. In ihr informierte von Ditfurth die Öffentlichkeit über die weitreichenden Folgen eines zu erwartenden Klimawandels. Damals schon beschrieb er ein Szenario, dass eine Erhöhung der mittleren globalen Temperatur um zwei bis drei Grad bis zum Jahr 2050 prognostizierte (Boeing 2019).

In einer anderen Folge, die im Februar 1975 ausgestrahlt wurde und den Titel »Phantasie der Schöpfung« trug, machte von Ditfurth das Fernsehpublikum erstmals, mit einer damals noch neuen Forschungsrichtung, der Bionik vertraut. Zusammen mit dem heute als Mitbegründer der Bionik bekannten Werner Nachtigall, ging er der Frage nach, wie sich Konstruktionsprinzipien aus biologischen Systemen auf technische Anwendungen übertragen lassen. Wie stabil ist ein rohes Hühnerei und wie stark kann man es zwischen dem oberen und dem unteren Ende zusammenpressen, ohne dass es kaputtgeht, waren die Fragen, denen in der Sendung, auch mithilfe eines Gewichthebers, nachgegangen wurde (Ditfurth 1993, S. 218–241). Das Ergebnis war erstaunlich: Die 0,3 mm dicke Eischale konnte einer Kraft, die dem Viertausendfachen ihres eigenen Gewichts entspricht, standhalten. Diese Stabilität hat die Eischale ihrem besonderen Aufbau zu verdanken, der die Form eines doppelten Gewölbes hat und einwirkende Kräfte längs der Schale verteilt.

Soweit die Erklärung, wie der mechanische Aufbau und die Stabilität der Eischale zusammenhängen. Sie stellt zufriedenstellend klar, *wie* bei der Eischale eine dermaßen hohe Stabilität erreicht wurde. Eine wichtige Frage bleibt jedoch unbeantwortet: Woher kommt die Idee für den Aufbau der Eischale? Müssen wir nicht, so fragt von Ditfurth (Ditfurth 1993, S. 221), da

das Haushuhn selbst keine Ingenieurin ist, »der Natur insgesamt eine Art Intelligenz zuschreiben […] die unserem viel gepriesenen technischen Verstand durchaus ebenbürtig oder überlegen ist?« »Wo immer man biologische Zusammenhänge durchschaut, scheint sich diese Schlussfolgerung aufzudrängen«, schreibt von Ditfurth weiter.

Wenn es diese Art von Intelligenz, von der Hoimar von Ditfurth hier spricht, in der Natur gibt und wenn diese Intelligenz der menschlichen Ingenieurskunst sogar überlegen ist, wäre es dann nicht klug, sich bei technischen Entwicklungen zukünftig mehr an der Natur zu orientieren? Wenn sich auf diese Weise technische Lösungen entwickeln lassen, kann es sich dann nicht sprichwörtlich lohnen, von der Natur zu lernen?

Der Gedanke, Technik an der Natur zu orientieren, übt auf Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler schon seit Langem eine inspirierende Faszination aus. In Forschungsansätzen unterschiedlicher Zeiten wird deshalb immer wieder ein Leitmotiv sichtbar, das als »Lernen von der Natur« bezeichnet werden kann. Es findet sich in der Renaissance in den Arbeiten Leonardo da Vincis und in den heutigen Wissenschaften u. a. in der bereits genannten Bionik. Das Motiv prägt eine wissensbasierte Bioökonomie und ist nicht zuletzt unter der Bezeichnung »Biologische Transformation« auch in einem, von der Fraunhofer-Gesellschaft entwickelten, aktuellen Forschungskonzept als Paradigma erkennbar. Die Begriffe »biologisch« und »natürlich« werden dabei oft gleichwertig verwendet. Was sie unter Biologischer Transformation verstehen, definieren im vorliegenden Band Thomas Bauernhansl und Markus Wolperdinger in ihrem Beitrag (Kapitel 2). Sie gehen von einer systematischen Anwendung des Wissens über die Natur aus und zielen auf eine Konvergenz von Bio- und Technosphäre. Im Fokus stehen bei ihnen Fertigungssysteme, die mithilfe einer Biologischen Transformation optimiert werden sollen. Biologische Transformation, Bioökonomie und Bionik sind dabei eng miteinander verwobene Konzepte.

Ist eine von der Natur abgeschaute Technik naturverträglicher?

Neben dem innovativen Potenzial, das der Natur zugesprochen wird, verbindet sich mit dem Begriff eines Lernens von der Natur auch die Hoffnung, dass sich auf diese Art und Weise auch Lösungen für die aktuelle ökologische Krise finden lassen; bei der es sich um dieselbe Krise handelt, die bereits Hoimar von Ditfurth in seiner Sendung aus dem Jahr 1978 beschrieben hat. Sie hat sich seitdem verschärft und bedroht uns inzwischen existenziell.

Zu der Zeit, als die Querschnitt-Folge ausgestrahlt wurde, war das Thema Klimawandel für die meisten Fernsehzuschauer noch neu. Vielfach wurde den Prognosen entgegengehalten, dass man ja nicht wissen könne, ob die Modelle der Klimaforscher denn stimmen. »Vielleicht kommt alles ja ganz anders«, »Die Natur wird das schon aushalten und regeln« und »Die Wirtschaft muss

Vorrang haben« waren oft zu hörende Argumente, die eine ernsthafte gesellschaftliche Auseinandersetzung mit dem Klimawandel verhinderten.

Auch wenn diese Argumente teilweise noch heute verwendet werden, ist die aktuelle Situation anders. Heute wissen wir sicher, dass der mit der wirtschaftlichen und technischen Entwicklung verbundene Ressourcenverbrauch und die damit einhergehenden Emissionen die globalen Stoffkreisläufe stören, die Atmosphäre, Ozeane und Böden massiv schädigen, das Klima relevant verändern und die Artenvielfalt dramatisch reduzieren. Die Veränderungen sind inzwischen so groß, dass bereits nur noch etwa ein Drittel des eisfreien Landes auf der Erde noch als Wildnis bezeichnet werden kann und der größte Teil der der Masse aller Wirbeltiere besteht inzwischen nicht mehr aus Wildtieren, sondern aus Nutztieren. (Williams 2015). Die ökologische Krise hat sich inzwischen so verschärft, dass auch ihr Potenzial eine soziale und ökonomische Krise auszulösen erkennbar ist. Ohne eine ökologische Grundlage ist nämlich auch die menschliche Existenz mit ihrer sozialen und wirtschaftlichen Dimension nicht denkbar.

Die Erkenntnis, dass die Art und Weise wie wir Technik bisher einsetzen, zu den ökologischen Problemen führt, die wir heute beobachten, lässt ein grundsätzliches und nicht vermeidbares Dilemma erkennen: Auf der einen Seite können wir unsere Lebensgrundlagen nicht ohne Technik erhalten, auf der anderen Seite führt aber gerade die Anwendung von Technik zur Bedrohung dieser Lebensgrundlagen. Kann uns also eine Technik, die von der Natur abgeschaut wird, aus diesem Dilemma befreien? Damit sie das kann, muss sie »naturgemäßer« oder zumindest »naturverträglicher« sein, als die Technik, die die bisherige Basis unserer Industriegesellschaft bildet (Gleich 1998, S. 7). Dass eine biologisch inspirierte Technik diese Qualität hat und deshalb einen nachhaltigen Beitrag zu einem zukünftigen Wirtschaften leisten kann, ist eine oft zu findende Ansicht (Dieckhoff 2019; Neugebauer 2019).

Wenn wir jedoch auf das Lernen von der Natur so viel Hoffnungen setzen, ist es von außerordentlicher Bedeutung vom wem oder von was wir da eigentlich lernen sollen oder wie Hoimar von Ditfurth bereits fragte (Ditfurth 1993, S. 221), wer »optimierte das Hühnerei und entwarf dessen geniale Form?«

Diese Frage nach dem »Wer«, die von Ditfurth ins Spiel bringt, wirft gravierende weitere Fragen auf, sie beinhaltet, zumindest sprachlich, die Suche nach einem Subjekt, das die Optimierung der Eischale vorgenommen hat. Die Natur als ein solches Subjekt zu beschreiben, sie quasi als Ingenieurin zu verstehen, ist jedoch äußerst problematisch. Um den Aufbau der Eischale zu erklären, berufen sich die Erklärungsmuster der Biologie nämlich nicht auf eine Zwecksetzung durch einen äußeren Willen oder ein Ziel, das in der Natur enthalten ist. Obwohl biologische Sprache nicht ohne teleologische Metaphern[1]

[1] Beispielsweise die Sätze »Wir haben Augen, um zu sehen«, »Ein Enzym benötigt …um…«, usw.

auskommt, ist in der Biologie, kein Platz für ein zielsetzendes »Wer«. Biologische Sprache und biologisches Weltbild passen hier nicht richtig zusammen, da teleologische Deutungskonzepte von zielorientierten Entwicklungen ausgehen, während das Weltbild der Evolutionsbiologie eine willentliche Gestaltung ausschließt und stattdessen von einem Wechselspiel aus Variation und Selektion ausgeht, dass die Entwicklung von Lebewesen erklären soll. Ein einfacher Verweis auf die Kreativität der Natur als solches hilft hier nicht weiter, weil sie das kreative Potenzial mit »der Natur« einem abstraktem »Etwas« unterstellt, von dem sich schwer sagen lässt, was es denn eigentlich ist. So gehört die Frage, was Natur ist, zu den ältesten und grundlegendsten der Philosophie überhaupt (Kather 2012, S. 7). Sie ist bis heute umstritten und auch Werner Ingensiep geht in seinem Beitrag (Kapitel 11) dieser Frage nach.

Was ist Natur?

Für Forschungsthemen, die sich am Leitbild Natur orientieren, hat die Frage, was mit der als Vorbild verwendeten Natur gemeint ist, eine entscheidende Bedeutung. Eine Reflexion was Natur ist, mitsamt einer Analyse der vielfältigen Antworten darauf, ist eine wichtige Voraussetzung, um die Naturbilder, an denen sich die jeweiligen Forschungsthemen – meist ohne es zu wissen – orientieren, zu identifizieren und zu bewerten. Letzteres ist ein notwendiger Prozess, der von der angewandten Forschung noch zu leisten ist! Der Umfang, den eine solche Reflexion hat, ist allerdings groß, sodass ihr hier nicht mit der gebotenen Ausführlichkeit nachgegangen werden kann. Grob zusammengefasst kann jedoch geschichtlich zwischen »monistischen« und »dualistischen« Naturvorstellungen unterschieden werden. In monistischen Vorstellungen wird die Natur mit allem was existiert, philosophisch ausgedrückt mit dem ganzen Seienden, gleichgesetzt. Wir finden solche Vorstellungen u. a. bei vorsokratischen Philosophen wie Heraklit, der die »physis«[2], wie die Griechen dieses ganze Seiende nannten, als etwas interpretierte, dass Dinge, Lebewesen, Menschen und das Göttliche enthielt.

Auch die modernen Naturwissenschaften, setzen scheinbar ein umfassendes Ganzes als Natur voraus, von dem sie annehmen, dass es eine weitgehend kausale Organisation[3] hat, die mathematisch erfasst werden kann. Dieses Ganze ist jedoch etwas Anderes als die physis der Griechen. Während die physis alle Dinge, alle Lebewesen mitsamt den Menschen und Göttern umfasste, benötigt das Konzept der Naturwissenschaften Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, die den Prozessen, die sie in der Natur untersuchen als erkennende Subjekte gegenüberstehen. In der Entwicklung der naturwissenschaftlichen Methode ist also schon eine dualistische Vorstellung von Natur enthalten, in

[2] Das griechische Wort physis griech. physis bedeutet » wachsen«, die spätere lateinischen Bezeichnung natura, leitet sich von dem Wort »nasci« ab. Nasci steht für »geboren werden«, »entstehen« (Glaeser 1992.)

[3] Die Grenzen dieser Annahme zeigen Phänomen in der Quantenphysik auf.

der eine determinierte Natur von einer durch den menschlichen Geist geprägten Sphäre unterschieden wird.

Eine dualistische Sichtweise findet sich bereits bei Aristoteles, für den Natur all das ist, was ohne menschliches Zutun entstanden ist (Schiemann 1996b, 17ff). Kultur, zu der auch die Technik gehört, wird somit bereits durch Aristoteles von der Natur unterschieden, eine Sichtweise, der die meisten Menschen wahrscheinlich intuitiv zustimmen würden. In dualistischen Naturvorstellungen kann Natur immer nur in Abgrenzung zur Kultur oder zu etwas anderem, beispielsweise einer göttlichen Sphäre definiert werden. Umgekehrt wird Kultur in Abgrenzung zur Natur gedacht, sodass Natur und Kultur mitsamt der Technik als Gegenpole verstanden werden, die ohne Bezug auf das jeweils Andere nicht beschrieben werden können (Schiemann 1996a).

Auch im Konzept einer Biologischen Transformation finden sich verschiedene Naturmotive als Deutungskonzepte wieder. So nimmt es eine Trennung zwischen Natur und Kultur (Technik) zum Ausgangspunkt und formuliert, mit der im Beitrag von Thomas Bauernhansl und Markus Wolperdinger (Kapitel 2) genannten Konvergenz aus Biosphäre und Technosphäre, eine Vision, in der diese Trennung aufgehoben wird. Diese Vermischung der meist getrennt gedachten Bereiche Natur und Kultur (Technik) zeigt sich bereits in der Biotechnologie und Gentechnik, deren Gegenstände sowohl natürliche wie auch technische Aspekte haben. Unsere Gewohnheit, Natürliches und Technisches strikt voneinander zu trennen, entspricht also nicht den Gegebenheiten, wie wir sie heute vorfinden. Von Einigen, beispielsweise von den Soziologen Michel Callon und Bruno Latour, wird diese Trennung nicht nur als falsch angesehen, sondern sogar als Hauptursache der ökologischen Krise ausgemacht. Die Aufhebung der Natur-Kultur-Trennung ist deshalb auch das Ziel der von ihnen ab den 1980er Jahren federführend entwickelten »Akteur-Netzwerk-Theorie«. Die Theorie »zielt […] darauf […]: die Unterscheidung zwischen Gesellschaft und Natur bzw. zwischen Gesellschaft und Technik aufzubrechen« (Schulz 2000). Im Fokus stehen die Eigenschaften und Verhaltensweisen der an einem Netzwerk beteiligten, belebten oder unbelebten Natur, die der involvierten technischen Artefakte und sowie der betreffenden sozialen Akteure, Normen oder Institutionen; sie alle werden als Handlungssubjekte eines Netzwerks interpretiert. (Schulz 2000)

Im interdisziplinären Diskurs wird das Gespräch über Natur und Kultur durch eine Grenzlinie behindert, die viele Naturwissenschaftlerinnen und –wissenschaftler von ihren geisteswissenschaftlichen Kolleginnen und Kollegen trennt. Auf der einen Seite der Grenzlinie finden sich eher naturalistische und auf der anderen Seite eher kulturalistische Positionen. Im »Naturalismus« wird die Kultur als Produkt der Natur aufgefasst und im »Kulturalismus« ist Natur ein kulturelles Konstrukt. Das Eine geht jeweils in dem Anderen auf bzw. ist dessen Produkt. Bei einem Diskurs über eine Biologische Transformation, die eine Konvergenz von Bio- und Technosphäre postuliert, ist deshalb zu fragen, ob dabei das Technische im Natürlichen oder das Natürliche im

Technischen aufgeht. Es ist eine offene interdisziplinäre Diskussion erforderlich, um zu vermeiden, dass »das Biologische« bzw. »das Natürliche« nur als Legitimation herangezogen wird, damit das Technische umgesetzt werden kann. Für einen partizipatorischen Prozess, der sich mit der Akzeptanz des Konzepts einer Biologischen Transformation auseinandersetzt, wird diese Frage von großer Wichtigkeit sein.

Prinzipien der Natur, Prinzipien der Biologie?

Wenn nun aber schon die Einordnung des Naturbegriffs äußerst kompliziert ist, so ist die Identifizierung von Natur-Prinzipien oder biologischen Prinzipien nicht einfacher. Biologische Prinzipien sind etwas Anderes als gesetzmäßige Zusammenhänge in der Physik oder Chemie.

Auch generelle Aussagen zur Natur können in einem oder mehreren Jahrhunderten ganz anders aussehen als heute. Solche Aussagen, mit denen Allgemeingültiges über die Natur ausgesprochen wird, sogenannte »Die Natur ist-Sätze« sind deshalb mit äußerster Vorsicht zu bewerten. »Die Natur ist ein System!«, »Die Natur arbeitet in Kreisläufen!« und »Die Natur ist effizient!« sind Aussagen, die in diese Kategorie gehören. Oft werden sie auch mit einer Schlussfolgerung verknüpft, die sich aus dem vermeintlichen Naturprinzip ergibt. Auf eine dieser Annahmen, die besagt, dass die Natur effizient ist, soll im Folgenden kurz eingegangen werden.

Es ist richtig, dass bionische Anwendungen effizienter sein können als herkömmliche technische Anwendungen. Aber lässt sich hieraus der Schluss ziehen, die Natur selbst ist effizient und Effizienz damit ein Prinzip der Natur? Viele Prozesse in der Natur lassen sich durchaus unter diesem Blickwinkel betrachten. So ist es möglich, den Materialaufwand zu messen und zu bewerten, der für einen zu erzielenden Nutzen, beispielsweise die Stabilität einer Hühnereischale, benötigt wird. Viele Prozesse und Produkte in der Natur erscheinen, wenn wir diesen Blickwinkel einnehmen, als ausgesprochen effizient. Viele, aber nicht alle! Beispielsweise ist die Energieumwandlung durch pflanzliche Photosynthese in Bezug auf die pro Flächeneinheit umgewandelte Energie deutlich ineffizienter als technische Photovoltaik-Anwendungen (Fratzl 2019, S. 50) und wie ressourceneffizient Prozesse in Lebewesen organisiert sind, hängt auch davon ab, wie viele Ressourcen zu Verfügung stehen. Effizienz wird nur dann wichtig, wenn Ressourcen knapp sind. (Vincent 2002)

Zu berücksichtigen ist auch, dass es sich bei Effizienz um ein quantitatives Konzept handelt, dass nur angewendet werden kann, wenn sich sowohl der Nutzen wie auch der Aufwand quantifizieren lassen. Effizienzdenken stößt immer da an seine Grenzen, wenn es nicht um quantitativ messbare Dinge geht, sondern um Qualitäten. Während wir in Technik und Ökonomie nämlich in der Regel einen Nutzen klar benennen können, ist das in der Natur nicht der Fall. Was soll »der Nutzen« in der Natur sein? Ist es das Überleben, die Fortpflanzung, die Arterhaltung? Wäre der Nutzen so zu erfassen, müssten wir

auch die Frage beantworten, warum sich immer komplexere Lebensformen entwickelt haben. Wäre es nicht effizient, wenn es nur Lebewesen wie »Haarsterne« gäbe? Haarsterne sind in der Tiefsee lebende Tiere, die sich nur wenige Zentimeter pro Jahr fortbewegen und keine Energie darauf verwenden, die eigene Körpertemperatur aufrechtzuerhalten (Weber 2010). Die Tiere kommen mit dieser Art zu leben bestens klar. Bestünde der Nutzen in der bloßen Arterhaltung, dann stellt sich die Frage, warum es so etwas wie energieverschwendende Warmblüter überhaupt gibt. Überleben und sich fortpflanzen können Haarsterne auch und sie tun das mit einem äußerst geringen Aufwand.

Das Beispiel zeigt, dass Effizienz in der Natur möglicherweise nicht unwichtig ist, keinesfalls aber von anderen Aspekten isoliert bewertet werden darf. So eröffnet eine konstante, ausreichend hohe Körpertemperatur, wie sie bei warmblütigen Tieren vorliegt, vermutlich ein reichhaltigeres Innen- und ganz anderes Sozialleben, als es bei wechselwarmen Tieren möglich ist. Hier reden wir jedoch über eine Qualität und nicht über eine quantitativ messbare Größe. Die Qualität »Warmblütigkeit« lässt sich nicht mithilfe des Effizienzgedankens erfassen. Effizienz, als leitendes biologisches Prinzip zu verstehen, greift deshalb viel zu kurz.

Wenn wir von Effizienz in der Natur sprechen, nehmen wir ein technoökonomisches Kosten-Nutzen Denken in unsere Vorstellung von Natur hinein und vermeinen es dort als biologisches Prinzip zu erkennen. Versuchen wir dann dieses Prinzip wieder in Technik, Wirtschaft oder gar die Gesellschaft zu übertragen, erfolgt eine Rückübertragung, die ggf. Dinge und Prozesse als »natürlich« legitimiert, obwohl sie es vielleicht gar nicht sind.

Begriffsübertragungen, wie sie eben beschrieben wurden, sind in der Geschichte der Wissenschaften nicht ungewöhnlich. Es gibt zahlreiche Beispiele, in denen Erkenntnisse aus einem Fachgebiet inspirierend auf Untersuchungen in anderen Fachgebieten einwirkten. Beispielsweise integrierte Carl von Linné ökonomische Gedanken in seine Lehre vom Naturhaushalt, Charles Darwin griff zur Erläuterung seiner Evolutionstheorie auf Begriffe des britischen Ökonomen Thomas Robert Malthus zurück und Erkenntnisse zu biologischen Systemen wurden von Biokybernetikern aus technischen Systemsteuerungen abgeleitet. Werden diese Gedanken nun wieder in den technischen, ökonomischen oder sozialen Bereich zurücktransferiert, ist eine kritische Reflexion dieses Vorgangs erforderlich. Zu berücksichtigen sind die mit der Übertragung verbundenen, unterbewussten und bewussten Vorstellungen und Ziele.

Und die Ethik?

Leider hat es in der Geschichte nicht an Versuchen gefehlt, vermeintliche biologische Prinzipien auf die menschliche Gesellschaft zu übertragen. Vor allem im 20. Jahrhundert geschah dies mit fatalen Folgen. So orientierte sich

die nationalsozialistische Ideologie auch am Verhalten von Tieren und angeblichen, aus der Evolutionstheorie ableitbaren Grundsätzen der Natur, um ihr Gesellschaftsmodell zu begründen. Diesen »Sozialdarwinismus«, betrachtet u. a. Gregor Schiemann (Schiemann 1996b) als extremen Teil einer »allgemeine(n) Tendenz der spätneuzeitlichen Wissenschaft, den Anwendungsbereich von Naturgesetzen und experimentellen Verfahren auf die Bereiche der menschlichen Gemeinschaft und Gesellschaft auszudehnen«. Als neueres Beispiel für diese Tendenz soll hier nur auf die, um das Jahr 2000 herum, erfolgte Debatte um sogenannte »konvergierende Technologien« (»Converging Technologies«) Bezug genommen werden. Sie wurde unter der Bezeichnung »NBIC[4]-Konvergenz« in den USA initiiert und basierte auf einer postulierten Wechselwirkung zwischen den Themengebieten Nano-, Bio- und Informationstechnik sowie den Kognitionswissenschaften, von der bahnbrechende Innovationen erwartet wurden. Während sich das Gespräch über die NBIC-Konvergenz in Europa vor allem an forschungspolitischen Fragen orientierte, war die Diskussion in den USA eher weltanschaulich geprägt. Die Initiatoren des US-amerikanischen Diskurses, Mihail Roco und Sims Bainbridge gingen von einer zunehmenden Vereinheitlichung unterschiedlicher Wissenschaften und Technologien aus (Roco 2003). Sie verwenden dabei den Begriff einer »materiellen Einheit auf der Nanoebene« (Coenen 2008; Roco 2003), der zu einem »hierarchischen Verständnis von Wirklichkeit« führt und zur Erklärung der gesamten Natur, dem menschlichen Gehirn sowie von sozialen und kulturellen Prozessen herangezogen werden kann. Komplexe soziale Zusammenhänge wurden dabei auf Gesetzmäßigkeiten auf der Nanoebene zurückgeführt. Zurecht kritisiert wurde das Leitbild der NBIC-Initiative, das sich an einer Optimierung von Menschen orientierte. Extrempositionen gingen dabei sogar von einer »Ergänzung, Ersetzung oder Abschaffung der Menschheit« durch posthumane Wesen aus (Coenen 2014).

Das hier angesprochene Beispiel, die Debatte um die NBIC Konvergenz, ist in seinen Tendenzen sicherlich extrem. Es zeigt jedoch deutlich, wie wichtig es ist, Forschungsprogramme ethisch zu reflektieren. Das gilt besonders, wenn Lebendiges oder sogar Menschen einbezogen sind. Werden Prinzipien aus der Natur in andere Bereiche transformiert oder Lebendiges und Technisches kombiniert, so hat das immer auch eine ethische Dimension. Auch das Thema Nachhaltigkeit, als ein ethisch-moralisches sowie handlungsleitendes Prinzip, spielt dabei eine besondere Rolle.

Ist eine von der Natur abgeschaute Technik nachhaltig?

Wie oben beschrieben, wird die Entwicklung von Technologien und Prozessen, die sich an der Natur orientieren mit der Hoffnung verbunden, dass sie eine naturverträglichere Technik ermöglichen und so zu einem nachhaltigen

4 NBIC: **N**ano, **B**io, **I**nfo, **C**ogno)

Wirtschaften beitragen. (Neugebauer 2019; Dieckhoff 2019). Die Frage nach Nachhaltigkeit kann jedoch nicht universell beantwortet werden, haben wir es doch in der Bionik, in der Bioökonomie und bei der Biologischen Transformation mit einer Reihe sehr unterschiedlicher Themen, Technologien und Konzepte zu tun. Sie müssen jeweils für sich geprüft und bewertet werden. Beispielsweise ist die wasserabweisende Wirkung von Oberflächenstrukturen, die den Vorbildern von Pflanzenblättern entnommen wurden (Lotus-Effekt), etwas völlig anderes, als die gentechnische Veränderung eines Lebewesens. Die Erwartung von Nachhaltigkeit darf deshalb nicht auf der ggf. bewusst oder unbewusst getroffenen Annahme gründen, dass Etwas, dass sich in seiner Funktion oder seinem Material ihn ähnlicher Weise in der Natur finden lässt, auch in seinen Auswirkungen mit der Natur kompatibel ist.

Wichtiger als die Orientierung an biologischen Prinzipien wird es auf dem Weg zu einem ökologisch verträglichen Wirtschaften möglicherweise sein, die gesellschaftlichen Stoffumsätze mehr als bisher an die Größenordnungen anzupassen, die in Ökosystemen umgesetzt werden. Dass hier eine große Diskrepanz vorliegt wird deutlich, wenn wir uns vergegenwärtigen, dass der jährliche Verbrauch von Erdöl und Erdgas, der globalen Lebensleistung von mehreren hunderttausend Jahren Plankton-Population entspricht (Steininger 2017). Es wird deshalb darauf ankommen, die in diesen Ökosystemen umgesetzten Stoffmengen und die Zeit, in der sie umgesetzt werden, zu berücksichtigen. Konkret heißt das, sich auch auf die Anfänge bioökonomischen Denkens zu besinnen, die in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts entstanden und dem gedanklichen Umfeld von Dennis und Donella Meadows zuzuordnen sind. Die Botschaft der Eheleute Meadows in ihren 1972 mit »Die Grenzen des Wachstums« betitelten Bericht des Club of Rome (Meadows 1972) war, dass auf einem Planeten mit endlichen Ressourcen ein grenzenloses Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum nicht möglich ist.

Diesem ursprünglichen bioökonomischen Denken sind auch die Arbeiten von Ökonomen wie Nicholas Georgescu-Roegen (Georgescu-Roegen 1987) und Herman Daly (Daly 1968; Daly 2015) zuzurechnen. Sowohl Daly wie auch Georgescu-Roegen entwickelten bioökonomische Wirtschaftsmodelle, die sich an thermodynamischen Prinzipien orientieren. Ihre Modelle können als Vorläufer heutiger Vorstellungen über eine Postwachstumsökonomie betrachtet werden. Sie hängen eng mit dem Nachhaltigkeitsdenken zusammen. Mit dem Begriff der Bioökonomie sollte ursprünglich der biologische Ursprung aller Wirtschaftsprozesse hervorgehoben und auf den begrenzten Vorrat ungleich verteilter natürlicher Ressourcen hingewiesen werden. In dieser Lesart der Bioökonomie ist die Erneuerung der Ressourcen, die für wirtschaftliche Zwecke verwendet werden, der entscheidende Aspekt. (Giampietro 2019). Es wird deshalb nicht ausreichen, ressourceneffizient zu wirtschaften. Zusätzlich gefragt sind auch Konsistenz- und Suffizienzstrategien.

Die Tagung »Biologische Transformation – Interdisziplinäre Perspektiven für die angewandte Forschung«

Die Ausführungen in diesem einleitenden Kapitel sollten zeigen, dass ein Konzept, welches das Lernen von der Natur voraussetzt und biologische Erkenntnisse in andere Bereiche übertragen möchte, äußerst komplex und vielschichtig ist. Es lässt sich nur interdisziplinär erschließen und reflektieren. Am 21. und 22.11.2019 kamen deshalb im Museum für Naturkunde Berlin Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, sowie Vertreterinnen und Vertreter der Presse, von NGOs und Projektträgern zu einer von der Fraunhofer-Gesellschaft, dem Zentrum für medizinische Biotechnologie der Universität Duisburg-Essen und dem Museum für Naturkunde Berlin ausgerichteten Tagung zusammen. Der Titel der Tagung »*Biologische Transformation – Interdisziplinäre Perspektiven für die angewandte Forschung*« zeigt an, dass es das Ziel der Tagung war, unterschiedliche Fachrichtungen zu einem interdisziplinären Diskurs über das Thema biologische Transformation anzuregen. Teil nahmen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Bereichen Ingenieur- und Naturwissenschaften, Bionik, Soziologie, Wirtschaftswissenschaften, Psychologie sowie Technik- und Biophilosophie. Die in diesem Band enthaltenen Artikel sind verschriftliche Beiträge der Tagung. Leider lagen nicht alle Beiträge in schriftlicher Form vor, sodass sicherlich wichtige Impulse noch fehlen.

Nach dieser Einleitung findet sich ein Beitrag von Thomas Bauernhansl und Markus Wolperdinger. Die Leiter des Fraunhofer IPA und IGB stellen in ihrem Beitrag den Fraunhofer-Forschungsansatz »Biologische Transformation« vor (Kapitel 2). Anschließend erläutert der Bioniker Oliver Schwarz, ebenfalls vom Fraunhofer IPA, welchen Mehrwert eine Technikentwicklung erreichen kann, die sich an der Natur orientiert (Kapitel 3).

In der Folge werden in einem weiteren Text verschiedene Kategorien biologischer Transformationen von mir untersucht. Im Vordergrund steht dabei die Frage, was seinem Wesen nach vorliegt, wenn Biologie und Technik zusammenkommen und welche Schlussfolgerungen daraus zu ziehen sind (Kapitel 4). Alfred Nordmann und Janine Gondolf interpretieren in ihrem Beitrag, Bionik und Biotechnologie als »Parodie« von Biologie oder Natur. Sie bringen »biologische Funktion in einem technischen Zusammenhang, [der] nichts mehr mit Biologie zu tun hat« (Kapitel 5)

Im sechsten, siebten und achten Kapitel finden sich unterschiedliche Sichtweisen auf den Begriff »Evolution«. Dieser stand auf der Tagung oft im Mittelpunkt des Austausches. Oft wurde diskutiert, ob es wissenschaftlich richtig ist, den Evolutionsbegriff auf andere Bereiche zu übertragen. Wie komplex die Zusammenhänge sind und dass zurückhaltend mit einer zu vorschnellen Übertragung umgegangen werden muss, macht vor allem der Beitrag von Ulrich Krohs, Biophilosoph an der Westfälischen Wilhelms-Universität Müns-

ter, deutlich (Kapitel 6). Er erläutert Evolutionsmechanismen und den Evolutionsbegriff. Im Anschluss stellt Marco Lehmann-Waffenschmidt von der Technischen Universität Dresden sein Fachgebiet, die Evolutionäre Ökonomik, vor (Kapitel 7). Die Evolutionäre Ökonomik untersucht graduelle, ergebnisoffene Prozesse bzw. ungerichtete Transformationen in der Ökonomie. Der Unternehmer und Psychologe Klaus-Stephan Otto bringt im vierten Kapitel Beispiele, wie, seinem Verständnis nach, Prozesse aus der Natur ihr Pendant in der Wirtschaft finden. Er nimmt eine metaphorische Übertragung biologischer Begriffe vor, in dem er Unternehmen als Lebewesen bzw. Ökosysteme betrachtet (Kapitel 8).

Kapitel neun und zehn setzen sich mit ethischen Aspekten rund um das Thema Biologische Transformation auseinander. Zunächst stellt der Ethiker und Philosoph Joachim Boldt von der Universität Freiburg ethische Prinzipien vor, die bei einer Diskussion um eine Biologische Transformation relevant sein können (Kapitel 9). Die Philosophin und Theologin Heike Baranzke stellt in Zusammenhang mit einer biologischen Transformation die Frage, ob es überhaupt so etwas wie eine »gute« Technik geben kann (Kapitel 10).

Der anstelle eines Schlusswortes formulierte und abschließende Text des Biophilosophen Werner Ingensiep nimmt die in diesem einleitenden Beitrag gestellte Frage auf, was wir unter Natur verstehen und was zu berücksichtigen ist, wenn wir Begriffe aus einem Bereich in einen anderen übertragen (Kapitel 11).

Auch wenn auf der Veranstaltung viele Fragen angesprochen wurden, ist abschließend festzustellen, dass der interdisziplinäre Diskurs für das Thema Biologische Transformation gerade erst begonnen hat. Da die Beiträge in diesem Tagungsband von Menschen, stammen, die ihre Expertise in sehr unterschiedlichen Disziplinen erworben haben, sind sie nicht nur unterschiedlich, teilweise widersprechen sie sich sogar. Dies kann bei einem interdisziplinären Diskurs jedoch nicht anders sein. Hier gibt es einfach unterschiedliche Standorte und Perspektiven, die oft in und mit ihren Unterschieden nebeneinanderstehen bleiben müssen. Dieser einleitende Text soll deshalb mit einem Zitat des Philosophen Georg Picht enden, das auf das Miteinander verschiedener Perspektiven Bezug nimmt und auch als Plädoyer für einen interdisziplinären Austausch in den Wissenschaften auslegt werden kann[5]. So wie »Der Wanderer im Nebelmeer«, der auf dem Umschlagbild dieses Buches zu sehen ist, haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler jeweils ihre eigene Perspektive. Georg Picht schreibt:

»Wir beginnen zu ahnen, daß unser Wissen keine zeitlosen Wahrheiten enthält, sondern von dem Standort abhängig ist, an dem wir uns jeweils befinden;

[5] Das Zitat von Georg Picht bezieht sich eigentlich auf die Beachtung historischen Denkens über die Natur. Das unterschiedliche Denken in den Epochen wurde hier auf die unterschiedlichen Perspektiven der einzelnen Wissenschaften übertragen.

es dämmert uns, daß [...] unser Denken eine Bewegung, daß heißt eine Wanderung durch die Landschaft ist, bei der uns von verschiedenen Standorten aus verschiedene Ausblicke in dieselbe Landschaft möglich werden. Würden wir die Aussagen vergleichen, in denen wir die verschiedenen Bilder beschreiben, und würden diese Bilder ohne Rücksicht auf den Standort, von dem aus sie jeweils gewonnen würden, nebeneinanderstellen, so würde sich ergeben, daß sie einander widersprechen. [...] Durch diesen Vergleich wird deutlich, wo der fundamentale Fehler in unseren Denkgewohnheiten steckt. Wir halten abstrakt Meinung gegen Meinung, Aussage gegen Aussage und stellen fest, daß sie einander widersprechen, reflektieren aber nicht darauf, daß sie von ihrem (jeweiligen) Standort aus in perspektivischem Sinne des Wortes »wahr« sind. Wir können ihre perspektivische Wahrheit nicht erkennen, weil uns die Landschaft unbekannt ist, durch die wir uns beim Denken bewegen, und weil wir vergessen haben, eine Karte zu zeichnen, auf der wir uns über die Formation dieser Landschaft und über die relative Position der verschiedenen Standorte orientieren könnten.« (Picht 1993, S. 28)

Literaturverzeichnis

Boeing, Nils (2019): Klimawandel im Jahr 2019 - Die Hütte brennt. Online verfügbar unter https://www.zdf.de/nachrichten/heute/klimawandel-2019-die-huette-brennt-100.html, zuletzt aktualisiert am 30.12.2019, zuletzt geprüft am 10.08.2020.

Coenen, Christopher (2008): Konvergierende Technologien und Wissenschaften: Der Stand der Debatte und politischen Aktivitäten zu "Converging Technologies". Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Hintergrundpapier. Büro für Technikfolgen. Online verfügbar unter http://www.itas.kit.edu/pub/v/2008/coen08a.pdf, zuletzt geprüft am 23.11.2017.

Coenen, Christopher (2014): Converging Technologies. In: Gabriele Gramelsberger (Hg.): Synthesis: Zur Konjunktur eines philosophischen Begriffs in Wissenschaft und Technik. Bielefeld: Transcript-Verl. (VerKörperungen, 20), S. 209–230.

Daly, Herman (1968): On Economics as a Life Science,. In: *Journal of Political Economy*, S. 392–406.

Daly, Herman (2015): Economics for a Full World. Hg. v. Great Transition Initiative. Online verfügbar unter https://greattransition.org/images/Daly-Economics-for-a-Full-World.pdf, zuletzt geprüft am 16.06.2020.

Dieckhoff, Patrick; Hippmann, Sophie; Klingner, Raoul (2019): Biologische Transformation. Eine Forschungsagenda der Fraunhofer Gesellschaft. In: Reimund Neugebauer (Hg.): Biologische Transformation (Fraunhofer-Forschungsfokus), S. 9–19.

Ditfurth, Hoimar von; Arzt, Volker (1993): Querschnitte. Reportagen aus der Naturwissenschaft. 8. Aufl., 67.-69. Tsd. München: Dt. Taschenbuch Verl.

Georgescu-Roegen, Nicholas (1987): The entropy law and the economic process in retrospekt. Berlin: IÖW (Schriftenreihe des IÖW, 5).

Giampietro, Mario (2019): On the Circular Bioeconomy and Decoupling: Implications for Sustainable Growth. In: *Ecological Economics* 162, S. 143–156. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2019.05.001.

Glaeser, B. (1992): Natur in der Krise? Ein kulturelles Mißverständnis. In: *Gaia* 1 (4), S. 195–203.

Gleich, Arnim (1998): Bionik. Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur? Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

Kather, Regine (2012): Die Wiederentdeckung der Natur. Naturphilosophie im Zeichen der ökologischen Krise. Darmstadt: WBG - Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Online verfügbar unter http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=945249.

Löhr, Eckhard (2014): Bilanz eines Suchenden. Zur Neuauflage von Hoimar von Ditfurths Innenansichten eines Artgenossen. Hg. v. Kritische Ausgabe. Online verfügbar unter http://www.kritische-ausgabe.de/artikel/bilanz-eines-suchenden, zuletzt geprüft am 10.08.2020.

Meadows, Dennis L. (1972): Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. 17. Aufl. Stuttgart: Dt. Verl.-Anst.

Neugebauer, Reimund; Thum, Martin (2019): Vom Kontrast zur Konvergenz. Biologische Prinzipien prägen die Technologien von morgen. In: Reimund Neugebauer (Hg.): Biologische Transformation (Fraunhofer-Forschungsfokus), S. 1–8.

Picht, Georg (1993): Der Begriff der Natur und seine Geschichte. 3.Auflage. Stuttgart: Klett-Cotta.

Roco, M. C.; Bainbridge, W:S. (2003): Converging Technologies for Improving Human Performance: Science (NBIC) Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology, and Cognitive. In: Mihail C. Roco (Hg.): Converging technologies for improving human performance: Nanotechnology, biotechnology, information technology and cognitive science. Dordrecht u.a.: Springer, S. 1–27.

Schiemann, Gregor (1996a): Traditionslinien der Naturphilosophie. In: Gregor Schiemann (Hg.): Was ist Natur? Klassische Texte zur Naturphilosophie. Orig.-Ausg. München: Dt. Taschenbuch-Verl. (Dtv, 4697), S. 10–46.

Schiemann, Gregor (Hg.) (1996b): Was ist Natur? Klassische Texte zur Naturphilosophie. Orig.-Ausg. München: Dt. Taschenbuch-Verl. (Dtv, 4697).

Schulz-Schaeffer, Ingo (2000): Akteur-NetzwerkTheorie. Zur Koevolution von Gesellschaft, Natur und Technik. In: Johannes Weyer und Jörg Abel (Hg.): Soziale Netzwerke. Konzepte und Methoden der sozialwissenschaftlichen Netzwerkforschung. München: Oldenbourg (Lehr- und Handbücher der Soziologie), S. 187–211. Online verfügbar unter https://www.uni-due.de/imperia/md/content/soziologie/akteurnetzwerktheorie.pdf, zuletzt geprüft am 23.04.2020.

Steininger, Benjamin (2017): Raffinerie und Katalyse. In: Jürgen Renn und Bernd Scherer (Hg.): Das Anthropozän. Zum Stand der Dinge. Zweite Auflage. Berlin: Matthes & Seitz, S. 210–225.

Weber, Andreas (2010): Zwischen Biomaschine, Artenkollaps und Wachstumswahn: Was ist der Irrtum in unserem Bild vom Leben? In: Anna M. Wobus (Hg.): Der Begriff der Natur. Wandlungen unseres Naturverständnisses und seine Folgen. In: Anna M. Wobus (Hg.): Der Begriff der Natur. Wandlungen unseres Naturverständnisses und seine Folgen ; Gaterslebener Begegnung 2009 ; ... vom 7. bis 9. Mai 2009 ; mit 1 Tabelle. Stuttgart: Wiss. Verl.-Ges (Nova acta Leopoldina, N.F., 376 = Bd. 109), S. 25–44.

Williams, Mark; Zalasiewicz, Jan; Haff, P. K.; Schwägerl, Christian; Barnosky, Anthony D.; Ellis, Erle C. (2015): The Anthropocene biosphere. In: *The Anthropocene Review* 2 (3), S. 196–219. DOI: 10.1177/2053019615591020.

2 Die Biologische Transformation der Produktion – Einführung einer biointelligenten Wertschöpfung[1]

Markus Wolperdinger,
Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB
Thomas Bauernhansl,
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Einleitung

Eine nachhaltige Transformation der traditionellen industriellen Wertschöpfung ist sowohl für die Gesellschaft als auch für die Wirtschaft von wesentlicher Bedeutung (Miehe 2016). Die Herausforderungen, vor denen Unternehmen und Einzelpersonen in diesem Zusammenhang stehen, sind vielfältig. Neben dem demografischen Wandel, der Globalisierung, Individualisierung und Digitalisierung sind Klimawandel, Ressourcenknappheit und Umweltschutz von entscheidender Bedeutung und sind Teil der globalen Nachhaltigkeitsziele.

Der globale Ressourcenabbau ist in den vergangenen 30 Jahren um hundert Prozent gestiegen (SERI 2014). Wenn wir so weiterwirtschaften, ist bis Mitte des Jahrhunderts mit einer weiteren Verdoppelung des Ressourcenverbrauchs zu rechnen (WWF 2014; Fischer 2011). Die externen Kosten für Schäden durch Luftverschmutzung betragen alleine in Europa etwa eine Billion Euro pro Jahr (EU 2013). Der Klimawandel tut sein Übriges und erzeugt bereits heute unüberschaubare Schäden.

Um diese Probleme zu lösen oder deren verstärktes Auftreten zu verhindern, haben in der jüngsten Vergangenheit Ideen wie die einer vollständigen Kreislaufwirtschaft oder der ausschließlichen Nutzung von erneuerbaren Ressourcen (Bioökonomie) große Aufmerksamkeit erregt. Die Digitalisierung der Fertigung wird dabei als ein wichtiger Ansatz angesehen. Viele Autoren argumentieren, dass der Übergang von einer Pipeline- zu einer Plattformwirtschaft eine nachhaltige Wertschöpfung ermöglicht (Alstyne 2016). Ein Beispiel ist Carsharing, das – konsequent umgesetzt – zu einer Gemeinschaftswirtschaft (Sharing Economy) führt, einem Eckpfeiler der Kreislaufwirtschaft.

Aktuelle Studien und Diskussionen in Wissenschaft und Praxis geben die dominierende Rolle der Digitalisierung als alleinigen Lösungsansatz auf und klassifizieren sie eher als Ermöglicher eines notwendigen Wandels (Hauff 2017). Das Zusammenwachsen von technischen und biologischen Prozessen

[1] Dieser Beitrag basiert auf einem Bericht zur Biotrain-Voruntersuchung, die unter anderem vom Fraunhofer IPA und Fraunhofer IGB verfasst wurde siehe : Miehe, R. et al. The biological transformation of the manufacturing industry – envisioning biointelligent value adding, Procedia CIRP Volume 72, 2018, pp. 739-743

hat hingegen das Potenzial, die Wertschöpfung grundlegend in Richtung Nachhaltigkeit zu verändern. In diesem Beitrag skizzieren wir solch eine Biologische Transformation aus Sicht der Fertigung und der Verfahrensentwicklung und stellen vorläufige Handlungsfelder auf der Grundlage aktueller Forschungsergebnisse vor.

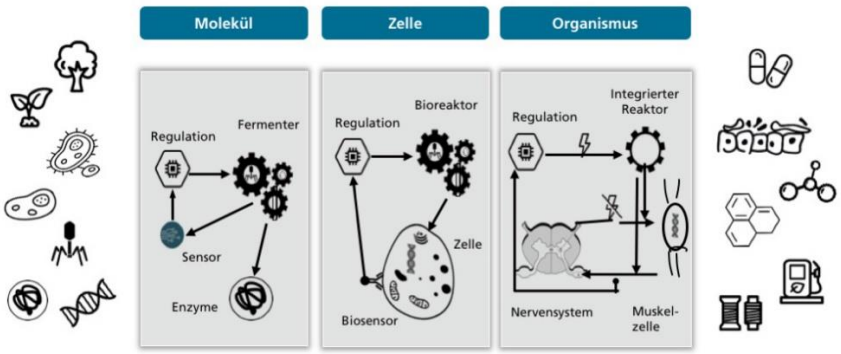


Abbildung 2-1: Die Biologie zieht in die technische Wertschöpfung ein. Die Produktion nutzt den Werkzeugkasten der Natur. Quelle: Fraunhofer IGB.

Stand der Technik

Verschiedene Autoren haben bereits Definitionen und Ansätze für das generische Konzept einer Kreislaufwirtschaft vorgestellt, z. B. Cradle-to-Cradle, Industrial Ecology, Performance Economy, Biomimicry, Regenerative Design, Natural Capitalism und Blue Economy (Braungart 2002; Lyle 1996). Die derzeit am weitesten verbreitete Definition wurde von der Ellen MacArthur Foundation präsentiert. Dabei wird das Ziel der Entkopplung von Ressourcennutzung und -wachstum als konstante Werterhaltung von Produkten, Komponenten und Materialien im Laufe der Zeit verstanden. Dies soll durch geschlossene Materialkreisläufe erreicht werden. Es wird zwischen einem technischen und biologischen Kreislauf unterschieden (MacArthur 2013). Ein verwandtes Konzept ist das der Bioökonomie (Potočnik 2005). Es beschreibt die Transformation einer Wirtschaft, die von fossilen Brennstoffen abhängig ist, zu einer Wirtschaft, die auf nachwachsenden Rohstoffen basiert (Isermeyer 2014; Bioöko 2019; VCI 2017). Dabei werden die Kreisläufe der Natur genutzt und erhalten, indem biologische Ressourcen zur Bereitstellung von Produkten, Prozessen und Dienstleistungen in allen Wirtschaftssektoren im Rahmen eines nachhaltigen Wirtschaftssystems (Bioökono 2016) erzeugt und genutzt werden.

Dabei wird die Biotechnologie oft als Befähiger angesehen (Potočnik 2005; Acatech 2017). Um den Prozess einer Konvergenz der traditionellen Herstellung mit biologischen Prozessen zu beschreiben, haben einige Autoren den

Begriff *Biologisierung* eingeführt. Einerseits versteht Kremoser darunter den Einsatz der Biotechnologie als Plattform, um eine Vielzahl von Innovationen in der Industrie voranzutreiben (Kremoser 2016). In diesem Sinne wird die Biologische Transformation als paralleler Prozess zur Digitalen Transformation betrachtet. Patermann definiert die Biologische Transformation breiter als systematische Anwendung von Wissen über die Natur unter Nutzung neuer Technologien, wie Informations-, Kommunikations- oder Nanotechnologien (Patermann 2014). Beispiele aus der chemischen und pharmazeutischen Industrie zeigen, dass eine groß angelegte Ergänzung und/oder der Ersatz traditioneller durch biobasierte Technologien bereits heute machbar ist (Kasal 2019) . Ein Beispiel ist die fermentative Isobutenproduktion, die es erlaubt, Isobuten, eines der Schlüsselmoleküle der chemischen Industrie, das derzeit kommerziell ausschließlich aus fossilen Quellen gewonnen wird, zukünftig biotechnologisch aus nachwachsenden Rohstoffen herzustellen. Isobuten ist eine wichtige Plattformchemikalie der chemischen Industrie und wird zur Herstellung von transparenten Polymeren, Butylkautschuk und vor allem Treibstoffzusätzen verwendet.

Obwohl die Verschmelzung der industriellen Fertigung mit biologischen Prozessen vor allem auf die Kreislaufwirtschaft und Bioökonomie abzielt, kann sie auch gleichzeitig zu signifikanten Verbesserungen im traditionellen Geschäftssinn führen, z. B. durch die Optimierung der Funktionalität eines Produkts während seiner Nutzungsphase oder durch adaptive industrielle Prozesse und Systeme. Dies erlaubt neue Geschäftsmodelle und den Zugang zu neuen Märkten. Die Biologische Transformation markiert also nicht nur den Übergang in eine nachhaltige Zukunft, sondern ist auch eine Chance für die Wirtschaft.

Abbildung 2-2: Innovative Lösungen durch Biointegration und Biointelligenz – Beispiele. Quelle Fraunhofer IGB/United Nations

Definition der Biologischen Transformation

Da der Fokus auf den Einsatz von Biotechnologie für den Prozess einer Biologischen Transformation zu eng erscheint, definieren wir den Begriff in Abhängigkeit von Patermann (Patermann 2014) als eine systematische Anwendung des Wissens über Natur und/oder natürliche Prozesse, die darauf abzielt, ein Fertigungssystem hinsichtlich seiner gesellschaftlichen und geschäftlichen Herausforderungen zu optimieren, indem wir eine Konvergenz von Bio- und Technosphäre anstreben (Wolperdinger und et al. 2018).

Als solches wird sie als Prozess hin zu einer nachhaltigen industriellen Wertschöpfung verstanden. Dabei unterscheiden wir zwischen drei Entwicklungsmodi der Konvergenz von Bio- und Technosphäre:

1. die ***Inspiration*** als Transfer von Naturphänomenen (Biomimikry, Biomimetik), die eine bioinspirierte Wertschöpfung ermöglichen,
2. die ***Integration*** technischer und biologischer Prozesse (d. h. Biotechnologie) in traditionelle Wertschöpfungsumgebungen, z. B. zum Schließen von Kreisläufen oder zur Herstellung neuartiger Produkte und
3. die ***Interaktion*** der Bio- und Technosphäre.

Während traditionelle Fertigungssysteme als genau definierte isolierte soziotechnische Einheiten betrachtet wurden, gibt es schon länger Lösungen für die Modi Inspiration und Integration. Die Interaktion ist jedoch ein völlig neuer Ansatz, der eine vollständige Verschmelzung von Bio- und Technosphäre mit einer engen Vernetzung von Bio- und Fertigungs- und Informationstechnologie anstrebt. Angetrieben von technischen Fortschritten bei der digitalen Vernetzung und in der Biotechnologie, ist es ihr Ziel, völlig neue, autarke (biointelligente) Wertschöpfungstechnologien und -strukturen zu schaffen, um eine autonome Ad-hoc-Anpassung der Systemarchitektur an die optimale Lösung einer Wertschöpfungsaufgabe zu ermöglichen. Abbildung 2-3 zeigt den Prozess und die Entwicklungsmodi der biologischen Transformation.

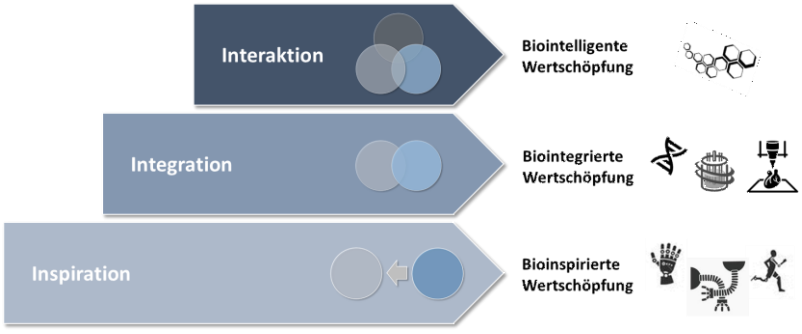


Abbildung 2-3: Prozess und Entwicklungsmodi der Biologischen Transformation
Quelle: Fraunhofer IPA, IGB nach Biotrain-Studie

Inspiration

Dieser Entwicklungsmodus ist definiert als Übertragen von Naturphänomenen in Form eines Analyseprozesses, einer Abstraktion und technischen Realisierung. Als solcher existiert er seit Jahren in der Biomimetik, obwohl es meist auf einzelne Aspekte der Herstellung reduziert wird.

Sein Ansatz basiert auf der Idee, Konzepte/Eigenschaften der Natur (z. B. Strömungsdynamik, Leichtbau, Biomechanik), den Evolutionsprozess (z. B. bioanaloge Optimierungstechniken) und Prinzipien der Natur (z. B. Modularität, Resilienz, Selbstorganisation, Selbstheilung) technisch zu duplizieren, um einen bestimmten Zweck zu erfüllen. Die Ergebnisse des Inspirationsmodus sind ausschließlich technische Lösungen. Es gibt zahlreiche Beispiele; Ta-belle 1 fasst eine Auswahl zusammen.

Tabelle 2-1: Beispiele für Technologien, die von natürlichen Prozessen inspiriert sind

Biologisches System	Technisches System
Ressourcenschonender Rindenaufbau	Additive Fertigung
Insektenpanzer	Exoskelett
Lotuseffekt	Funktionalisierung und Beschichtungen
Knochenstruktur	Leichtbau
Vogelschwarm	Schwarmintelligenz für das Management von Organisationen
Pflanzenfotosynthese	Künstliche Fotosynthese

Integration

Ein weiterer Entwicklungsmodus der biologischen Transformation ist die Integration technischer und biologischer Prozesse, eine Kombination von biologischer und traditioneller Produktionstechnologie. Das wurde ursprünglich von Kremoser (Kremoser 2016) und Patermann als *Biologisierung* bezeichnet (Patermann 2014). Daher sind die wichtigsten Enabler die weiße (industrielle), blaue (maritime), rote (pharmazeutische), graue (Umwelt-) und grüne (Pflanzen-) Biotechnologie. Beispiele für die systematische Nutzung von Synergiepotenzialen von Technik und Natur sind der Einsatz von Mikroorganismen zur Herstellung von pharmazeutischen Wirkstoffen, Vitaminen oder organischen Säuren, aber auch zur Rückgewinnung seltener Erden aus Magneten, die Funktionalisierung von Polymeren, die Gewinnung von Methan aus industriellem und kommunalen Abwasser und die Umsetzung natürlicher Filtermechanismen zum Schließen von Wertschöpfungszyklen.

Das Prinzip der Symbiose ist ein evolutionäres Schlüsselprinzip der Natur, das im Kontext einer nachhaltigen industriellen Wertschöpfung an Relevanz ge-

winnen dürfte. Abbildung 2-4 zeigt eine integrierte, bereits sehr weit entwickelte Anwendung in Form eines funktionellen Diagramms, das die Symbiose zwischen einer traditionellen Wertschöpfungsumgebung und einem Mikroalgen-Fotobioreaktor und der Nutzung regenerativ zugänglicher Ressourcen (Sonnenlicht) veranschaulicht.

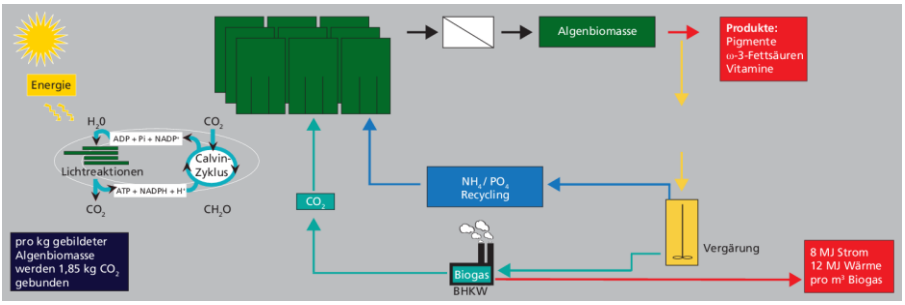


Abbildung 2-4: Integrierte Nutzung und Produktion biologischer Ressourcen am Beispiel der Wertschöpfung von Mikroalgen. Quelle: Fraunhofer IGB

Die im Fotobioreaktor wachsenden Algen nutzen Nährstoffe, CO_2 und Sonnenlicht für die Fotosynthese und Selbstreplikation. Das CO_2 kann aus Fabrikemissionen stammen und zusammen mit nährstoffreichen Abwässern von Biogasanlagen zum Algenwachstum beitragen. Die kultivierten Algen wiederum können in vielerlei Hinsicht für industrielle Wertschöpfungsprozesse verwendet werden. Mikroalgen produzieren eine Vielzahl chemischer Grundstoffe wie Vitamine, Fettsäuren oder Carotinoide mit einem hohen Wertschöpfungspotenzial für die Pharma-, Lebensmittel-, Futtermittel- und die Kosmetikindustrie. Ferner ist die Herstellung von biobasierten Kunststoffen aus Mikroalgeninhaltsstoffen möglich. Die nach der Extraktion der Wertstoffe verbleibende Biomasse kann zudem energetisch genutzt – zu Biogas umgewandelt und dieses in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen eingesetzt werden. Wichtige Inhaltsstoffe wie stickstoff- und phosphorhaltige Produkte können extrahiert und beispielsweise als Dünger verwendet werden.

Interaktion

Der dritte und disruptivste Ansatz für die zukünftige Produktionstechnik ist die vollständige Verschmelzung der Bio- und der Technosphäre in Form einer umfassenden Vernetzung von Bio- und Produktions- und Informationstechnologie. Sie wird als *Interaktion* bezeichnet. Das Ergebnis dieses Modus ist ein biointelligentes Produktionssystem, das gemäß den Eigenschaften von Lebewesen entwickelt ist. Nach Goertz und Bruemmer sind die Charakteristika des Lebens (Görtz 2012) zelluläre Organisation, Stoffwechsel, Homöostase, Komplexität, Stimulation und Kommunikation, Reproduktion, Vererbung und Entwicklung, Bewegung und Evolvierbarkeit. Entscheidend für die Realisierung eines biointelligenten Systems ist nicht das einzelne Merkmal, sondern die Summe der Eigenschaften. Der Übergang zu einem System stellt ein

bisher kaum umgesetztes, hochkomplexes Zusammenspiel von Informationen/Daten, Biotechnologie und konventioneller Produktionstechnik dar, mit dem Ziel einer autonomen und ad hoc angepassten Systemarchitektur für die optimale Lösung einer Wertschöpfungsaufgabe. Hier soll ein System nicht mehr als abgegrenzte Einheit, sondern als regionale Wertschöpfungszelle verstanden werden. Biointelligente Wertschöpfungszellen werden dezentralisiert, nutzen regionale Ressourcen in Symbiose mit ihrer umgebenden natürlichen Umgebung und pflegen eine Vielzahl von Austauschbeziehungen mit den umgebenden Systemen Abbildung 2-5 zeigt schematisch, wie durch biointelligente Systeme eine nachhaltige Bedürfnisbefriedigung erreicht werden kann.

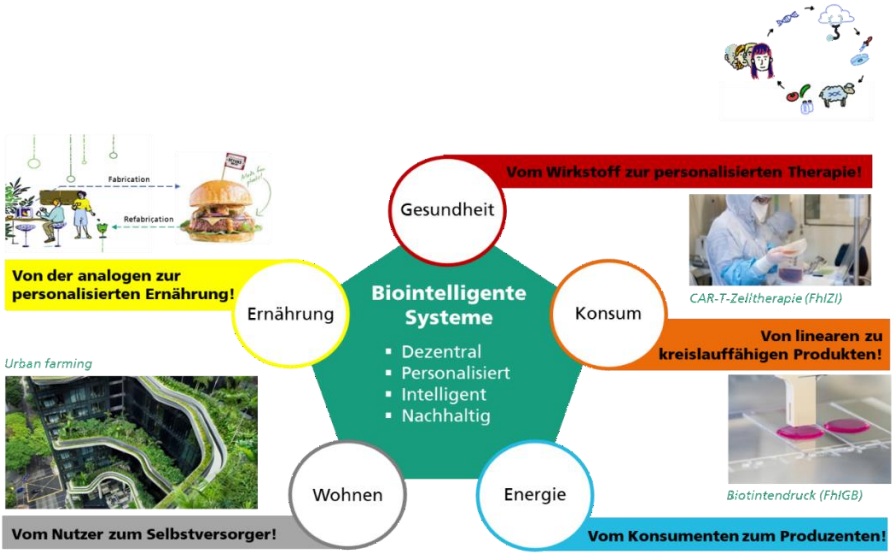


Abbildung 2-5: Nachhaltige Bedürfnisbefriedigung durch biointelligente Systeme. Quelle: Fraunhofer IPA

Handlungsfelder der Biologischen Transformation

Um die traditionelle Produktion in eine biointelligente Fertigung umzuwandeln, sind verschiedene Maßnahmen in Bezug auf Forschung, industrielle Investitionen, politische Initiativen und gesellschaftliches Engagement erforderlich. Basierend auf einer umfangreichen Literaturrecherche zu über 270 potenziellen technologischen Lösungen sowie einer Umfrage mit 123 Experten aus verschiedenen Bereichen (Fertigung, Information und Biotechnologie, Sozial- und Politikwissenschaft) haben wir zehn Handlungsfelder für die Industrie ermittelt. Abbildung 2-6 ordnet sie als intraorganisatorische (grün), interorganisatorische und soziale/politische (grau) Herausforderungen ein – gemäß dem kürzlich von Yang et al. (Yang 2018) im Bereich der biohybriden Robotik vorgestellten Rahmen.

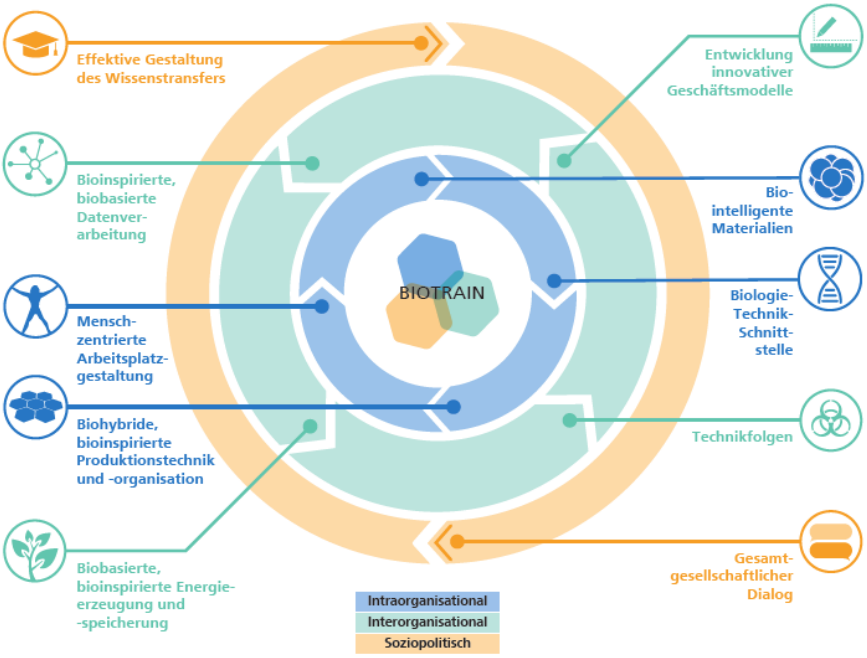


Abbildung 2-6: Handlungsfelder der Biologischen Transformation. Quelle: Fraunhofer IPA, IGB.

Die vier intraorganisatorischen Herausforderungen bestehen aus:

1. der Entwicklung und Herstellung biobasierter, funktioneller, biointelligenter Materialien,
2. der richtigen Konfiguration von Bio-Tech-Schnittstellen (Molekül-/Zell-/Organismus-Technologie-Verbindung), um die Kommunikation über geeignete Sensoren, Aktoren etc. zu realisieren,
3. einer biohybriden und bioinspirierten (d. h. biointelligenten) Fertigungstechnologie und -organisation (Robotik, Prozesse, Logistik etc.) und
4. der Anordnung von menschenzentrierten Arbeitsplätzen in einer biointelligenten Fertigungsumgebung (Biohybrid-Arbeitsplätze, Mensch-Maschine-Beziehung usw.).

Die vier interorganisatorischen Herausforderungen bestehen aus:

1. der Datenverarbeitung, um den Echtzeit-Datenaustausch zwischen technologischen und biologischen Systemen (mit Maschinen-/Tiefen-Schiefalgorithmen usw.) zu ermöglichen,
2. einer Dezentralisierung und Übertragung auf biobasierte/erneuerbare Energieerzeugung,
3. der Erweiterung der methodischen Grundlagen der technologietechnischen Folgenabschätzung sowie deren Standardisierung und

4. der Schaffung und finanziellen Unterstützung neuer Geschäftsmodelle in Form innovativer Ansätze und Zugang zu Risikokapital.

Die beiden drängendsten sozialen und politischen Herausforderungen einer biologischen Transformation der verarbeitenden Industrie sind:

1. einen verstärkten sozialen Dialog zu initiieren, um Chancen und Risiken dieser Entwicklung der breiten Öffentlichkeit zu erklären und die Beteiligung jedes Einzelnen am Prozess der Wertschöpfung (vom Konsumenten zum Prosumenten) und
2. einen effektiven Wissenstransfer zwischen Produktionstechnikern und Biotechnologen, Biologen, Betriebswirtschaftlern sowie Geistes- und Sozialwissenschaftlern zu ermöglichen.

Die oben skizzierten Herausforderungen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Fazit und Ausblick – ein neuer Innovationsraum entsteht

Eine nachhaltige Transformation der traditionellen industriellen Wertschöpfung ist sowohl für die Gesellschaft als auch für die einzelnen Volkswirtschaften von entscheidender Bedeutung. Während die ökonomischen Systemlösungen (z. B. Kreislaufwirtschaft oder Bioökonomie) und die Befähiger (z. B. Digitalisierung) weitgehend einheitlich definiert und teilweise schon etabliert sind, sind es die Prinzipien einer nachhaltigen Transformation nicht. Wir haben die Konvergenz der technischen mit den biologischen Prozessen – die Biologische Transformation – als einen zukünftigen Trend in Forschung und Industrie identifiziert. Sie hat das Potenzial, die Wertschöpfung drastisch zu verändern und Nachhaltigkeitsaspekte von Anfang an mitzudenken. Das neue Forschungsfeld umfasst die systematische Anwendung des Wissens über die Natur und natürliche Prozesse, um ein Produktionssystem im Hinblick auf seine gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen zu optimieren. Wir unterscheiden die drei Entwicklungsmodi Inspiration, Integration, Interaktion, die schließlich zur Vision einer Biointelligenten Wertschöpfung führen. Basierend auf der Kenntnis der Prozesse, die in Lebewesen ablaufen, werden zukünftige Fertigungssysteme unter anderem in Zellen selbst organisiert sein, einen ausgeprägten Stoffwechsel aufweisen, evolvierbar sein und in ständiger selbstgesteuerter Interaktion und Kommunikation mit ihrer lokalen Umgebung sowie über- und untergeordneten Systemen sein.

Da die Biointelligente Produktion ein neues Forschungsfeld ist, müssen Entscheidungsträger auf politischer, wirtschaftlicher und wissenschaftlicher Ebene mutig und schnell handeln, um die Nachhaltigkeitsherausforderung angemessen zu bewältigen, indem sie das volle Potenzial der Biologischen Transformation nutzen. Dann kann mit der Biologischen Transformation ein völlig neuer Innovationsraum entstehen.

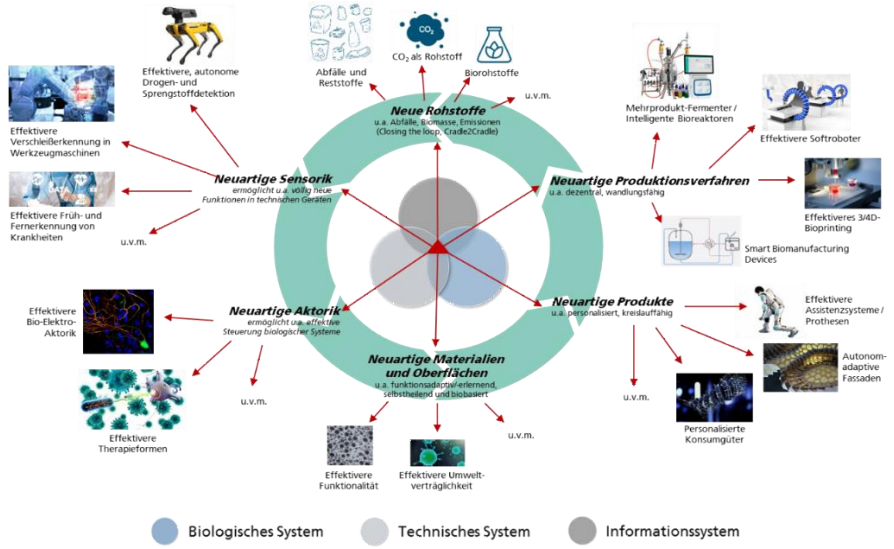


Abbildung 2-7: Ein neuer Innovationsraum entsteht. Quelle Fraunhofer IPA

Literaturverzeichnis

Acatech, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2017): Innovationspotenziale der Biotechnologie. Online verfügbar unter https://www.acatech.de/publikation/innovationspotenziale-der-biotechnologie/, zuletzt geprüft am 0.12.2019.

Bioökonomierat (2016): Eckpunktepapier des Bioökonomierates: „Auf dem Weg zur biobasierten Wirtschaft“. Politische und wissenschaftliche Schwerpunkte. Online verfügbar unter http://biooekonomierat.de/fileadmin/Publikationen/empfehlungen/BOER_Eckpunktepapier_2013.pdf, zuletzt geprüft am 03.12.2019.

Bioökonomierat (2019): Was ist Bioökonomie? Online verfügbar unter http://biooekonomierat.de/biooekonomie.html, zuletzt geprüft am 05.12.2019.

Braungart, M.; McDonough, W. (2002): Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things. New York: North Point Press.

Ellen MacArthur Foundation (2013): Circular Economy - Towards the Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. Online verfügbar unter https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf, zuletzt geprüft am 02.12.2019.

Europäische Kommission (2013): Umwelt: Neues Maßnahmenpaket für saubere Luft in Europa. Brüssel. Online verfügbar unter http://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-1274_de.htm., zuletzt geprüft am 03.12.2019.

Fischer-Kowalski, M.; Weizsäcker, E. von; Ren, Y.; Moriguchi, Y.; Crane, W.; Krausmann, F.; et al. (2011): Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth. Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel. Paris.

Görtz, H-D.; Brümmer, F.; Siemann-Herzberg, M. (2012): Biologie für Ingenieure. Berlin: Springer Spektrum. Online verfügbar unter http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=993922.

Hauff, M. von (2017): Zu Risiken und Nebenwirkungen. forum Nachhaltig Wirtschaften. Online verfügbar unter https://www.forum-csr.net/News/12903/Zu-Risiken-und-Nebenwirkungen-...html, zuletzt geprüft am 03.08.2020.

Isermeyer, F. (2014): „Bioökonomie“: Alter Wein in neuen Schläuchen? Thünen-Institut. Braunschweig. Online verfügbar unter https://www.thuenen.de/media/ti-themenfelder/Nachwachsende_Rohstoffe/Biooekono-mie/Interview_Biooekonomie.pdf, zuletzt geprüft am 05.12.2019.

Kasal, B.; Leschinsky, M.; Oehr, C.; Unkelbach, G.; Wolperdinger, M. (2019): Das Wertstoff-Prinzip: Nutzung und intelligente: Verwertungswege von Holz-werkstoffen, Naturfasern und organischen Reststoffen. In: Reimund Neuge-bauer (Hg.): Biologische Transformation (Fraunhofer-Forschungsfokus), S. 265–315.

Kremoser, C. (2016): Round-Table-Diskussion „Wir schaffen Zukunft“. In: Ernst & Young GmbH (Hg.): Momentum nutzen -- Politische Signale setzen für Eigenkapital und Innovation - Deutscher Biotechnologie-Report 2015.

Lyle, J.T (1996): Regenerative Design for Sustainable Development. New York: Wiley.

Miehe, R.; Bogdanov, I.; Schneider, R.; et al. (2016): The Eco Lean method - A combined approach for low cost economic and ecologic optimization in the manufacturing industry. In: *Procedia CIRP* 57, S. 613–618.

Patermann, C. (2014): Innovation, Wachstum, Bioökonomie -- Europa wird sich sputen müssen, um in der Umsetzung der Bioökonomie im industriellen Maßstab mitzuhalten. Online verfügbar unter https://www.ibbnetzwerk-gmbh.com/uploads/media/05_Gastbeitrag_Patermann_Druck_A3_v2.pdf, zuletzt geprüft am 05.12.2019.

Potočnik, J. (2005): Transforming life sciences knowledge into new, sustainable, eco-efficient and competitive products. Hg. v. European Commission

Press Release. Brüssel. Online verfügbar unter http://europa.eu/rapid/press-release_SPEECH-05-513_en.htm, zuletzt geprüft am 02.12.2019.

Sustainable Europe Research Institute (SERI) (2014): Global material extraction by material category 1980-2013. Hg. v. Vienna University of Economics and Business (WU Vienna). Online verfügbar unter http://www.materialflows.net/materialflowsnet/trends/analyses-1980-2013/ global-material-extraction-by-material-category-1980-2013/, zuletzt geprüft am 23.07.2017.

van Alstyne, M.; Parker, G.; Choudary, S. (2016): Pipelines, Platforms, and the New Rules of Strategy. In: *Harvard Business Review* (4). Online verfügbar unter https://hbr.org/2016/04/pipelines-platforms-and-the-new-rules-of-strategy, zuletzt geprüft am 03.12.2019.

Verband der Chemischen Industrie e.V (2017): Daten und Fakten - Bioökonomie. Frankfurt. Online verfügbar unter https://www.vci.de/vci/downloads-vci/top-thema/daten-fakten-biooekonomie-de.pdf, zuletzt geprüft am 05.09.2017.

Wolperdinger, M.; et al. (2018): The great convergence: digitalisation, biologicalisation and the future of manufacturing. Proceedings of the Global Bioeconomy Summit. Berlin, 19.04.2018.

WWF – World Wide Fund for Nature. (Hg.) (2014): Species and spaces, people and places. Living Planet Report. Gland, Switzerland.

Yang, G.-Z.; Bellingham, J.; Dupont, P. E.; et al (2018): The grand challenges of science robotics. In: *Science Robotics* (3), S. 1–14.

3 Vorbilder aus der Natur – worin besteht der Mehrwert?

Oliver Schwarz,
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Wie unerschöpflich ist die Natur?

Die Natur als unerschöpfliche Fülle des Lebens, der Formen, Farben und Organismen – so erscheint sie einem Taucher inmitten eines bunten Korallenriffs, einem Musterexemplar der Biodiversität auf unserem Planeten. An anderen Orten ist allerdings wesentlich weniger zu entdecken – wenigstens im Makroskopischen. Die Fülle ist endlich, ist zählbar, wissenschaftlich bestimmbar, jede Art ist eine einmalige Komposition von Sinnesleistungen, Kinematik, Aktorik, ausgestattet mit spezifischen Effektoren zur Nahrungsaufnahme und innerartlicher Kommunikation.

Während Sie diesen Artikel lesen, stirbt vermutlich gerade eine Spezies aus und das meist sogar bevor wir sie überhaupt kennengelernt haben. Nach einem Bericht der Vereinten Nationen zur Artenvielfalt sterben täglich bis zu 130 Tier- und Pflanzenarten aus. Sie müssen demnach den Artikel in elf Minuten durchgelesen haben (lesen Sie also schnell), sonst sind es entsprechend noch mehr Verluste. Mit jeder Art geht auch ein Vorbild verloren, aus dem wir etwas lernen könnten.

Die Wissenschaft geht davon aus, dass 99 % aller Arten oder 1 bis 1,6 Mrd., welche die Natur hervorgebracht hatte, ausgestorben sind. Nur ca. 130.000 davon wurden bisher als Fossile von Paläontologen beschrieben und mit einem Namen versehen. Seit dem Kambrium, als das Leben vor 540 Mio. Jahren begann, sich rasant in Form von Arten zu manifestieren, starben die Arten nicht gleichmäßig aus, sondern in fünf großen Wellen. Sie resultierten aus drastischen Veränderungen der Umweltbedingungen. Gerade hat übrigens die sechste Aussterbewelle mit dem Namen Anthropozän begonnen. Sie ist nicht so schlagartig folgenreich wie ein gigantischer Meteoriteneinschlag vor 65 Mio. Jahren, mit dem das Zeitalter der Dinosaurier endete. In geologischen Zeiträumen betrachtet sind die drastischen Veränderungen der letzten 100 Jahre und der nächsten 50 Jahre trotzdem ein Wimpernschlag. Der Bericht der Vereinten Nationen (UN) zum Stand der Artenvielfalt im Mai 2019 kommt zu einem desaströsen Ergebnis: Zwischen 500.000 und 1.000.000 Tier- und Pflanzenarten sind vom Aussterben bedroht. Die Aussterberate liegt infolge des menschlichen Einflusses um Faktor 10 bis 100 über dem »Grundrauschen« des Artensterbens der letzten 10 Mio. Jahre. Und wenn der 2 °C-Anstieg der Jahresmitteltemperatur eintrifft, werden 99 % der Korallenriffe mit großer Wahrscheinlichkeit absterben. Ähnliche »Point of no Return«-Marken werden in jedem Ökosystem etwas anders liegen. Allen gemeinsam ist, dass

sie zum Kollaps der jeweiligen Ökosysteme und zum Verschwinden von deren Bewohnern führen.

Derzeit sind 1 bis 1,25 Mio. Tier- und 500.000 Pflanzenarten wissenschaftlich beschrieben, d. h. bekannt. Man geht von 8,7 ± 1,3 Mio. überhaupt existierenden Tier- und Pflanzenarten aus, wovon etwa ein Viertel im Meer lebt (Camilo 2011). In dem Zensus, einer Art Volkszählung unter Wasser, welche 2.000 Forscher aus 82 Nationen über einen Zeitraum von 10 Jahren durchgeführt haben, wurden 20.000 neue Arten beschrieben.

Aber ist das Arteninventar wirklich so groß, dass man mit sich dem täglichen Verlust von 130 Arten abfinden kann? Gerade mal ca. 5.513 Säugetierarten kennt man – jedes Vorschulkind kann aus dem Bilderbücherwissen also immerhin 1 % davon benennen. Außerdem kennt man >7.302 Amphibien, ca. 10.425 Reptilien, ca. 10.064 Vögel, >32.900 Fische, >47.000 Krebstiere, >85.000 Weichtiere, >102.248 Spinnentiere und 71.000 sonstige niedere Tiere. Die mit Abstand größte Gruppe sind die Insekten mit über 1 Mio. Arten! (IUCN Rote Liste 2012.1) Bei diesen sowie bei Einzellern und Viren (die ja nicht zu den Lebewesen zählen) ist die Diskrepanz bei den Schätzungen der rezenten Arten am größten. Im Vergleich sind es >330.000 Pflanzen und ca. 140.000 Pilze. (BfN 2020)

Wie gering der Umfang dieses Arteninventars der Erde eigentlich ist, wird klar, wenn man ihm die Artefakte gegenüberstellt, die der Mensch in vergleichsweise kurzen Zeiträumen hervorgebracht hat: In der British Library sind 170. Mio. Medien vorhanden, bei Amazon wurden im April 2019 120 Mio. Artikel[1] angeboten, bei Alibaba sind mehr als 15 Mio. Produkte »ready-to-ship poducts« und allein im Jahr 2018 wurden weltweit 3.3 Mio. Patente eingereicht. (Alibaba Group 17.082020; ScrapeHero 2019; Schönauer)

Das, was wir an Vorbildern in der Natur haben, lohnt sich aber genauer anzuschauen – insbesondere im Hinblick auf deren Überlebensstrategien und ihre Fähigkeiten, mit ihrer Um- und Mitwelt zu interagieren. Die Funktionsmorphologie, Verhaltensbiologie, Sinnesphysiologie und viele andere Spezialgebiete der Biologie ermöglichen die wissenschaftliche Analyse. Die Bionik versucht, die Erkenntnisse in die Technik zu transferieren und die Evolutions- und Organisationsbiomimetik überträgt die Erkenntnisse auf die Wirtschaft.

Was uns biologische Vorbilder sagen können

Wenn wir krank sind, gehen wir zum Arzt, weil er der Profi ist für unser Problem. Wenn ich ein besonderes Problem habe, gehe ich in die Klinik, weil dort viele Spezialisten zusammenarbeiten, die mir helfen können. Die Natur ist in übertragenem Sinn die Auslese von Spezialisten und die Auslese vieler Millionen Jahre erprobter Erfolgsmodelle (= Profis). Deren Optimierung erfolgte im Rahmen der biologischen Evolution, basierend auf gegebenen anatomischen Grundmodellen. Jede Spezies ist hierbei Spezialist für x abiotische und biotische Rand- bzw. Umweltbedingungen, Anforderungen und Krankheiten.

Oder, um es mit Leonardo da Vinci zu sagen: »Der menschliche Schöpfergeist kann verschiedene Erfindungen machen […], doch nie wird ihm eine gelingen, die schöner, ökonomischer und geradliniger wäre als die der Natur, denn in ihren Erfindungen fehlt nichts, und nichts ist zu viel«. Dahinter steckt die Annahme, dass die vorgefundenen Vorbilder optimal sind. (Codex 1519)

Drei Gründe, um in der Natur nach Vorbildern für die Beantwortung drängender Fragen unserer Zeit zu suchen sind:

1. Wir kennen nichts anderes System als das, Ökosystem Erde, das so lange überlebt hat. Fast jede Art, oder wie der Techniker sagen würde, jedes »Modell« hat Millionen Jahre Entwicklung hinter sich. Nicht nur die Entwicklung der eigenen Art, sondern auch die der Gattung, Ordnung oder die Stammesentwicklung (Phylogenie) muss dazu gezählt werden. So durchläuft beispielsweise auch der Mensch während der embryonalen Entwicklung die Merkmale der Stammesentwicklung, in der sog. »Rekapitulation«.
   → Zu verstehen und zu lernen, warum das Ökosystem Erde resistent, resilient und adaptibel ist, und wie es sich nach globalen Katastrophen »neu erfunden« hat, hat ein hohes Potenzial[1] für die Entwicklung von Technik.
2. Wie gerade die embryonale Entwicklung des Menschen zeigt, ist der Mensch Teil der Natur und deren Geschichte und Gesetzmäßigkeiten. Es ist wahrscheinlich, dass sein Handeln und Denken auf den Möglichkeiten der Säugetier-Gehirnstrukturen beruht und er damit Lösungswege entwickelt, die im Ideenraum der Natur bereits existent sind.
   → Es besteht ein hohes Potenzial, in der Natur Lösungen für ähnliche Probleme zu finden, die in den vom Menschen erdachten und gemachten Kontexten auftreten. Der Lösungsweg, den die Natur gegangen ist, kann dabei überraschend anders als unsere Denkwege sein. Hier hilft die Natur als Ideenbörse, die oft zu Sprunginnovationen führt.
3. Evolution heißt Entwicklung hin zu einer optimalen Anpassung an die gegebenen abiotischen Umweltbedingungen und an die biotische Mitwelt auf Basis der ererbten Ressourcen, die die eigene Stammesgeschichte (»evolutive Last«) mit sich bringt. Man spricht dabei allgemein von Randbedingungen. Biologische Selektion bewirkt, dass die Angepasstheit verbessert wird.
4. Die Optimierung kann als Aufwandsminimierung beschrieben werden. Der Energieaufwand, der auch den Materialaufwand einschließt, ist im Verhältnis zum Nutzen einer Funktion einer der wichtigsten Selektionsfaktoren der Evolution. Die Aufwandsminimierung ist eigentlich ein physikalisches Prinzip: »Alles erfolgt mit dem geringsten vertretbaren Energieaufwand« (Hamiltonsches oder d´Alembertsches Prinzip). Alle

[1] I. S. v. »potentialis« (lat.) = Möglichkeit.

physikalischen Gesetze gelten auch in der Biologie, sind aber nicht das alleinig bestimmende Prinzip in der Optimierung. (Kull 1995)

→ Dem Biologen ist klar, dass ein Optimum (i. S. einer nicht mehr zu verbessernden Ausprägung) in einem Organismus so gut wie nie anzutreffen ist. Dazu müsste zum einen eine Konstanz der Umwelt- und Randbedingungen[2] über große Zeiträume bestehen, zum anderen muss die betrachtete Art genug Zeit gehabt haben, sich daran anzupassen.[3] Und selbst dann wäre es unwahrscheinlich, dass die betrachtete Funktion eines Bauplans eines Organismus als globales Optimum ausgebildet würde. Denn jeder Organismus stellt einen Kompromiss aller Fähigkeiten dar, der seine Überlebensfähigkeit (Fitness) sichert. [4] So wundert es auch nicht, dass die abstrahierte bionische Übertragung in technische Artefakte sehr häufig effizienter gestaltet werden kann als es die zugrundeliegenden biologischen Vorbilder sind. Denn in der Abstraktion kann nur auf eine oder sehr wenige technisch relevante Zielfunktionen hin optimiert werden. Das Potenzial ist hoch, in der Biologie Vorbilder zu finden, die ein Stück des Weges der Optimierung von Mechanismen, Strukturen, Baupläne, Materialien etc. zur spezifischen Funktionserfüllung unter den gegebenen Randbedingungen gegangen sind. Sie können vom Menschen nach Abstraktion weiter verbessert werden.

Der Mehrwert von Vorbildern aus der Natur in Zahlen

Letzten Endes überzeugen die Ingenieure die Betriebswirte in der Industrie nicht durch schöne Worte und Hypothesen einen biologisch inspirierten Weg zu finanzieren. Die Industrie versteht den »Mehrwert« nur rein zahlenbasiert. Eine solche Betrachtung soll an einigen Beispielen der bionischen Umsetzung erfolgen.

---

[2] Die schnellste Umweltveränderung, die nicht durch kosmische Ereignisse oder den Menschen bewirkt wird, erfolgt übrigens über Krankheitserreger, die ein hohes Veränderungsvermögen besitzen. Um gegen diesen permanenten Selektionsdruck immer Individuen vorzuhalten, die optimale Abwehrstrategien zur Verfügung haben, hat sich bei der Entwicklung mehrzelliger Organismen die Ausbildung von zweierlei Geschlechtern mit der Möglichkeit der permanenten Neukombination der Gene entwickelt, insbesondere um das Immunsystem immer wieder neu zu kodieren. Schon wegen dieser permanenten Veränderung bei den Einzellern ist eine Konstanz der biotischen Umwelt unmöglich.

[3] Ein Lebewesen, das nicht schnell genug auf Veränderungen reagieren kann, muss entweder dorthin ausweichen, wo die biotische und abiotische Umwelt für seine Ausstattung optimale konstante Bedingungen bereithält, oder es wird nicht ausreichend Nachkommen produzieren, um den Fortbestand seiner Gene und die seiner Art zu sichern. Selektion wirkt immer auf der Individuenebene.

[4] Beispiel Leopard: Um eine Beute erfolgreich zu erjagen, genügt es nicht, nur die Laufgeschwindigkeit bzw. den Bewegungsapparat zu maximieren. Das Gebiss muss ebenso an die Beutegröße und Beschaffenheit angepasst sein, um erfolgreich das Beutetier zu schlagen. Wenn er aber 100 % der Beute erlegen würde, dann würde die Anzahl der Beutetiere maximal abnehmen, was das Aussterben des Leoparden zur Folge hätte. In der »Unperfektheit« liegt ein Schlüssel zum Überleben der Spezies.

Optimieren nach dem Vorbild der Evolution

Ingo Rechenberg von der TU Berlin versuchte, den Prozess der Evolution mit Algorithmen abzubilden. Die Evolution ist ein Spiel aus zufälligen Veränderungen von Merkmalen, die sich phänotypisch ausprägen und damit einer Selektion unterliegen. Die Veränderungen passieren zum einen systematisch bei jeder sexuellen Vermehrung, wenn die Gene von Vater und Mutter sich neu kombinieren. Zum anderen finden sehr seltene Ereignisse, nämlich Mutationen, statt. Sie führen in den meisten Fällen zum Tod, in wenigen Fällen zu etwas Neuem oder Besserem. In beiden Fällen unterliegen die Individuen dann einer Selektion, bei der die am besten Angepassten, statistisch gesehen, die meisten Nachkommen haben werden.

Rechenberg hat diese Prozesse mathematisiert: »Nachkommen« sind »Modelle«, die in einem einstellbaren Korridor mit dem Zufall variiert werden. Die Selektionskriterien sind definierte Zielparameter, die die Modelle erfüllen sollen. Ausgehend von einem Startmodell wird dann zufallsgesteuert in einer erlaubten Variationsbreite variiert. Die »Nachkommen« bilden die nächste Modellreihe. Aus ihr wird nach Algorithmus dann das beste Modell oder werden die besten Modelle ausgewählt. Diejenigen, die von den gegebenen Zielparametern am meisten abweichen, werden verworfen. Die Selektierten werden wieder variiert und bilden die nachfolgende Modellgeneration.

Die Überprüfung dieser formalisierten Evolution nahm Rechenberg 1965 an einer durch Gelenke segmentierten Platte vor und konnte an diesem Schlüsselexperiment die Hypothese über den Prozess der Evolution bestätigen (Spiegel 1964). Diese sechs Gelenkplatten waren zueinander in jeweils fünf verschiedenen Gradeinstellungen zu jeder Seite neigbar. Die jeweilige Einstellung wurde durch einen Zufallsgenerator (Galtonsches Nagelbrett) ermittelt. Das Ergebnis bzw. das Gelenkplattenmodell wurde im Windkanal auf seinen Zielparameter hin überprüft. Ausgehend von einem beliebigen »Zickzack«-Ausgangsmodell wurde dieses variiert (Nachkomme) und dann im Windkanal auf den erzeugten Windwiderstand überprüft und mit dem Ausgangsmodell (Elter) verglichen. Das Modell mit dem geringeren Widerstand (Elter oder Nachkomme) wurde dann weiter variiert.

Für ein systematisches Durchspielen aller Gelenkplattenstellungen wären 515 oder 345.025.251 Versuche notwendig gewesen. Der Evolutions-Algorithmus benötigte hingegen nur ca. 300 Nachkommen bzw. Versuche, um auf die finale Lösung mit geringstem Luftwiderstand zu kommen – die ja jeder aus Erfahrung kennt: ein flaches Brett.

Mit Evolutions-Algorithmen überprüfte Rechenberg technische Lösungen auf deren Optimierungsfähigkeit bzw. optimierte sie: z. B. das strömungsoptimierte gekrümmte Rohr. Ausgehend von einem idealen Halbkreis und im anderen Fall von einem Viertelkreis, die aus zueinander verschiebbaren Segmenten bestanden, variierte er die relativen Stellungen der Segmente zuei-

nander – wieder zufallsgesteuert und mit einer bestimmten erlaubten Variationsbreite. Das Ergebnis verblüffte: Ausgebeulte Rohrführungen bieten einen um 10 % geringeren Reibungswiderstand als die Ausgangszustände.

Jedenfalls sind Rohrleitungen mit geometrischen Linienführung allgegenwärtig – denken Sie nur an Ihre Heizung. Angenommen, der Strömungswiderstand einer Heizungsanlage würde damit um 10 % gesenkt werden, damit könnte auch die Leistung der Umwälzpumpe um diesen Betrag reduziert werden, dann wäre das wieder ein vergleichsweise großer Schritt i. R. Energieeinsparung bei bereits energietechnisch optimierten Systemen.

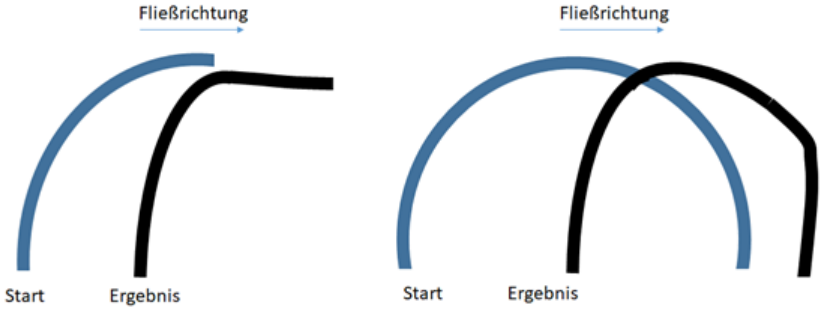


Abbildung 3-1: Optimaler 90°- und 180°-Strömungskrümmer mit 10 % verminderten Strömungsverlusten (schwarze Linie) gegenüber der Kreisform, von der die Optimierung mit Evolutionsalgorithmen gestartet ist. (in Anlehnung an Ingo Rechenberg)

Produktionssteigerung durch das Vorbild der Blattadern

Blattadern sind die Logistikwege, über die Wasser und Zucker transportiert werden. Eine gleichmäßige Verteilung über die Blattfläche muss gewährleistet werden. Ein ursprüngliches und einfaches Verzweigungsmuster mit dichotomer Verzweigung weisen Farne und der Ginkgo auf.

Michael Hermann vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE hat die Verteilung analysiert und einen einfachen Algorithmus entwickelt, anhand dem man mit Geodreieck und Bleistift eine Hydraulikstruktur auf einer beliebigen Flächengeometrie optimal verteilen kann. Konkrete Anwendung sind Solarabsorber, die so die Energie optimal abtransportieren können. Im Unterschied zu den heute üblichen Mäander- oder Harfenabsorber, die in rechteckigen Modulen erhältlich sind, können nun beliebige Flächengeometrien ausgefüllt werden. Diese sogenannten Fractherm®-Kanalstrukturen wurden dann auch auf die 3. Dimension angewandt, nämlich auf die Kühlkanäle von Spritzgusswerkzeugen.

Beim Spritzguss wird heißer, verflüssigter Kunststoff in eine Form, das Werkzeug, mit hohem Druck gefüllt. Der Abkühlvorgang sollte einerseits so schnell wie möglich erfolgen, denn davon hängt der Output der Maschine pro Zeiteinheit ab. Andererseits soll das Abkühlen gleichmäßig schnell über den ganzen

Körper hinweg geschehen, weil sonst Spannungen induziert werden, die die Haltbarkeit reduzieren. Beiden Bedingungen erfüllt Fractherm®.

Mit dem Standard-Kühlsystem dauerte es 88 Sekunden, bis der Kunststoff auf 40 °C abgekühlt war und entformt werden konnte. Mit den Fractherm®-Kanalstrukturen dauerte es hingegen nur 39 Sekunden. Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt konnte durch die Übertragung des Blattaderprinzips also um mehr als die Hälfte reduziert, der Output pro Zeiteinheit mehr als verdoppelt werden!

Die Zugdreiecksmethode zur Reduzierung von Kerbspannungen

Claus Mattheck vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) analysierte die Wachstumsprinzipien von Bäumen und entdeckte dabei u. a. das »Axiom der konstanten Spannung«. Es besagt, dass Bäume entsprechend den mechanischen Belastungen durch Wind und Eigengewicht der Äste das Material dort produzieren und anlagern, wo die Kräfte-Trajektorien am größten sind und diese Kräfte damit kompensieren. Als Optimalzustand liegen dann spannungsfreie Holzstrukturen vor, in denen eine Rissbildung minimiert wird und damit ein Materialversagen drastisch reduziert wird (Abbildung 3-2). In Finiten Elemente Analysen (FEM können die Van-Mieses-Spannungen in Werkstücken oder auch durch polarisiertes Licht in Plexiglas bei Anliegen von Belastungszuständen visualisiert werden (Abbildung 3-3).

Mattheck entwickelte einen einfachen Algorithmus, die sogenannte Zugdreiecksmethode, mit der man die Form von Astgabeln auf technische Konstruktionen mit Geodreieck, Bleistift und Zirkel ermitteln kann.

Alarmierend war bisher das häufige Versagen von Knochenschrauben, sogenannten Pedikelschrauben, die in Wirbelkörper der Wirbelsäule eingeschraubt werden, um daran Metallstäbe zu fixieren. Sie dienen der temporären Ruhigstellung von Segmenten der Wirbelsäule. Das Versagen äußert sich sehr unangenehm durch Abbrechen der Schrauben, wobei die Spitze im Wirbelkörper verbleibt.

Bisher wurden Kreisradien zur Konstruktion der Schraubenwindungen verwendet, ebenso wie prinzipiell an allen 90°-Winkeln, die Konstrukteure mit Viertelkreisen abrunden. Mattheck übertrug die Erkenntnisse aus der Baumtopologie auf die Schraubenwindungstopologie und erhöhte damit die Stabilität um das 20-fache. Während die konventionell konstruierten medizinischen Schrauben nach 220.000 Lastwechseln Risse aufwiesen, traten sie bei der bionisch optimierten erst nach 5 Mio. Lastwechseln auf. Nicht durch mehr Materialverwendung, sondern allein durch die intelligente Materialanordnung konnte dieser Qualitätssprung erreicht werden.

Dieser bionische Konstruktionsalgorithmus hat neue Maßstäbe in der Medizintechnik gesetzt und ist für den konstruktiven Leichtbau unverzichtbar.

Abbildung 3-2: Typische spannungsoptimierte Baumgabelgeometrie

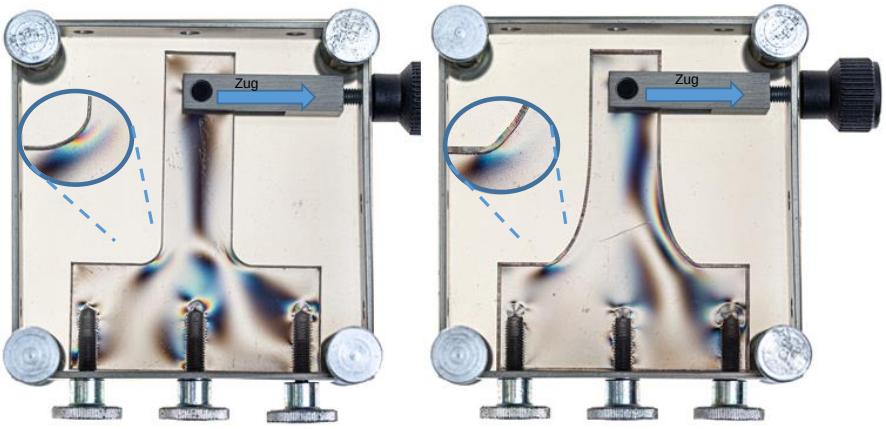


Abbildung 3-3: Darstellung der Spannungen in einer Plexiglasnase bei Ausübung von Zugkräften, links: mit Viertelkreiskontur an der Basis; rechts: mit Astgabelkontur. An den Verankerungsschrauben treten auch starke Spannungen auf. Rote Farbe: besonders hohe Spannung, diese tritt nur links beim Viertelkreis auf.

Haftsysteme der Natur – fest kleben auch ohne Klebstoff

Stanislav Gorb von der Universität Kiel hat Hunderte von tierischen Füßen untersucht – die meisten davon waren Insektenfüße. Mit hochempfindlichen Messgeräten können die winzigen Adhäsionskräfte gemessen werden; mikroskopische Untersuchungen, insbesondere Rasterelektronenmikroskopie, helfen die strukturbedingten Mechanismen zu entschlüsseln. Bei den rein physikalisch auf molekularer Ebene wirkenden Van-der Waals-Kräften kommt es zur direkten Interaktion von Untergrund und Haftstrukturen. Der Kontakt ist umso intensiver, je feiner und zahlenmäßig größer die Haarverästelungen sind. Da die Natur nur so viel Haftkraft ausbildet, wie der jeweilige Organismus braucht, um sich an senkrechten Wänden oder waagerecht kopfunter fortbewegen zu können, nimmt es nicht wunder, dass die Dichte der terminalen Enden von Haftstrukturen proportional zum Körpergewicht ist. Im Diagramm, in dem der Logarithmus der Masse gegen den Logarithmus der Dichte aufgetragen wird, liegen die Tiere auf einer Geraden. Die massereichsten Tiergruppen, die Van-der-Waals-Kräfte nutzen, haben folglich die dichtesten terminalen Enden. Das sind die Geckos, gefolgt von Spinnen und am Ende Insekten.

Dies ist ein eingängiges Beispiel für das »Augenmaß«, mit dem optimiert wird, ganz im Sinne von Leonardo da Vinci (s. Sentenz oben). Bei den Organismen wird eine Fähigkeit, hier die Haftkraft, nicht über das Notwendige hinaus maximiert. Das wäre schon deshalb nachteilig, weil das Ablösen ja auch bewerkstelligt werden muss und der Kraftaufwand bedeutet Energieverbrauch. Der Gecko hat für das Ablösen einen ganz eigenen biomechanischen Trick entwickelt, indem er nämlich die Zehen bzw. Finger von den Endgliedern her nach oben aufrollt.

Ali Dhinojwala von der University of Akron entwickelte nach dem Vorbild der Geckofüße eine künstliche Haftklebefolie. Unter Nutzung von Selbstorganisationsprozessen auf molekularer Ebene konnten Carbo-Nanotubes in größerer Dichte als die terminalen Enden eines Gecko-Hafthaars erzeugt werden. Ein Hafttest an einer glatten Scheibe zeigt den Unterschied in der Effizienz. Dem Gecko wurden Gewichte an den Bauch gehängt; dieselben Gewichte wurden an die Folie mit gleicher Kontaktfläche wie die Fußflächen sukzessive angebracht.

Der Gecko fing erst bei einem zusätzlichen Gewicht von 50 g, das entspricht dem Vierzehnfachen seines Körpergewichts, an, an der glatten Glasscheibe zu rutschen (Hinweis: Dieses Experiment war keine systematische Erhebung, sondern ein Einzelversuch) (Weird Connections 2009). Den synthetischen Geckofüßen konnte 26-mal mehr Gewicht zugeladen werden als dem Gecko, nämlich 1.300 g, bevor ein Abrutschen erfolgte! Dies zeigt zum einen, dass ein biologisches Optimum immer im Gesamtkontext des Überlebens des Organismus gesehen werden muss, zum anderen, dass die technische Übertragung sich auf eine Zielfunktion – hier das Haften – konzentrieren kann und andere

für das Tier wichtige Randbedingungen ignorieren kann. Das biologische Original kann damit an Effektivität deutlich übertroffen werden. Die Grundidee dafür wurde aber am funktionierenden Vorbild gewonnen.

Schmetterlinge revolutionieren die Solarenergie-Gewinnung

Die Effizienzsteigerung verschiedener Solarzelltypen während der vergangenen 40 Jahre ist ein schönes Beispiel für inkrementelle Verbesserung (< 0,5 % Verbesserung pro Jahr). Sie wurde meist durch Erhöhung der Reinheit der Ausgangsmaterialien erreicht; die größte Verbesserung gelang durch Kombinatorik von verschiedenen Materialien in übereinanderliegenden Schichten. Bei letzteren, den sogenannten Tandem-Solarzellen, weist jede Schicht eine optimale Bandlücke für einen spezifischen Spektralbereich auf; in der Summe kann dann aus einem größeres Frequenzband Strom gewonnen werden.

Motten sind Nachtschmetterlinge, die mit dem Restlicht des Mondes und der Sterne auskommen müssen, um optisch navigieren zu können. Der Sehsinn wurde hier auf quantitative Ausnutzung der vorhandenen Helligkeit optimiert. Eine geniale Entwicklung war dabei die Entspiegelung der Facettenaugen. Diese hat mit der heute praktizierten Entspiegelung von technischen Artefakten wie Brillen, Handyoberflächen oder Bildschirmen aber nichts gemein, sondern folgt einem völlig anderen Prinzip.

Die technische Übertragung gelang nanotechnologisch. Der Vergleich von Optiken mit und ohne Nanostrukturierung zeigte, dass ohne Nanostrukturierung die Lichtreflexion über das gesamte Spektrum des sichtbaren Lichts zwischen 5 und 6 % betrug. Mit Mottenaugeneffekt hingegen lag die Restreflexion unter 0,5 %.

Wenn man von der vereinfachten Annahme ausgeht, dass 5 % weniger Reflexion 5 % mehr Sonnenenergie und damit 5 % mehr Strom bedeutet, dann würde diese eine Invention die Solarzellenentwicklung auf einen Sprung um 10 Jahre voranbringen.

Eine noch größere Verbesserung ist einem tropischen Schmetterling, Pachliopta aristolochiae, besser bekannt als »Common Rose Butterfly«, zu verdanken. Alle Flügel haben eine schwarze Grundfarbe mit knallroten Mustern auf dem Körper. Das Verbreitungsgebiet ist das tropische Asien. Die schwarzen Flügel sind wie bei ziemlich allen Falterarten mit Schuppen besetzt. Nur sind diese bei dieser Art mikro- und nanostrukturiert, was sich als unregelmäßiges Lochmuster mit Löchern in der Größenordnung von 300 nm ausdrückt. Dies hat den verblüffenden Effekt, dass sie nahezu im gesamten Spektralbereich absorbieren und das auch noch aus allen Einfallswinkeln. Also auch hier wie bei der Motte: Vermeidung von Reflexion, nur mechanistisch anders realisiert.

Radwanul Hasan Siddique vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) stellte im Rahmen seiner Dissertation eine Matrix aus verschieden großen ungeordneten Nanolöchern her. Die Matrix wurde dann in einen dünnen silizi-

umbasierten fotovoltaischen Absorber geätzt. Ein Vergleich der Lichtabsorption von Dünnschicht-Solarzellen mit und ohne Nanoschicht zeigte eine 90 %-Zunahme bei senkrechtem Einfallswinkel und über 200 % für flache Einfallswinkel im Vergleich zu einem unstrukturierten Layout. (Siddique 2017)

Dieser Effekt wird sehr wahrscheinlich den Wettbewerb zwischen Dick- und Dünnschicht-Solarzellen entscheiden. Mit nur einem Hundertstel Dicke ist die Dünnschichtzelle leichter als die Dickschichtzelle, sie ist in der Herstellung einfacher und damit insgesamt etwa 30 % kostengünstiger. Sie produzieren aber auf der gleichen Fläche auch 20 bis 40 % weniger Strom. (spondeus 2020) Wenn die Dünnschichtzellen in der Leistung mit diesem Effekt gegenüber den Dickschichtzellen aufholen, insbesondere weniger empfindlich auf suboptimalen Sonnenstand und Schwachlichtbedingungen sind, dann wird die Ressourcenschonung und der Käufer der Dünnschicht-Solarmodule auf jeden Fall Gewinner sein.

Bionische Patente – gute Patente!?

Der Mehrwert von biologisch inspirierten Technologien lässt sich indirekt über die Haltedauer von daraus resultierenden Patenten ablesen. So hat die zentrale Patentabteilung der Fraunhofer-Gesellschaft die Patente der letzten zwölf Jahre abgefragt, die dem Bereich »von der Natur inspiriert« zugeordnet werden konnten. Es wurden 64 Erfindungen identifiziert, aus denen 250 Patente resultierten. Bei über 90 % der bionischen Patente bestand fünf Jahre nach der Erstanmeldung noch mindestens ein Schutzrecht. Das ist im Vergleich zu konventionellen Erfindungen deutlich mehr und ein Indiz dafür, dass bei bionischen Erfindungen deutlich mehr Innovationspotenzial gesehen wird. Außerdem entstammen besonders viele Innovationspreise diesen biologisch inspirierten Erfindungen, was zwar für die Reputation gut, aber monetär nicht zu beziffern ist. (Schoester 2017)

Vorbilder eröffnen Chancen für Neues

Neben dem mit Effizienzsteigerungen oder Ressourcenschonung quantifizierbaren Profit, der aus dem Nutzen der Tricks biologischer Vorbilder entsteht, gibt es Vorbilder, die zunächst einfach Chancen bieten, althergebrachte Technologien oder Methoden zu ersetzen.

Ein solch faszinierendes Vorbild ist der Legestachel der Hautflügler. Mit 150.000 bekannten Arten sind Ameisen, Bienen und Wespen, die sogenannten Hautflügler (Hymenoptera), eine der artenreichsten und bekanntesten Insektengruppen. In dieser Gruppe wurde der Ei-Legestachel (Ovipositor) entwickelt, um das Ei in tieferen Schichten auf oder in einem Wirtstier abzulegen. Von einigen Arten wurde er später sekundär als Stechapparat zur Verteidigung umgenutzt. Dies ist ein Grund, warum nur weibliche Bienen und Wespen stechen können. Der komplexe Aufbau und Mechanismus blieb aber sehr ähnlich. Der Ovipositor besteht aus drei Lanzen, die über Gleitrippen (Schwalbenschwanzstrukturen) sich alternierend zueinander bewegen. Zwischen diesen

liegt der Eikanal, durch den dann final das Ei gepresst wird. Die Lanzen weisen entweder Raspel- oder Schaufelzähne auf, mit denen sie hartes Material wie Holz, Lehm oder Samen abtragen und hinaustransportieren.

Dieser Mechanismus stellt die einzige Alternativen zu dem vom Menschen in der Jungsteinzeit erfundenen Drehbohren dar. Alle maschinellen spanabhebenden Verfahren beruhen auf dem drehenden Bohren.

Eine technische Übertragung des sogenannten Pendelhubverfahrens der Hautflügler vereint vier Alleinstellungsmerkmale:

1. Infolge des linearen Bohrens muss das Loch nicht zylindrisch werden. Es besteht völlige Geometriefreiheit – beispielsweise ist ein Dreieck, Viereck usw., Sternchen oder ovales Loch möglich.
2. Wird mit flexiblen Lanzen gebohrt, können auch gekrümmte Löcher gebohrt werden – die Lanzen suchen sich den Weg des geringsten Widerstandes.
3. Der Bohrer erzeugt kein Drehmoment auf das Werkstück, was die Verletzungsgefahr für den Menschen reduziert.
4. Der Bohrer bohrt sich auch mit wenig Axialkraft in das Substrat. Versuche haben die Hypothese bestätigt, dass Insekten nur wenig Kraft aufbringen müssen, damit der Ovipositor in das zu durchbohrende Material eindringt. Das Bohrprinzip raspelt sich selbstständig in das Substrat, sobald die Spitze die Oberfläche durchdrungen hat und die ersten Raspelzähne greifen. Ein Bohren unter reduzierter Schwerkraft – wie unter Wasser oder extraterrestrisch – ist damit möglich.

Mit dem Pendelhubbohren stünde eine generische Technologie zur Verfügung, die von medizinischen Anwendungen (z. B. Bohren von Kavitäten für verdrehsichere Hüftimplantate) über künstlerische Verzierungen in Holz über sichere Verankerungen in Wänden bis hin zu Erdbohrungen reicht.

Aber die Welt denkt aufgrund der langen Historie in »runden Löchern« und eine Substitution des seit hunderten von Jahren optimierten Drehbohrwerkzeugs bedarf erheblicher Forschung allein bezüglich der Feinabstimmung der Werkzeuggeometrien auf das zu bearbeitende Material. Das erscheint der Industrie zu hoch, weil die Effizienz des konventionellen Bohrens höher priorisiert wird als die neuen Möglichkeiten, die sich mit dem Pendelhubbohren eröffnen.

Wie der Mehrwert eines biologischen Prinzips unschätzbar werden kann, zeigt das bei ESA und NASA als ganz real angesehene Szenario der Kollision eines Asteroiden mit der Erde. Die maximal schlimmste anzunehmende nicht menschengemachte Bedrohung für die Menschheit ist vom Menschen jedoch dank seiner technologischen Möglichkeiten zu verhindern: Zur Sprengung von Asteroiden bedarf es einer Bombe, die in einem Loch gezündet wird, um den Asteroiden effektiv zu zerlegen. (ESA 2019)

Vier Voraussetzungen müssen hierzu vorliegen:

1. die rechtzeitige Entdeckung auch kleiner Himmelskörper -> ist möglich
2. der Flug von Raketen zum Zielobjekt -> ist möglich
3. die Sprengkraft von Bomben -> ist vorhanden
4. die Bohrung eines Loches ohne oder mit wenig Schwerkraft -> nicht effektiv möglich

Diese Lücke würde dieses Bohrprinzip schließen können, dessen Funktionsprinzip schon vor über 300 Mio. Jahren von kleinen Insekten entwickelt wurde.

Literaturverzeichnis

Spiegel 1964 (1964). In: *Der Spiegel* (47), S. 145–147. Online verfügbar unter https://www.spiegel.de/spiegel/print/d-46176161.html, zuletzt geprüft am 06.01.2020.

Alibaba Group (Hg.) (17.082020): Alibaba.com. Online verfügbar unter https://www.alibaba.com/, zuletzt aktualisiert am 17.082020.

Bundesamt für Naturschutz (Hg.) (2020): Tiere, Pflanzen und Pilze Artenzahlen der Tiere, Pflanzen und Pilze in Deutschland und weltweit. Online verfügbar unter https://www.bfn.de/infothek/daten-fakten/zustand-der-natur/tiere-pflanzen-und-pilze/ii-11-1-artenzahlen-pflanzen-pilze-und-tiere.html, zuletzt geprüft am 08.01.2020.

Camilo, M. (2011): How Many Species Are There on Earth and in the Ocean? In: *PLoS biology* 9 (8). DOI: 10.1371/journal.pbio.1001127.

Codex Windsor 19115r, Richter II no. 837 (1519).

ESA / Space in Member States / Germany (Hg.) (2019): Noch Zukunft: Die Asteroidenabwehr. Online verfügbar unter https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Noch_Zukunft_Die_Asteroidenabwehr, zuletzt aktualisiert am 22.3 2019, zuletzt geprüft am 05.01.2020.

Kull, U.; Baumgartner, A. von (Hg.) (1995): Evolution und Optimierung. Strategien in Natur und Technik. Stuttgart: Hirzel (Edition Universitas).

Schoester, P.; Schwarz, O. (2017): (2017): »Die Rolle der Bionik in der Fraunhofer-Gesellschaft – der größten Forschungsinstitution für angewandte Forschung«. In: A. B. Kesel und D. Zehren (Hg.): Bionik: Patente aus der Natur. Tagungsbeiträge zum 8. Bionik-Kongress in Bremen, 21.-22. Oktober 2016. Bremen: Bionik-Innovations-Centrum (B-I-C), S. 91–95.

Schönauer, M.: Wer hat‘s erfunden? In: *Die Zeit* 2019 (45).

ScrapeHero (Hg.) (2019): How Many Products Does Amazon Sell? – April 2019. Online verfügbar unter https://www.scrapehero.com/number-of-products-on-amazon-april-2019/, zuletzt geprüft am 15.11.2019.

Siddique, R. H.; Donie, Y. J.; Gomard, G.; Yalamanchili, S.; Merdzhanova, T.; Lemmer, U.; Hölscher, H. (2017): Bioinspired phase-separated disordered nanostructures for thin photovoltaic absorbers. In: *Science Advances* 3 (10), e1700232. DOI: 10.1126/sciadv.1700232.

spondeus solar (Hg.) (2020): Dickschicht oder Dünnschicht? Welcher Modultyp ist besser für Ihr Dach geeignet? Online verfügbar unter https://photovoltaiksolarstrom.com/aufbau-photovoltaik/photovoltaikmodule/vergleich/, zuletzt geprüft am 06.01.2020.

Weird Connections (Hg.) (2009): Gecko Climbing Robot on Weird Connections. ». Youtube. Online verfügbar unter http://www.youtube.com/watch?v=anbqiBUmKIA&feature=related, zuletzt aktualisiert am 07.01.2009, zuletzt geprüft am 06.01.2020.

4 Was ist »Biologische Transformation«?

Thomas Marzi,
Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- Energietechnik UMSICHT

Ein biologischer Antrieb für ein Raumschiff

Vor etwas mehr als 150 Jahren entstand mit der Science-Fiction-Literatur ein neues Genre, das unzählige Möglichkeiten bietet, phantasiesievoll über die Zukunft der Menschheit zu spekulieren. Weniger spekulativ als die Zukunftsprognose selbst, aber nicht weniger interessant ist, was Science-Fiction-Geschichten über die kulturelle Situation aussagen, in der sie geschrieben oder verfilmt wurden. So finden sich fast immer auch Bezüge zu Hoffnungen und Ängsten, denen die Autorinnen und Autoren ausgesetzt waren. Letzteres lässt sich gut an US-amerikanischen Filmen wie »Die Dämonischen« (Moviepilot 2020a) oder Fernsehserien wie »Invasion von der Wega« (Moviepilot 2020b) ablesen, in denen Außerirdische die Gesellschaft unterwandern. Film und Serie spiegeln die Angst vor einer kommunistischen Unterwanderung wieder, die in den 1950er Jahren – der sogenannten McCarthy-Ära – in den USA herrschte. Auch im Hinblick auf die von ihnen beschriebenen Zukunftstechnologien, sind die Autorinnen und Autoren nicht völlig frei. Meist gehen sie von der Weiterentwicklung einer bereits vorhandenen Technologie aus. Ihre technologischen Visionen weisen zwar über die aktuelle Zeit hinaus, sie bleiben jedoch häufig auf eine technologische Basis bezogen, die zu der Zeit, als die Geschichten entstanden, Stand der Technik waren. Aus diesem Grund konnte die im 19. Jahrhundert von Jules Verne verfasste »Reise um den Mond« (Verne 2013) nicht mit einer Rakete erfolgen, sondern wurde mit Hilfe einer überdimensionalen Kanone ermöglicht.

Eine Science-Fiction-Serie, die mit einer geeinten, den Weltraum erforschenden Menschheit, ein insgesamt positives Bild für die Zukunft zeichnet, ist die Serie »Star Trek« (Lauer 2016; Giammarco 2016). Sie wurde in den 1960er Jahren konzipiert und ist bekannt dafür, dass die in ihr gezeigten technischen Geräte auch reale Entwickler zu ihren Erfindungen inspiriert haben. Star Trek vermittelt eine positive Technikvision, in der Technik die Grenzen von Menschen erweitert, ohne dass diese ihre Menschlichkeit verlieren. Die Serie gibt es noch heute und hat sich von Staffel zu Staffel mit dem Zeitgeist weiterentwickelt.

Im jüngsten Ableger der Serie erhält das Raumschiff, die Discovery, einen neuen Antrieb, der sich ein Geflecht aus Pilzfäden – ein Myzel, welches in der Serie das Weltall durchzieht – zunutze macht.[1] Sporen aus der Brutkammer

[1] »Bei Pilzen ist oberirdisch immer nur ein kleiner Teil des eigentlichen Pilzes zu sehen. -Der größte Teil eines Pilzes ist ein unterirdisches Geflecht aus vielen feinen Pilzhyphen. Fadenfein

des Raumschiffs stellen dabei eine Verbindung zwischen dem Raumschiff und dem Myzel her. (Wurche 2018) Der Antrieb basiert also nicht mehr wie in den Staffeln zuvor, mit dem sogenannten Warp-Antrieb auf einem physikalischen, sondern auf einem biologischen Prinzip. Das wesentliche Merkmal dieses »biologisch transformierten« Antriebs ist die Interaktion der Raumschifftechnik mit einem Lebewesen.

Obwohl es ein das Weltall durchziehendes Pilzgeflecht unseres Wissens nach nicht gibt und es den »Sporenantrieb« der Discovery deshalb wohl auch nicht geben wird, ist die Idee eines biologisch transformierten Raumschiffantriebs originell. Sie ist aber keineswegs aus dem Nichts entstanden, sondern spiegelt, wie in anderen Ablegern der Serie zuvor auch, aktuelle Vorstellungen und Erwartungen, die mit technischen Innovationen verbunden werden. Der Sporenantrieb der Discovery, den die Autorinnen und Autoren der Star-Trek-Serie erdachten, zeigt, dass diese Erwartungen sich heute nicht mehr so sehr auf die technische Umsetzung physikalischer und chemischer Erkenntnisse beziehen, sondern auf die Nutzung von biologischem Wissen. Der Unternehmer Steve Jobs verglich deshalb das Potenzial der Biologie sogar mit der Digitalen Entwicklung (Isaacson 2011) und der Biologe Peter Sitte schrieb mit Blick auf das 21. Jahrhundert von einer »Jahrhundertwissenschaft Biologie« (Sitte 1999; Vollmer 1992).

Bei der zunehmenden Bedeutung von biologischen Verfahren und biologischem Wissen, scheint es deshalb folgerichtig zu sein, eine grundlegende Veränderung in der Art wie wir zukünftig Technik gestalten werden, anzunehmen. Wie Thomas Bauernhansl und Markus Wolperdinger in ihrem Beitrag (Kapitel 2) schreiben, ist damit zu rechnen, dass technische Entwicklungen zukünftig mehr von der Natur inspiriert sind und dass biotechnologische Methoden immer mehr an Bedeutung gewinnen. Da diese »Biologische Transformation« zu einer Konvergenz von Bio- und Technosphäre führen soll, wird im Folgenden der Frage nachgegangen, was das denn eigentlich ist, wenn Biologisches mit Technischem konvergiert.

Biologische Transformation – Definition und Kategorien

Bevor der Frage nachgegangen wird, was eine Biologische Transformation eigentlich ist, soll zunächst ein Blick auf die Vielfalt an Themen geworfen werden, die sich mit diesem Begriff verbinden lassen.

---

und bleich bildet dieses dichte Geflecht, das meist unsichtbare Myzel (engl: mycelium) des Pilzes, aus dem die Fruchtkörper bei passender Temperatur und Luftfeuchtigkeit emporschießen. Solche Myzelien können sehr alt und sehr groß werden: Biologen schätzen einen Pilz in Oregon auf über 2200 Acres (965 Hektar oder 1.665 Fußballfelder) groß und ein Alter von 2000 Jahren«. (Wurche 2018.

In der Fraunhofer-Gesellschaft wird unter einer Biologischen Transformation eine »zunehmende Anwendung von Materialien, Strukturen und Prinzipien der belebten Natur in der Technik mit dem Ziel einer nachhaltigen Wertschöpfung« verstanden. Erreicht werden soll dies durch eine »Konvergenz verschiedener, vormals meist separat betrachteter Technologiebereiche« (Bauernhansl 2019)[2] Dieser Definition lassen sich grundsätzlich unterschiedliche Themengebiete zuordnen, beispielsweise die Nutzung von Biomassen, Biotechnologie, Gentechnik, Entwicklung bionischer Formen und Materialien, evolutionäre Entwicklungsansätze in der Technik, Übertragungen biologischer Erkenntnisse in die Ökonomie (sofern Ökonomie als ein technikähnlicher Bereich aufgefasst wird), Human Enhancement, Organisationsformen für Produktionsabläufe, Robotik sowie die Konstruktion von Maschinen, welche Lebewesen oder Teile von Lebewesen als Funktionselemente enthalten. Da die genannten Themen sehr unterschiedlich sind, wurden vier Kategorien definiert (Marzi 2018), die im Folgenden benannt werden:

1. *Materialadaptionen* zeichnen sich durch den Ersatz von anorganischen Materialien durch biologisch entstandene Materialien aus.
2. *Formadaptionen* übertragen Konstruktionsprinzipien, die in Lebewesen und lebenden Zellen vorkommen, auf technische Anwendungen. Hierzu gehört die klassische Bionik.
3. *Systemadaptionen* orientieren sich an systemischen Eigenschaften, die in Lebewesen, Ökosystemen oder der Biosphäre identifiziert werden und übertragen diese auf andere Bereiche. Zu nennen ist hier beispielsweise der Versuch, Mechanismen der Evolution auf Technik und Wirtschaft zu übertragen.
4. *Biologisch-Technische-Konvergenzen* bezeichnen Dinge, in denen Biologisches und Technisches unmittelbar miteinander kombiniert sind. Dabei kann es sich um Lebewesen, lebende Zellen oder funktionelle Einheiten aus Lebewesen (z. B. DNA-Segmente und Enzyme) handeln, die mit technischen Elementen verbunden werden. Weiterhin umfasst die Kategorie der Biologisch-Technischen Konvergenz die Imitation oder Umgestaltung von Lebewesen, wie sie beispielsweise in den Forschungen zur Künstlichen Intelligenz (KI) oder in Teilgebieten der Synthetischen Biologie erfolgen.

Was liegt jedoch nach einer biologischen Transformation vor? Diese Frage lässt sich für die Kategorien Material- und Formadaption relativ einfach beantworten: Es handelt sich um technische Systeme! So wird, wenn anorganische Materialien durch biologisch entstandene Stoffe ersetzt werden, nichts »Lebendes«, in technische Prozesse integriert. Das was verwendet wird, sind tote »Überreste« von Lebewesen. Bei einer Formadaption werden spezielle

[2] Hier ergibt sich eine große Nähe zu wissensbasierten Definitionen der Bioökonomie. Eine gesonderte Untersuchung zu Schnittmengen und Unterschieden zwischen diesen Begriffen sollte hierzu noch erfolgen.

Materialeigenschaften, die in einem evolutionären Geschehen entstanden sind, in einem technischen Produkt nachgeahmt.

Ein wichtiger Aspekt ist in der Kategorie Systemadaption zu berücksichtigen: Hier muss untersucht werden, ob es sich um eine wirkliche biologische Transformation, d. h. echte Systemübertragung handelt oder ob biologische Begriffe lediglich als Metapher verwendet werden. Meist ist das Letztere der Fall. Eine metaphorische Verwendung biologischer Begriffe liegt beispielsweise vor, wenn von »Digitalen Ökosystemen« oder »lebenden Maschinen« gesprochen wird. In diesen Fällen ist immer zu fragen, welche Inhalte durch die Verwendung der Metapher transportiert werden sollen.

Was liegt jedoch vor, wenn biologische und technische Komponenten direkt miteinander kombiniert werden? Um diese Frage zu beantworten, ist es hilfreich auf Konzepte aus der Bio- und Technikphilosophie zurückzugreifen und zunächst nach wesentlichen Unterschieden zwischen Lebewesen und technischen Produkten zu fragen.

Artefakte und Lebewesen

Das »Wesen« der Technik

Das Wort Technik entstammt dem griechischen Wort techné (τεχνη) und ist bereits in seiner Herkunft mehrdeutig, da es sich sowohl auf Werkzeuge als auch auf Kunst und Handwerk bezieht (Kornwachs 2013, S. 18). Es ist schwierig, eine allgemein akzeptierte Definition für Technik abzugeben. Der Begriff kann sich auf den Prozess menschlichen Herstellens beziehen, die Menge an Werkzeugen, Maschinen und Apparaten darunter fassen oder eine bestimmte Art und Weise bezeichnen, wie Menschen mit der Welt umgehen. Nahezu jeder Autor definiert und bewertet Technik im Detail unterschiedlich. Obwohl eine geistesgeschichtliche Tradition, die sich als »Philosophie der Technik« bezeichnet, vergleichsweise neu ist und dem 19. Jahrhundert zugeschrieben werden kann, hat es bereits in der Antike philosophische Überlegungen zum Wesen technischer Prozesse und Werkzeug gegeben.

Wie kommt es zu Erfindungen und wie entwickeln sich aus einzelnen Erfindungen neue Technologien? Wie nicht anders zu erwarten, finden sich hierzu verschiedene Sichtweisen und Vokabulare. Nachfolgend wird exemplarisch die Analyse des Ökonomen William B. Arthur (Arthur 2009) wiedergegeben. Die Entwicklung neuer Technologien bei Arthur entweder durch Bedürfnisse oder durch Kenntnisse von (Natur)-Phänomenen ausgelöst (Abbildung 4-1). Das Entstehen eines Bedarfs für eine Technologie kann ökonomische Gründe haben, die beispielsweise im Erkennen eines neuen Marktes oder in einer Veränderung der ökonomischen Verhältnisse bestehen. Nichtökonomische Gründe können beispielsweise militärischer Art oder prestigemotiviert sein. Ein Bedarf muss nicht unbedingt aktuell konkret vorliegen, sodass es besser ist, von Bedarfspotenzialen zu sprechen.

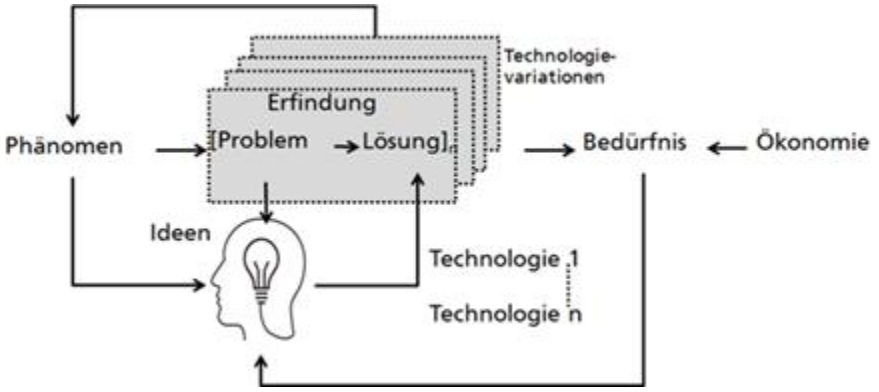


Abbildung 4-1: Entstehen und Entwicklung neuer Technologien. Grafische Darstellung des bei W. B. Arthur (Arthur 2009) beschriebenen Konzeptes

Technische Verfahren bauen, wie Arthur schreibt, auf natürlichen Phänomenen auf, die entweder direkt in der Natur beobachtet werden können oder erst noch entdeckt werden müssen. Ein Phänomen, das sich unmittelbar in der Erfahrungswelt erschließt, besteht darin, dass mit scharfkantigen Steinen andere Materialien bearbeitet werden können. Eine daraus resultierende technische Entwicklung ist beispielsweise ein Steinmesser. Schwerer zugängliche Phänomene sind chemische Reaktionen oder Schwingungsfrequenzen in Quarzkristallen. So war die Erfindung der Quarzuhr, die auf Schwingungsfrequenzen in Quarzkristallen als Phänomen zurückgeht, erst möglich, als bereits ein gewisser technischer Entwicklungsstand vorlag, da zur Entdeckung und Erschließung von Quarzschwingungen andere technische Geräte benötigt wurden. Es besteht somit ein rekursiver Prozess zwischen der Entdeckung von neuen Phänomenen und der Entwicklung von Technologien. Historisch interpretiert Arthur den Entwicklungsprozess von Technologien so, dass zunächst Phänomene erschlossen wurden, die unmittelbar zugänglich waren. Aus einzelnen Technologien entstanden durch Kombination weitere Technologien, die als Werkzeuge, Apparate oder Messgeräte wiederum die Entdeckung neuer Phänomene ermöglichten. Damit ein Phänomen technisch verwendet werden kann, muss es erschlossen werden, was Arthur als »capsulating« von Phänomenen bezeichnet. Dieses Erschließen setzt als kreativen gedanklichen Akt die Assoziation eines Effekts mit einem Bedarf oder einer Anwendung voraus und ist der eigentliche Erfindungsvorgang. Eine neue Technologie verknüpft also einen neuen oder adaptierten Effekt mit einem (potenziellen) Bedarf für eine Anwendung, wobei Bedürfnisse auch erst nachträglich durch eine technische Entwicklung geweckt werden können (Ropohl 2009, S. 40). Liegen technische Produkte erst einmal vor, werden sie häufig auch für andere Zwecke eingesetzt als ursprünglich vorgesehen (Kornwachs 2015, S. 121).

Jede erfolgreiche Verknüpfung eines Bedarfs mit einem Phänomen stellt eine Lösung zur Deckung eines Bedarfs dar. Die Menge der Lösungen, die zu einer Menge von Problemstellungen gehören, bezeichnet Arthur auch als »Design«,

das auch eine Optimierung in Bezug auf Funktionalität und Kosten beinhaltet. Die Verwendung eines Designs benötigt ggf. noch verschiedene Subsysteme, bei denen es sich selbst um Technologien handelt, die ebenfalls weiterentwickelt werden, um an das übergeordnete System angepasst zu werden. Technik entwickelt sich dabei in einem relativ langsamen Prozess durch ständige Entwicklung ihrer Subsysteme weiter. Es entstehen neue Lösungskombinationen und technische Variationen, die gewöhnlich zu einer Zunahme der Komplexität führen. Hat sich ein bestimmtes Design in einem Segment durchgesetzt, findet es gegebenenfalls als Modul in verschiedenen Bereichen Anwendung. Vorhandene Technik wird so zum Baustein neuer Technik.

Damit aus einer Erfindung eine neue Technologie entsteht, muss ein Phänomen mit einem (potenziellen) Bedarf verknüpft, also mit dem Wirtschaftssystem und der Gesellschaft gekoppelt werden. Dieser Prozess kann als die eigentliche Innovation angesehen werden, die dann wirksam wird, wenn die Voraussetzungen für eine Lösung und einen Bedarf zeitgleich vorliegen. Hierbei spielen wirtschaftliche, soziale und infrastrukturelle Voraussetzungen eine Rolle.

Betrachten wir das von Arthur beschriebene Konzept, fällt auf, dass Technik hier auf die Natur bezogen wird. Technik wendet dabei natürliche Phänomene an, man könnte auch sagen, sie nutzt Naturgesetze und arrangiert deren Wirken neu. Bedingungen und Umstände, wie wir sie in der Welt vorfinden, werden dabei so umgestaltet, dass die an sich »natürlichen« Prozesse anders ablaufen, als es sonst der Fall wäre. Man könnte auch mit Gregor Schiemann sagen, Technik wirkt nach kulturellen Vorgaben auf Natur ein (Schiemann 2011).

Ist Technik also etwas »Natürliches«? Auch wenn in technischen Geräten keine Prozesse ablaufen, die den Naturgesetzen wiedersprechen, sind technische Geräte etwas anderes als Lebewesen. So existieren Lebewesen von selbst, während technische Geräte »aufgrund anderer Ursachen da« sind. (Schiemann 1996, S. 69) Einer der ersten, die sich mit diesem Unterschied befassten, war der griechische Philosoph Aristoteles, der das Wesen technischer Produkte, durch seine Ursachenlehre zu erfassen suchte. Aristoteles argumentiert mit dem in Abbildung 4-2 dargestellten Bau eines Hauses. (Kirchman 1871, 25 ff). Er unterscheidet zwischen sogenannten »inneren Formal- und Materialursachen« und »äußeren Zweck- und Wirkursachen« (Anzenbacher 2010, 80 ff.). Die inneren Ursachen bestehen aus dem Bauplan (Formursache) und den Baustoffen (Materialursache), während es sich bei den äußeren Ursachen um die Arbeit der Bauarbeiter (Wirkursache) und die Absicht handelt, in dem fertigen Haus zu wohnen (Zweckursache). Die Zweckursache gibt keine Antwort auf eine kausale Abfolge, also auf das „Wie" der Bautätigkeit, sondern auf die dahinterstehende Absicht, das »Warum« ein Ereignis stattfindet oder ein Vorgang erfolgt. Die geistig vorhandene Absicht des Bauherrn in einem Haus zu wohnen löst in diesem Fall die Handlung der Bautätigkeit aus. Für einen technischen Vorgang sind somit ein zielgerichtetes

Handeln, eine Absicht und eine Zwecksetzung durch Menschen wesentlich. Anders ausgedrückt: Technik hat einen Sinn.

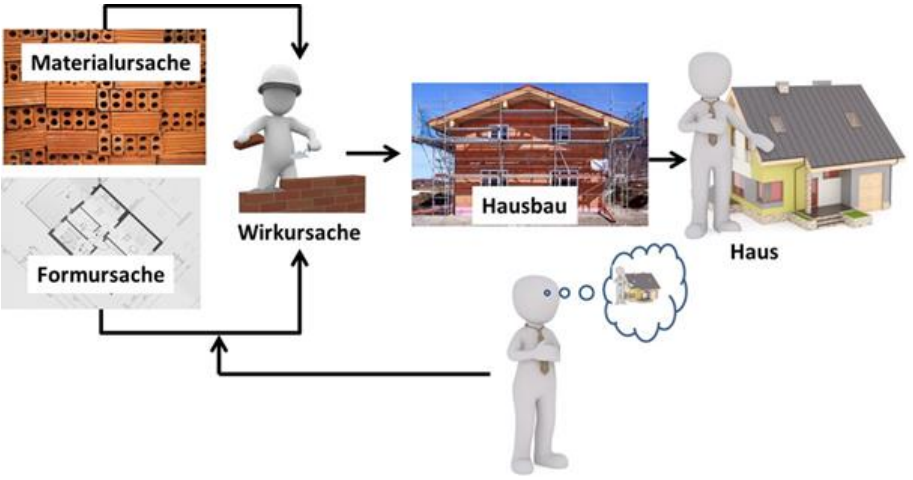


Abbildung 4-2: Der Zweck eines Hausbaus ist das bewohnte, fertige Haus.

Ziellose Evolution

Versuchen wir, die von Aristoteles für den Bau eines Hauses identifizierten Ursachen auf Vorgänge in der belebten Natur, beispielsweise auf das Heranwachsen eines Pferdes zu übertragen, kann bei oberflächlicher Herangehensweise vielleicht die Formursache mit dem »genetischen Bauplan« (DNA), die Materialursache mit Futter bzw. Nährstoffen und die Wirkursache mit Stoffwechselprozessen gleichgesetzt werden (Abbildung 4-3). Dass dieser Vergleich hinkt, wird schon bei einer näheren Betrachtung des Stoffwechsels deutlich. Während der Stoffwechsel bei Lebewesen eng mit ihrer Selbsterhaltung und Erneuerung verknüpft ist, bei dem etwas von »Außen« zu einem Teil des Lebewesens selbst wird, dient der Treibstoff bei einem Auto lediglich zur Bereitstellung von Energie für die Fortbewegung. Ob das Auto existiert oder nicht, hängt aber nicht davon ab, ob Treibstoff zur Verfügung steht. Die Existenz eines Lebewesens ist jedoch ohne Stoffwechsel nicht möglich. Es wächst und entwickelt sich mit dem Stoffwechsel.

Interessant wird es, wenn wir bei dem Heranwachsen eines Pferdes nach der Zweckursache fragen. Beim Hausbau bestand sie in der Absicht des Bauherrn in einem Haus zu wohnen. Gibt es eine solche Zweckursache, also einen zielgerichteten Sinn, beim Heranwachsen eines Pferdes überhaupt?

Auf die Frage, ob die Natur Sinn und Zweck hat, hätte es vor achthundert Jahren eine eindeutige Antwort gegeben: Zu Zeiten der Scholastik, einer im Mittelalter dominierenden philosophischen Richtung, war man davon überzeugt, dass sowohl in der Technik als auch in der Natur Zweckursachen wirksam sind. In der Natur wurden diese Zwecke durch den göttlichen Willen gesetzt,

der selbst nicht Teil der Natur war. Einer »ersten Schöpfung« aus Himmel, Erde und Lebewesen wurde eine »zweite Schöpfung« gegenübergestellt, die aus dem besteht, was durch den Menschen mit Hilfe von Technik oder Kunst geschaffen wird. Thomas von Aquin, einer der bedeutendsten Protagonisten der Scholastik, spricht in diesem Zusammenhang von einem »Hinordnen« der Dinge auf den Geist. Dieser Geist ist beim Hausbau der Geist des Bauherrn und in der ersten Schöpfung, wie Thomas die Natur nennt, der Geist Gottes. Da der Geist Gottes über dem Menschen steht und vollkommen ist, während der Geist des Menschen unvollkommen bleiben muss, müssen in der Sichtweise der Scholastik die »Dinge« der Natur vollkommener und »wahrer« sein als die Werke von Menschen. (Anzenbacher 2010, S. 64)

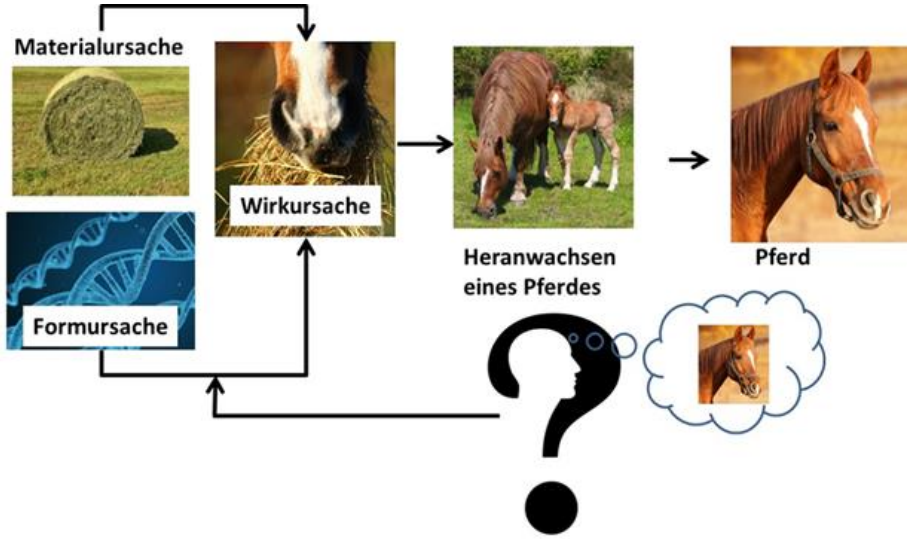


Abbildung 4-3: Hat das Heranwachsen eines Pferdes einen Zweck?

Konzepte wie die des Thomas von Aquin, die einen Zweck oder ein Entwicklungsziel in der Natur voraussetzen, werden im naturwissenschaftlichen Weltbild von heute mit Ausnahme von Randpositionen nicht mehr berücksichtigt. Sie werden aufgrund ihrer Orientierung an einem Ziel auch als »teleologische« Konzepte bezeichnet. Heute anerkannte Erklärungsmodelle gehen von einem *nicht* zielgerichteten Evolutionsprozess aus, der durch Veränderung und Auslese angetrieben wird. Eine Zweckursache gibt es hier nicht. Einer der aktuell bekanntesten Gegner teleologischer Konzepte ist der Biologe Richard Dawkins. In seinem Buch »Der blinde Uhrmacher« schreibt er:

»Die natürliche Zuchtwahl [...] zielt auf keinen Zweck. Sie hat keine Augen und blickt nicht in die Zukunft. Sie plant nicht voraus. Sie hat kein Vorstellungsvermögen, keine Voraussicht, kann überhaupt nicht sehen. Wenn man behauptet, dass sie die Rolle des Uhrmachers in der Natur spielt, dann die eines blinden Uhrmachers.« (Dawkins 2008, S. 18)

Die Methode darf an in dieser Stelle jedoch nicht mit dem Ergebnis verwechselt werden. Dass im Rahmen der Naturwissenschaft keine Zwecke identifiziert werden können, ist nämlich nicht weiter verwunderlich, da Naturwissenschaft ja gerade in dem Versuch besteht, unter Anwendung einer bestimmten Methodik Erklärungsmodelle zu finden, ohne auf das Wirken von außen gesetzter Zwecke zurückgreifen zu müssen. So fragt Biologie als Naturwissenschaft nach dem »Wie«, also beispielsweise den funktionellen Zusammenhängen in Lebewesen; während die Frage, »warum« ein Lebewesen existiert oder was Leben eigentlich ist, bereits methodisch aus dem Forschungsbereich der Biologie ausgeschlossen ist. Biologische (naturwissenschaftliche) Erkenntnisse können deshalb auch nicht als umfassend und alles beschreibend angesehen werden. Sie sind immer auch auf die Methodik zu beziehen mit der sie erkannt wurden. Unabhängig jedoch davon, ob wir geneigt sind, die Begrenztheit biologischer Kenntnisse an dieser Stelle anzuerkennen oder nicht, müssen wir, wenn wir uns auf biologische Erkenntnisse beziehen, davon ausgehen, dass es in der Natur zwar zweckhafte Beziehungen gibt, aber keine äußere Zwecksetzung. Gehen wir darüber hinaus, könnten wir nicht mehr von einer Biologischen Transformation sprechen, da wir uns außerhalb des Erkenntnisbereichs der Biologie bzw. der Naturwissenschaften bewegen würden.

Technik ohne Zwecksetzung? –» Evolutionäre« Entwicklungen

Lässt sich die menschliche Zwecksetzung in der Technikentwicklung vermeiden, in dem evolutionäre Mechanismen auf technische Entwicklungen übertragen werden? Lässt sich der kognitive Vorgang in der Entwicklung ausschalten, indem die Entwicklung eines technischen Elements zufälligen Veränderungen unterworfen wird, die, wenn sie sich bewähren, für weitere Veränderungen ausgewählt werden? »Entwicklungsbionische Strategien«, wie sie beispielsweise von Werner Nachtigall (Nachtigall 2008) in seinem Überblickswerk zur Bionik beschrieben werden, versuchen solche Konzepte in die Entwicklung technischer Elemente zu integrieren.

In dem von Nachtigall verwendeten Beispiel, das auf Arbeiten von Hans-Paul Schwefel in den 1960er Jahren zurückgeht, soll der Wirkungsgrad einer Düse optimiert werden. Die Düse wurde hierzu in Scheiben geschnitten und die Scheiben zufällig neu angeordnet. Für die neue Anordnung wurde der Wirkungsgrad bestimmt. Wenn ein besserer Wirkungsgrad erzielt werden konnte, wurde die Düsenform, die den verbesserten Wirkungsgrad aufwies, durch zufällige Variationen erneut verändert. Wenn kein besserer Wirkungsgrad erzielt werden konnte, wurde auf die vorherige Düsengeneration zurückgegriffen. Nach 45 aufeinander aufbauenden Schritten konnte so ein um etwa 40 % höherer Wirkungsgrad erreicht werden. Warum die resultierende Form einen höheren Wirkungsgrad hatte als die ursprüngliche Form, konnte erst später theoretisch nachvollzogen werden.

Wie ähnlich sind die hier beschriebenen Strategien den Prozessen, die in der biologischen Evolution ablaufen? Auch wenn durch stochastische Variationen und mit einem Vererbungs- und Selektionsmodus sicherlich wesentliche Aspekte der biologischen Evolution kopiert werden konnten, unterscheidet sich der technische Entwicklungsprozess trotzdem durch eine menschliche Zwecksetzung von der biologischen Evolution.

In der biologischen Evolution entscheidet sich erst in der Auseinandersetzung mit einer komplexen Umwelt – zu der chemisch-physikalische Umgebungsbedingungen sowie Begegnungen mit Lebewesen der eigenen Art oder anderen Arten gehören – ob ein Lebewesen sich fortpflanzen kann oder nicht. Die Umwelt ist komplex und die jeweiligen Lebewesen sind selbst ein Teil der Umwelt für andere, sodass anstelle des Begriffs »Umwelt« auch der Begriff »Mitwelt« gebraucht werden könnte. Es verändern sich nicht nur die Lebewesen, auch die Umwelt verändert sich durch die Vielzahl der Veränderungen, die Lebewesen erfahren. Im Vergleich zur biologischen Evolution liegt bei der oben geschilderten Entwicklung einer Düse jedoch eine eindeutige, von außen gesetzte, Zwecksetzung vor. Diese konstituiert sich hier zwar nicht in den einzelnen Veränderungsschritten – anders als bei technischen Entwicklungen sonst – sondern im Selektionskriterium, dem Wirkungsgrad. So erhält der Prozess durch die Wahl des Selektionskriteriums eine Zielrichtung. In der biologischen Evolution ist das nicht der Fall, da unbestimmt ist, welche Eigenschaften zukünftig die Chancen der Vermehrung verbessern. Ob ein Lebewesen sich fortpflanzen kann oder nicht, hängt von vielen Einflüssen ab.

Kombinationen aus technischen und biologischen Elementen

Muskelbetriebene Roboter

Im Jahr 2005 erschien im Magazin Nature Materials ein Artikel, der von einem Wissenschaftlerteam um Carlo Montemagno veröffentlicht wurde (Xi et al. 2005). Sie beschrieben ein mikromechanisches Robotersystem, das aus mechanischen Bauteilen und lebenden Muskelzellen besteht. Zur Fertigung des Roboters ging die Gruppe folgendermaßen vor: Um das Skelett des Roboters aufzubauen, wurde zunächst durch ein Ätzverfahren eine Struktur auf einem mit einer Siliziumdioxidoberfläche versehenen Siliziumwafer erzeugt. Anschließend erfolgte eine Beschichtung mit Acrylamidgel, auf das dann an ausgewählten Stellen eine Chrom-Gold-Beschichtung aufgebracht wurde, sodass eine dünne metallische Verbindung zwischen den Stellen gebildet wurde, die später die Gelenke des Roboters bilden. Als Muskelzellen dienten Herzzellen von Ratten, die bevorzugt auf dem Chrom-Gold-Film und nicht auf der Acrylamidbeschichtung -wachsen. Nach dem Aufwachsen der Muskelzellen wurde das Acrylamid durch Herauslösen aus der Struktur entfernt. Die bewegliche und durch die Muskelbündel verbundene Skelettstruktur war 138 µm lang, 40µm breit und hatte zwei »Extremitäten« aus Muskelzellen, die sich

an einem Chrom-Gold-Stäbchen befanden. Durch Kontraktion des einen und Entspannung des anderen Muskels kam eine Vorwärtsbewegung mit einer maximalen Geschwindigkeit von 38 µm/s und einer mittleren Schrittgröße von 25 µm zustande. Die Muskeln wurden durch eine Zuckerlösung mit Energie versorgt und die Muskelkontraktionen wurden durch elektrische Impulse ausgelöst. Als mögliche Anwendung nennen die Autoren piezoelektronische Schaltkreise, die durch die Muskelbewegung mit Energie versorgt werden. Eine Vorstellung wie ein solcher Roboter arbeitet, erhält man durch den nachfolgenden Link bzw. Barcode. Verwiesen wird auf ein YouTube Video, in dem der muskelbetriebene Roboter einer anderen Arbeitsgruppe gezeigt wird.

Video:
»Biohybrid robot with living muscle tissue, Techy Muna«,
https://www.youtube.com/watch?v=LiOljNuI1ws
zuletzt geprüft am 21.08.2020

Die Veröffentlichung von Carlo Montemagno und seinem Team hat in der Presse große Aufmerksamkeit erfahren. Beispielsweise vergleicht Spiegel online die Entwicklung mit dem Terminator, einer von Arnold Schwarzenegger dargestellten Kampfmaschine, die sich aus mechanischen und biologischen Teilen zusammensetzt (Spiegel 2004); die BBC (Pease 2005) betitelt ihre Nachricht mit der Überschrift »Living' robots powered by muscle«, diskutiert also die Lebendigkeit des Roboters. In einem Interview richtet Robert Pease, der Autor des BBC-Artikels, deshalb an Carlo Montemagno die Frage, ob die Zellen weiter lebendig sind, wenn sie mit der Siliziumstruktur verbunden sind. Montemagno antwortete hierauf: »They're absolutely alive.[...] I mean the cells actually grow, multiply and assemble – they form the structure themselves. So the device is alive.« Offensichtlich geht Montemagno also davon aus, dass nicht nur die Muskelzellen, sondern der ganze Verbund aus anorganischem Material und Zellen (also der Roboter), lebendig ist.

Die Ansicht, dass der Mikroroboter lebendig ist, ist natürlich nicht richtig. Er enthält zwar lebendige Komponenten, dies macht jedoch aus dem System selbst noch kein Lebewesen. Wäre dies der Fall, dann wäre auch das System Pferdekutsche ein Lebewesen. Die Pferdekutschte bildet zwar ein integriertes Handlungssystem, das aus der Kutsche selbst, den Pferden und dem Kutscher oder der Kutscherin besteht, lebendig sind jedoch nur Kutscher bzw. Kutscherin und die Pferde. Die Zwecksetzung, also wohin die Kutsche fährt, erfolgt durch den Kutscher und nicht durch das System Pferdekutsche als Ganzes.

Bei dem muskelbetriebenen Roboter sind die einzelnen Muskelzellen lebendig. Sie haben einen Stoffwechsel und setzen die Glukose, die sie der umgebenden Lösung entnehmen, dazu ein, um am Leben zu bleiben und sich zu vermehren. Der Verbund aus Muskelzellen wächst hierdurch. All diese Eigenschaften hat der Roboter als Ganzes nicht. Er kann sich nicht vermehren, sondern ist darauf angewiesen, dass ein menschlicher Konstrukteur neue Roboter baut. Er hat auch kein eigenes Wesen, keine »Innerlichkeit« aus der die Motivation kommt, sich in Bewegung zu setzen. Die Bewegung geht vielmehr auf die Kontraktion des Muskelgewebes, also auf eine synchronisierte Kontraktion der Muskelzellen zurück. Auslöser der Bewegung ist ein von außen gesetzter Reiz, der die Muskelzellen dazu bringt zu kontrahieren. Lebewesen dagegen interagieren mit ihrer Umgebung (Trogemann 2014) und versuchen sich mit der nötigen Energie für ihr »Weiterleben« selbst zu versorgen (Schark 2006). Sie entwickeln und erhalten sich selbst und pflanzen sich fort. All das kann der Roboter nicht; er hat als Ganzes nicht die Fähigkeit, Nahrung aufzunehmen. Er hat nicht – wie die Zellen – die seine mechanischen Teile verbinden, eine halbdurchlässige Grenze, die ihn von seiner Umgebung trennt und durch die er sich mit Nährstoffen versorgen kann. Er zeigt selbst keine Aktivität, sondern nur die einzelnen Muskelzellen und die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen – gewissermaßen die »Kutscher und Kutscherinnen« des Roboters –, die die Stromimpulse generieren, tun dies. Der Roboter ist kein Lebewesen, sondern eine biotechnische, mit einem Motor vergleichbare Maschine, die allerdings aus lebenden Teilen besteht.

Die »Natur« eines muskelbetriebenen Roboters – ein Gedankenexperiment

Interessanter als die Frage, ob der Roboter lebendig ist, ist die Frage des BBC-Journalisten, ob die Muskelzellen, die den Roboter bewegen, noch lebendig sind, wenn sie mit der Siliziumstruktur verbunden werden. Auf den ersten Blick verwundert diese Frage, da der Roboter ja gar nicht funktionieren würde, wenn die Muskelzellen nicht lebendig wären. Nur lebende Zellen, die einen Stoffwechsel haben und durch Fortpflanzung zu Muskelbündeln heranwachsen, können den Roboter in Bewegung setzen, nicht etwa abgestorbene Zellen. Es kann hier nur spekuliert werden, was Robert Pease bei seiner Frage durch den Kopf ging und warum er die Lebendigkeit der Zellen in Frage stellte. Irgendetwas jedenfalls schien ihn daran zweifeln zu lassen, dass die Daseinsform der Zellen am Skelett des Roboters mit dem »normalen« Leben der Zellen übereinstimmt. Robert Pease hat mit diesem Zweifel nicht unrecht. Was lebende Zellen oder Lebewesen, die in einem technischen System leben, von lebenden Zellen oder Lebewesen unterscheidet, die in der Natur leben, soll im Folgenden mit einem Gedankenexperiment nachgegangen werden.

Das Gedankenexperiment erfolgt anhand einer fiktiven Technologie, die in der anfangs bereits genannten Science-Fiction-Serie »Star Trek« angewendet wird. Dabei handelt es sich um die sogenannte »Replikatortechnik«, mit deren Hilfe die Raumschiffbesatzung u. a. Nahrung aus Energie herstellen kann.

(Memory 2018) . Das in Abbildung 4-4 dargestellte fiktive Prinzip orientiert sich grundsätzlich an einem solchem Konzept, allerdings werden die Nahrungsmittel auf chemischem Wege hergestellt.

Rohstoffe sind CO_2, Wasser und Stickstoff, die der Umgebung entnommen, aufkonzentriert und in geeigneten Reaktoren zu Proteinen, Kohlehydraten und Fetten umgesetzt werden. Die vorhandenen Moleküle werden repliziert, aufbereitet und durch Mischung und Formgebung zu Fleisch und Milch verarbeitet. Der Replikator in Abbildung 4-4 ist noch ein Prototyp, d. h. er ist ein aus technischen Subsystemen verschaltetes technisches Produkt, das wie jedes andere technische Produkt noch optimiert werden muss. Die Optimierung muss eine Maximierung der Ausbeute an Fleisch und Milch, eine Minimierung des Energieaufwandes, die Sicherstellung einer immer gleichbleibenden Fleisch- und Milchqualität sowie eine optimale Verschaltung und Integration der einzelnen Komponenten zu einem Gesamtsystem »Replikator« beinhalten. Die Optimierung der einzelnen Systemkomponenten orientiert sich dabei an der optimalen Funktion des Gesamtsystems, in die die Funktion der einzelnen Subsysteme eingebettet ist. Die Optimierung soll die verlässliche Benutzbarkeit, eine gleichbleibende Qualität und die ökonomische Vermarktbarkeit sicherstellen.

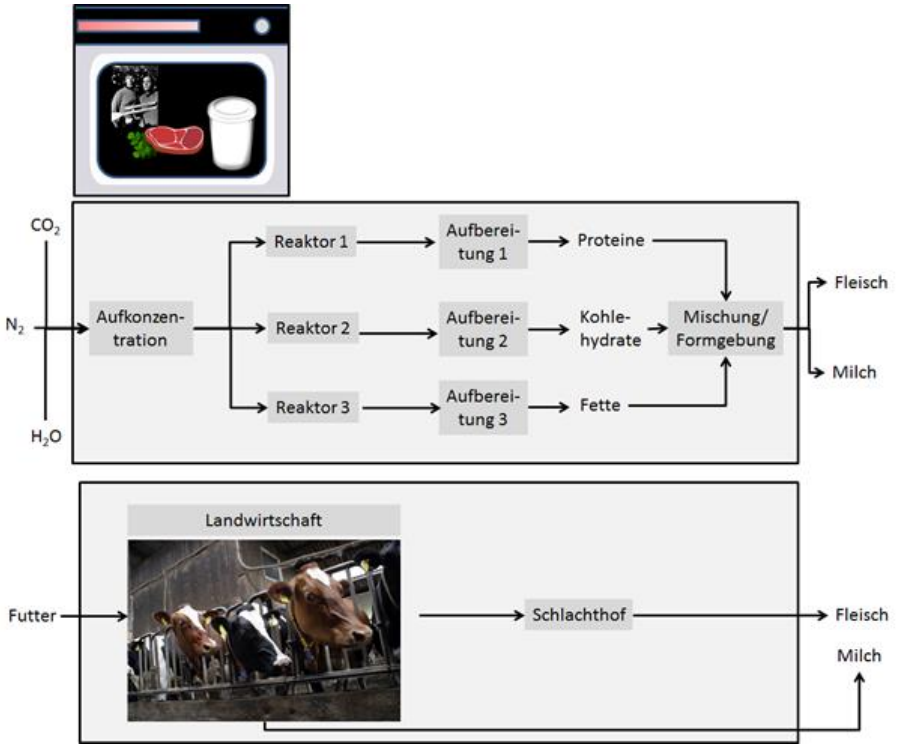


Abbildung 4-4: »Gedankenexperiment Replikator«: Theoretische maschinelle Konzeption (oben) und »biologisch transformierte« Konzeption (unten)

Bei einer Weiterentwicklung des fiktiven Prototypen müssen seine Komponenten zu einem integrierten System verbunden werden. Darunter ist das Entstehen einer Maschine als vollständige Einheit zu verstehen, die durch rekursive Beziehungen wie rückkoppelnde Regelungsmechanismen sowie multiple Funktionsweisen der enthaltenen technischen Elemente ausgezeichnet ist (Simondon 2012, S. 51). Ein Beispiel für eine multiple Funktionsweise kann der Motorenentwicklung entnommen werden (Simondon 2012, S. 40). So ist bei Verbrennungsmotoren und Dampfmaschinen der Zylinder, in dem die Ausdehnung bzw. der Druck eines Gases dazu verwendet wird, eine mechanische Kraftübertragung und die Bewegung eines Kolbens zu initiieren, ein wesentliches Element. Bei einer Dampfmaschine wird dieser Vorgang durch den Druck des Wasserdampfs hervorgerufen, der in einem Dampfkessel erzeugt wird, welcher durch eine externe Wärmequelle, in der beispielsweise Kohle verbrannt wird, beheizt wird. Sowohl Gas- als auch Wärmeerzeugung befinden sich bei der Dampfmaschine außerhalb des Zylinders. Bei einem Gasmotor dagegen ist der Zylinder multifunktional, da sowohl die Verbrennung als auch die Bildung der antreibenden Gase im Zylinder stattfinden. Das konkrete technische Objekt gewinnt durch diese Entwicklung an innerem Zusammenhang. Animierte Darstellungen der Funktionsweise von Dampfmaschine und Verbrennungsmotor sind durch die nachfolgenden Links bzw. Barcodes zugänglich.

Dampfmaschine	KW WZ Technik Portal https://www.k-wz.de/dampfmaschine zuletzt geprüft am 21.08.2020	
Verbrennungsmotor	KW WZ Technik Portal: https://www.k-wz.de/otto-4-takt-motor/ zuletzt geprüft am 21.08.2020	

Eine solche Optimierung zu einem integrativen System ließe sich für den Replikator in Abbildung 4-4 am einfachsten durch eine biologische Transformation der Replikatortechnik erreichen. Dies kann erfolgen, in dem die technischen Aggregate, die im mittleren Bild in Abbildung 4-4 dargestellt sind, durch Kühe ersetzt werden. Als Resultat erhält man dann die heutige Landwirtschaft. Diese Sichtweise mag ungewöhnlich erscheinen, da ein heute verwendetes technoökonomisches System wie die Landwirtschaft als Weiterentwicklung einer Science-Fiction-Technologie dargestellt wird. Das Beispiel soll aber nicht einen realen Entwicklungsweg beschreiben, es verdeutlicht nur, um

was es sich seinem Wesen nach handelt, wenn Lebewesen in technische Systeme eingebunden werden. So wie der oben beschriebene Replikator nämlich eine Maschine ist, kann das »System Landwirtschaft« auch als Maschinerie oder Fabrik betrachtet werden, in die die Lebewesen Kühe als Subsysteme maschinell eingebunden sind.

Bei einer Kuh handelt es sich eindeutig um ein fühlendes Lebewesen. In der Landwirtschaft ist dieses Lebewesen aber, ebenso wie die Subsysteme des oben beschriebenen Replikators, in einen technischen Produktionsverlauf integriert. So werden Kühe, wie die Verdopplung der Milchleistungen seit 1950 zeigt, ebenso optimiert wie Maschinen in industriellen Anwendungen. Dass eine Kuh in der konventionellen Landwirtschaft wie eine Maschine oder Systemkomponente in das Produktionssystem eingepasst wird, wird durch die Beschreibung von M. Schwerin in seinem Fachartikel mehr als deutlich (Schwerin 2009). Schwerin schreibt: »Aus ökonomischer Sicht muss die Leistung einer Kuh mindestens 15 kg Milch je Lebenstag betragen, um ihre Kosten zu amortisieren und Gewinn zu erwirtschaften […] Das entspricht z. B. einer Lebensleistung von ≥ 30.000 kg Milch bei einer Nutzungsdauer von 3,5 Laktationen«. Die technische Umgebung und der technische Zweck übernehmen in der Landwirtschaft die Rolle einer selektierenden Umwelt.

Die Optimierung von Kühen für das Produktionssystem Landwirtschaft macht deutlich, dass sich die Seinsweise von Kühen erheblich von der Seinsweise der Rinder unterscheidet, aus denen die heutigen Kühe gezüchtet wurden. Die ersten Rinder wurden vor etwa 10.000 Jahren der Natur entnommen und mit technischen Mitteln von der Natur abgrenzt. Ihre Bewegungsfreiheit wurde eingeschränkt und ihre Vermehrung und Ernährung kontrolliert. Aus einst freien Lebewesen entstanden so, obwohl sie nach wie vor Lebewesen sind, optimierte maschinelle Systemkomponenten in einem industriellen Umfeld. Diese sind inzwischen aufgrund ihrer technischen Optimierung, ohne technische Hilfsmittel nicht (über)lebensfähig, da sie u. a. regelmäßig gemolken werden müssen. Sie haben etwas »Künstliches« an sich, da es sie in ihrer heutigen Form ohne die technische Zwecksetzung durch Menschen nicht geben würde. Die Existenz von Kühen in der Landwirtschaft heute unterscheidet sich erheblich von der Lebensweise ihrer Vorfahren. So führt die hohe Milchleistung zu einer großen Belastung des Stoffwechsels, da in der Phase der höchsten Milchleistung die Nährstoffe des Futters für die Synthese der Milchinhaltsstoffe nicht mehr ausreichen, sodass die Kuh eigenes Körpergewebe angreifen muss (Schwerin 2009). Weiterhin führt der große gezüchtete Euter dazu, dass der normale Bewegungsablauf einer Kuh erheblich eingeschränkt ist (Albert Schw. 2018).

Werden anstelle von Kühen einzellige Lebewesen oder Bestandteile von Lebewesen in technische Strukturen eingebettet, wird die Entfremdung von der natürlichen Existenzweise längst nicht so deutlich wie bei Kühen. So besteht ein Unterschied zwischen Kühen und Herzmuskelzellen von Ratten darin,

dass das Leben von Herzmuskelzellen bereits in Bezug auf einen übergeordneten Organismus, in diesem Fall auf eine Ratte, optimiert ist, während es sich bei einer Kuh um ein Lebewesen handelt, welches wir als Individuum ansehen müssen. Aber auch die Muskelzellen leben in dem Roboter in einem technischen Milieu, das ihr Verhalten beeinflusst. So wachsen sie beispielsweise nur auf den mit Gold beschichteten Komponenten und interagieren in einem anderen Rhythmus als im Herz einer Ratte, dem sie ursprünglich entnommen wurden. Ihr Leben dient nicht mehr dazu, die Existenz eines Lebwesens zu sichern, sondern die Fortbewegung eines Roboters zu ermöglichen. Der muskelbetriebene Roboter hat sowohl eine biologische als auch eine technische Dimension. Letzteres gilt auch für eine Kuh in der Landwirtschaft, die als Lebewesen eine technische Funktion übernimmt.

Die »entmächtigte« Natur?

Wie wir gesehen haben, werden bei einem muskelbetriebenen Roboter Zellen und in der Landwirtschaft Kühe technisch zugerichtet. Trotz dieser technischen Zurichtung ist jedoch in beiden Fällen immer noch ein »natürlicher« Aspekt zu finden. Die Zellen leben, die Kühe sind Lebewesen und beide werden nicht gebaut, sondern »wachsen«. Diese Mehrdimensionalität aus Technik und Natur findet sich noch an anderen Stellen, sodass sich eine strikte Trennung zwischen Natur und Technik, wie Aristoteles sie noch vorgenommen hat, nicht durchgehend aufrechterhalten lässt. Bei dem muskelbetriebenen Roboter kann vielleicht noch eine Natur/Technik-Grenze zwischen den Muskelzellen und den mechanischen Teilen des Roboters gezogen werden, doch auch diese Trennung passt schon nicht mehr, da das Wachstum der Zellen und ihre Bewegung technisch gesteuert sind. Insgesamt lassen sich heute immer mehr Wesen, Objekte und Bereiche identifizieren, die sowohl natur- als auch technikgeprägt sind. So tragen Lebewesen, die gentechnisch verändert oder in der synthetischen Biologie auf ein Minimum reduziert wurden, Merkmale des technischen »Zugerichtetseins« in sich. Ohne Technikanwendung würden sie gar nicht existieren. Auch wenn ihre Entstehung einen technischen Anteil hatte und hat, es handelt sich dennoch um Lebewesen. Zur Beschreibung dieser sowohl biologischen als auch technischen Dimensionen hat die Philosophin Nicole Karafyllis den Begriff des »Biofakts« eingeführt (Karafylis 2006; Karafyllis 2003). Während es sich bei »Artefakten« um künstlich erschaffene Objekte handelt, sind »Biofakte« biotische Artefakte. Sie sind oder waren »wachsende« Lebewesen, die durch zweckgerichtetes Handeln in die Welt gekommen sind. Ihr »Wachsen« erfolgt jedoch nicht autonom, da die Wachstumsbedingungen technisch verändert wurden. Gäbe es Biosphäre und Technosphäre als separate Systeme, würde die Sphärengrenze in diesem Fall durch ein Individuum laufen. Sie wäre jedoch noch nicht einmal dort klar auszumachen, da die technischen Merkmale oft nicht am Lebewesen selbst, sondern nur in der Entstehungsgeschichte des Lebewesens zu finden sind.

Was findet also statt, wenn wir von einer Biologischen Transformation sprechen, eine »Biologisierung von Technik« oder eine »Technisierung von Natur«? Eine zu beobachtende Technisierung von Natur beschrieb der Theologe und Philosoph Paul Tillich jedenfalls bereits vor einiger Zeit. Er schrieb:

»Die Technik dient dem Menschen, sie ist ihm unterworfen. Seine Zwecksetzung wird allen Dingen auferlegt. Um dieses Zweckes willen werden die übrigen Wesen ihrem Eigenzweck entfremdet, sie werden entmächtigt, um eine neue Macht im Dienst des Menschen zu erhalten: der Baum wird zum Holz, das Tier zur Arbeitskraft, […] das Eisen zur Maschine.« (Tillich 1961, 80f)

Tillich beschreibt hier mit drastischen Worten eine Technisierung der Natur, durch die die Dinge der Natur einem technischen und ökonomischen Zweck untergeordnet werden. Damit Technik funktioniert dürfen die Dinge und Lebewesen, die ein technisches System konstituieren nicht zu eigenständig sein, sie dürfen nicht über zu viel Macht verfügen. Plakativ formuliert: »Damit etwas macht was es soll, darf es nicht tun was es will!« Tillich spricht von einer »Entfremdung« und »Entmächtigung« durch eine menschliche Zwecksetzung. Während uns der Begriff Entfremdung durch Karl Marx in Zusammenhang mit der Veränderung der Arbeit in der Industriellen Revolution bekannt ist, erscheint uns der Begriff Entmächtigung heute wahrscheinlich eher seltsam. In freier Auslegung können wir vielleicht hierunter die Beschränkung verstehen, der beispielsweise Milchkühe und die Muskelzellen des Roboters in ihrer Existenz ausgeliefert sind. Der Begriff enthält jedoch noch eine tiefere Bedeutung. Er geht auf den ontologischen Begriff der »Seinsmächtigkeit« zurück. Gemeint ist also die Macht zu sein bzw. die Möglichkeit zu existieren. (Tillich 1987, S. 184).

Bei einer Entmächtigung im Sinne Tillichs geht es also um mehr als eine Beschränkung der Kuh in Ihrem Leben, es geht um die Existenz der Kuh selbst bzw. die eines weiblichen Rindes. Ohne Technik wäre das Leben der Kuh nicht einfach nur anders, es gäbe die Kuh gar nicht. Sie wäre auch nicht etwas Anderes, sondern sie würde gar nicht existieren. Existieren würden weibliche Rinder und keine Milchkühe..

In seinen Ausführungen bleibt Paul Tillich nicht bei der Entmächtigung von Dingen, Tieren und Pflanzen stehen. Er schreibt:

»der Mensch selbst kann zu dem werden, wozu er Dinge zwingt: zum Werkzeug, zur Maschine, zur Arbeitskraft. Er kann wie die Dinge entmächtigt werden, um in die neue Macht des technischen Gebildes als Glied eingefügt zu werden […] Die Entscheidung […] gab die Wirtschaft und ihre Zwecksetzung.« (Tillich 1961, 80f).

Deutlicher kann es kaum werden: Menschen verändern nicht nur die Natur, als Teil der Natur sind sie von diesen Veränderungen selbst betroffen. Menschen können in die »Macht des technischen Gebildes als Glied eingefügt« werden. Sie können selbst entmächtigt und Teil eines technischen Prozesses werden, wenn ihnen ein Zweck auferlegt wird, der nicht aus ihnen selbst

kommt. Ihre eigene Optimierung nehmen Menschen häufig dabei sogar selbst vor. Der Zweck, kann durch andere Menschen, ihren Machtinteressen oder ökonomischen Bedürfnissen sowie durch einen techno-ökonomischen Automatismus gesetzt werden. All diese Aspekte sind auch bei der Entwicklung digitaler und biologisch transformierter Technologien zu beachten und aktueller denn je.

Fazit

Die Entwicklung einer biologisch transformierten Technik, in der technische Elemente mit biologischen Systemen kombiniert werden und Menschen sich von Prozessen und Strukturen in der belebten Natur inspirieren lassen, wird wahrscheinlich Innovationen ermöglichen, die heute noch nicht bis ins letzte vorstellbar sind. Ein Grund hierfür ist, dass Lebewesen, auch wenn sie nicht auf diesen Aspekt reduziert werden dürfen, wie hochintegrierte Systeme aufgebaut sind. Aus einer Kombination von technischen Elementen mit Strukturen, wie sie in Lebewesen vorkommen, können sich deshalb ungeahnte Möglichkeiten ergeben. Diese biologisch transformierte Technik ist jedoch nicht automatisch naturverträglicher als die bisherige Technik. So ist bei biologischen Transformationen immer auch zu fragen, welche Prinzipien in welche Bereiche übertragen werden sollten und welche besser nicht. Für eine biologisch transformierte Technik gilt dasselbe, wie für andere Technik auch: Sie muss sich an Nachhaltigkeitskriterien orientieren und hat deshalb ökologische, ökonomische und soziale Gegebenheiten zu berücksichtigen. Ob eine Technologie biologisch transformiert ist oder nicht, sagt für sich genommen noch nichts darüber aus, welche ökologischen Auswirkungen sie hat und ob sie wirtschaftlich und sozial angemessen eingesetzt werden kann. Für die Welt, in der wir leben, ist nicht entscheidend, ob eine Technik biologische Prinzipien berücksichtigt, sondern, dass eine technische Anwendung verträglich für Menschen und ihre Mitwelt gestaltet wird und dass sie kontrollierbar bleibt. Technik verwandelt sich durch eine biologische Transformation nicht einfach in etwas Lebendiges, dass, da es ja »natürlich« ist, nicht mehr in Frage gestellt werden muss. Wenn Biologie und Technik zusammenkommen, schwingt deshalb immer auch die Frage mit, ob hierdurch Technik natürlicher und naturverträglicher oder Leben technischer wird. Sich diese Aspekte bewusst zu machen, ist in einer angewandten Forschung, die sich ihrer Verantwortung bewusst ist, unentbehrlich.

Literaturverzeichnis

Albert Schweitzer St. (2018): Milchkühe. Online verfügbar unter https://albert-schweitzer-stiftung.de/massentierhaltung/milchkuehe, zuletzt geprüft am 26.02.2018.

Anzenbacher, Arno (2010): Einführung in die Philosophie. Neuausgabe, 7. Auflage, (14. Gesamtauflage). Freiburg im Breisgau and Basel and Wien: Herder.

Arthur, W. Brian (2009): The nature of technology: What it is and how it evolves. London: Free Press.

Bauernhansl, Thomas (2019): Die Biointelligente Wertschöpfung. White Paper des Kompetenzzentrums Biointelligenz. Hg. v. Kompetenzzentrum Biointelligenz. Stuttgart. Online verfügbar unter https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/UeberUns/Leitthemen/BiointelligenteWertschoepfung/WhitePaper_BioIntelligenz_de.pdf, zuletzt geprüft am 02.01.2020.

Dawkins, Richard (2008): Der blinde Uhrmacher. Warum die Erkenntnisse der Evolutionstheorie zeigen, daß das Universum nicht durch Design entstanden ist. 3. Aufl. München: Dt. Taschenbuch-Verl. (Dtv, 34478).

Giammarco, Francesco (2016): 50 Jahre "Star Trek": Früher war die Zukunft besser. Online verfügbar unter http://www.spiegel.de/kultur/tv/star-trek-wird-50-frueher-war-die-zukunft-besser-a-1111266.html, zuletzt geprüft am 23.02.2018.

Isaacson, Walter (2011): Steve Jobs. New York, NY: Simon & Schuster.

Karafylis, Nicole (2006): Biofakte – Grundlagen, Probleme, Perspektiven. In: *Erwägen Wissen Ethik* 17 (4), S. 547–558.

Karafyllis, Nicole Christine (Hg.) (2003): Biofakte. Versuch über den Menschen zwischen Artefakt und Lebewesen. Paderborn: mentis-Verl. Online verfügbar unter http://hsozkult.geschichte.hu-berlin.de/rezensionen/2004-1-087.

Kirchman (1871): Aristoteles Metaphysik. Berlin: L. Heiman.

Kornwachs, Klaus (2013): Philosophie der Technik. 1. Aufl. München: C.H.Beck (C.H.Beck Wissen).

Kornwachs, Klaus (2015): Philosophie für Ingenieure. München: Hanser.

Lauer, Christopher (2016): Star Trek : "Ihre Zukunft wurde Realität. In: *Die Zeit* 2016 (46). Online verfügbar unter http://www.zeit.de/2016/46/star-trek-gene-roddenberry-christopher-lauer-liebesbrief, zuletzt geprüft am 23.02.2018.

Marzi, T.; Knappertsbusch, V.; Marzi, A.; Naumann, S.; Deerberg, G.; Weidner, E. (2018): Fragen zu einer biologischen Technik. Oberhausen: Verlag Karl Maria Laufen (UMSICHT-Diskurs, Heft 2).

Memory Alpha (2018): Die Technik der USS Enterprise: Replikator. Online verfügbar unter http://de.memory-alpha.wikia.com/wiki/Replikator.

Moviepilot (2020a): Die Dämonischen. Hg. v. Webedia GmbH. Berlin. Online verfügbar unter https://www.moviepilot.de/movies/die-daemonischen, zuletzt geprüft am 25.08.2020.

Moviepilot (2020b): Invasion von der Wega. Hg. v. Webedia GmbH. Berlin. Online verfügbar unter https://www.moviepilot.de/serie/invasion-von-der-wega, zuletzt geprüft am 25.08.2020.

Nachtigall, Werner (2008): Bionik: Lernen von der Natur. Originalausgabe. München: Verlag C.H. Beck (Beck'sche Reihe C.H. Beck Wissen, 2436).

Pease, Robert (2005):.Living' robots powered by muscle. Hg. v. BBC News. London. Online verfügbar unter http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/4181197.stm, zuletzt geprüft am 25.08.2020.

Ropohl, Günter (2009): Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik. s.l.: KIT Scientific Publishing. Online verfügbar unter http://www.doabooks.org/doab?func=fulltext&rid=15084.

Schark, Marianne (2006): Lebewesen als ontologische Kategorie. In: Ulrich Krohs und Georg Toepfer (Hg.): Philosophie der Biologie: Eine Einführung. Orig.-Ausg., 1. Aufl., [Nachdr.]. Frankfurt am Main: Suhrkamp (Suhrkamp-Taschenbuch Wissenschaft, 1745), 175ff.

Schiemann, Gregor (Hg.) (1996): Was ist Natur? Klassische Texte zur Naturphilosophie. Orig.-Ausg. München: Dt. Taschenbuch-Verl. (Dtv, 4697).

Schiemann, Gregor (2011): Natur - Kultur und ihr Anderes. In: Friedrich Jaeger und Burkhard Liebsch (Hg.): Handbuch der Kulturwissenschaften. Band 1: Grundlagen und Schlüsselbegriffe. Sonderausgabe. Stuttgart, Weimar: Verlag J.B. Metzler, S. 60–75. Online verfügbar unter https://www.philosophie.uni-wuppertal.de/fileadmin/philosophie/PDFs_allg/Schiemann/Aufs%C3%A4tze_neu/31Natur-Kultur_und_ihr_Anderes2.pdf, zuletzt geprüft am 08.07.2020.

Schwerin, M. (2009): Die Zucht hochleistender und gesunder Milchkühe – nur ein Traum? In: *Züchtungskunde* 81 (6), S. 389–396.

Simondon, Gilbert (2012): Die Existenzweise technischer Objekte. 2. Auflage. Zürich: Diaphanes (Sequenzia, 11).

Sitte, Peter (Hg.) (1999): Jahrhundertwissenschaft Biologie: Die großen Themen. München: Beck.

Spiegel online (Hg.) (2004): Terminator 4 Muskel treibt Roboter. Online verfügbar unter https://www.spiegel.de/consent-a-?targetUrl=https%3A%2F%2Fwww.spiegel.de%2Fwissenschaft%2Fmensch%2Fterminator-4-muskel-treibt-roboter-an-a-288118.html, zuletzt geprüft am 25.08.2020.

Tillich, P. (1961): Philosophie und Schicksal: Evangelisches Verlagswerk (Gesammelte Werke). Online verfügbar unter https://books.google.de/books?id=cfPYAAAAMAAJ.

Tillich, Paul (1987): Writings in the philosophy of religion: Religonsphilosphische Schriften. Berlin: de Gruyter (Main works, ; 4).

Trogemann, Georg (2014): Synthese von Maschine und Biologie: Organische Maschinen und die Mechanisierung des Lebens. In: Gabriele Gramelsberger (Hg.): Synthesis: Zur Konjunktur eines philosophischen Begriffs in Wissenschaft und Technik. Bielefeld: Transcript-Verl. (VerKörperungen, 20), S. 171–192.

Verne, Jules (2013): Reise um den Mond. Mit den Illustrationen der Originalausgabe. Hamburg: Nikol.

Vollmer, Gerhard (1992): Die Wissenschaft vom Leben - - Das Bild der Biologie in der Öffentlichkeit. In: *Biologie in unserer Zeit* 22 (3), S. 143–150. DOI: 10.1002/biuz.19920220319.

Wurche, Bettina (2018): Astromykologie: Der Pilz-Godzilla aus der Eifel und der Sporen-Antrieb der USS „Discovery". Online verfügbar unter https://www.torial.com/en/bettina.wurche/portfolio/308497, zuletzt aktualisiert am 15.03.2018, zuletzt geprüft am 19.08.2020.

Xi, Jianzhong; Schmidt, Jacob J.; Montemagno, Carlo D. (2005): Self-assembled microdevices driven by muscle. In: *Nature materials* 4 (2), S. 180–184. DOI: 10.1038/nmat1308.

5 Biotheorie und Bioparodie – Zur Transformation literarischer und biologischer Gattungen[1]

Alfred Nordmann, Technische Universität Darmstadt
Janine Gondolf, Technische Universität Darmstadt

Die Transformation der Biologie kann beschrieben werden als ein Wechsel von einem Register zum anderen, vielleicht auch als ein Hin und Her zwischen Registern – in heutiger Zeit wäre das wohl der Wechsel vom Register der Theoriebildung und Hypothesenprüfung in das Register der Konstruktion und des Aufbaus biologischer Komplexität. Oder: vom Register der Evolutionstheorie in das Register des Designdenkens. Nun ist die Rede von unterschiedlichen Registern aus dem Orgelspiel abgeleitet. Warum nicht einen Schritt weitergehen und sich an unterschiedlichen Genres orientieren – Chronik oder Roman, Essay oder Komödie, Tragödie oder Parodie? Die Transformation von einer literarischen Gattung zur anderen entspräche der Transformation von einem Modus biologischer Forschung zu einer anderen, wobei jeder Modus die Welt anders konturiert. So entstand der folgende Aufsatz. Er nimmt seinen Ausgangspunkt in der biologischen Formenwelt, was sie naturphilosophisch und technisch bedeutet – bei Morphologie und Fossilienkunde, bei Biomimetik.

Vorbild und Nachbildung

Wo Apparaten, Maschinen und Verfahren eine funktionale Ähnlichkeit mit Vorgängen aus der Natur zugeschrieben wird, ist gerne von »biomimetisch« oder »bioinspiriert« die Rede. Der Bezug auf das biologische Vorbild soll die Effizienz, Naturnähe, Resilienz technischer Systeme verbürgen. Diese vermeintliche Patenschaft der Biologie ist jedoch irreführend, insofern sie zwar ein klassisches Abbildungsverhältnis von natürlichem Original und technischer Kopie suggeriert, dies aber weder einlösen kann noch sollte. Vielmehr geht es um den technischen Nachvollzug eines aus dem biologischen Zusammenhang isolierbaren Wirkmechanismus in einem biologiefremden Kontext.[2]

---

[1] Diese Ausarbeitung entstand im Zusammenhang des SUSPHIRE Projekts. In dem Projekt geht es um Pflanzen, die Pheromone emittieren sollen. Den zugrundeliegenden proof of concept hierfür lieferte ein iGEM Projekt, das passenderweise »sexy plants« hieß. Im Idealfall locken die gentechnisch veränderten Pflanzen bestimmte Schädlinge an und lenken sie davon ab, die Nutzpflanzen zu schädigen, für die sie sich eigentlich interessieren. SUSPHIRE wird durch das Horizon 2020 Forschungs- und Innovationsprogram der Europäischen Union gefördert unter dem Grant Agreement 722361. – Eine englischsprachige Vorfassung dieses Aufsatzes soll in Perspectives on Science erscheinen.

[2] Wo hier und im folgenden „Nachvollzug“ steht, wäre auf Englisch von „re-enactment“ die Rede. Es geht also nicht um den rein intellektuellen Nachvollzug, sondern um die Wiederholung eines praktischen Vollzugs, um ein Nachstellen, Nachbilden, Nachempfinden, Nachmachen

Dieser Nachvollzug folgt den Kompositionsprinzipien, Parametern, Anforderungen nicht des Ursprungs- sondern des Anwendungszusammenhangs. Dabei erweist sich die Neuinszenierung der ehemals biologischen Funktion in gewissem Sinne als eine Parodie des vermeintlichen Originals.

Im buchstäblichen Sinne handelt es sich hier um Re-Produktionen als Nach- oder Neu-Bildungen, die gar nicht erst nach ihrem Wahrheits- oder Abbildungsgehalt beurteilt werden können, sondern wie eine Parodie nach ihrer Effektivität und Treffsicherheit oder Schlagkraft zu bewerten sind. Durch diese Übertragungsleistung zwischen den unterschiedlichen Kontexten generieren die Parodien einen heuristischen Mehrwert für die Designprozesse und einen spezifischen Erkenntnisgewinn. Dieser Beitrag erprobt auf experimentellem Wege das Vokabular, mit dem diese parodistischen Qualitäten der Biotechnologie, einschließlich der Genom-Editierung oder der Synthetischen Biologie, erfasst, beschrieben und gewürdigt werden können.[3]

Fossile Wissenschaftsgeschichten

Auf den ersten Blick sind Fossilien schlicht und einfach Steine, deren Spuren eine frappierende Ähnlichkeit mit den Formen vertrauter, lebender Organismen aufweisen. Diese Ähnlichkeit bezeugt zunächst, dass das Formvokabular der göttlichen Schöpfe eine Fülle von verwandten Formen enthält, die hier und dort und immer wieder aufzufinden sind. So bezeugt diese Ähnlichkeit aber auch die Einzelheit und Besonderheit jedes Einzeldings, das gewissermaßen die Signatur seines Schöpfers trägt, sei es eine Steinformation, sei es eine organische Form. Insofern Fossilien auch als Relikte ausgestorbener Arten aufgefasst wurden, bedeutet ihre jeweilige formale Integrität die einzigartige enge Verkoppelung von Struktur und Funktion als Ausdruck schöpferischer Intention – was als die »designfulness« aller Lebewesen ausgelegt wurde, die sich noch in den Fossilien manifestiert (Rudwick 1976, besonders S. 202 f.).

Diese vor-Darwinschen Schöpfungsgeschichten haben auch heute wenig von ihrem ursprünglichen Charme eingebüßt. Sie fügten sich in die sogenannten »arguments from design«, die darin bestehen, geologische und biologische Befunde darum auf einen Schöpfer zurückzuführen, weil jeder einzelne Organismus absichtsvoll gestaltet zu sein scheint – also ein Designprodukt ist. Inzwischen wurde eine Vielfalt von Schöpfungsgeschichten durch ein anderes Narrativ ersetzt, das als Abstammungslehre alle jemals existierenden Organismen auf einen gemeinsamen Vorfahren zurückführt. Auch dieses evolutionsbiologische Narrativ gibt es in unterschiedlichen Ausführungen: Einige

[3] Das Genre der Parodie lebt bekanntermaßen von einer Überzeichnung, die dem bereits Bekannten etwas Neues abgewinnen kann. Dies stellt sich für unterschiedliche Biotechnologien gewiss unterschiedlich dar. Einschränkend sei daher hervorgehoben, dass es hier vornehmlich um Biotechnologien geht, die eine biologisch vorgefundene Funktion herauspräparieren und in einen technischen Zusammenhang übertragen.

privilegieren die Mechanismen der natürlichen Auslese, andere heben morphogenetische Organisationsprinzipien hervor, einige setzen vor allem auf Anpassungen, andere auf genetische Variabilität, einige beharren auf nahtloser Kontinuität, andere lassen katastrophisches Massenaussterben und explosionsartige Entstehungsereignisse zu. Und doch sind all diese Narrative Spielarten einer darwinistischen Evolutionsbiologie, die allen Designtheorien ein Ende bereitet.[4] Wir schätzen sie als glaubhafter und »wissenschaftlicher« ein, weil sie von der Konstanz der Natur ausgehen, und allgemeine Mechanismen unterstellen (Nordmann 2000).

Nun ist der Darwinismus, einschließlich seiner Spielarten des »evo-devo« oder der Epigenetik, offenbar nicht das letzte Wort – schon gar nicht, wenn manchen Propagandisten der Synthetischen Biologie geglaubt werden darf, die von einem bloßen »Darwinschen Zwischenspiel« sprechen, um dann das Design aus der Schublade zu holen und für die Zukunft auf neue Weise »designerful« Organismen in Aussicht zu stellen (Dyson 2007). Aber auch die weniger verstiegene, gut etablierte biotechnologische Forschung bedient sich gerne der Sprache des Design, wenn von Editierung und Modularisierung die Rede ist und wenn der Design-Cycle eine Forschungsheuristik für die Optimierung funktionaler Eigenschaften darstellt. Und ähnlich den visionären Fantasien eines Freeman Dyson, durchbricht auch die Biotechnologie den engen Entwicklungspfad der biologischen Vererbung mit Variabilität und Auslese, implementiert stattdessen laterale Genübertragung. Die Sprache und Methodik des Design tritt somit wieder in den Vordergrund, insbesondere wenn am Computer Konstruktionspläne für genetische Schaltkreise entwickelt werden oder wenn auf kontrollierte Weise biologische Komplexität erzeugt wird (Nordmann 2014).

Die Wissenschaftsgeschichte der Biologie umfasst (bisher?) die drei skizzierten Ansätze des Denkens und Sprechens über die Entstehung und Bedeutung biologischer Formen. Einigkeit herrscht, dass im Wissenschaftlichen die Schöpfungsgeschichten abgelöst wurden und dass die darwinistischen und biotechnologischen Ansätze derzeit irgendwie friedvoll koexistieren. Dabei gerät in Vergessenheit, wie scharf diese Narrative voneinander unterschieden sind, dass Evolution und Design immer gegensätzlich sind. Dieser Antagonismus ist fast klassisch kennzeichnend für die Begegnung schöpfungsgeschichtlicher und darwinistischer Ansätze, ist aber auch eigentümlich problematisch für das Verhältnis darwinistischer und biotechnologischer Forschung. Eine weitere wichtige Unterscheidung fasst die schöpfungs- und evolutionsgeschichtlichen Ansätze zusammen und konfrontiert sie mit der Biotechnologie:

---

[4] Sie sind nicht nur in dem Sinne darwinistisch wie alle Psychotherapien freudianisch sind – auch wenn sie sie sich gegen die Psychoanalyse positionieren. Darwinistisch sind sie, insofern sie einem Grundgedanken Darwins entsprechen. Darwin wollte nur etablieren, dass der Mechanismus der natürlichen Auslese hinreichend ist, um die Evolutionsgeschichte naturalistisch zu rekonstruieren. Damit schloss er dezidiert nicht aus, dass es auch andere Prozesse geben könnte, die kausalen Einfluss auf das Evolutionsgeschehen haben (Nordmann 1992, 1994; Tamborini 2020).

Auch, wenn alle drei hierzu völlig unterschiedlicher Auffassung sind, geht es ersteren beiden jeweils um die wahre Theorie und die beste Beschreibung der biologischen Entwicklungen und Lebewesen, während es letzterer um die Konstruktion von Systemen geht, die aus der Biologie abgeleitete Funktionalitäten aufweisen. Bezüglich ihres Erkenntnisgegenstands unterscheiden sich schließlich alle drei: Die Schöpfungsgeschichten sehen Akte der Willkür und Launen der Natur, außergewöhnliche Besonderheiten, die darwinistischen Ansätze sehen Durchschnittswesen und deren Eigenschaften, die Biotechnologie schließlich die Leistungen und Möglichkeiten biomolekularer Systeme (Bensaude-Vincent 2011).

Um das Spannungsfeld zwischen Biologie als Naturgeschichte, als theoretische Wissenschaft, als biotechnologische Forschung auszuloten, werden aus dieser Gemengelage heraus »Biomimesis« oder »Nachahmung der Natur« in den Blick genommen. Dieser Versuch – im wahrsten Sinne des Wortes ein Essay – orientiert sich an wissenschaftsphilosophischen Modellbegriffen, erzähltheoretischen Gattungsbegriffen und an so weit auseinanderliegenden Kommentatoren wie Gotthold Ephraim Lessing, Theodor Dobzhansky und Karl Marx.

Weisen des Nachvollzugs

Egal ob von »biomimetisch« oder »bioinspiriert« die Rede ist, steckt darin doch etwas Paradoxes, zumindest eine ungelöste Spannung. Denn jede Form des Biomimetischen spricht gleichermaßen für und gegen eine vermeintliche Urheberschaft der Natur. So basiert Biomimetik auf der Annahme, dass technisch mustergültige Strategien das Ergebnis der Evolution sind. Dabei muss aber im selben Atemzug mitgesagt werden, dass diese technischen Strategien auch außerhalb ihres biologischen Kontextes funktionieren und für ihre Existenz gar keine Evolutionsgeschichte voraussetzen dürfen oder können. Im Rückblick auf das »Original« ergibt sich eine demütige Anerkennung von Variation, Auslese, Anpassung und deren Beitrag zur Entwicklung der Organismen in ihrer Umgebung. Dagegen manifestiert sich im Ausblick auf das bioinspirierte technologische Produkt eine selbstsichere Aneignung, wonach Mechanismen unabhängig von ihrem ursprünglichen Kontext isoliert, modularisiert und produziert werden können. Zum Beispiel: Im Rückspiegel sehen wir den Biorhythmus, vorausschauend den Repressilator.

Hierbei bezieht sich »Mimesis« nicht auf Ähnlichkeit, Nachahmung oder formale Analogie, sondern auf die Nachbildung, den Nachvollzug in einem anderen Kontext. Es wird dabei etwas Inspirierendes wiederholt, rekapituliert oder nachgestellt, schlussendlich etwas nachvollzogen, was erfolgreich bereits vorvollzogen wird – mit anderen Mitteln, in einem anderen Medium und mit anderen, eigenen Zielen. Erst wird ein dynamischer Vorgang in seinem naturhistorischen Zusammenhang aufgefunden und isoliert. Bereits die Entscheidung, ihn zu wiederholen oder nachzustellen, erweist die Wiederholung als

eine eigenständige Darbietung und technische Leistung. Diese Darbietung »folgt« nicht etwa der ursprünglichen Dynamik, sondern greift sie auf, überträgt sie und passt sie an das spezifische Genre oder die Kompositionsregeln an, die alleine für diese Art und Weise der Darbietung gelten – mit dem Nachvollzug verschiebt sich ein dynamischer Vorgang von einem Register in ein anderes, zum Beispiel von der Naturgeschichte in die Elektrotechnik. Und darin liegt auch das eigentliche Ziel und der heuristische Wert der Übertragung eines Vorgangs von einem Zusammenhang in einen ganz anderen – einer Konturierung und Analogiebildung nicht sprachlich oder begrifflich, sondern durch Konstruktion der materiellen Ähnlichkeit von etwas zunächst Unähnlichem.

Wer sich etwas in der Geschichte der ästhetischen Theorie auskennt, wird mit der Vorstellung unterschiedlicher, genrespezifischer Register durchaus vertraut sein. Sie geht zurück auf das 18. Jahrhundert und Gotthold Ephraim Lessings Laokoon – Über die Grenzen der Poesie und Malerei (Lessing 1994). Darin findet sich ein Vergleich der Darstellungen vom Tod des Laokoon in der Dichtung und einer vielbewunderten und oft kopierten Skulptur (das Original findet sich im Vatikanischen Museum). Im dichterischen Nachvollzug vollzieht sich Laokoons Tod in einem zeitlichen Verlauf, der Laokoon Zeit gibt, sein Schicksal zu beklagen und seinen Schmerz lautstark auszudrücken. Dagegen muss der skulpturale Nachvollzug einen einzigen prägnanten Augenblick festhalten, der es den Betrachtern ermöglicht, an der Ausbreitung des Schmerzes, am Eintreten des Todes teilzunehmen. Die dichterische und die skulpturale Darbietung widersprechen sich nun aber nicht, auch wenn die eine den Schmerz Laokoons zur Schau stellt und die andere ihn gewissermaßen sublimiert. Es handelt sich um zwei Genres des Nachvollzugs, von denen jedes seinen eigenen Kompositionsregeln folgt, jedes bestimmte Aspekte von Laokoons Schicksal konturiert, jedes einen Einstiegspunkt bietet, der es Hörern oder Betrachtern ermöglicht mitzugehen und an dem unausweichlich tödlichen Verlauf teilzunehmen. Der heuristische Wert und die Wirkmacht des Gedichts und der Skulptur liegen nicht in der Anlehnung an ein historisches oder mythisches Ereignis, sondern in der Verschiebung des Registers mit seiner jeweils spezifischen Kunst des Nachvollzugs von Tod und Sterben.

Evolution und Design

In Bezug auf Biomimesis führen diesen allgemeinen Überlegungen auf einen Standpunkt, von dem her diverse Genres des Nachvollzugs biologischer Prozesse unterschieden werden können – was ihnen gemäß ist, was sie konturieren und als wirksam auszeichnen. Dies bedeutet weiterhin, dass aus dem Modus technologischen Handelns keine theoretische Beschreibung oder wissenschaftliche Repräsentation eines biologischen Vorbilds hervorgeht, vielmehr eine Parodie, vielleicht eine Posse oder Farce, – wobei aus der so entstehenden Diskrepanz zum »Original der Natur« andere Möglichkeiten und Einsichten gewonnen werden.

Das Beispiel von Lessings Laokoon kann uns sehen helfen, inwiefern der Wechsel des Registers von theoretischer Rekonstruktion zu technologischer Aktion einer Genre-Verschiebung entspricht. Jedes historische Ereignis – sei es eine Rebellion oder ein Zusammenschluss oder eine politische Reform – resultiert aus dem Zusammenwirken einer Vielzahl von historischen Akteuren. Jedes dieser Ereignisse kann nun beispielsweise in Form einer mehr oder weniger neutralen Chronik aufgeschrieben werden, aber es kann auch Gegenstand eines Spiel- oder Dokumentarfilms werden, lässt sich als Tragödie oder Komödie dramatisieren - wobei jede Art, das Ereignis aufzugreifen, andere Haltungen, Zugänge und Einsichten hervorruft. Wenn Charlie Chaplin oder Billy Wilder oder Taika Waititi vor großem Kinopublikum den »großen Diktator« nachbilden geht es nicht um die Erzählung einer Geschichte, sondern eine parodistische Maschinerie oder Dramaturgie, die episodische Elemente aufgreift und wirksam einsetzt.

Wenn also Bio-Engineering kein treues Abbild, sondern eine freie Parodie der biologischen Welt produziert, dient dies der Hervorhebung oder Konturierung eines funktionalen Zusammenhangs, eines Merkmals oder einer Perspektive. Wie ein Modell oder eine Erklärung in der Sprache der biologischen Theorien, hat auch die Parodie in der Sprache der Biotechnik eine biologische Tatsache zum Gegenstand – aber die Parodie zielt nicht darauf ab, diese Tatsache zu erklären oder ihr einen Sinn zu geben, sondern sie auszustellen, einem prüfenden Blick preiszugeben.

Als Theodosius Dobzhansky 1964 die berühmte Bemerkung machte, dass nichts in der Biologie Sinn macht, außer im Lichte der Evolution, dachte er vornehmlich an die kreationistische Design-Alternative, aber nicht an das heutige Design durch Bioengineering. Und doch unterscheidet schon seine nuancierte Bemerkung sorgfältig die Gattungen der biologischen Theorie und des biologischen Designs:

»I venture another, and perhaps equally reckless, generalization – nothing makes sense in biology except in the light of evolution, sub specie evolutionis. If the living world has not arisen from common ancestors by means of an evolutionary process, then the fundamental unity of living things is a hoax and their diversity is a joke.«

»Ich wage eine weitere, vielleicht ebenso waghalsige Verallgemeinerung – nichts macht Sinn in der Biologie außer im Lichte der Evolution, sub specie evolutionis. Wenn die lebende Welt nicht durch einen evolutionären Prozess aus gemeinsamen Vorfahren hervorgegangen ist, dann ist die grundlegende Einheit aller Lebewesen eine Täuschung und ihre Vielfalt ein Witz. (Dobzhansky 1964, S. 449)«

Dobzhansky spricht hier von drei verschiedenen narrativen Gattungen: Erstens gibt es die (Evolutions)theorie, die Sinnstiftung leistet, indem sie ein vereinheitlichendes Erklärungsmuster bietet: Nach einem vor allem adaptionistischen Schema generiert Darwins Theorie beliebig viele Geschichten, die die Naturgeschichte auf ein sinnvolles Grundmuster beziehen (Kitcher 1981). Nie

ist in diesen Geschichten von Zwecksetzungen, willentlichen Schöpfungsakten oder »special creations« die Rede. Die sinnstiftende Verallgemeinerung wird ganz allein von einem durchgängigen Naturalismus geleistet. Konturiert wird hierdurch, dass es wahre Geschichten sein sollen, die den Bezug zwischen dem Schema des evolutionären Mechanismus und der beobachteten Einheit und Vielfalt der Lebewesen verbürgen.

Zweitens gehört zu den Hauptleistungen der Evolution als Theorie, dass sie auch der vorgefundenen biologischen Vielfalt einen Sinn zu geben vermag. Für Darwin ist die Vielfalt das notwendige Material für den Evolutionsprozess – ohne Variabilität und Vervielfältigung von Lebewesen gäbe es keinen Überlebenskampf, kein Aussterben, keine Anpassung, kein Entstehen von Arten. Ohne Evolutionstheorie ist die tatsächlich vorfindbare lebendige Vielfalt des Lebendigen sinnlos oder nur ein Witz. Tatsächlich entspricht dieser einer theistischen Konzeption von Design, für die diese Vielfalt den Überschwang eines geistreichen Schöpfers darstellt, der sich Kängurus, Seepferdchen, Schildkröten und andere außergewöhnliche, separat geschaffene Organismen ausgedacht hat. In die Reihe dieser Fantasieprodukte zählte bisweilen auch der Fossilienbestand, der auch steinerne Formen fiktiver Organismen enthielt – eine spielfreudige Laune der Natur, ein Witz ganz ausdrücklich (sports of nature, lusus naturae). Eine Auffassung, die den launischen Witz eines Schöpfers zu schätzen weiß, konturiert den eigentümlichen Charakter des Phänotyps: Jedes Individuum ist ein kleines Wunder der Natur und lässt sich nicht in eine sinnvolle Darstellung der Welt als Ganzes auflösen. Synthetische Biologie und andere Formen des Bioengineering stellen in gewisser Weise eine säkularisierte Variante hiervon dar, insofern es in ihren Projekten wortwörtlich um Schöpfungsakte geht, die der menschlichen Willkür entspringen. Dobzhanskys Bemerkung trifft besonders genau auf das biotechnologisch visionäre Programm von »de-extinction«, also den Versuch, ausgestorbene Arten zu rekonstituieren. Hierbei geht es um biologische Vielfalt, die ein bloßer Witz wäre, also Organismen mit Merkmalen, denen die Umwelt abhandengekommen ist, in der diese Merkmale Anpassungen waren. Derart wiederhergestellte Organismen wären so etwas wie ein isoliertes Zitat aus einem verlorenen Text, ein Anachronismus ohne Sinnzusammenhang, der die Evolutionsgeschichte ins Lächerliche zieht.[5] Nicht Biodiversität und Vielfalt als ökosystemische Eigenschaft ist das Ziel dieses Programms des Designs, sondern Freude an der technischen Virtuosität, für die jeder biologische Organismus, jedes Merkmal oder jeder Prozess als eine Besonderheit und technische Errungenschaft erscheint.

Drittens ist die gemeinsame Abstammung und die Einheit der Lebewesen eine Art Axiom der darwinistischen Evolutionsbiologie – sie dient als taxonomi-

[5] Der parodistische Aspekt dieses Forschungsprogramms wurde brillant pointiert in dem kurzen Animationsfilm »Reinventing the Dodo« (van Eekele 2013). Auch die Jurassic Park-Filmreihe kann als eine Art reductio ad absurdum des Programms der De-Extinktion aufgefasst werden.

sche Heuristik und organisierendes Prinzip, das die Sammlung und Interpretation von Beweisen leitet. In dem Maße, wie sich die Theorie bestätigt, bestätigt sich auch die gemeinsame Abstammung, der Mechanismus der Variation und Auslese und damit die Einheit der Lebewesen. Diese Einheit ist jedoch erschwindelt und bloß vorgetäuscht, wenn es unumgänglich erscheint, sich auf einen schöpferischen Gott berufen zu müssen, um eine Einheit der Schöpfung aufrechtzuerhalten, die ansonsten nicht erklärbar ist. Aber durch Augenwischerei und Täuschung erkauft ist die Einheit alles Lebendigen auch, wenn die Natur zu einem Ingenieur deklariert wird, wenn sich die Einheit allein der Tatsache ihrer Gemachtheit oder Konstruiertheit verdanken soll. Im Gegensatz zum Witz steht eine Täuschung oder ein Schwindel nicht für sich, sondern in einem Feld vielfältiger Bindungen und Verpflichtungen, erfordert die Konsequenz der Durchführung. So sind Täuschung und Schwindel eben nicht wahrheitsgetreu und brauchen es auch nicht zu sein, weil sie sich dadurch bewähren, dass sie ihre eigene Realität schaffen. Insofern die Täuschung einer eigenen Logik folgt, konturiert sie die Mechanismen und Verfahren ihrer eigenen Konstruktion – legt eine Maschinerie frei, die bestimmte Tatsachen der Welt als Zeugnisse göttlicher Weisheit konturiert oder als Konstruktionsprinzipien einer ingenieurmäßigen Natur. Wenn also mit der Einheit alles Lebendigen ein aus der gemeinsamen Abstammung heraus entwickeltes großes Ganzes gemeint ist, so wird diese Einheit per definitionem durch die Konstruktion xenobiologischer Entitäten zerstört. Die Wiederherstellung dieser Einheit durch den Hinweis auf verwandte Konstruktionsprinzipien konturiert dann wiederum wesentliche Eigenschaften einer Maschinerie, die beliebige genetische Codes in Proteine übersetzt. Diese Einheit ist nun aber nicht mehr durch Abstammungsverhältnisse und historische Bindungen gewährleistet, sondern verdankt sich allein der abstrakten Idee einer Welt des Lebendigen, die sich aus unzähligen technischen Kunststücken ergibt. Einheitlich an dieser Welt ist, dass in ihr wesentlich immer dasselbe passiert, die gleichen Prinzipien überall und immer nur wiederholt werden, hier und da auf Seite des ingenieurmäßigen Konstruierens und auf der Seite der Entwicklung des Lebendigen. Die früheste bekannte Aussage dieses Gedankens findet sich bei Aristoteles, wenn er für die Technik als Nachahmung der Natur argumentiert, indem er hypothetisch den Umkehrschluss zulässt, dass, wenn die Natur ein Haus bauen würde, sie es genauso bauen würde, wie es der Mensch tut (Aristotle 2018, 199a12ff). Wer für die Einheit der Abstammung von »gewachsenen« Organismen und »entworfenen« xenobiologischen Strukturen argumentieren will, muss tatsächlich genauso vorgehen. Jenseits der Bemühung um sinnstiftende Theorien, könnte sich dies als heuristisch produktiv erweisen. Etwa so: Wenn die »Natur« ein Ingenieur ist wie der Mensch, könnten sich ihre technischen Lösungen sub-optimal erweisen. Befreit von der evolutionsgeschichtlichen Vorgabe, können beispielsweise xenobiologische Konstruktionen noch einmal ganz vor vorne anfangen und alles besser machen.

Dobzhanskys »waghalsiger Verallgemeinerung« ist es somit in wenigen Worten gelungen, die spezifische Leistung der auf Wahrheit und Sinn orientierten Evolutionsbiologie mit zwei Ansätzen zu vergleichen, die schöpfungsgeschichtlich oder biotechnologisch einerseits den Witz und die Willkür der »special creation« konturieren und andererseits Konstrukteurs- und Konstruktionsprinzipien des Lebendigen, die nicht an die tatsächliche Naturgeschichte gebunden sind, sondern technische Funktionen auch jenseits der biologischen Anpassung zulassen.

Parodie

Die in der Idee der biomimetischen, bioinspirierten, biotechnischen Ingenieursleistung aufgezeigte Spannung erweist sich nun als das Zusammenfallen oder die Koinzidenz von mindestens zwei Genres des Nachvollzugs. Die unterstellte Urheberschaft der Natur wird im Genre der wissenschaftlichen Theoriebildung bewahrt, das hervorhebt oder konturiert, inwieweit Beschreibungen und Erklärungen der evolutionären Entwicklung entsprechen. Das Genre des biotechnologischen Designs unterwandert und parodiert die bloß unterstellte Urheberschaft der Natur, indem es die unerschöpfliche Produktivität isolierbarer Mechanismen konturiert.

Warum aber »Parodie«? Wo Dobzhansky von einer Täuschung oder einem Schwindel spricht, ließe sich auch »Ketzerei« sagen und damit zum Ausdruck bringen, dass sich der biotechnologische Ansatz gegen die evolutionsbiologische Orthdoxie behauptet.[6] Hier auf den am besten passenden Begriff zu beharren, würde bedeuten, der fehlerhaften Annahme verfallen, dass es sich hier tatsächlich nur um zwei Genres und deren Antagonismus handelt. Anzunehmen ist vielmehr, dass wir es in jedem Fall mit einer Familie von Methoden, Annahmen, Zwecken, also auch Weisen des Nachvollzugs zu tun haben.

Für »Parodie« sprechen allenfalls einige Aspekte: Erstens handelt es sich bei ihr um ein Genre des Nachvollzugs nicht anders als dies für Chroniken, Tragödien, Komödien, historisches Dramen, oder die Farce gilt.[7] Zweitens verdeutlicht Parodie, dass »(Bio)mimesis« nicht die einfache nachahmende Ähnlichkeit bis hin zur Ununterscheidbarkeit ist – wie die berühmten gemalten Früchte, die echte Vögel anlocken –, sondern dass das Parodieren ein vereinseitigend konturierender Nachvollzug ist, bzw. eine auf Charakteristisches beschränkte Wiederholung. Drittens erlaubt uns »Parodie«, die resultierende Verfremdung oder Karikatur, um ihre produktive Konturierung zu würdigen, d. h. um den kognitiven Wert der Isolierung, der Umwidmung, der einseitigen

---

6 Diese Anregung verdanken wir Hanna Worliczek aus der Diskussion in einem Seminar des Biological Engineering Collaboratory am 25. November 2020, siehe www.bioengcoll.org/bec-seminars-2020.htm (Zugriff am 27. Dezember 2020).

7 Im Gegensatz zu »Chronik« wirft »Parodie« die Frage nach der Form auf. In der Tat hat jedes Genre – hier definiert als Konturierungsstrategie – eine Formtendenz, selektiert nach Form, bzw. dient als formatives Prinzip, das »Fakten« oder »modularisierte Funktionen« und andere elementare Formen aufgreift.

Übertreibung. Schließlich eröffnet die implizite parodistische Distanzierung von einem nicht als heilig angenommenem Original jene Freiheitsgrade, die dort fehlen, wo eine wahrheitsgetreue Darstellung ihrem »Original« verpflichtet bleibt. In der Tat ergeben sich diese Freiheitsgrade erst dann, wenn etwas für merkwürdig befunden, gar ausgelacht werden kann: Es bedarf schon eines Sinns für Humor, um beispielsweise Klettverschlüsse als technische Fortführung einer Technik zu sehen, mit der sich Kletten an den Haaren eines Hundes hängen.

In der Parodie erscheint die Kompliziertheit als eine unbeholfene Einfachheit. Ein paar Beispiele müssen ausreichen, um eine Richtung anzudeuten: Was macht zum Beispiel den Repressilator zu einer Parodie des Biorhythmus, und was macht den Klettverschluss zu einer Parodie der Klette? Ein rhythmischer Prozess, der dazu dient, das Innenleben auf die äußere Realität abzustimmen und umgekehrt, wird nun als genetischer Schaltmechanismus dargestellt. Liegt für den Biorhythmus ein dramatisches Geheimnis im Auftreten des richtigen chemischen Auslösers zum richtigen Zeitpunkt, so wird der Auslöser im Repressilator entmystifiziert: Sein Erscheinen oder Nicht-Erscheinen wird willentlich gesteuert, gewissermaßen von einer unsichtbaren Hand hinter den Kulissen. Der für den Biorhythmus entscheidende »richtige Moment« wird zum frei verfügbaren Taschenspielertrick oder besser gesagt zu einer Finte. Eigenwilligkeit ist auch das Markenzeichen des Klettverschlusses, der vielleicht lästigsten aller »biomimetischen« Erfindungen. Anstelle des sanften, hartnäckigen Verhaktseins gibt es beim Klettverschluss das grobe Geräusch eines gewaltsamen heftigen Risses, der nötig ist, um der raffinierten Verbindung ein brachiales Ende zu setzen.

Diese parodistischen Züge des Bioengineering lassen sich auf Vaucansons Ente (Riskin 2003) anwenden, aber auch auf die künstliche Selektion, wie sie im Lichte der natürlichen Selektion erscheint. Künstlich selektiert wird für gewisse Merkmale und gegen andere, wobei eine einseitige Konturierung bestimmter Merkmale gleichermaßen nützlich und dysfunktional sein kann. So werden Hunde gezüchtet, die unglaublich schnell laufen, die sich aber ohne menschliche Hilfe nicht mehr fortpflanzen können. Auch das sehr ernste Geschäft der Genom-Editierung und der Diskussion darum trägt parodistische Züge. Um die Unterscheidung der Genom-Editierung von anderen Formen der Gentechnik aufrechtzuerhalten, wird es als »Präzisionszüchtung« beworben, d. h. als eine kontrollierte Form der Mutagenese, die eine Variation nicht abwartet und selektiert, sondern gezielt induziert. Da die Produkte der Genom-Editierung prinzipiell nicht von den Effekten einer Mutagenese unterschieden werden können, sollen sie gar nicht erst als Gentechnik angesehen werden. Ist dies nun aber eine ernst zu nehmende Behauptung, insbesondere, wenn sie auf den Fall von gewöhnlichen Tieren angewandt wird, die zu Zuchtzwecken die genetischen Merkmale elitärer Spendertieren in sich tragen? Obwohl das betreffende Tier gentechnisch verändert wurde, seien die Nachkom-

men unbefleckt, denn »die Spende stammt von einem Donor, an dessen genetischem Code nicht herumgebastelt wurde« (Grover 2020).[8] Ergibt sich aus der Ununterscheidbarkeit der Resultate von Genom-Editierung und Mutagenese auch die Ununterscheidbarkeit von gezielten Gestaltungseingriffen und der traditionellen Praxis der Züchtung? Während die gezielten Eingriffe Präzisionskontrolle beanspruchen, integriert Züchtungspraxis immer auch den Zufall, die Geschichte, die Abweichung in den Gestaltungsprozess. Hier, so ließe sich sagen, münden die Argumente der Verteidiger der Genom-Editierung als Präzisionszüchtung in einer Parodie und Verharmlosung eben jenes ingenieurmäßigen Kontrollanspruchs, für den sie sprechen (Gondolf 2021).

Eine neue Sprache

Das ursprüngliche Paradoxon der biomimetischen, bioinspirierten oder allgemein biotechnischen Innovation hat sich nun verschoben: Einerseits verfügt die Biotechnologie über extrem leistungsfähige Werkzeuge, mit denen hochgradig künstliche Dinge vollbracht werden können, wie z. B. aus Organismen stammende Zellen, die die Funktionen einfacher Computer ausführen. Gleichzeitig und auf der anderen Seite versucht sie, sich hinter einer konstruierten Urheberschaft der Natur zu verstecken, die wiederum als Ingenieur konzipiert ist und so als Schwindel oder Vortäuschung entlarvt werden kann.

Obwohl sie damit beschäftigt ist, die Dinge umzuwälzen, noch nicht Dagewesenes zu schaffen, behauptet die Biotechnologie von sich, nur zu wiederholen, wofür die Evolutionsgeschichte Vorbilder liefert – und wir sahen schon, welch hoher Preis für diese Behauptung sie bezahlen muss. Sie folgt damit einem Muster, das in einer berühmten Passage von Karl Marx beschrieben wird. Marx notiert:

»Hegel bemerkte irgendwo, daß alle großen weltgeschichtlichen Tatsachen und Personen sich sozusagen zweimal ereignen. Er hat vergessen, hinzuzufügen: das eine Mal als Tragödie, das andere Mal als Farce. Die Menschen machen ihre eigene Geschichte, aber sie machen sie nicht aus freien Stücken, nicht unter selbstgewählten, sondern unter unmittelbar vorgefundenen, gegebenen und überlieferten Umständen. Die Tradition aller toten Geschlechter lastet wie ein Alp auf dem Gehirne der Lebenden. Und wenn sie eben damit

[8] »Manchmal … wird nicht gewürdigt, dass wir seit wahrscheinlich 10.000 Jahren Tiere züchten – seit der Domestizierung von Nutztieren […] Sie kombinierten genetisches Material durch künstliche Befruchtung und konstruierten so ein Genom, das sich möglicherweise nicht allein durch normale natürliche Selektion entwickelt hätte … wir tun es nur auf eine präzisere und effizientere Weise« (Jon Oatley quoted in Grover 2020). Die Vorstellung, dass ein gewöhnliches Stubenhockerschwein die unverfälschten Gene eines veritablen Zuchttieres vererbt, hat freilich sowohl etwas Komisches als auch Besorgniserregendes: In Anbetracht dieser Vorstellung und zumindest zum Zwecke der Partnerwahl sind wir nun alle sexuell verwirrt, nicht unähnlich dem Schädling, der versucht, sich mit einer Pflanze zu verbinden, die die Pheromone der Insektenart des Schädlings verströmt.

beschäftigt scheinen, sich und die Dinge umzuwälzen, noch nicht Dagewesenes zu schaffen, gerade in solchen Epochen revolutionärer Krise beschwören sie ängstlich die Geister der Vergangenheit zu ihrem Dienste herauf, entlehnen ihnen Namen, Schlachtparole, Kostüm, um in dieser altehrwürdigen Verkleidung und mit dieser erborgten Sprache die neuen Weltgeschichtsszene aufzuführen. So maskierte sich Luther als Apostel Paulus, die Revolution von 1789-1814 drapierte sich abwechselnd als römische Republik und als römisches Kaisertum, und die Revolution von 1848 wußte nichts Besseres zu tun, als hier 1789, dort die revolutionäre Überlieferung von 1793-1795 zu parodieren.« (Marx 1885, S. 7)

Hieran anschließend zeigt Marx einen Ausweg aus dieser Situation für politische und wohl auch für biotechnologische Revolutionäre. Sein Vorschlag klingt insofern einfach, als er lediglich in der Aufforderung besteht, eine eigene Sprache zu finden. Sie soll nicht dem Nachvollzug, sondern der Neuerfindung dienen und deshalb nicht aus einem anderen Feld entliehen sein, sondern eine Sprache für bisher Unerhörtes:

»So übersetzt der Anfänger, der eine neue Sprache erlernt hat, sie immer zurück in seine Muttersprache, aber den Geist der neuen Sprache hat er sich nur angeeignet und frei in ihr zu produzieren vermag er nur, sobald er sich ohne Rückerinnerung in ihr bewegt und die ihm angestammte Sprache in ihr vergisst.« (Marx 1885, S. 7)

Auf die Biotechnologie bezogen wäre dies ein Appell für intellektuelle Ehrlichkeit, nämlich deutlich zu sagen, dass eine biologische Funktion in einem technischen Zusammenhang nichts mehr mit Biologie zu tun hat, dass die Pointe beispielsweise der synthetischen Biologie darin besteht, biologische Funktionen gänzlich aus der Naturgeschichte herauszulösen und in einem ganz anderen Feld nach einer ganz anderen Logik nachzubilden.

Eine weitere literarische Analogie hilft, diesen Punkt noch zu verdeutlichen. Viele zeitgenössische Inszenierungen der Theaterstücke von William Shakespeare beziehen sich auf sie als eine Art »Vorbild«, als ein Idol oder Modell, das es zu erfassen oder nachzuahmen gilt, während sie ein »Nachbild« oder eine zeitgenössische Version produzieren. Vielleicht wird in modernen Kostümen gespielt, aber es soll doch immer noch »Shakespeare« sein, was da gespielt wird – und oft genug resultieren diese Nachstellungen in eine Parodie oder Farce. Warum ist es so wichtig, fragen andere Regisseure, dass eine zeitgenössische Inszenierung in zeitgenössischen Kostümen mit einer modernisierten Sprache etwas vermittelt, das erkennbar immer noch »Shakespeare« ist? Sind die Handlungen und Worte von Shakespeares Stücken – ebenso wie biologisch entstandene Prozesse und Entitäten – nicht gut genug, um als Bausteine zu dienen, etwas »noch nicht Dagewesenes zu schaffen«?

Sicherlich, sobald die Biotechnologie lernt, eine unbefangenere Sprache des Designs zu sprechen, die sich nicht auf Bilder der Natur und Ideen des Natürlichen bezieht, werden Philosophen wie wir die ersten sein, die ihr technowissenschaftlichen Gestaltungsoptimismus und Hochmut vorwerfen, also auch

einen entsprechenden Mangel an Demut angesichts biologischer Komplexität und historischer Kontingenz. In einer sehr altmodischen, vielleicht zutiefst anachronistischen Weise werden wir den Untergang des darwinistischen Evolutionsdenkens beklagen. Und doch können dieses Klagelied und diese Debatte überhaupt erst stattfinden, wenn die sogenannte biomimetische oder bioinspirierte Technik aus ihrer paradoxen Zwangslage herauskommt und zu einer klaren Sprache findet.

Literaturverzeichnis

Aristotle (2018): Physics. : Hackett. Cambridge: Hackett.

Bensaude-Vincent, Bernadette; Loeve, Sacha; Nordmann, Alfred; Schwarz, Astrid (2011): Matters of Interest: The Objects of Research in Science and Technoscience. In: *Journal for General Philosophy of Science* 42, S. 365–383.

Dobzhansky, Theodosius (1964): Biology, Molecular and Organismic. In: *American Zoologist* (4), S. 443–452.

Dyson, Freeman (2007): Our Biotech Future. The New York Review of Books 54:12 (July 19), www.nybooks.com/articles/2007/07/19/our-biotech-future/ (accessed December 27, 2020). In: *The New York Review of Books* 54 (12). Online verfügbar unter www.nybooks.com/articles/2007/07/19/our-biotech-future/, zuletzt geprüft am 22.02.2021.

Gondolf, Janine; Nordmann, Alfred: Provenance Assessment - Valuing the Process and Outcomes of Research. in Vorbereitung.

Grover, Natalie (2020): 'Surrogate sires' could create specially bred livestock, say scientists. The Guardian. Online verfügbar unter https://www.theguardian.com/science/2020/sep/14/surrogate-sires-could-create-specially-bred-livestock-say-scientists, zuletzt geprüft am 15.02.2020.

Kitcher, Philip (1981): Explanatory Unification. In: *Philosophy of Science* 48 (4), S. 507–531.

Lessing, Gotthold Ephraim (1994): Laokoon. Oder: Über die Grenzen der Malerei und Poesie. Stuttgart: Reclam.

Marx, Karl (1885): Der achtzehnte Brumaire des Louis Bonaparte. 3. Aufl.: Otto Meißner. Online verfügbar unter http://resolver.staatsbibliothek-berlin.de/SBB00002A7800000000, zuletzt geprüft am 1502.2021.

Nordmann, Alfred (1992): Darwinians at War: Bateson's Place in Histories of Darwinism. In: *Synthese* 91 (1-2), S. 53–72.

Nordmann, Alfred (1994): The Evolutionary Analysis: Apparent Error, Certified Belief, and the Defects of Asymmetry. In: *Perspectives on Science* (2), S. 131–175.

Nordmann, Alfred (2000): Blinded to History? Science and the Constancy of Nature. In: Martin Carrier, Gerald Massey, Ruetsche und laura (Hg.): Science at Century's End: Philosophical Questions on the Progress and Limits of Science. Pittsburgh and Konstanz: University of Pittsburgh Press/Universitätsverlag Konstanz, S. 150–178.

Nordmann, Alfred (2014): Synthetic Biology at the Limits of Science. In: Bernd Giese, Christian Pade, Henning Wigger und Arnim von Gleich (Hg.): Synthetic Biology: Character and Impact. Berlin: Berlin: Springer, S. 31–58.

Riskin, Jessica (2003): The defecating duck, or, the ambiguous origins of artificial life. In: *Critical Inquiry* 29 (4), S. 599–633.

Rudwick, M. J. S. (1976): The Meaning of Fossils: Episodes in the History of Paleontology. Chicago and London: University of Chicago Press.

Tamborini, Marco (2020): Challenging the Adaptationist Paradigm: Morphogenesis, Constraints, and Constructions. In: *Journal of the History of Biology* 53 (2), S. 269–294.

van Eekele, Steven (2013): Reinventing the Dodo," short film, Biofiction Science Art Film Festival Vienna 2014. Bio Fiction. Online verfügbar unter https://bio-fiction.com/wp-content/uploads/2018/07/FILM-BROCHURE-Biofiction.pdf, zuletzt geprüft am 15.02.2021.

6 Evolution und Entwicklung – universelle Konzepte?

Ulrich Krohs, Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Einleitung

Bionik überträgt Ergebnisse biologisch-evolutionärer Formgebung in den Bereich der Technik. Resultate adaptiver Evolutionsprozesse dienen somit als Anregung oder Vorbild für technische Innovationen. So finden sich bionische Statik im Leichtbau, bionische Dynamik in Fluggeräten, und bionische Oberflächen mit bestimmten Eigenschaften bei Beschichtungen mit Lotuseffekt (Nachtigall 2002).

Jedoch sind nicht alle technisch erstrebten Funktionen biologisch realisiert. Die Frage nach einer biologischen Technik (Marzi 2018) bleibt deshalb nicht bei der Fruchtbarmachung vorfindlicher Evolutionsprodukte stehen. Wenn die Resultate evolutionärer Prozesse gute Vorlagen für technische Artefakte darstellen, sollten dann nicht auch die Evolutionsprozesse selbst brauchbare Vorlagen für technische Konstruktions- und Entwicklungsprozesse bieten? Sollte nicht die Imitation eines Evolutionsprozesses in einem Prozess technischer Konstruktion zu einem guten Resultat führen können und eine Struktur (im Folgenden »Form« genannt) hervorbringen können, welche die gewünschte Funktion erfüllen kann, unabhängig davon, ob diese jemals in einem biologischen Adaptationsprozess hervorgebracht wurde?

Um bezüglich Funktionen, die in der belebten Natur nicht vorfindlich sind, von einem evolutionären Entwicklungsweg profitieren zu können, kann ein Evolutionsprozess technisch nachgebildet werden. Meist wird Evolution dabei als Iteration von Schritten der zufälligen Modifikation und der Selektion verstanden, verbunden mit einem Kopier-, Vererbungs- bzw. Retentionsschritt. Ein Konstrukt wird nach einem Zufallsverfahren in ausgewählten Aspekten modifiziert und die Resultate der Variation hinsichtlich der zu realisierenden Funktion bewertet. Selektiv werden die besten Ergebnisse weiteren Zyklen von Variation und Selektion unterworfen. Nicht das technische Produkt, sondern der Prozess der Technikentwicklung wird biomimetisch gestaltet.

Beispiele aus unterschiedlichen Bereichen demonstrieren, dass dieser Weg erfolgreich sein kann. Hierzu gehören Untersuchungen zur evolutionären Optimierung der Form einer Zweiphasendüse (Schwefel 1968), zur Evolution neuronaler Netze als Controller von Laufrobotern (Hülse 2004) sowie evolutionäre Ansätze in der Synthetischen Biologie (Bedau 2013). Technikentwicklung geht hier nicht einmal völlig neue Wege, denn die Trennung zwischen einer als rational rekonstruierten Methodik technischen Designs und dem Trial-and-Error-Verfahren der Evolution ist längst nicht so strikt wie häufig angenommen (Morange 2013).

Wege biologischer Formbildung erschöpfen sich jedoch keinesfalls in dem Mechanismus von Variation, Selektion und Retention. Im Folgenden möchte ich ein erweitertes Spektrum biologischer Formbildungsprozesse unter der Perspektive einer möglichen Übertragung auf Prozesse technischer Entwicklung darstellen. Neben evolutionärer Formbildung – der Phylogenese – berücksichtige ich hierbei auch Formbildungsprozesse im Individuum – die Ontogenese (Abschnitt 1). Im Anschluss betrachte ich die Übertragung biologischer Formbildung auf technische Entwicklung und diskutiere die Frage, ob die biomimetische Technikentwicklung die Geltung von Theorien der Evolution auf soziale und technische Systeme voraussetzt (Abschnitt 2). Abschließend untersuche ich die Rollen und die Grenzen der Metaphern der Evolution und der Entwicklung (im Sinne biologischer Ontogenese) im außerbiologischen Bereich (Abschnitt 3).

Biologische[1] Formbildung

Biologische Formbildung findet einerseits in evolutionären Prozessen, andererseits in der Individualentwicklung statt. In diesem Abschnitt stelle ich Mechanismen beider Arten von Formbildung vor, um einen Eindruck von der Vielfalt solcher Mechanismen zu vermitteln und zu zeigen, dass diese Mechanismen dasjenige sind, worauf biomimetische Technikentwicklung zurückgreifen muss. Die übergeordneten Prozesse spielen diesbezüglich keine bedeutende Rolle.

Formbildung in der Evolution

Unter Formbildung in der Evolution wird die Veränderung von Merkmalen, einschließlich der Entstehung neuer Merkmale, und der damit verbundene Funktionswandel[2] verstanden. Seit den Arbeiten von Charles Darwin und – unabhängig davon – Alfred Russel Wallace gegen Mitte des 19. Jahrhunderts verstehen wir, wie die Ausbildung spezialisierter Merkmale von Organismen über eine große Zahl von Generationen grundsätzlich ablaufen kann (Darwin 1858; Wallace 1858): durch eine Kombination zufälliger Variation der Ausprägung von Merkmalen mit einem Selektionsmechanismus, der darauf beruht, dass Organismen, deren Merkmale besser in die Umwelt passen (besserer »fit« des Organismus (Darwin 1988)), statistisch betrachtet mehr überlebende und sich fortpflanzende Nachkommen hervorbringen als weniger gut in die Umwelt passende. Voraussetzung ist dabei, dass sowohl das variierte als auch das nicht variierte Merkmal erblich ist. Nach heutigem Allgemeinverständnis ist die Erblichkeit durch Fixierung der Eigenschaften des Organis-

[1] Ich folge bei der Wahl des Adjektivs dem Sprachgebrauch. Korrekt hieße es »biotische Formbildung«.

[2] Zur Problematik des Begriffs der biologischen Funktion und für eine kurze Darstellung der Standardtheorien vgl.(Wouters 2003; Krohs 2009). Für die Abhängigkeit des Funktionsbegriffs vom jeweils angenommenen biologischen Paradigma vgl. (Krohs 2011).

mus in der DNA-Sequenz als genetischem Material, die Variation durch Mutation, d. h. durch zufällige, aber erbliche Veränderung der DNA-Sequenz realisiert (Graw 2015; Janning 2008; Nordheim et al. 2018). Dieses allgemeine Verständnis von Evolution berücksichtigt jedoch nur einen kleinen Ausschnitt aus dem Spektrum des aktuellen Wissens über evolutionäre Mechanismen. Auch historisch betrachtet stellt es lediglich eine – wichtige – Momentaufnahme des Prozesses der Entwicklung evolutionären Denkens dar. Ich möchte deshalb zumindest einen kleinen Ausschnitt evolutionärer Ansätze darstellen, denn neben dem dargestellten verkürzten Schema können sowohl spezifischere als auch von diesem Schema abweichende Evolutionsmechanismen als Grundlage der Entwicklung evolutionärer Strategien in der Technik dienen.

Der dargestellte Evolutionsmechanismus von Mutation, Selektion und Vererbung bzw. Retention stellt eine genetisch geprägte Variante der Evolutionstheorie dar, die – ausgehend vom Neodarwinismus August Weismanns der 1880er Jahre unter der Bezeichnung »Synthetische Evolutionstheorie« ab den 1940er Jahren entwickelt und gleichsam zum Allgemeinwissen wurde – glänzend bestätigt durch die Aufklärung der DNA-Struktur durch Watson, Crick und Franklin (Watson 1953a; Watson 1953b; Franklin 1953a; Franklin 1953b). Darwin selbst wusste noch nicht viel über die Mechanismen oder gar die materielle Basis der Vererbung und sprach von Variation, nicht von Mutation. Die etwa zeitgleichen Arbeiten von Gregor Mendel zur Vererbung kannte er nicht; die Genetik entstand erst Anfang des 20. Jahrhunderts und die molekulare Ebene der Genetik wurde erst in den 1940er Jahren erreicht.

Darwins Theorie war zwar ein überzeugender, jedoch keinesfalls der erste Versuch, die Vielfalt biologischer Formen durch einen Evolutionsprozess zu erklären. Bevor ich auf neuere Befunde eingehe, möchte ich deshalb zumindest einen Vorgänger erwähnen, dessen Theorie sich dazu eignet, einen wesentlichen Zug erklärungsmächtiger Evolutionstheorien herauszustellen, der diesem frühen Ansatz fehlt. Ich spreche von der Evolutionstheorie Lamarcks. Lamarck ging davon aus, dass der Gebrauch eines Merkmals dieses verändert. Dies ist beispielsweise vom trainierten Muskel oder von der Hornschwiele bekannt; nach Lamarck gilt das aber für alle Merkmale. So verändert sich seiner Auffassung nach der Hals eines Tieres, wenn es diesen immer reckt: Er verlängert sich. Diese erworbene Verlängerung hielt Lamarck für erblich. So könne durch regelmäßiges Recken beim Fressen letztlich der lange Hals der Giraffe entstehen. Die Theorie der Vererbung erworbener Eigenschaften ist noch heute als Lamarckismus bekannt. Übrigens war Darwin von dieser Ansicht in gewisser Hinsicht nicht weit entfernt. Seine heute widerlegte, ohne hinreichende empirische Grundlage entworfene Pangenesis-Theorie der Vererbung, nach welcher der gesamte Körper kleine Erbteilchen, Gemmulae genannt, produziere, die sich in den Keimzellen ansammelten, sollte die Vererbung phänotypischer Eigenschaften des Individuums erklären. Das Merkmal

selbst, dessen Variation er allerdings auf zufällige Streuung, nicht auf den Gebrauch zurückführte, sollte für seine Vererbung selbst sorgen. Eine der Ausprägung zu Grunde liegende Erbsubstanz nahm Darwin noch nicht an.

Lamarcks Evolutionstheorie beruht auf einer weiteren Grundannahme, und diese verwarf Darwin: dass es nämlich eine gerichtete Höherentwicklung der Organismen gebe, eine sogenannte Orthogenese (Lefèvre 2009). Auf diesem Prozess sitzt nach Lamarck die weitere Diversifizierung durch Vererbung erworbener Eigenschaften lediglich auf. Darwin ersetzte die Orthogenese durch die ungerichtete Diversifizierung der Lebensformen, kanalisiert durch umweltbedingte Selektion.

Dieser Zufallsmechanismus musste im viktorianischen England noch skandalöser wirken als eine immerhin mit einem göttlichen Plan verträgliche Orthogenesetheorie (Gayon 1998; Krohs 2006). Weshalb konnte sie sich dennoch durchsetzen? Dies lag wohl an Darwins empirischen Belegen, mit denen er übrigens auch Wallace weit voraus war, und daran, dass er einen plausiblen Mechanismus vorgeschlagen hat, der Evolution hervorbringt. Lamarcks Orthogenesetheorie blieb auf der Stufe einer bloßen Hypothese. Sie stellt ein *ad hoc* entworfenes Modell für die historische Ausbildung biologischer Komplexität dar. Lamarck konnte nicht sagen, wo der Plan für diese Höherentwicklung niedergelegt ist, durch welche Mechanismen er umgesetzt wie er zustande gekommen ist. Darwin hingegen gab den Mechanismus von Variation, Selektion und Retention an, plausibilisierte dessen Wirkung mittels der Analogie zur Tierzüchtung, untermauerte dies durch empirische Befunde beispielsweise der Differenzierung der Form von Vogelschnäbeln. Zusätzlich benötigte er eine Theorie der Vererbung, die die Retention der erfolgreichen Varianten eines Merkmals erklären konnte. Hier schlug er mit der Pangenesistheorie zumindest eine Denkmöglichkeit vor. Auch wenn diese Theorie sich als falsch herausstellte, zeigte sie zumindest, dass der Prozess grundsätzlich einer mechanistischen Betrachtung zugänglich ist. Nichts von dem traf auf Lamarcks Orthogenesetheorie zu. Sie blieb Spekulation, weil sie die Mechanismen schuldig blieb. Darwins Theorie hingegen hatte Erklärungskraft, weil sie nicht nur den Verlauf der Evolution, sondern die Mechanismen angab, die diesen Verlauf hervorbringen.

Ich möchte festhalten und werde noch mehrfach darauf zurückkommen: Die Erklärungskraft einer Evolutionstheorie gründet nicht in Eigenschaften dieser übergeordneten Theorie, sondern in den aufgewiesenen Mechanismen und der Evidenz, die für diese vorgelegt wird. Sie rekonstruiert Evolution als Kausalprozess. Darwins Theorie war derjenigen Lamarcks überlegen, weil sie genau dies leistete.

Gleichwohl werden heute erneut Theorien gerichteter Evolution diskutiert. Ausgangspunkt ist die Beobachtung von evolutionären Trends, die über längere Phasen anhalten, beispielsweise die Zunahme des Körpervolumens der Individuen einer Tierart oder -gattung über geologische Zeiträume oder die

Abnahme des Körpervolumens bei Abwesenheit von Fressfeinden (»Inselverzwergung«). Solche »Evolution on Rails« (Popov 2018) wurde von Lew Berg auf die Wirkung innerer Faktoren des Organismus zurückgeführt (vgl. (Levit 2006)). Das ist jedoch höchst spekulativ; Berg konnte keine geeigneten Mechanismen für eine solche »autonome Orthogenese« angeben. Jedoch können heute empirisch plausible, z. T. recht gut belegte Mechanismen als Grundlage solch gerichteter evolutiver Sequenzen angeführt werden. Zum einen kommt in Frage, dass eine konstante oder auch eine sich stetig in dieselbe Richtung, z. B. zu immer höheren oder geringeren Temperaturen hin ändernde abiotische Umwelt dazu führt, dass sich Modifikationen über einen langen Zeitraum immer dann als günstig erweisen, wenn sie dieselbe Richtung gehen. Zum zweiten können koevolutive Prozesse vorliegen, in denen z. B. die Zunahme der Körpergröße eines Tieres, das so vielleicht einem Fressfeind besser widerstehen kann, zur evolutiven Zunahme der Größe auch des Fressfeinds führt und umgekehrt. Drittens kann die Modifikation der Umwelt durch Organismen ihre Lebensbedingungen verbessern und sofern die modifizierte Umwelt an die Nachkommen weitergegeben, »vererbt« wird wie beispielsweise der Biberdamm, kann auch hier ein evolutionärer Trend etabliert werden, der über lange Zeiträume anhält. Die Merkmale der Organismen passen sich der Modifikation der Umwelt an und ermöglichen zugleich weitergehende Umweltmodifikationen. Dieser Prozess wird als Nischenkonstruktion bezeichnet (Odling-Smee et al. 2011).

Die Orthogenese-Theorie kann somit heute trotz ihrer scheinbaren Unvereinbarkeit mit dem Darwinismus zumindest bestimmte evolutive Situationen erklären. Und auch die Theorie der Vererbung erworbener Eigenschaften erlebt eine Renaissance, und zwar in Form der Epigenetik (Jablonka 2014).[3] Es sind mehrere Formen umweltabhängiger Modifikation der Genexpression bekannt, darunter die Methylierung von Basen in der DNA und die Modifikation der Histone, also der Proteine, an welche die DNA gebunden ist (Gilbert 2010, 46 ff.). Einige dieser Modifikationen scheinen vererbt zu werden, wobei jedoch noch kein Vererbungsmechanismus aufgezeigt werden konnte, denn die DNA wird bei der Bildung der Keimzellen demethyliert und es ist unklar, wie das Methylierungsmuster in der Zygote neu gebildet werden kann. Auch die evolutionäre Rolle epigenetischer Vererbung ist noch nicht hinreichend geklärt. Da sie aber ggf. zu einer generationenübergreifenden Modifikation des Phänotyps führt und somit zu Modifikationen der Passung in die Umwelt, ist zu erwarten, dass sie evolutionär relevant ist (Beispiele hierzu im nächsten Unterabschnitt).

Wir können zunächst festhalten, dass Evolutionstheorien die Modifikation von Merkmalen als intrinsisch oder als extrinsisch und ggf. durch Koevolution gerichtet oder als ungerichtet beschreiben; dass als Quelle der Modifikation

[3] Es mag dahingestellt bleiben, ob es glücklich ist, die epigenetische Vererbung umweltabhängiger Eigenschaften als Lamarckismus zu bezeichnen.

sowohl Umwelteinflüsse als auch interne Prozesse in Frage kommen, und dass neben genetischer Vererbung auch solche über die Umwelt und über epigenetische Mechanismen vorkommen kann.

Mit dem Begriff der Nischenkonstruktion wurde auf eine moderne Form der Evolutionstheorie Bezug genommen, die sich von der im Mechanismus von Mutation und Selektion unterstellten Schrotschuss-Quelle aller evolutionären Veränderung löst. In dieser Strömung der »erweiterten synthetischen Theorie der Evolution«, die im nächsten Unterabschnitt angesprochen wird, wird die These einer einheitlichen Gründung aller evolutionärer Prozesse aufgegeben zugunsten eines pluralistischen Ansatzes, der versucht, die Mechanismen konkreter evolutiver Schritte aufzuklären.

Formbildung in Prozessen biologischer Entwicklung

Augenfälliger als im nur indirekt erschließbaren Evolutionsprozess ist Formbildung in der ontogenetischen Entwicklung, in der Ausbildung eines Organismus mit differenzierten Merkmalen aus einer einzelnen Zelle. Anders als ein Evolutionsprozess sind Entwicklungsprozesse reproduzierbar. Alle Individuen einer Art durchlaufen ähnliche Stadien und bilden ähnliche Formen aus. Dies und die kürzere Zeitskala machen ontogenetische Entwicklung der Beobachtung und dem experimentellen Eingriff leichter zugänglich als phylogenetische. Auch deshalb sind viele Mechanismen der ontogenetischen Formbildung vergleichsweise gut untersucht, was sie für die biomimetische Technikentwicklung interessant machen mag.

Die Mechanismen phylogenetischer und ontogenetischer Formgebung scheinen sich auf den ersten Blick grundlegend zu unterscheiden: Überschuss und Auswahl in der Phylogenese, Umbau und Wiederverwendung in der Ontogenese; zufällige Änderung auf der einen Seite, regelmäßig auftretende, gleichsam programmierte Modifikation auf der anderen; offenes, nicht vorhersagbares Resultat der Evolution, stabile Generierung einer genetisch festgelegten Form selbst bei äußeren Störungen in der Individualentwicklung. Doch diese holzschnittartige Gegenüberstellung verdeckt, dass es unter den evolutionären Mechanismen solche gibt, die dem unterstellten Typus von Entwicklungsmechanismen sehr nahekommen – wie diejenigen evolutionärer Trends oder gar der Orthogenese – und dass umgekehrt manche Entwicklungsmechanismen auf einem evolutionären Trial-and-Error-Mechanismus beruhen. Evolutionsanaloge Prozesse finden sich z. B. bei der Ausdifferenzierung des Immunsystems und bei der Immunantwort in Form der Produktion einer großen Zahl zufällig variierter Antikörper, aus denen die »passenden« selegiert werden (Burnet 1959). Die Ausdifferenzierung des Gehirns umfasst vergleichbare Schritte. Zunächst wird eine Überzahl von Synapsen gebildet, von denen die nicht für die jeweilige Leistung erforderlichen rückgebildet werden ((Ackerman 2010) Chap. 6). Offenheit beim Resultat eines Entwicklungsprozesses ist ebenfalls häufig gegeben. So ist die Form eines Schwammes oder eines Baumes viel weniger bestimmt als diejenige beispielsweise eines Insekts oder eines Säugetiers. Sie hängt in erheblichem Maße von Interaktionen mit

der Umwelt einerseits, von zufälligen Ereignissen während des Entwicklungsprozesses andererseits ab. Jedes Individuum entwickelt sich anders. Das zeigt sich auch daran, dass wir zwar in der Lage sind, den Organismus als einer bestimmten Art zugehörig zu erkennen, nicht aber, seine genaue Form vorherzusagen.

Dies soll nicht heißen, dass nicht grundsätzliche Unterschiede zwischen Phylogenese und Ontogenese bestünden. Ich möchte lediglich den Blick darauf lenken, dass ein Verständnis konkreter phylogenetischer und ontogenetischer Prozesse nur durch Analyse der je spezifischen Mechanismen erlangt werden kann und sich nicht schon aus der Zugehörigkeit zur Ebene der Phylogenese oder der Ontogenese ergibt.

Viele unterschiedliche ontogenetische Mechanismen bringen Form in unmittelbarer Reaktion auf äußere Einflüsse und auf benachbarte Elemente des sich entwickelnden Organismus hervor. Ich spreche im Folgenden einige dieser Mechanismen an. Dies soll deutlich machen, dass es sich lohnt, in der entwicklungsbiologischen Literatur nach Mechanismen zu suchen, die auf technische Prozesse übertragbar sein könnten. Dabei kann sowohl daran gedacht werden, biomorphe Selbstorganisations- und Musterbildungsprozesse zu implementieren als auch daran, für die Optimierungen für bestimmte Kontexte Wechselwirkungen mit der Umgebung nutzbar zu machen.

Ein ontogenetischer Mechanismus, der technisch interessant sein könnte, ist die Strukturierung und Musterbildung mittels Reaktions-Diffusions-Systemen (Turing 1952). Bei einem solchen System liegt ein Diffusionsgradient einer Aktivator- oder Repressor-Substanz vor, die eine autokatalytische Reaktion beeinflusst. Dies kann zur Bildung quasi-periodischer Muster führen, wie sie beispielsweise aus der Belousov-Zhabotinsky-Reaktion im ungerührten zweidimensionalen System bekannt sind (Müller 1985). Solche Systeme können im sich entwickelnden Organismus z. B. Streifenstrukturen induzieren oder die etwa äquidistante Verteilung der Spaltöffnungen auf der Unterseite des Laubblattes bewirken (Gierer 1972; Meinhardt 1982). Auf diese Weise wird auch die Untergliederung der Extremitätenknospe in Fingern reguliert, wobei die Anzahl der Finger von der Größe der Knospe abhängt, da diese bestimmt, wie viele Konzentrationsmaxima des Aktivators sich ausbilden können (Alberch 1981; West 2003; Gilbert 2010).

An diesem Beispiel lässt sich eine Rolle von Entwicklungsmechanismus für evolutionäre Prozesse verdeutlichen. Verschieben sich Entwicklungsschritte zeitlich gegeneinander, kann das Ergebnis des Entwicklungsprozesses sich erheblich ändern. Man spricht von heterochronen Effekten. Wird das Reaktion-Diffusions-System für die Fingerbildung etwas später aufgebaut als üblich, ist die Gliedmaßenknospe bereits etwas größer. So baut sich ggf. ein Aktivierungsmaximum mehr in der Knospe auf und es entsteht eine Hand mit einem zusätzlichen Finger. Diese modifizierte Gliedmaße kann vor- oder nachteilig sein. Sofern die Vorteile überwiegen, kann die Verschiebung der zeitlichen Ordnung der Entwicklungsschritte sekundär auch genetisch fixiert werden,

indem die nicht mehr aktualisierte Möglichkeit der ursprünglichen zeitlichen Ordnung verloren geht (»genetische Adaptation«) (ebd.).

Eine weitere Klasse von Entwicklungsmechanismen sind solche der Induktion durch Kontakt. Die Ausbildung und genaue Lage bestimmter Gewebe wird durch Kontakt mit benachbartem Gewebe oder mit umgebenden Strukturen bestimmt. Bei der Induktion durch Gewebe erfolgt diese häufig durch chemische Signale (Spemann 1924; Gilbert 2010). Die Induktion durch externe Strukturen kann z. B. durch Druck erfolgen. So bildet die Epidermis der Wirbeltiere bei anhaltendem Kontakt Knochen aus. Dieser Mechanismus erlaubt mechanische Verstärkung an beanspruchten Stellen in flexibler Weise, ohne dass solche Stellen zuvor festgelegt sein müssten. (Auch hier kann die Ausbildung des Hautknochens nachträglich durch genetische Adaptation fixiert werden, was vermutlich bei der Ausbildung des Schädels der Wirbeltiere eine Rolle gespielt hat.)

Evolution und Individualentwicklung beruhen nicht nur auf zum Teil einander ähnlichen Mechanismen. Wie die Beispiele zeigen, beeinflussen sie sich auch wechselseitig und umweltinduzierte Veränderungen von Entwicklungsprozessen können Treiber der Evolution sein. Dies modelliert die Evolutionäre Entwicklungsbiologie (Gilbert 2010), die in der erweiterten Synthetischen Theorie der Evolution aufgegangen ist (Sultan 2015; Huneman 2017). In der Literatur dieser Gebiete finden sich deshalb sowohl Beschreibungen zahlreicher weiterer Entwicklungsmechanismen als auch Modelle zu deren Kopplung mit Mechanismen der Evolution.

Übertragungen biologischer Formbildung

Technische Implementierungen biomimetischer Formbildung

Bekannte technische Implementierungen evolutionärer Formbildung übertragen insbesondere die Abfolge von Schritten der zufälligen Variation und der Selektion auf technische Entwicklungsprozesse. Oben erwähnt wurden mittels Selektionsmechanismen optimierte Zweiphasendüsen und neuronale Netze. An diesen Beispielen ist aus biologischer Perspektive genau derjenige Aspekt ungewöhnlich, der für die Technik eine Selbstverständlichkeit darstellt: dass das Optimierungsziel vorgegeben ist. Selegiert wird nach Kriterien der Erfüllung vorgegebener Spezifikationen, die in den genannten Fällen den Wirkungsgrad oder hervorzubringende Bewegungsmuster betreffen mögen. Für die gewünschten Leistungen können, wie die Beispiele zeigen, mittels des evolutionären Mechanismus unerwartete Lösungen gefunden werden. Derart spezifische Vorgaben sind jedoch in der Evolution der Lebewesen kaum je zu finden. Ob ein Organismus in einer bestimmten Umwelt besser überlebt, indem er sich schneller fortbewegt, oder indem er sich besser tarnt, ist offen. Beides wären mögliche Resultate des evolutionären Wandels eines von einem Fressfeind bedrohten Tieres. Jede verbesserte Passung in die Umwelt wird fi-

xiert und ggf. weiter verstärkt, unabhängig davon, auf welche Weise sie hervorgebracht wird. Das Ergebnis der Evolution ist damit typischerweise – mit Ausnahme von Fällen der Orthogenese – offen.

Technische Entwicklung hingegen versucht in der Regel, eine vorgegebene Funktion unter Erfüllung vorgegebener Rahmenbedingungen zu optimieren. Soll der Brennstoffverbrauch eines Motors oder eines Strahltriebwerks minimiert werden, ist die Verkleinerung des Motors mit einer damit verbundenen Verringerung der Leistung häufig keine Option. Die Bewertung ist auf eine zuvor festgelegte Funktion beschränkt. Das Ergebnis der Selektion ist anders als im biologischen Fall nicht offen, sondern vorgegeben und somit auch vorhersagbar. Würde Nicht-Vorhersagbarkeit als Charakteristikum der Evolution gelten, wie beispielsweise in der evolutionären Ökonomik (siehe Kapitel 7), so könnte die technische Realisierung des Selektionsprozesses nicht als Evolution gelten. Vielmehr wäre es ein Prozess umbauender und wiederverwertender Ontogenese. Diese Klassifikation wäre ggf. noch in einer weiteren Hinsicht passend: Anders als im Evolutionsprozess werden in der Technikentwicklung nicht notwendigerweise immer wieder neue Exemplare aus neuem Material hergestellt. Gerade das Beispiel der Düse zeigt, dass modifizierte Wiederverwendung der Komponenten durchaus eine Option ist: Die Düse wird in Scheiben geschnitten und die Abfolge immer derselben Scheiben wird abgeändert. Die bestehende Düse wird modifiziert, nicht aus neuem Material Kopien hergestellt.

Der Prozess biomimetischer Technikentwicklung kann nicht nur in diesem Fall nicht eindeutig als einem Evolutions- oder aber einem biologischen Entwicklungsprozess analog beschrieben werden. Er vereint auf unproblematische Weise Züge beider Prozessarten. Ich möchte deshalb mein bereits mehrfach angeklungenes Plädoyer dafür, statt auf übergeordnete Prozesse besser auf die biologischen Mechanismen zurückzugehen, nochmals explizit machen: Die Mechanismen biologischer Phylogenese und Ontogenese sind vielfältig und ihre Reduktion auf zwei einheitliche Klassen wäre in hohem Maße simplifizierend. Der Reichtum möglicher Anregungen technischer Entwicklungsprozesse durch biologische Mechanismen würde vergeben. Auch ist es für die technische Implementierung nicht erforderlich, einen konkreten biologischen Prozess genau nachzuvollziehen. Vielversprechender – und in allen genannten Beispielen realisiert – ist ein Ansatz, der biologische Mechanismen aufgreift und diese, ggf. in neuer Kombination, flexibel einsetzt und modifiziert.

Die Grenzen zwischen biomimetischer Technikentwicklung und Bionik sind fließend. In Letzterer werden Lösungen funktionaler Probleme aus dem Bereich der belebten Natur auf die Technik übertragen. Dies wird jedoch in aller Regel nicht ohne Modifikation der biologischen Lösung erfolgen können: Technische Materialien unterscheiden sich von biologischen, Umskalierungen mögen erforderlich sein, ebenso Anpassungen aufgrund einer Verschiebung der Funktionalität in Fällen, in denen die Biologie nur die Lösung eines

verwandten Problems bereithält. Die in derart zahlreichen Hinsichten ggf. erforderliche Anpassung könnte wiederum mittels biomimetischer Mechanismen erfolgen, die phylogenetischen und ontogenetischen Prozessen abgeschaut sind. Aber auch wo rein technische Optimierungsprozesse implementiert werden, wird eben nicht die vollständige biologische Lösung unverändert übertragen. Bestimmte Aspekte werden herausgegriffen, andere – z. B. die konkrete Materialität – ersetzt oder verändert. Nicht die ganze biologische Lösung und nicht ihr ganzer Kontext werden übernommen. Wie in der Bionik nur der grundsätzliche Lösungsansatz für die technische Anwendung nutzbar gemacht wird, wird in biomimetischen Entwicklungsprozessen nicht der gesamte biologische Formbildungsprozess nachgebildet, sondern nur dessen Mechanismus.

Allgemeine Evolutionstheorie

»Die« Evolutionstheorie wird häufig auf Bereiche außerhalb der Biologie angewendet oder eine solche Anwendung zumindest diskutiert. So ist von der Evolution der Technik bzw. materieller Kultur die Rede, beispielsweise steinzeitlicher Pfeilspitzen, mittelalterlicher Rüstungen oder neuzeitlicher Eisenbahnwaggons; von der Evolution wissenschaftlicher Theorien (Popper 1995) oder allgemeiner von Ideen oder kleinster bedeutungstragender Einheiten, der Meme (Dawkins 1976); allgemeiner: von kultureller Evolution. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass nicht jede Beschreibung einer als Stammbaum darstellbaren Abfolge als Evolutionsprozess erhellend ist – nicht einmal, wenn die Veränderung in derselben Weise formal beschrieben werden kann wie in einem biologischen Evolutionsprozess. Die Annahme eines *universal Darwinism* (Dawkins 1998) bzw. einer allgemeinen oder verallgemeinerten Evolutionstheorie (Schurz 2011) stützt sich auf solche durchaus starken Strukturanalogien. Die abstrakte Beschreibung der Erblichkeit und Veränderlichkeit von Merkmalen kultureller Entitäten lässt dabei nicht auf einen bestimmten zu Grunde liegenden Mechanismus schließen. Sie beschreibt modellhaft die Oberflächenmerkmale eines Prozesses. Ob dem Prozess aber Mechanismen zugrunde liegen, die denen biologischer Evolution entsprechen, kann auf diese Weise nicht geklärt werden. Im Fall der Meme ist nicht einmal klar, ob es solche Einheiten überhaupt gibt oder ob es sich hierbei um bloße Postulate des Modells handelt (Kronfeldner 2011). Erst der Nachweis solcher Entitäten und der Aufweis eines zugehörigen kausalen Evolutionsmechanismus könnte eine valide evolutionäre Erklärung für den beobachteten Formbildungsprozess bieten. In der Plausibilisierung eines solchen Mechanismus für die biologische Evolution liegt wie erwähnt eines von Darwins größten Verdiensten. Er führt eine ungeheure Fülle von Beobachtungen und Vergleichen mit Züchtungsprozessen an, um empirische Belege für den von ihm postulierten Mechanismus zu liefern (Darwin 1988). Diese Plausibilisierung, die inzwischen sehr differenziert weiter ausgearbeitet wurde, gilt jedoch nur für den Bereich, der empirisch untersucht wurde, für die Biologie. Sie hat für andere

Bereiche keine Relevanz und kann insbesondere nicht die Geltung »der« Evolutionstheorie für andere als die überprüften Bereiche sichern. Das könnten allein empirische Belege jeweils aus diesen Bereichen leisten.

Da die kausalen Mechanismen evolutiver Prozesse durch überlagerte Prozesse verdeckt sein können, wäre umgekehrt eine fehlende Passung zwischen strukturellen Aussagen einer allgemeinen Evolutionstheorie und technischen oder kulturellen Prozessen kein hinreichender Grund, die Abwesenheit evolutionärer Mechanismen anzunehmen. Dies ist für den Ansatz einer biomimetischen Technikentwicklung letztlich ermutigend, denn es zeigt, dass für die Übertragbarkeit von Evolutionsprozessen auf Prozesse technischer Entwicklung die Geltung der Evolutionstheorie für den Bereich der Technik und Kultur nicht entscheidend ist. Es geht allein um die Übertragung konkreter Evolutionsmechanismen auf die Technik.

Rollen und Grenzen biologischer Metaphern

Evolution und Entwicklung dienen in der biomimetischen Technikentwicklung als Metaphern, die diese Entwicklung leiten, jedoch nicht präzise beschreiben können. Häufig wird der technische Entwicklungsprozess nicht genau eine dieser Alternativen umsetzen. Gleichwohl tragen die Metaphern weit genug, um den technischen Prozess zu inspirieren. Sie haben heuristischen Wert, indem sie helfen, zur technischen Fragestellung passende Formbildungsmechanismen der biologischen Prozesse zu finden, die sodann technisch implementiert werden können. Diese Mechanismen leisten die Arbeit, sie bringen kausal die Form hervor. Die Metaphern von Evolution und Entwicklung finden häufig ihre Grenzen, sobald versucht wird, den resultierenden Prozess einer der Metaphern vollständig unterzuordnen. Dies jedoch ist unschädlich für ihren Nutzen. Nichts hängt daran, ob es über das biomimetische Aufgreifen von Mechanismen hinaus noch eine biomimetische Technikevolution oder Technik-Ontogenese gibt. Die Begriffe von Evolution und Entwicklung könnten abgeschwächt und so angepasst werden, dass sie auch im technischen Bereich wörtlich anwendbar werden. Dies würde ihnen jedoch die Stärke in der Beschreibung biologischer Prozesse nehmen. Erstrebenswerter als die Fixierung auf insgesamt als evolutiv oder als ontogenetisch zu betrachtende Prozesse scheint mir der Rekurs auf kausale Mechanismen der Formbildung zu sein, ganz gleich, in welchem biologischen Kontext sie vorkommen. Diese Mechanismen erklären die resultierenden biologischen Prozesse und diese werden aufgenommen, um die im Bereich der Technik zu realisierenden Prozesse hervorzubringen.

Literaturverzeichnis

Ackerman, S. (2010): Discovering the brain. Washington, D.C: National Academy Press.

Alberch, P.; Alberch, J. (1981): Heterochronic mechanisms of morphological diversification and evolutionary change in the neotropical salamander Bolitoglossa occidentalis (Amphibia; Plethodontidae). In: *Journal of Morphology* 1 (167), S. 249–264.

Bedau, M. A. (2013): Weak Emergence Drives the Science, Epistemology, and Metaphysics of Synthetic Biology. In: *Biological Theory* 8, S. 334–345.

Burnet, F. M. (1959): The Clonal Selection Theory of Acquired Immunity. Cambridge: Cambridge University Press.

Darwin, C. (1858): Extract from an unpublished woirk on species. In: *Journal of the Linnean Society (Zool.)* 3, S. 46–53.

Darwin, C. (1988): On the Origin of Species by Means of Natural Selection (1859). In: P. H. Barrett und R. B. Freeman (Hg.): The Works of Charles Darwin. London (15).

Dawkins, R. (1976): The selfish gene. Reissued in new covers. Oxford: Oxford Univ. Press.

Dawkins, R. (1998): Universal Darwinism. In: D. L. Hull (Hg.): The philosophy of biology. Oxford: Oxford Univ. Press (Oxford readings in philosophy), S. 14–37.

Franklin, R. E.; Gosling, R. G. (1953a): Evidence for 2-chain helix in crystalline structure of sodium deoxyribonucleate. In: *Nature* (172), S. 156–157.

Franklin, R. E.; Gosling, R. G. (1953b): Molecular configuration in sodium thymo-nucleate. In: *Nature* (171), S. 740–741.

Gayon, J. (1998): Darwinism's struggle for survival. Heredity and the hypothesis of natural selection. Cambridge: Cambridge Univ. Press (Cambridge studies in philosophy and biology).

Gierer, A.; Meinhardt, H. (1972): A theory of biological pattern formation. In: *Kybernetik* (12), S. 30–39.

Gilbert, S. F.; Barresi, M. J. F. (2010): Developmental biology. Eleventh edition. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates Inc.

Graw, J. (2015): Genetik. 6., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin: Springer Spektrum (Lehrbuch).

Hülse, M., Wischmann, S.; Pasemann, F. (2004): Structure and function of evolved neuro-controllers for autonomous robots. In: *Connection Science* (16), S. 249–266.

Huneman, P.; Walsh, D. M. (Hg.) (2017): Challenging the modern synthesis. Adaptation, development, and inheritance. New York: Oxford University Press.

Jablonka, E.; Lamb, M. (2014): Evolution in Four Dimensions. Genetic, Epigenetic, Behavioral, and Symbolic Variation in the History of Life. Cambridge: The MIT Press (Life and Mind).

Janning, W.; Knust, E. (2008): Genetik. Allgemeine Genetik, molekulare Genetik, Entwicklungsgenetik. 2. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart, New York: George Thieme Verlag.

Krohs, U. (2006): The changeful fate of a groundbreaking insight: the Darwinian fitness principle caught in different webs of belief. In: *Jahrbuch für Europäische Wissenschaftskultur* 2, S. 107–124.

Krohs, U. (2009): Der Funktionsbegriff in der Biologie. In: A. Bartels (Hg.): Wissenschaftstheorie. Ein Studienbuch. 2., durchges. und korr. Aufl. Paderborn: mentis-Verl., S. 287–306.

Krohs, U. (2011): Functions and fixed types: Biological functions in the post-adaptationist era. In: *Applied Ontology* (6), S. 125–139.

Kronfeldner, M. (2011): Darwinian creativity and memetics. Durham England: Acumen Publishing Ltd (Acumen research editions).

Lefèvre, W. (2009): Die Entstehung der biologischen Evolutionstheorie. Überarb. Aufl. mit einem neuen Nachw., Orig.-Ausg. Frankfurt am Main: Suhrkamp (Suhrkamp-Taschenbuch Wissenschaft, 1905).

Levit, G. S.; Meister, K.; Hoßfeld, U. (2006): AlternativeEvolutionstheorien. In: U. Krohs und G. Toepfer (Hg.): Philosophie der Biologie. Eine Einführung. Orig.-Ausg., 1. Aufl., [Nachdr.]. Frankfurt am Main: Suhrkamp (Suhrkamp-Taschenbuch Wissenschaft, 1745).

Marzi, T.; Knappertsbusch, V.; Marzi, A.; Naumann, S.; Deerberg, G.; Weidner, E. (2018): Fragen zu einer biologischen Technik. Oberhausen: Verlag Karl Maria Laufen (UMSICHT-Diskurs, Heft 2).

Meinhardt, H. (1982): Models of biological pattern formation. London: Acad. Press.

Morange, M. (2013): Comparison Between the Work of Synthetic Biologists and the Action of Evolution: Engineering Versus Tinkering. In: *Biological Theory* (8), S. 318–323.

Müller, S. C.; Plesser, T.; Hess, B. (1985): The Structure of the Core of the Spiral Wave in the Belousov-Zhabotinskii Reaction. In: *Science* (230), S. 661–663.

Nachtigall, W. (2002): Bionik. Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler ; mit 440 Abbildungen. 2., vollst. neu bearb. Aufl. Berlin: Springer.

Nordheim, A.; Knippers, R. (Hg.) (2018): Molekulare Genetik. 620 Abbildungen. 11., unveränderte Auflage. Stuttgart, New York: Thieme.

Odling-Smee, J.; Laland, K. N. (2011): Ecological Inheritance and Cultural Inheritance: What Are They and How Do They Differ? In: *Biological Theory* (6), S. 220–230.

Popov, I. (2018): Orthogenesis versus Darwinism. Cham: Springer International Publishing.

Popper, K. R. (1995): Objective knowledge. An evolutionary approach. 9. impr. Oxford: Clarendon Press.

Schurz, G. (2011): Evolution in Natur und Kultur. Eine Einführung in die verallgemeinerte Evolutionstheorie. Heidelberg: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg.

Schwefel, H. P. (1968): Experimentelle Optimierung einer Zweiphasendüse. Hg. v. AEG Forschungsinstitut. Berlin (HE/F 35-B).

Spemann, H.; Mangold, H. (1924): »Über Induktion von Embryonalanlagen durch Implantation artfremder Organisatoren. In: *Archiv für mikroskopische Anatomie und Entwicklungsmechanik* (100), S. 599–638.

Sultan, S. E. (2015): Organism and environment. Ecological development, niche construction, and adaptation. 1st edition. Oxford: Oxford University Press (Oxford series in ecology and evolution).

Turing, A. M. (1952): The chemical basis of morphogenesis. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society London*, S. 37–72.

Wallace, A. R. (1858): On the tendency of varieties to depart indefinitely from the original type. In: *Journal of the Linnean Society (Zool.)* (3), S. 53–62.

Watson, J. D.; Crick, F.H.C (1953a): A structure for deoxyribose nucleic acid. In: *Nature* (171), S. 737–738.

Watson, J. D.; Crick, F.H.C (1953b): Genetic implications of the structure of deoxy-ribonucleic acid. In: *Nature* (171), S. 964–967.

West-Eberhard, M. J. (2003): Developmental plasticity and evolution. Oxford, New York: Oxford University Press.

Wouters, A. G. (2003): Four notions of biological function«. Studies in History and Philosophy of Biology and Biomedical Science (34), S. 633–668.

7 Zur Analyse der Evolution der Wirtschaft – Kontingenz, kontrafaktische Methode und Kausalität

Marco Lehmann-Waffenschmidt, Technische Universität Dresden

Kontingenz von Prozessen

Wirtschaften vollzieht sich als Prozess in der Zeit. Es liegt daher nahe, für die analytisch-theoretische Betrachtung ökonomischer Prozesse Denk- und Erklärungsmuster zu entwickeln und anzuwenden, die prozessorientiert sind und nicht statisch. Schaut man sich auf der Suche nach prozessorientierten Erklärungsansätzen in den Lebens-Wissenschaften um, liegt es nahe, den Evolutionsgedanken der Biologie aufzugreifen und zu versuchen, ihn geeignet auf die wirtschaftswissenschaftliche Analyse zu transformieren.[1] Tatsächlich weisen die beiden Gegenstandsbereiche der Biologie und der Wirtschaftswissenschaften Gemeinsamkeiten auf, die eine ähnliche Theorie- und Modellanalyse nahelegen: In beiden Gegenstandsbereichen können Prozesse des Wandels stationär, kontinuierlich sich verändernd oder saltatorisch und disruptiv, also sprunghaft und gleichgewichtsstörend verlaufen, und es können inkrementelle oder radikale Innovationen auftreten sowie Pfadabhängigkeiten, durch die vergangene Zustände die Gegenwart und die Zukunft beeinflussen. Schon aus dieser zwangsläufig unvollständigen Beschreibung wird deutlich, dass Prozesse in beiden Gegenstandsbereichen typischerweise - zumindest partiell - verlaufs- und ergebnisoffen sind (»open loop«) und sich nicht durch dynamische Modellierungsansätze mit festgelegten »Generatoren« wie z. B. Differentialgleichungssystemen wirklich adäquat abbilden und analysieren lassen. Stochastische Erweiterungen von »closed loop«-Modellansätzen können die Erklärungskraft für open-loop evolvierende Prozesse zwar verbessern, bleiben aber in ihrer Modellstruktur nach wie vor festgelegt. Sind die Freiheitsgrade eines verlaufs- und ergebnisoffenen Prozesses nicht von stochastischer Natur, sondern spiegeln die variablen Gestaltungsmöglichkeiten menschlicher Handlungsweisen wider, braucht man andere Modellierungsansätze, die dieser Tatsache adäquat Rechnung tragen. Das Kontingenzkonzept, das in diesem Beitrag vorgestellt wird, versucht dies, indem es open-loop evolvierende Prozesse im Spannungsfeld zwischen Verlaufs- und Ergebnisoffenheit auf der einen und Regularität bis zu Prädeterminiertheit auf der anderen Seite modelliert. Gerade ökonomische Prozesse bewegen sich in diesem Span-

[1] Andere aktuelle theoretische und methodische Ansätze zur Analyse dynamischer ökonomischer Systeme, z. B. aus der Physik oder der Komplexitätsforschung, sind nicht Gegenstand dieses Beitrags.

nungsfeld, da sie einerseits aus sozialen Interaktionen eingeschränkt rationaler Akteure auf verschiedenen Aggregationsebenen entstehen, andererseits aber inneren und äußeren Restriktionen und Gesetzmäßigkeiten unterliegen.

Das neo-darwinistische Grundkonzept der Variation, Selektion und Retention leistete bereits einen wesentlichen Schritt in die Richtung einer adäquaten Modellierung biologischer Evolutionsprozesse.[2] Als universell angelegtes Denkmuster lässt es sich als Beschreibung auf wirtschaftliche Wettbewerbsprozesse von Unternehmen in einem Markt übertragen. Dabei bieten sich Modifikationen an. So kann man beim Übertrag statt von Genen mit ihren biologischen Bauplänen von Memen als kulturellen Verhaltens-Mustern sprechen, und man kann versuchen, die Erkenntnisse der modernen Evolutionsbiologie mit einzubringen. Die Akteure, also im Beispiel die konkurrierenden Unternehmen, die eigentlich Objekte der Selektion (des Wettbewerbs) sind, können ihre Selektionsbedingungen – intentional oder unbeabsichtigt – beeinflussen, z. B. durch Lobbyismus, der zu einer Regeländerung des betreffenden Geschäftsumfeldes führt. Damit können sie die klassische Einbahnwirkungsrichtung des Spencerschen »survival-of-the-fittest«-Erklärungsansatzes von der Selektionsebene auf ihre erfolgreiche Retention, also ihr nachhaltiges Überleben auf Grund einer optimalen Fitness, zugunsten eines Viabilitäts-Prinzips aufheben. Es geht also nur um ein »Durchkommen« auf irgendeinem Weg (lat. via), nicht um eine arithmomorphe Optimierung. Tatsächlich können sich Spezies ihre Selektionsumgebungen als Nischen schaffen und mit suboptimaler Fitness-Ausstattung überleben, das Gleiche gilt mutatis mutandis für Unternehmen. Auch die von Darwin und seinen Nachfolgern postulierte Einbahnstraße der (genotypischen) Steuerung von (phänotypischen) Ausprägungen bei lebenden Organismen kann nach neuen Erkenntnissen der Epigenetik in der modernen Evolutionsbiologie durch Rückwirkungen von der Objektebene der Phänotypen auf die Steuerungsebene der Genotypen durchbrochen werden – d. h., erworbene Fähigkeiten und Eigenschaften können vererbbar werden, wie es in anderem Kontext und mit anderer Intention der Lamarckismus vor Darwin postuliert hatte.[3] Im Beispiel können Unternehmen ihre Meme in Form von Routinen und Verhaltensweisen der Unternehmensangehörigen zum Vorteil der Unternehmensperformance verändern und diese Veränderungen können sich stabilisieren.

Ein zentrales Ziel des Verstehens von Prozessen gerade in der Wirtschaftswissenschaft sind möglichst treffgenaue Prognosen sowie Prozess-Lenkungs- und –Gestaltungsanleitungen und -empfehlungen. Eine wichtige Rolle spielen da-

---

[2] Wenn die drei Schritte Variation/Mutation – Selektion-Retention/Vererbung nicht konkretisiert und operationalisiert werden, nehmen sie allerdings den Charakter einer Selbstverständlichkeit an: Denn ohne Mutation wären alle heute existierenden Spezies auf der Erde vom Beginn des Lebens an auf der Erde vorhanden gewesen, ohne Selektion würde es keine ausgestorbenen Spezies, und ohne Retention würde es gar kein Leben mehr auf der Erde geben.

[3] Damit beschäftigt sich auch der Beitrag von Ulrich Krohs in diesem Band.

bei die Gerichtetheit von Prozessen vs. Richtungslosigkeit oder Drift – Letzteres verstanden als eine gerichtet erscheinende Entwicklung, die sich aber nicht schlüssig begründen lässt, die erwünschte Gerichtetheit im Sinne von Fortschritt und Entwicklung, im evolutionswissenschaftlichen Fachjargon als Orthogenese oder auch Anagenese bezeichnet, sowie das Ziel, Kausalitäts-Beziehungen zwischen konsekutiven Zuständen eines Prozesses in realer Zeit zu verstehen. Hierzu gehören die Begriffe »teleologisch« für Prozesse mit eindeutiger Ziel- bzw. Konvergenzrichtung und »teleonomisch« für Prozesse, die zwar Verlaufsgesetzmäßigkeiten unterliegen, aber trotzdem Freiheitsgrade zu einer partiellen Verlaufs- und Ergebnisoffenheit besitzen. Wie genau ein domänenübergreifend inspirierter, evolutorischer Analyseansatz in der Wirtschaftswissenschaft Theorieansätze aus der Evolutionsbiologie adaptiert und transformiert, bleibt grundsätzlich offen. Im einen Extremfall können die wissenschaftliche Herangehensweise und Theorieansätze der Evolutionsbiologie in einer 1-1-Adaption als universell gültige Theoriemuster auf ökonomische Prozesse übertragen werden, im entgegengesetzten Extremfall dienen sie lediglich als metaphorische Grundlage zu einer analogiegeleiteten wirtschaftswissenschaftlichen Theorie- und Modellkonzeption. Tatsächlich haben sich in der Debatte in der Evolutionsökonomik nach 1990 zwei konträre Standpunkte zur Frage der adäquaten Transformation evolutionsbiologischer Konzeptionen und Ergebnisse für ein evolutorisches Grundverständnis und eine entsprechende Analyse der Wirtschaft herausgebildet – der Ansatz des »Universal Darwinism« von Geoffrey Hodgson und der naturalistische »Kontinuitäts«-Ansatz von Ulrich Witt. Während der Universal Darwinism tatsächlich von einer universellen, domänenübergreifenden Erklärungskraft des neo-darwinistischen Konzepts der natürlichen Evolution ausgeht, sieht Witt in anderen menschlichen Handlungsebenen wie z. B. in (Selbst)Reflexions-, Lern- oder anderen Entwicklungsprozessen, die zu Verhaltensänderungen und zu technischen oder organisatorischen Innovationen führen, weitere relevante Einflussgrößen für die kulturelle Evolution der menschlichen Lebensbedingungen, zu der auch die Domäne des Wirtschaftens gehört.[4]

Eine spezielle Fragestellung der Evolutionsbiologie ist die Frage nach der biologischen Herkunft der Menschheit und damit nach der Zwangsläufigkeit oder Zufälligkeit ihrer Entstehung. Der US-amerikanische Paläontologe und Evolutionsbiologe Stephen J. Gould (1941 – 2002) hat in seinem wissenschaftlichen Werk herausgestellt, dass die Entstehung des modernen Menschen evolutionsbiologisch einerseits zwar nachvollziehbar ist, dass es aber dabei auch offensichtliche mögliche »Bruchstellen« – sogenannte »Bi-« oder »Multifurkationsstellen« - in der Entwicklung zu unserer Spezies gab, die bei

[4] Aus der inzwischen umfangreichen Literatur zu dieser Debatte seien hier stellvertretend nur die Referenzen (Hodgson 2004; Hodgson und Knudsen 2010) für die Position des „Universal Darwinism“ und (Cordes 2006; Levit et al. 2011; Witt 2004, 2014) für die naturalistische Position der „Kontinuitätshypothese“ genannt. Aus einer weiter gefassten Perspektive untersucht Krohs in seinem Beitrag in diesem Tagungsband die Frage, inwieweit die evolutionsökonomischen Konzepte Evolution und Entwicklung universell sind.

einem nochmaligen »Abspielen des Bandes des Lebens auf dem Planeten Erde« (Gould) vom Anfang mit plausiblen, wissenschaftlich fundierten Begründungen zu einer Welt ohne die Spezies des modernen Menschen hätten führen können. So hätte es durch die massiven Rückschläge bei den prähistorischen Massensterben auf der Erde auch zum Aussterben der Vorfahrenspezies der heutigen Säugetiere kommen können, was den faktischen Evolutionsverlauf des Wirbeltierstammes, zu dem unsere Spezies des rezenten Menschen gehört, außer Kraft gesetzt hätte. Oder die relativ schwach bewehrten Vorfahrenspezies der Säugetiere hätten den gut ausgerüsteten Räubern der urweltlichen Fauna nicht standhalten können und wären ausgerottet worden.

Ein ganz wesentlicher Aspekt dieses »Kontingenzerklärungsansatzes« der natürlichen Evolution nach Gould ist seine Eigenschaft, dass faktische und kontrafaktische Evolutionsverläufe nicht einfach zufälligen oder arbiträr erratischen Einflüssen zugeschrieben werden, sondern durch nachvollziehbar und schlüssig begründete Erklärungen charakterisiert werden können. So waren die Vorfahrenspezies der heutigen Säugetiere zwar schwach bewehrt, aber klein und anpassungsfähig und dadurch hinreichend widerstandsfähig, so dass ihre Retention funktionierte. Natürlich können stochastische Einflüsse auch eine Rolle spielen, sie sind aber in kontingenten Situationen nicht entscheidend.

Letztlich ist unsere Lebenswelt von Kontingenzen, die nicht einfach durch Zufälle bestimmt werden, und von kontrafaktischen Überlegungen mit geprägt – jeder Konjunktiv (»Hätte er doch …«, »Was wäre, wenn … ?«, »Ich könnte jetzt gehen, oder bleiben.«), die juristische Schuldermittlung nach einem Verkehrsunfall oder die Suche nach den Verantwortlichen bei einer durch eine politische Weichenstellung verursachten, unerwünschten wirtschaftlichen Entwicklung machen dies greifbar.[5] Die Weltreise des Phileas Fogg in 80 Tagen um die Welt, jede Schachpartie und jedes Fußballspiel oder ein ausführliches Interview zu kontroversen Themen – bei all diesen Beispielen handelt es sich um (zumindest partiell) verlaufs- und ergebnisoffene Prozesse, in denen Kontingenzen als mögliche, also weder zwingende noch beliebige Verlaufsalternativen auftreten und von Pfadabhängigkeiten, d. h. vergangenheitsbedingten Restriktionen, beeinflusst werden können. Biografien weisen immer wieder Multi-Furkationspunkte auf, von denen aus es auch anders hätte weitergehen können, als es tatsächlich der Fall war, ohne dass aber Zufälle dabei eine wesentliche Rolle spielten. Der Dichter Jean Paul hat dieser Idee in seiner autobiografischen »Konjekturalbiographie« bereits 1818 ein literarisches Denkmal gesetzt, Max Frisch oder Yasmin Reza zeigen auf dramatische Weise

---

5 Nicht gemeint ist damit der in der öffentlichen (gesellschafts)politischen Diskussion neue Begriff der »alternativen Fakten«, der – abgesehen von seiner interessengelenkten, meist äußerst platten Instrumentalisierung – schon begrifflich Unsinn darstellt, weil mit »Fakten« sprachlich unzweideutig etwas wirklich Existierendes bezeichnet wird und nicht etwas nicht Existierendes, sei es möglich oder unmöglich, erwünscht oder unerwünscht.

alternativ mögliche Lebensverläufe in ihren Bühnenstücken »Biografie. Ein Spiel« (1967) bzw. »Trois Versions de la Vie« (2000). Auch prominente Lebensläufe in Geschichte und Gegenwart geben markante Beispiele – Alexander der Große wäre als Kind beinahe einer schweren Krankheit zum Opfer gefallen, Otto von Bismarck konnte bei einem Badeunfall Anfang der 1860er Jahre im Atlantik im letzten Augenblick gerettet werden, der erste Reichspräsident der Weimarer Republik Friedrich Ebert war als Sohn eines Schneiders geboren worden und lernte als Jugendlicher das Sattlereihandwerk – usw. usw. Spielfilme unserer Zeit wie »Lola rennt«, »Zurück in die Zukunft«, »Sie liebt ihn, sie liebt ihn nicht«, »Und täglich grüßt das Murmeltier« oder die Klassiker »Ist das Leben nicht schön?« (Regie: Frank Capra) von 1946 und Kurosawas »Rashomon« von 1950 spielen auf inspirierende Weise mit der Idee der Kontingenz und Kontrafaktik. Tatsächlich geht es dabei vielfach nicht um Zufallseinflüsse: Die Figur des Phil Connors in »Und täglich grüßt das Murmeltier« probiert bewusst verschiedene Verhaltensmuster in (unfreiwilligen) Wiederholungsschleifen aus, in »Ist das Leben nicht schön?« stellt sich der Protagonist George Bailey kontrafaktisch vor, wie sich seine Lebenswelt ohne ihn entwickelt hätte, und in »Rashomon« wird ein Mord im 12. Jahrhundert an einem Samurai in vier unterschiedlichen, aber völlig schlüssigen Varianten nacherzählt. Doku-Serien zu kontrafaktischer Geschichtsanalyse in Phoenix und 3sat (»Was wäre wenn …«) zeigen das Interesse der Geschichtswissenschaft und der Öffentlichkeit, mit dieser Methode Prozesse im Hinblick auf Verantwortlichkeiten und Leistungsqualitäten der handelnden Akteure im Nachhinein verstehen und bewerten zu können oder im Voraus abzuschätzen. Grundsätzlich fällt auf, dass die Anzahl der konstruierten alternativen Prozesse sowohl auf der Ebene der Romane oder Spielfilme wie auch in wissenschaftlichen Beiträgen erfahrungsgemäß im (kleinen) einstelligen Bereich bleibt, also keineswegs in ein unüberschaubares Durcheinander ausufernder hypothetischer Phantasiewelten mündet, wie man befürchten könnte.

Die Omnipräsenz des wirtschaftswissenschaftlichen Denkens in Kontingenzen zeigt z. B. schon ein simples Marktdiagramm, das eine Nachfrage- und eine Angebotsfunktion eines Wirtschaftsgutes in einem Preis-Mengen-Koordinatensystem als Kurven abbildet. Tatsächlich beschreibt es kontingente Pläne der modellierten Nachfrager und Anbieter. Denn zu jedem Zeitpunkt wird man in einem realen Markt stets eine eindeutig realisierte Preis-Mengen-Kombination im positiven Orthanten des Preis-Mengen-Koordinatensystems beobachten. Alle anderen Punkte auf der Angebots- bzw. Nachfragekurve sind für diese Situation kontrafaktische Alternativen. Ein weiteres Beispiel gibt der ökonomische Schlüsselbegriff der Opportunitäts- bzw. Alternativkosten. Dabei wird der erwartete oder realisierte Nettoertrag einer bestimmten wertschöpfenden Aktivität eines Wirtschaftssubjekts verglichen mit den erwarteten oder realisierten Nettoerträgen alternativer wertschöpfender Aktivitäten, die für das Wirtschaftssubjekt ebenfalls möglich (gewesen) wären. Der

höchste alternativ zu erzielende Nettoertrag stellt dann die Opportunitätskosten der zur Diskussion stehenden Aktivität dar. Sind die Opportunitätskosten höher als der Nettoertrag der Ausgangsaktivität, ist die Entscheidung für diese Aktivität aus der Ertragsmaximierungsperspektive ineffizient.

Seine Ursprünge hatte das systematische Denken in Möglichkeiten bereits in der antiken griechischen Philosophie, genauer in der Modallogik von Aristoteles (ta endechomena = was möglich ist). Die moderne Begriffsbedeutung eines kontingenten Ereignisses als »nicht notwendig, aber nicht unmöglich« geht auf Gottfried W. Leibniz (1646 – 1716) zurück (contingere = passieren, gelingen, glücken). In der erkenntnisphilosophischen Debatte unserer Zeit verbinden sich mit dem Kontingenzansatz u. a. die Namen Kripke, Lewis, Lübbe, Luhmann, Marquard und Rorty, zudem gibt es markante Ausstrahlungen in einzelne Wissenschaftsbereiche wie die Geschichts-, Religions-, Politik-, Literatur- und Wirtschaftswissenschaft sowie Soziologie und Statistik[6]. Das Ziel dieses Beitrags ist nicht, die ideengeschichtliche Entwicklung und den aktuellen Stand der erkenntnistheoretischen und fachspezifischen Debatten um den Begriff Kontingenz nachzuvollziehen, obwohl das eine lohnende Aufgabe wäre, sondern die Bedeutung und Rolle eines kontingenzorientierten Denk- und Untersuchungsansatzes für den evolutionswissenschaftlichen Ansatz in der Ökonomik, also für die evolutorische Ökonomik, mit Hilfe eines eigenen Ansatzes, des »analytischen Kontingenz-Konzepts«, darzustellen.

Das graphisch-analytische Kontingenzkonzept[7]

Der Grundgedanke ist, die Möglichkeitsumgebung eines faktischen Prozesses eines ökonomischen Systems zu modellieren, also z. B. der Evolution einer Volkswirtschaft, einer Branche oder einer Firma in realer, historischer Zeit. Dabei soll nicht nur eine Abbildung des faktischen Prozesses in der Vergangenheit und der alternativ möglichen, aber kontrafaktisch gebliebenen Verläufe entstehen, sondern es sollen darüber hinaus fundierte, weiterführende

---

[6] In der Geschichtswissenschaft spielt der Ansatz der kontrafaktischen, virtuellen, alternativen oder Parallel-Geschichte naturgemäß eine große Rolle. Bereits antike Historiker wie Thukydides oder Tacitus haben sich kontrafaktischer Argumentationen bedient, auch Toynbee und Churchill haben kontrafaktische Studien verfasst. In der aktuellen geschichtswissenschaftlichen Forschung hat sich vor allem der Historiker Alexander Demandt um diesen Ansatz verdient gemacht. Aus Platzgründen kann dieser Beitrag leider nicht näher darauf eingehen. Ortmann (Ortmann 1995) hat das Kontingenzkonzept aus betriebswirtschaftlicher und unternehmenssoziologischer Sicht in die wirtschaftswissenschaftliche Debatte eingebracht.

[7] In diesem Beitrag wird vor allem die graphische Darstellung verwendet. Für die formal-analytisch exakten Definitionen und Herleitungen sei der Leser verwiesen auf (Lehmann-Waffenschmidt 2010). Die Beiträge (Lehmann-Waffenschmidt 2018) und (Lehmann-Waffenschmidt 2019) führen in das kontingenzanalytische Konzept ein und diskutieren es kritisch in konstruierten kontroversen Debatten.

Schlussfolgerungen abgeleitet werden können, z. B. hinsichtlich Kausalitätsbeziehungen zwischen Zuständen des analysierten ökonomischen Systems zu verschiedenen Zeitpunkten.[8]

Damit ist der Blick zwangsläufig in die Vergangenheit gewendet. Eine Kontingenzanalyse muss aber nicht auf vergangene Prozesse beschränkt werden. Analog zur retrospektiven Analyse können Möglichkeitsräume natürlich auch für zukünftige Prozessverläufe untersucht werden, der wesentliche Unterschied besteht lediglich darin, dass (noch) kein faktischer Referenzprozess existieren kann, sondern alle alternativen Prozessverläufe Konstrukte sind. Natürlich können – wie in der retrospektiven Anwendung auch – Referenzverläufe im Sinne von erwünschten Verläufen eine besondere Rolle bei der Analyse spielen. Gerade im Zusammenhang mit erwünschten, oder unerwünschten, Prozessverläufen ist die Klärung von Kausalitätsbeziehungen relevant, lassen sich dadurch doch ex-post Verantwortlichkeiten bestimmen, Leistungen bewerten und ex- ante Gestaltungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für bestimmte Ziele beurteilen.[9]

Das angekündigte analytische Kontingenz-Konzept lässt sich graphisch durch einen »diachronen Kontingenz-Di-Graphen« darstellen, im Weiteren »Kontingenzgraph« genannt. Ein Kontingenzgraph modelliert einen bestimmten Prozess in historischer Zeit – in Abbildung 7-1 z. B. den Prozess, der durch die Knotenfolge (E1, E2II, E3V) bestimmt wird – und seine Möglichkeitsumgebung, also alle anderen Kanten und Knoten des Graphen. Die historische Zeit ist die Dimension auf der Abszisse des Koordinatensystems. Als Di-Graph besteht der Kontingenzgraph aus zwei Elementtypen: aus Knoten, die Zustände bzw. Ereignisse des modellierten Prozesses darstellen und diachron mit Zeitindizes markiert sind, und aus Kanten, die an jedem Knoten die Möglichkeiten abbilden, wie der Prozess im nächsten Zeitschritt weiter verlaufen kann. Gibt es nur eine Kante von einem bestimmten Knoten, dann ist der Zustand des nächsten Zeitschritts determiniert, gibt es zwei Kanten, stellt der Knoten einen Bifurkationspunkt dar – man denke z. B. an »ja« oder »nein« oder an »rechts« oder »links« – , bei mehr als zwei Knoten handelt es sich um einen Multifurkationspunkt.[10]

---

[8] Hogdson (Hodgson 2004) hat sich auch mit Kausalität im Zusammenhang mit Evolution beschäftigt, allerdings in einem anderen Kontext.

[9] Die Frage, welche Prozessverläufe von welchen Subjekten als erwünscht angesehen werden, fällt nicht in den Analysefokus dieses Ansatzes.

[10] Der Kontingenzgraph muss tatsächlich »Graph« und nicht »Baum« heißen, weil ein Kontingenzgraph in späteren Bereichen der Zeitachse wieder zusammenlaufende Kanten aufweisen kann, also konvergente Teilprozesse, die im Graphen Zyklen erzeugen – was bei einem Baum normalerweise ja nicht möglich ist.

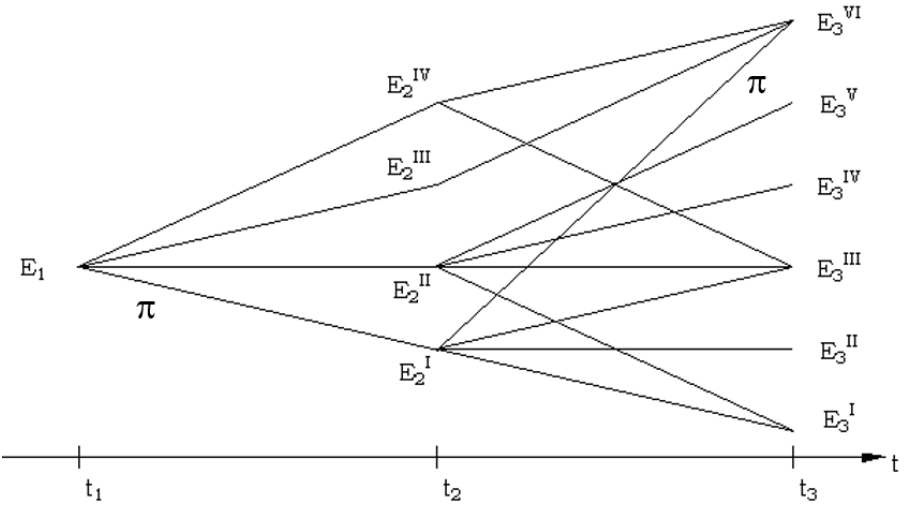


Abbildung 7-1: Ein Kontingenzgraph mit 3 Zeitpunkten, 11 Knoten (1 initialer Knoten, 4 innere Knoten zu t2 und 6 Endknoten), 14 Kanten und 4 Zyklen. π bezeichnet den faktischen Referenzpfad, dessen Möglichkeitsumgebung vom gesamten Graphen abgebildet wird.

Die Frage nach der Überschaubarkeit von Kontingenzgraphen in realen Anwendungen lässt sich nicht abstrakt allgemein beantworten – die Komplexität des Kontingenzgraphen eines realen modellierten Prozesses hängt ab von der Natur dieses Prozesses und dem Wissensstand über seine Möglichkeitsumgebung. Eine Antwort auf diese Frage kann also nur mit Hilfe eines empirischen Befundes zu Anwendungsfällen gegeben werden. Hier zeigt sich aus der Erfahrung in der Anwendung des analytischen Kontingenzkonzepts auf (wirtschafts)historische Fallbeispiele, dass die Graphenstruktur keineswegs zu Überkomplexität neigt, sondern die Anzahl der relevanten Zeitpunkte und der Knoten des Graphen ist überschaubar, und die Anzahl der Kanten an den Knoten bleibt in der Regel im kleinen einstelligen Bereich. So enthalten z. B. die kontrafaktischen kliometrischen[11] Studien von Robert Fogel zur Untersuchung der Frage, ob der faktische Eisenbahn-Ausbau in den USA im 19. Jh. notwendig war für den wirtschaftlichen take-off der USA gemessen an der Wertschöpfungsleistung, nur ein Kontrafaktum[12]. Es gibt keinen Schienennetzausbau in den USA, sondern Kanäle und Landwege werden ausgebaut.

[11] »Kliometrics« bezeichnet die methodische Vorgehensweise, historische Prozesse mit Hilfe ökonometrischer Methoden zu analysieren. Klio ist der Name der griechisch-antiken Muse der Geschichtsschreibung (original mit »K« geschrieben). Fogel erhielt den Nobel-Gedenkpreis für Wirtschaft im Jahr 1993.

[12] Bei der kliometrischen kontrafaktischen Analyse wird üblicherweise nur ein Kontrafaktum angenommen, das historisch plausibel ist, also prinzipiell realisierbar gewesen wäre. Der hier vorgestellte Kontingenzansatz lässt dagegen grundsätzlich mehrere Kontrafakta in einem Zustand zu, die historisch prinzipiell realisierbar gewesen wären.

Auch ein Kontingenzgraph zur Untersuchung der Frage, wieso sich bei der friedlichen Nutzung von Kernenergie nach 1945 weltweit die Leichtwasser- und nicht die Gas-Graphit-Reaktor-Technologie durchgesetzt hat, oder andere Lock-In-Fallstudien historisch »verriegelter« suboptimaler Technologien (VHS-Video-Kassetten, »qwerty«-Schreibmaschinenbuchstabensysteme usw.) zeigen klar strukturierte und überschaubare Kontingenzgraphen.

Das analytische Kontingenz-Konzept kann aber noch mehr. Z. B. können Pfadabhängigkeiten im Kontingenzgraphen abgebildet werden, was die folgende Abbildung veranschaulicht: Wie es ab dem Zustand E_3^{III} weitergehen kann, hängt davon ab, woher man zu E_3^{III} kommt.

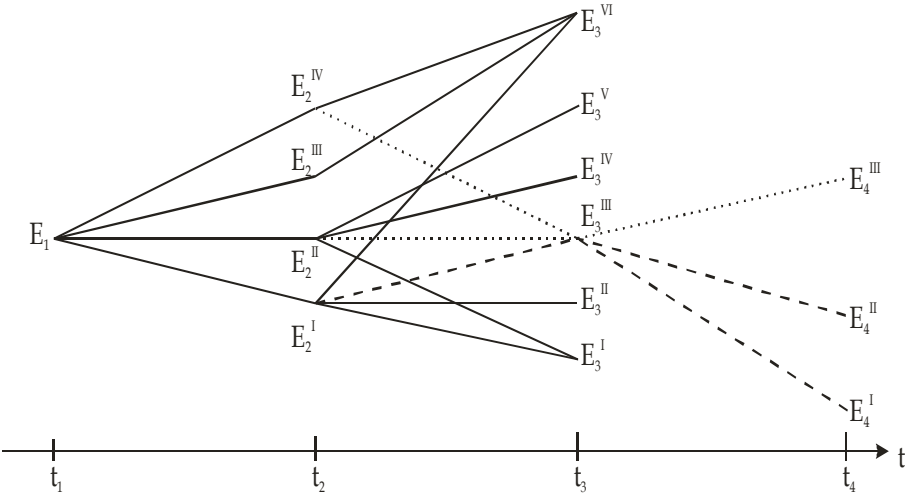


Abbildung 7-2: Pfadabhängigkeit im Kontingenzgraph

Das Kontingenzkonzept bietet die Unterscheidungsmöglichkeit von »prograden« bzw. »retrograden Alternativenmengen« eines Knotens E_i zum Zeitpunkt t_i, also die »prograden« Knoten im Graphen, die im nächsten Zeitschritt t_{i+1} durch eine Kante mit E_i verbunden, also von E_i aus erreichbar sind, und die »retrograde« Alternativenmenge derjenigen Knoten im Graphen zum vorhergehenden Zeitpunkt t_{i-1}, von denen aus im Graphen eine Kante zu E_i besteht. Beide Alternativenmengen können grundsätzlich auch leer sein, sind es aber nicht, wenn man postuliert, dass der Graph keine Knoten enthalten darf, die neu entstehen (die retrograde Alternativenmenge wäre leer), oder in denen ein Pfad im Kontingenzgraphen endet (die prograde Alternativenmenge wäre leer).

Wie passieren die kontingenten Weichenstellungen an Multi-Furkationspunkten in realen Prozessen? Man kann zwei Ebenen unterscheiden – einmal die Ebene eines »entscheidungsbestimmten oder situativen Regimes« und zum anderen die eines »struktur- bzw. systembedingten Regimes«. Ein entscheidungsbestimmtes bzw. situatives Regime liegt vor, wenn eine Person,

oder eine Gruppe, eine Entscheidung trifft bzw. treffen muss und dabei Freiheitsgrade hat, so dass mehrere mögliche Ausgänge resultieren können. Dieser Regime-Typ ist typisch für die Historie von Firmen. So hätten die Automobilhersteller sehr wohl die Möglichkeit gehabt, den Betrug bei der Emissionsmessung ihrer Fahrzeuge zu vermeiden, oder Bayer hätte den Erwerb von Monsanto unterlassen können. Ein struktur- bzw. systembedingtes Regime lag z. B. im Europa des 18. Jahrhunderts vor, als sich auf Grund mehrerer struktureller Gegebenheiten entschied, dass England vor Frankreich die (erste) Industrielle Revolution realisierte.

Eine wichtige Frage ist, ob Alternativen im modellierten analytischen Kontingenzkonzept nur diachron oder auch synchron verstanden werden können. So galt auf dem Territorium der ehemaligen DDR zwischen der Gründung am 7.10.1949 und dem Beitritt zur Bundesrepublik Deutschland (gegründet 23.5.1949) am 3.10.1990 eine sozialistisch-zentralverwaltete Gesellschafts- und Wirtschaftsordnung, ab der Wiedervereinigung 1990 dann eine demokratisch-marktwirtschaftliche. D. h., es kam auf dem Territorium der ehemaligen DDR zu einer Aufeinanderfolge zweier faktischer alternativer Gesellschafts- und Wirtschaftsordnungen. Es gab aber in der Zeit zwischen 1949 und 1990 auch zwei synchrone faktische Alternativprozesse, als beide Staats- und Wirtschaftsformen in den beiden Teilen Deutschlands parallel nebeneinander existierten. Ein anderes Beispiel für synchrone faktische Alternativprozesse geben zwei oder mehrere Unternehmen, die auf demselben Produktmarkt miteinander konkurrieren. Wie ist dies im analytischen Kontingenzkonzept darstellbar?

Wir bleiben beim Beispiel Bundesrepublik und DDR ab 1949. Der analytische Kontingenzansatz in der bisherigen Darstellung lässt nur die Analyse der diachronen Variante zu, weil der faktische Prozess des betrachteten Systems, also der politischen und wirtschaftlichen Ordnung der Bevölkerung auf dem Territorium der ehemaligen DDR, eindeutig sein muss und daher alle betrachteten kontingenten Alternativen logischerweise kontrafaktische Möglichkeiten bleiben müssen. Für die synchrone Variante müssen zwei getrennte Kontingenzgraphen erstellt werden, so dass die Interaktion beider Gesellschafts- und Wirtschaftsordnungen von der Kontingenzanalyse nicht erfasst werden würde. Wie aber ist der synchrone Fall mit Hilfe des analytischen Kontingenzkonzepts adäquat modellierbar? Zwei Wege sind möglich. Der naheliegende erste Weg besteht darin, dass das zugrundeliegende System für die Modellierung geeignet geändert werden muss, indem im Beispiel die beiden Territorien der ehemaligen DDR und der Bundesrepublik und ihre jeweiligen politischen und wirtschaftlichen Ordnungen als das der Modellierung zugrundeliegende System und nicht zwei getrennte Systeme mit zugehörigen Kontingenzgraphen betrachtet werden. Ein zweiter Weg der Kontingenz-Modellierung synchroner alternativer Prozesse kann darin bestehen, dass man das Konzept des eindeutigen faktischen Prozess-Pfades im Kontingenzgraphen aufgibt und – für diesen Fall – ab dem Bifurkationspunkt in 1949 zwei Pfade im Graphen

als faktisch betrachtet. Natürlich können zu beiden Pfaden dann im Prozessverlauf alternative kontrafaktische Prozessverläufe wie in der bisherigen Modellierung hinzukommen. 1990 konvergieren dann beide Prozessstränge wieder.

Die graduelle Messung von Kausalitätsbeziehungen durch den prograden und den retrograden Kausalitätsgrad

Mit Hilfe des Kontingenzgraphen können nun zwei Kausalitätsgrade definiert werden – der prograde und der retrograde Kausalitätsgrad. Während der prograde Kausalitätsgrad den Grad der Eindeutigkeit der kausalen Verursachung eines späteren Zustands E_{i+n} des Graphen zum Zeitpunkt t_{i+n} durch einen früher liegenden Zustand E_i zum Zeitpunkt t_i durch eine rationale Zahl zwischen 0 und 1 bemisst, wird die retrograde Kausalität zwischen E_{i+n} und E_i als rationale Zahl zwischen 0 und 1 gemessen, die den Grad von E_i als eindeutiger Verursacher von E_{i+n} bestimmt.

Konkret lässt sich der n-prograde Kausalitätsgrad zwischen E_i und E_{i+n} dadurch berechnen, dass die Anzahl der Pfade im Graphen, die von E_i zu E_{i+n} führen, dividiert wird durch die Anzahl der Pfade, die von E_i zu irgendeinem Zustand des Graphen zum Zeitpunkt t_{i+n} führen. Offensichtlich muss dieser Quotient zwischen 0 und 1 liegen, 0 und 1 eingeschlossen. Entsprechend wird der m-retrograde Kausalitätsgrad zwischen E_{i+m} und E_i dadurch berechnet, dass die Anzahl der Pfade im Graphen, die von E_i zu E_{i+m} führen, dividiert wird durch die Anzahl der Pfade, die von irgendeinem Zustand zum Zeitpunkt t_i zu E_{i+m} führen. Offensichtlich liegt auch dieser Quotient immer zwischen 0 und 1.

Die folgenden beiden Graphiken zeigen zwei einfache und instruktive Spezialfälle mit n = m = 1, also jeweils nur einem Zeitschritt: Der 1-retrograde Kausalitätsgrad von E_i in Abbildung 7-3 beträgt ¼, der 1-prograde von E_i in Abbildung 7-4 beträgt 1/5.

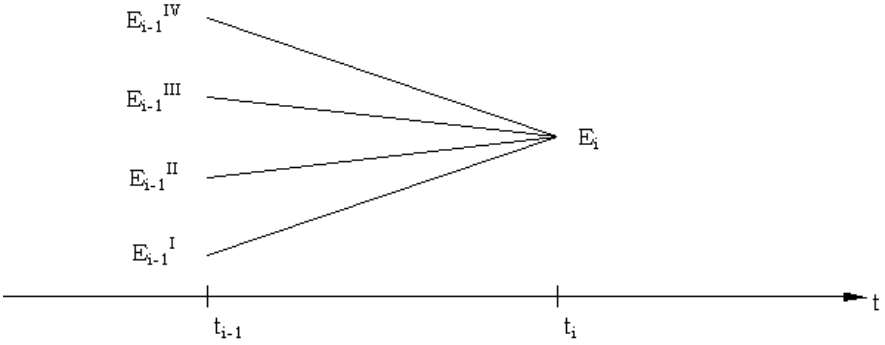


Abbildung 7-3: Retrograde Alternativenmenge mit 4 Knoten

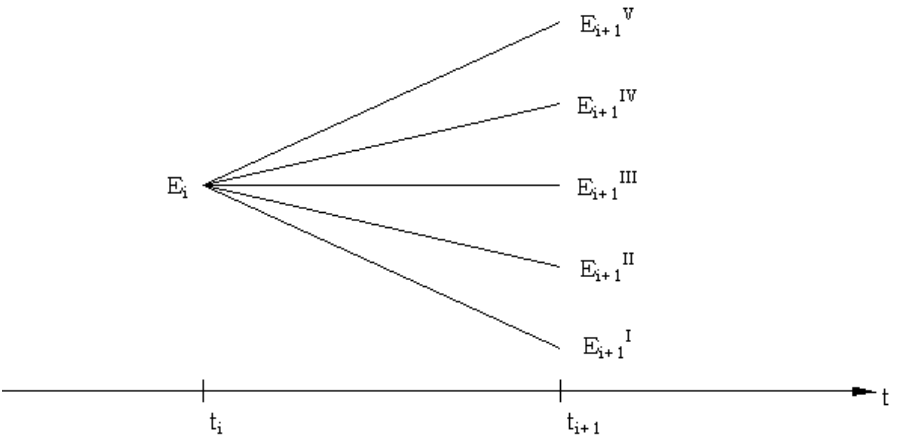


Abbildung 7-4: Prograde Alternativenmenge mit 5 Knoten

Ein weiteres Beispiel: In Abbildung 7-1 oben beträgt der 2-prograde Kausalitätsgrad $C^{P}_{E1 \rightarrow E3^{III}}$ zwischen dem initialen Zustand E_1 und E_3^{III} zum Zeitpunkt t_3 3/11, da 3 Pfade von E_1 zu E_3^{III} und 11 Pfade von E_1 zu einem der 6 möglichen Zustände zum Zeitpunkt t_3 führen.

Zum Verhältnis zwischen dem Kontingenzansatz und den kausallogischen Begriffen »notwendig« und »hinreichend«

Es stellt sich die Frage, in welcher Beziehung die klassischen kausallogischen Kategorien von Ursachen-Wirkungs-Zusammenhängen zwischen Zuständen oder Ereignissen *notwendig, hinreichend und äquivalen*t zum Kontingenzansatz stehen. Lässt sich das Kontingenzkonzept vielleicht vollständig mit Hilfe dieser klassischen logischen Ursachen-Wirkungs-Kategorien beschreiben, was bedeuten würde, dass es lediglich eine Reformulierung von bereits Bekanntem darstellt? Einige Überlegungen zeigen, dass dies keineswegs der Fall ist. Denn der Kontingenzansatz modelliert in der Anwendung auf ein sozioökonomisches System die »Möglichkeitsumgebung« der faktischen Zustände des historischen – oder der erwarteten Zustände des künftigen – Evolutionspfades des Systems. Die kausallogischen Begriffe »notwendig« und »hinreichend« hingegen beziehen sich abstrakt und allgemein auf mögliche kausallogische Relationen, in denen zwei Elemente A und B hinsichtlich der Art der Verursachung von B durch A zu einander stehen können. Es gibt aber partielle Berührungen beider Herangehensweisen.

Die logische Relation »**A ist notwendig für B**«, formal dargestellt durch B => A, d. h. die Existenz von B impliziert immer auch die Existenz von A, ist äquivalent zu der Relation ¬A => ¬B, d. h., »nicht A impliziert nicht B«. Als Beispiel: Wasser (B) enthält immer Sauerstoff (A). Und umgekehrt: Ohne Sau-

erstoff entsteht kein Wasser. Diese logische Notwendigkeits-Implikation findet man wieder in einer Teil-Konfiguration des Kontingenzgraphen in Abbildung 7-5 unten: E_i^I ist notwendig für E_{i+1}^I, aber E_{i+1}^I und damit auch E_i^I sind nicht notwendig für E_{i+2}, da E_{i+2} auch E_{i+1}^{II} als potentiellen Vorgängerzustand hat.[13] Allgemein gesagt ist E_{i-n} genau dann als Vorgängerzustand **notwendig** für E_i, wenn alle 1-retrograden Alternativenmengen zwischen E_i und Ei_{-n} einpunktig sind. Daraus wird deutlich, dass das Konzept eines Kontingenzgraphen die kausallogische Kategorie der Notwendigkeit als Spezialfall enthält.

Es gibt aber noch einen weiteren deutlichen Unterschied zwischen dem Kontingenzansatz und dieser kausallogischen Kategorie. Im Eingangsbeispiel sind zwei Faktoren gemeinsam notwendig für die Entstehung von Wasser: Wasser- und Sauerstoff. Ein Kontingenzgraph kann dies aus der Logik seiner Konstruktion als diachroner Di-Graph mit möglichen Zuständen des betrachteten ökonomischen Systems und verbindenden Kanten bzw. Pfaden zwischen den Zuständen im Raum der möglichen Zustände so nicht abbilden. Der Kontingenzgraph in Abbildung 7-3 zeigt z. B. nicht, dass die vier möglichen Vorgängerzustände E_{i-1}^I bis E_{i-1}^{IV} von E_i gemeinsam notwendig sind für den Zustand E_i, sondern nur, dass jeder dieser vier Vorgängerzustände »**hinreichend**« ist für E_i als Nachfolgezustand. So kann z. B. der Fall abgebildet werden, dass sowohl Regen als auch ein Gartenschlauch jeweils den Rasen mit Wasser versorgen können, aber der Fall, dass nur Wasserstoff und Sauerstoff zusammen Wasser erzeugen können, kann nur durch einen neuen Zustandspunkt im Graphen (»Sauerstoff und Wasserstoff sind vorhanden«) modelliert werden, von dem aus eine Kante zu »Wasser« führt.

Die logische Implikation »**A ist hinreichend für B**«, in Symbolen A => B (A impliziert immer B) wurde gerade schon angesprochen. Logisch äquivalent formuliert ergibt sich ¬B => ¬A (»nicht B impliziert immer nicht A«). Als Beispiel sei ein Befund aus der experimentellen Spieltheorie genannt: Eine Person, die sich an die gesellschaftliche Norm hält, fair zu teilen, wird in einem Ultimatum-Spiel nicht das egoistische homo-oeconomicus-Verhalten zeigen, alles bis auf einen marginalen Rest für sich zu beanspruchen. Kurz: Normkonformität => faires Aufteilungsverhalten. Diese Implikationskategorie lässt sich im Kontingenzgraphen von Abbildung 7-5 z. B. im Zustand E_{i+1}^{II} wiederfinden, der in einem Zeitschritt einen eindeutigen Nachfolgerzustand E_{i+2} hat und damit hinreichend ist für E_{i+2}. In einem erweiterten Sinn kann (s. Abbildung 7-4) ein Zustand E_i auch als hinreichend für mehrere alternativ mögliche Zustände E_{i+1}^I, E_{i+1}^{II}, E_{i+1}^{III}, E_{i+1}^{IV} zum Zeitpunkt t_{i+1} angesehen werden, aber dann wird die Formulierung »E_i impliziert immer E_{i+1}^I« der formallogischen

[13] Der Kontingenzgraph in Abbildung 7-5 zeigt den Fall einer Äquifinalität, d. h., mehrere – oder wie hier alle – Pfade enden im selben Endzustand, der, wie in Abbildung 7-5, möglicherweise dann stationär stabil sein kann. Auch wenn Äquifinalität in der Lebenswelt durchaus vorkommt, bedeutet das nicht die Irrelevanz einer Möglichkeitsanalyse, wie es der vorliegende Beitrag vorschlägt da es in der Lebenswelt entscheidend darauf ankommt, was im – möglicherweise langen – Zeitraum vor ti+2 passiert, und zudem die Konvergenz in ti+2‘ vorher (mehr oder weniger) ungewiss ist.

Schreibweise $E_i => E_{i+1}^I$ bedeutungslos. In diesem Sinn ist jeder Zustand für jeden seiner Nachfolgezustände im Graphen hinreichend. Allgemein gesagt ist also bei mehreren Zeitschritten E_i »im strengen Sinn« hinreichend für E_{i+n}, wenn E_i und E_{i+n} im Graphen durch einen eindeutigen Pfad verbunden sind, d. h., wenn alle 1-prograden Alternativmengen zwischen E_i und E_{i+n} einpunktig sind. Wie schon bei der Notwendigkeits-Kategorie wird auch hier deutlich, dass das Konzept eines Kontingenzgraphen allgemeinere Situationen und Beziehungen zwischen Zuständen eines evolvierenden Systems abbildet und die kausallogische Kategorie »hinreichend« als Spezialfall enthält.

Die logische Äquivalenz zwischen A und B, formal A <=> B, also »A ist genau dann der Fall, wenn B der Fall ist« oder: »A dann und nur dann, wenn B«, ergibt sich als Kombination der beiden vorhergehenden Implikationsrichtungen. Ein Beispiel geben in Abbildung 7-5 die beiden Zustände E_i^I und E_{i+1}^I.

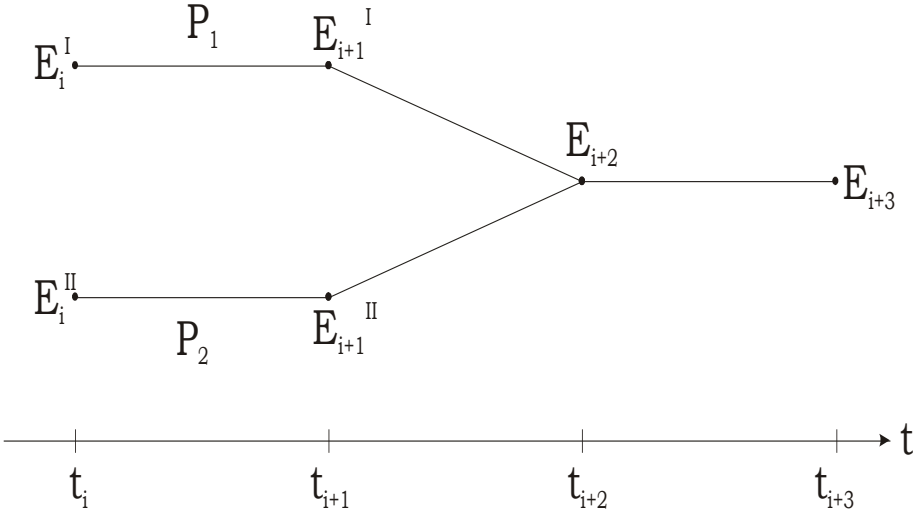


Abbildung 7-5: Konvergenz zweier separater Prozesse: ein Beispiel für Äquifinalität

Die Erweiterung der Kontingenzanalyse durch Wahrscheinlichkeiten – zum Verhältnis zwischen Kausalitäts-Kontingenzanalyse und Wahrscheinlichkeitstheorie

Konstruktionsbedingt ist der Kontingenzansatz grundsätzlich verschieden vom stochastischen bzw. probabilistischen Denkansatz. Während der stochastische Ansatz auf Zufallsexperimente in Grundgesamtheiten oder auf subjektive Wahrscheinlichkeitszurechnungen von Akteuren basiert, kommt das Kontingenzkonzept prinzipiell ganz ohne Wahrscheinlichkeitszurechnungen aus. Die analytische Kontingenzmodellierung ist zudem diachron-zeitbezogen und kann daher Pfadabhängigkeiten berücksichtigen, ist prozeßspezifisch in-

halts- und sachbezogen, so dass für alle Zustände und Pfade eines modellierten Prozesses nachvollziehbare und plausible Begründungen gegeben werden können, und kann durch den Zeitbezug im Gegensatz zum stochastischen Ansatz unterscheiden zwischen nach vorne gerichteten prograden und in der Zeit rückwärts gerichteten retrograden Verursachungsbeziehungen. Dadurch lässt der Kontingenzansatz nicht nur Aussagen über Korrelationen zu, sondern insbesondere auch Schlussfolgerungen über Kausalitätsbeziehungen zwischen diachronen Zuständen sowohl in prograder als auch in retrograder Zeitrichtung. Insbesondere wird damit das Risiko des »post-hoc-ergo-propter-hoc«-Irrtums reduziert.

Trotz der systematischen Unterschiede liegt es andererseits aber auch nahe, das Kontingenzkonzept durch Wahrscheinlichkeiten zu erweitern, sofern Wahrscheinlichkeitszurechnungen für die Kanten des Kontingenzgraphen vorliegen, seien sie objektiv oder subjektiv. Graphisch wird die Wahrscheinlichkeitserweiterung im Modell eines Kontingenzgraphen dadurch erreicht, dass man an jedem Zustand bzw. Knoten des Graphen alle Kanten der zugehörigen prograden Alternativenmenge gemäß einer Wahrscheinlichkeitsverteilung mit Wahrscheinlichkeiten gewichtet, so dass sie sich also zu 1 addieren.

Das formal-analytische Grundelement für diese wahrscheinlichkeits-erweiterte Kontingenzanalyse ist das Pfadwahrscheinlichkeitsgewicht, oder einfach Pfadgewicht, eines beliebigen Pfades im Graphen, das in naheliegender Weise als die konventionelle bedingte Wahrscheinlichkeit für diesen Pfad im Graphen zu definieren ist, also als das Produkt der Wahrscheinlichkeiten der den betrachteten Pfad konstituierenden Kanten.

Will man nun die Konzepte des prograden und des retrograden Kausalitätsgrades um Wahrscheinlichkeiten erweitern, so bietet es sich in naheliegender Weise an, im Zähler beider Kausalitätsgrade-Quotienten jeweils die Zahl der verbindenden Pfade durch die Summe der Pfad(wahrscheinlichkeits)gewichte derselben verbindenden Pfade zu ersetzen. Analog tauscht man im Nenner die Summe der Anzahl der dort in der Grunddefinition relevanten Pfade aus gegen die Summe der Pfad(wahrscheinlichkeits)gewichte derselben Pfade.

Der mögliche Verdacht, dass sich das wahrscheinlichkeitserweiterte und das Basis-Kontingenz-Kausalitäts-Konzept vollständig durch geeignete Umformulierungen des konventionellen wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansatzes ergeben und damit obsolet sind, erweist sich als falsch, wie einfache Gegenbeispiele zeigen. Natürlich entsprechen das Pfad(wahrscheinlichkeits)gewicht und der prograde wahrscheinlichkeitserweiterte Kausalitätsgrad zwischen zwei Zuständen E_i zu E_{i+n} konstruktionsbedingt genau der konventionellen bedingten Wahrscheinlichkeit. Aber hier hört die direkte Korrespondenz zwischen bedingter Wahrscheinlichkeit und den vorgestellten Konzepten auch schon auf, wie das folgende Beispiel zeigt.

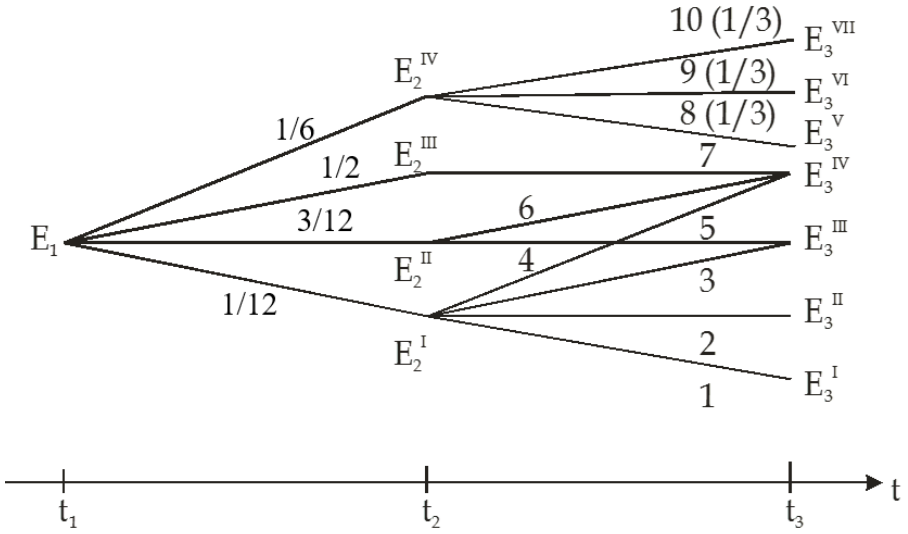


Abbildung 7-6: Ein Kontingenzgraph mit Wahrscheinlichkeitsgewichten

Die retrograde wahrscheinlichkeitsgewichtete Kausalität des Zustandspaares E_3^{IV} und E_2^{II} beträgt 2/7, wenn man an den Zuständen bzw. Knoten E_2^{I} und E_2^{II} jeweils den abgehenden Kanten eine Wahrscheinlichkeitsgleichverteilung zuschreibt, also jeweils die Wahrscheinlichkeit ½ für die Kanten 5 und 6 und jeweils ¼ für die Kanten 1 bis 4. Dieser Wert hat nichts zu tun mit der bedingten Wahrscheinlichkeit mit dem Wert 1/2, von E_2^{II} den Zustand E_3^{IV} zu erreichen, oder mit dem nicht-wahrscheinlichkeitsgewichteten retrograden Kausalitätsgrad, der 1/3 beträgt. Die bedingte Wahrscheinlichkeit, von E_1 den Zustand E_3^{VI} zu erreichen, beträgt wie der wahrscheinlichkeitsgewichtete prograde Kausalitätsgrad $1/6 \times 1/3 = 1/18$. Der nicht wahrscheinlichkeitsgewichtete prograde Kausalitätsgrad beträgt aber 1/10, und wenn an allen Knoten bzw. Zuständen eine gleichgewichtende Wahrscheinlichkeitsverteilung der abgehenden Kanten vorgenommen würde, hätte die bedingte Wahrscheinlichkeit, von E_1 den Zustand E_3^{VI} zu erreichen, immer noch nicht den Wert 1/10 des nicht wahrscheinlichkeitsgewichteten prograden Kausalitätsgrades, sondern den Wert 1/12.

Fazit – was sind die Verdienste des kontingenzanalytischen Ansatzes aus evolutionswissenschaftlicher und evolutionsökonomischer Perspektive?

Kontingenz ist ein Charakteristikum unserer von Prozessen geprägten Lebenswelt. Dies legt für das wissenschaftliche Nachdenken über Prozesse und deren Modellierung und Analyse insbesondere in den Sozialwissenschaften eine Kontingenzorientierung nahe. Das heißt, man versucht, für die in der Realität (partiell) verlaufs- und ergebnisoffenen Prozesse, die weder vollständig

determiniert noch stochastisch, aber auch nicht arbiträr oder erratisch verlaufen, ex-post alternativ mögliche Prozesse zu konstruieren. So entstehen (kontingente) Möglichkeitsumgebungen faktischer Prozessverläufe. Für in die Zukunft gerichtete Prozesse gilt prinzipiell dasselbe Verfahren, allerdings kann es hier den faktischen Referenzprozess noch nicht geben. Eine graphische Darstellungsform sowie weitergehende Analysemethoden im Hinblick auf Kausalitätsüberlegungen in Prozessen bilden den hier vorgestellten graphisch- analytischen Kontingenzansatz.

Der vorgestellte Kontingenzansatz in seinen beiden Ausprägung – der Ex-post-Ausprägung auf der Ebene der kontrafaktischen Analyse und der Ex-ante-Ausprägung auf der Ebene der Szenarienanalyse – basiert nicht auf wunschgeleiteten Phantasien oder beliebigen Spekulationen. Er zielt in seiner Ex-post-Ausprägung nicht auf »bessere« kontrafaktische Wunsch-Vergangenheiten ab, sondern auf ein nachträgliches Verstehen faktischer Prozesse. Im Kontingenzansatz werden die während eines faktischen Prozessverlaufs realistischer Weise gegebenen Möglichkeiten, ihn zu verändern, im Gedankenexperiment systematisch ausprobiert, so dass dadurch die Gründe für den faktischen Verlauf und den Grad seiner Unumgänglichkeit bzw. Veränderbarkeit erkennbar werden. In seiner Ex-ante-Ausprägung liefert der Kontingenzansatz in analoger Weise nachvollziehbar begründbare Kriterien für Entscheidungen, Maßnahmen und andere Einflussfaktoren auf künftige Prozessverläufe.

Dadurch, dass Kausalitätsbeziehungen zwischen Zuständen während eines Prozessverlaufs in realer Zeit untersucht und in ihren Intensitäten graduell bestimmt werden können, leistet der Kontingenzansatz einen Beitrag zur Untersuchung der grundlegenden Frage nach der Existenz historischer Gesetzmäßigkeiten im Verlauf realer Prozesse. Solche historischen Verlaufsgesetzmäßigkeiten können z. B. rekurrente Muster, also im Zeitverlauf strukturähnlich wiederkehrende Verlaufsabschnitte sein, die zunächst empirische Generalisierungen zulassen und letztlich theoretisch erklärt werden müssen. Zustände eines Prozesses mit einem irregulären und damit nicht prognostizierbaren Verlauf sind dagegen singuläre Ereignisse, die lediglich einer fallweisen, kasuistischen Analyse zugänglich, aber nicht wissenschaftlich systematisch und strukturell erklärbar und damit nicht wirklich theoriefähig sind. Fundierte Prognosen und Handlungsempfehlungen im Hinblick auf Gestaltungsziele sind so insbesondere im Bereich der Wirtschaft nicht möglich. Aber genau die werden von einer gesellschaftlich relevanten Wirtschaftswissenschaft erwartet und benötigt.

Literaturverzeichnis

Cordes, C. (2006): Darwinism in economics: from analogy to continuity. In: *Journal of Evolutionary Economics* 16, S. 529–541. Online verfügbar unter https://link.springer.com/article/10.1007/s00191-006-0027-3, zuletzt geprüft am 26.10.2020.

Hodgson, G. M. (2004): Darwinism, Causality and the Social Sciences. In: *Journal of Economic Methodology*, S. 175–194.

Hodgson, G. M.; Knudsen, T. (2010): [Duplikat] Darwin's conjecture. The search for general principles of social and economic evolution. Chicago, London: University of Chicago Press. Online verfügbar unter http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10438641.

Lehmann-Waffenschmidt, M. (2010): Contingency and Causality in Economic Processes - Conceptualizations, Formalizations, and Applications in Counterfactual Analysis. In: *European Review* 18 (4), S. 481–505.

Lehmann-Waffenschmidt, M. (2018): Kontrafaktik, Kontingenz, Evolution und Co Ein kontrafaktisches Gespräch. In: Christoph Meißelbach, Jakob Lempp und Stephan Dreischer (Hg.): Politikwissenschaft als Beruf. Perspektiven aus Wissenschaft und Gesellschaft. Wiesbaden, Germany: Springer VS, S. 279–300. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-21557-6_20, zuletzt geprüft am 26.10.2020.

Lehmann-Waffenschmidt, M. (2019): Möglichkeitswissen(schaft) zwischen Kontingenz, Kontrafaktik und Transformation. In: L. Hochmann, S. Graupe, T. Korbun, S. Panther und U. Schneidewind (Hg.): Möglichkeitswissenschaften. Ökonomie mit Möglichkeitssinn, S. 475–489.

Levit, Georgy S.; Hossfeld, Uwe; Witt, Ulrich (2011): Can Darwinism be "Generalized" and of what use would this be? In: *Journal of Evolutionary Economics* 21 (4), S. 545. DOI: 10.1007/s00191-011-0235-3.

Ortmann, G. (1995): Formen der Produktion: Westdeutscher Verlag.

Witt, U. (2004): Beharrung und Wandel – Ist wirtschaftliche Evolution theoriefähig? In: *Erwägen-Wissen-Ethik* 15 (1), S. 33–45.

Witt, U. (2014): The Future of Evolutionary Economics: Why the Modalities of Explanation Matter. In: *Journal of Institutional Economics*, S. 645–664.

8 Transformationsprozesse in Natur und Wirtschaft

Klaus-Stephan Otto, EVOCO GmbH

Einleitung

Wir befinden uns gerade in bedeutsamen Transformationsprozessen, die unsere Wirtschaftsprozesse, aber auch die Prozesse unseres Zusammenlebens massiv verändern. Ist dies ein rein menschliches Phänomen? Auch in der Evolutionsgeschichte des Lebens auf unserer Erde hat es an vielen Punkten vergleichbare Transformationsprozesse, verbunden mit vielen Umwälzungen, gegeben, von denen wir für unsere heutigen Prozesse wichtige Hinweise und Anregungen ableiten können. Nicht im Sinne eines direkten Kopierens, sondern um wichtige Anregungen zur Prozessoptimierung zu bekommen.

Abbildung 8-1: Weißer Baumpilz, ©Klaus-Stephan Otto.

Die Ermöglichung des Recyclingprozesses des Holzes der Bäume ist dafür ein gutes Beispiel: Im Transformationsprozess der Pflanzen, die vom Wasser aufs Land gekommen sind, hatten die Pflanzen an Land plötzlich mit der Schwerkraft zu kämpfen, sie mussten deswegen sehr viel stabiler werden, um in dem neuen Element zu überleben. Es entstand der Stoff Lignin, der Pflanzen und später Bäumen Stabilität verleiht, sodass sie besser mit der Schwerkraft umgehen können. Über einen langen Zeitraum nach der Entstehung des Lignins konnte dieses allerdings nicht zersetzt werden, da in der Natur noch keine Lösung dafür vorhanden war. In dieser Zeit sind die fossilen Brennstoffe Öl, Kohle und Gas aus den Ablagerungen der Bäume, die nicht recycelt wurden, entstanden. Deren heutige übermäßige Nutzung für die Energiegewinnung ist einer der wichtigen Treiber für menschengemachte Klimaveränderung. Erst der weiße Baumpilz als Innovation der Natur – wir sehen ihn vielfach bei unseren Waldspaziergängen an Totholz - war in der Lage, das Lignin abzubauen. Dadurch kann Holz komplett recycelt werden und die zersetzten Stoffe sind Grundlage für ein neues Wachstum der Pflanzen und Bäume. Danach ist kein

weiteres Öl mehr entstanden. Die Natur hat den Recyclingprozess weiterentwickelt und perfektioniert. Die mit der Transformation der Pflanzen, die ein neues Element besiedelten, einhergehende Begleiterscheinung brauchte einige Zeit für eine neue Lösung. Die Entwicklung von Kunststoffen im Zuge der industriellen Revolution hat für unser Leben eine Reihe von Vorteilen gebracht, aber wir sind bisher noch nicht in der Lage, ein umfassendes Recycling dafür zu gewährleisten. Wenn wir das konsequente Recycling der Natur in Stoffkreisläufen genauso auf unseren Umgang mit Kunststoffen anwenden würden, wäre das Problem der ungeheuren Vermüllung der Meere gelöst und wir wären einer nachhaltigen Wirtschaftsweise ein gutes Stück nähergekommen. Recyclingprozesse zu entwickeln und zu optimieren ist also nicht eine geniale Erfindung von Homo sapiens, sondern wir vollziehen noch viel zu langsam nach, was die Natur seit vielen Millionen Jahren praktiziert.

Definition von biologischer/bioinspirierter Transformation

Um welche Transformationen geht es? Unter dem Transformationsbegriff, wie er in diesem Beitrag benutzt wird, verstehen wir eine grundlegende Veränderung von Lebensprozessen auf der Erde. Das können Lebensprozesse in der Natur, aber auch in der menschlichen Kultur sein. In der Entwicklung der Gesellschaft können wir heute von drei wichtigen Transformationen sprechen: Erstens der digitalen Transformation, die den Diskurs bestimmt und momentan nicht zuletzt als großes Heilsversprechen für die Menschen in aller Munde ist, zweitens der biologischen oder auch bioinspirierten Transformation, die die Übertragung von Naturprozessen auf wirtschaftliche Prozesse, Technik und gesellschaftliche Entwicklungen zum Mittelpunkt hat und schließlich drittens von der »großen« oder auch ökosozialen Transformation hin zu einer nachhaltigen und klimagerechten Wirtschaft und Gesellschaft, wobei letztere Transformationsprozesse sich sehr stark überschneiden. Der Begriff der biologischen oder auch bioinspirierten Transformation beinhaltet eine klare Lösungsrichtung: von bewährten Prinzipien der Evolution in der Natur für die Wirtschaft und Gesellschaft zu lernen und nachhaltige Lösungen an Naturprozessen zu orientieren.

In diesem Beitrag soll beleuchtet werden, inwiefern aus Transformationsprozessen in der Natur für wirtschaftliche und gesellschaftliche Transformationsprozesse gelernt werden kann und es sollen beispielhaft Prinzipien vorgestellt werden, die sich übertragen lassen. Dabei wird unsere Erfahrung aus der Beratungsarbeit der Evoco GmbH einbezogen werden.

Teil der biologischen/bioinspirierten Transformation ist die Bionik, die technische Lösungen aus der Natur auf technische Lösungen in der Wertschöpfungskette überträgt. Die Bionik ist inzwischen etabliert und die Übertragung von Prozessen aus der Natur auf die Technik schon lange anerkannt. Bioinspirierte Transformation beinhaltet aber auch die Art, wie wir wirtschaften und

wirtschaftliche Prozesse an den Gesetzmäßigkeiten der Natur ausrichten, z. B. auch unseren Umgang mit wirtschaftlichem Wachstum zu überdenken. In den Rahmen der bioinspirierten Transformation ordnen sich auch die Organisationsbionik bzw. das Evolutionsmanagement für die Optimierung von Organisationsprozessen ein. Die sich mit der Nutzung nachwachsender Rohstoffe und Organismen beschäftigende Bioökonomie sowie die Weiterentwicklung und Nutzung der Biotechnologie gehören ebenfalls zur biologischen Transformation. Ein weiteres Feld der biologischen Transformation ist die verstärkte Nutzung von Erkenntnissen aus der Neurobiologie für die Transformation. Mit all diesen Bestandteilen hat die bioinspirierte Transformation eine große Bandbreite, um die Herausforderungen der notwendigen Transformationsprozesse in vielen Bereichen unterstützen zu können.

In der Evolution entwickeln sich nach dem Philosophen Hartmann und dem Ethologen Lorenz in ihrer historischen Entwicklung verschiedene Schichten. (Lorenz 1984) Das, was an grundlegenden Gesetzmäßigkeiten in einer früheren Schicht der Evolution entstanden ist, gilt auch weiter in der nächsten Schicht. Die Physik und die Chemie sind die Wissenschaften der nicht belebten Materie, des Anorganischen, die schon existierte, bevor sich das Leben auf der Erde entwickelt hat. In der nächsten Schicht entwickelt sich das Leben auf der Erde, damit beschäftigen sich die Lebenswissenschaften, unter ihnen die Biologie. Die Gesetzmäßigkeiten der Physik und der Chemie gelten aber auch für die Biologie und z. B. die Evolutionstheorie, wie Darwin sie entwickelt hat. Mit der Entstehung der menschlichen Kultur ist eine weitere Schicht in der Evolution entstanden: Für diese gelten sowohl die Gesetzmäßigkeiten der Physik und der Chemie als auch die Gesetzmäßigkeiten der Entstehung und Entwicklung des Lebens, wie sie die Biologie und andere Lebenswissenschaften gefunden haben. Dabei ist in der Evolution und der evolutionären Entwicklung oft auch eine Komplexitätsentwicklung zu beobachten: Es wird in diesem Prozess Altes zerstört und es entwickelt sich Neues, das so vorher noch nicht da gewesen ist und in vielen Fällen auch eine höhere Komplexität ausweist. So wird auch deutlich, dass die kulturelle Evolution Prozesse beinhaltet, die es in der biologischen Evolution bis dahin noch nicht gegeben hat. Trotzdem gelten die vorher entstandenen Gesetzmäßigkeiten auch in der kulturellen Evolution weiter.

Übertragung nur in der Technik?

Um welche Bereiche geht es in der biologischen Transformation bei der Übertragung von Lösungen aus der Natur? Die Fraunhofer-Gesellschaft hat seit 2017 intensiv am Konzept der biologischen Transformation gearbeitet. Ihr Präsident Prof. Reimund Neugebauer definiert sie dabei wie folgt:

»Die Bionik sucht in der Natur nach Lösungen, mit denen sich vor allem Gestalt und Design von technischen Strukturen verbessern lassen. Die biologi-

sche Transformation aber geht weit darüber hinaus. Sie beschreibt den Prozess der zunehmenden Nutzung von Ressourcen, Strukturen und Prozessen der Natur in der Technik. Die Grundlage hierfür ist die digitale Transformation, der wir eine biologische Transformation an die Seite stellen.« (Reckter 2019)

Neugebauer erweitert die klassische Bionik. Aber diese Erweiterung ist aus unserer Sicht noch weiterzuführen. Die Definition der biologischen Transformation sollte über die Anwendung in der Technik hinausgehen. Für uns ist die Anwendung auf technische Prozesse eine Teilmenge der umfassenderen Anwendung auf wirtschaftliche und gesellschaftliche Prozesse, um Nachhaltigkeit zu gewährleisten, naturzerstörerische Prozesse abzuwenden und eine nachhaltige Klimapolitik umzusetzen. Dabei hat die Technik eine dienende und unterstützende Funktion für die gesamtgesellschaftliche und wirtschaftliche Transformation, die ohne eine Weiterentwicklung der Technik nicht erfolgreich sein kann. Technische Anwendungen sind also einerseits Mitverursacher von menschengemachtem Klimawandel und Umweltzerstörung, bieten aber auf der anderen Seite auch Möglichkeiten, um negative Begleiterscheinungen von Innovationsprozessen zu korrigieren und die notwendigen Nachhaltigkeitsziele umzusetzen. Dies wird aber nur möglich sein, wenn die biologische Transformation sich nicht auf Übertragungen in der Technik beschränkt, sondern Managementprozesse sowie wirtschaftliche und gesellschaftliche Prozesse insgesamt einbezieht.

An einem praktischen Beispiel kann man das verdeutlichen: Die Kultur der Nutzung von Kleidung in den industrialisierten Ländern ist geprägt durch einen außerordentlich hohen Ressourcenverbrauch, Umweltverschmutzung, Naturzerstörung sowie die Nichteinhaltung von Menschenrechten und menschengerechten Arbeitsbedingungen. Die technische Entwicklung von immer besseren, abbaubaren Fasern, Maschinen, die die Arbeitsbedingungen verbessern und Verfahren, die die Belastung der Umwelt durch Schadstoffe bei der Produktion reduzieren, ist schon sehr weit fortgeschritten. Die Technik allein kann aber nicht die bestehenden Probleme aus unserem Nutzungsverhalten von Textilien lösen, da diese sehr komplex sind und sich aus vielen verschiedenen sozialen, gesellschaftlichen, kulturellen, wirtschaftlichen und ökonomischen Faktoren zusammensetzen: Viele Verbraucher wollen zahlreiche neue, billig hergestellte Kleidung schnell und oft online kaufen. Dadurch verlängert sich die Lieferkette, gibt es einen hohen Ressourcenverbrauch in der Produktion, auch der Transport durch den Handel erhöht sich signifikant. Dadurch steigen die CO_2-Emissionen bei der Herstellung und beim Vertrieb von Kleidung enorm. Bei der Herstellung von Naturfasern kommt es zu einem massiven Einsatz von Pestiziden. In der Produktion spielen auch die Entstehung von Mikroplastik mit den dazugehörigen Auswirkungen eine Rolle. Die Modeindustrie mit ihrem schnellen Wechsel der Kollektionen und der Ausrichtung auf schnelle Profite bildet die ökonomische Seite des übermäßigen Konsums ab. Die Verbraucher, die ein T-Shirt für zwei Euro wollen und sich einer

Kultur des schnellen Modewechsels und der Markenkulte unterwerfen, tragen ihren Teil dazu bei.

Die technische Entwicklung neuer Fasern/Materialien, Maschinen oder neuer Produktionsweisen allein reicht also nicht aus, um einen Wandel in der Textilindustrie zu bewirken. Es braucht das Zusammenspiel aller technischen, sozialen, ökologischen und kulturellen Faktoren, um einen nachhaltigen Umgang mit Kleidung zu erreichen. Wenn man sich bei der Lösung der heutigen komplexen Probleme auf die Technikanwendung reduziert, werden in vielen Fällen Lösungen nicht möglich sein. Dies erfordert ein komplexeres Denken für die Technikwissenschaften und erfordert ein neues Zusammenspiel mit den nichttechnischen Disziplinen.

Folgt die Technikentwicklung den evolutionären Gesetzmäßigkeiten?

Unbestritten ist heute, dass man in der Technikentwicklung Beispiele aus der Natur übertragen kann, wie es die Bionik umsetzt. Aber folgt auch die Technikentwicklung als Ganze den Gesetzmäßigkeiten der Natur? Dies ist deswegen wichtig, weil dann für Transformationsprozesse die Analyse der Evolutionsgeschichte von großer Bedeutung ist. Hier hat der Physiker und Philosoph Gerhard Vollmer eine klare Position bezogen. Er betont die Wichtigkeit der evolutionären Wissenschaft, zieht aber weiterhin eine Grenze zur Technikentwicklung. (Vollmer 2017) Er vertritt den Standpunkt, dass sich die natürliche Evolution nicht auf die Technikentwicklung übertragen lässt. Vollmer orientiert sich an Grassman (Grassmann 1985, 567 ff) und macht fünf Merkmale der Technikentwicklung fest, die seiner Meinung nach entscheidende Unterschiede zur natürlichen Evolutionsentwicklung ausmachen. Deswegen seien technische und natürliche Entwicklung nicht vergleichbar. Auf diese möchte ich im Einzelnen Bezug nehmen und herausarbeiten, warum die Übertragung doch sinnvoll und möglich ist.

In der Technikentwicklung ist laut Vollmer von Anfang an ein Ziel gesetzt, in der Natur aber nicht.

Die Komplexitätsentwicklung des Lebens ist stark von Zufällen geprägt. Aber die Organismen verfolgen durchaus Ziele. Nach den Erkenntnissen des Neurowissenschaftlers Antonio Damasio gibt es für alle Organismen zwei klare Ziele: Sie wollen überleben und dabei so angenehm leben wie möglich. (Damasio 2018) Darin unterscheiden sich menschliche Organismen nicht von anderen Organismen, auch nicht von den einfachsten, wie den Bakterien. Diese Ziele des Überlebens und angenehmen Lebens treiben die Evolution und bringen viele Innovationen hervor. Sie sind auch übergeordnete Treiber für die Technikentwicklung: Sie sollte dazu dienen, unser Überleben zu sichern und uns das Leben so angenehm wie möglich zu machen. Hier wird also deutlich, dass es sich eben nicht um einen Unterschied, sondern eine deutliche Parallele handelt. Eine weitere Argumentation betont, der Mensch allein

könne die Zukunft antizipieren und daran sein Handeln, seine Ziele ausrichten. Dies gelte auch für die Technikentwicklung, weswegen sie auch nicht mit der natürlichen Evolutionsentwicklung vergleichbar sei. Schaut man in die Natur, findet man aber ebenfalls Beispiele für zukunftsorientierte planvolle Vorgehensweisen: Z. B. schaut auch das Eichhörnchen in die Zukunft und bereitet sich auf den Winter vor, in dem die Nahrung knapp ist. Es legt versteckte Nahrungsvorräte an. Nun wird argumentiert, dass dieses Verhalten instinktgetrieben sei. Das macht aber für den Vergleich keinen Unterschied, denn das instinktgetriebene Verhalten ist Teil der Gesetzmäßigkeiten der Evolution. Auch der Mensch handelt in seiner Zukunftsplanung stark instinktgetrieben, eben mit dem Ziel des Überlebens und des möglichst angenehmen Lebens. Die große Finanzkrise 2008/2009 wurde von einem Finanzsektor ausgelöst, der instinktgetrieben immer mehr haben wollte und dieses Ziel unter Inkaufnahme so außerordentlich hoher Risiken mit katastrophalen Konsequenzen für die Wirtschaft und die Menschheit verfolgt hat, dass nicht mehr von rationaler, bewusster Planung gesprochen werden kann. Die Neurowissenschaft geht heute davon aus, dass weit mehr als neunzig Prozent unserer Gehirnaktivitäten nicht bewusst und kognitiv sind. Würde der Mensch nur bewusst und rational handeln, hätten wir nicht die Probleme, mit denen wir uns heute auseinanderzusetzen haben.

Abbildung 8-2: Eichhörnchen legen Nahrungsvorräte für den Winter an, ©Klaus-Stephan Otto.

Mutation, Rekombination und Auslese in der Natur sind nach Vollmer in der Technik durch das Spiel der Gedanken ersetzt, sowie der Elektronen in den Computern.

Schaut man sich den Innovationsprozess in der Natur an, lässt sich feststellen, dass er größtenteils nach Prinzipien des von uns entwickelten VAB-Modell verläuft: Es entsteht **V**ielfalt durch Mutation (z. B. durch Fehler, die beim Kopieren der Gene entstehen), Rekombination, Anpassungsprozesse oder durch zufällige Ereignisse. Dann findet in einem Selektionsprozess eine **A**uswahl statt. Was sich in dem Auswahlprozess bewährt und weiterbestehen soll, wird anschließend **b**ewahrt.

Bei der Herstellung eines Produktes in der Technikentwicklung erfolgt der Innovationsprozess nach den gleichen Prinzipien: Es wird eine **V**ielfalt von

Ideen entwickelt, was man machen und wie man es umsetzen könnte. In einem ersten **A**uswahlprozess werden erste Ideen ausgewählt und entsprechende Prototypen gebaut und getestet. Im nächsten **A**uswahlprozess wird entschieden, welche Produkte auf den Markt gebracht werden. Im Markt findet nun ein weiterer **A**uswahlprozess statt, das Produkt wird vom Markt angenommen oder es fällt durch. Ist ein gutes Produkt entstanden und angenommen worden, ist es wichtig, dieses zu **b**ewahren, die Qualität und Quantität der Herstellung zu gewährleisten und dafür zu sorgen, dass es am Markt bleibt.

Der große Unterschied zwischen Entwicklungsprozessen in der Natur und der Technik liegt an diesem Punkt darin, dass der Auswahlprozess in der Technik tatsächlich erst einmal gedanklich und in den Diskussionen von Menschen stattfinden kann. Wenn aber ein Produkt, das erst gedanklich und dann real entstanden ist, sich nicht bewährt, d. h. im Auswahlprozess des Marktes durchfällt, war das Produkt nicht erfolgreich. Der einfache Auswahl-Prozess in der Natur ist in der Wirtschaft durch einen mehrfachen Auswahl-Prozess ersetzt: Zuerst werden im Unternehmen Ideen ausgewählt (z. B. für ein neues Produkt), die umgesetzt werden sollen, danach erfolgt der Auswahl-Prozess auf dem Markt. Diese Unterschiede ändern aber nichts daran, dass der grundlegende Prozess der Entstehung von Innovationen in Technik und Natur sich nicht voneinander unterscheidet.

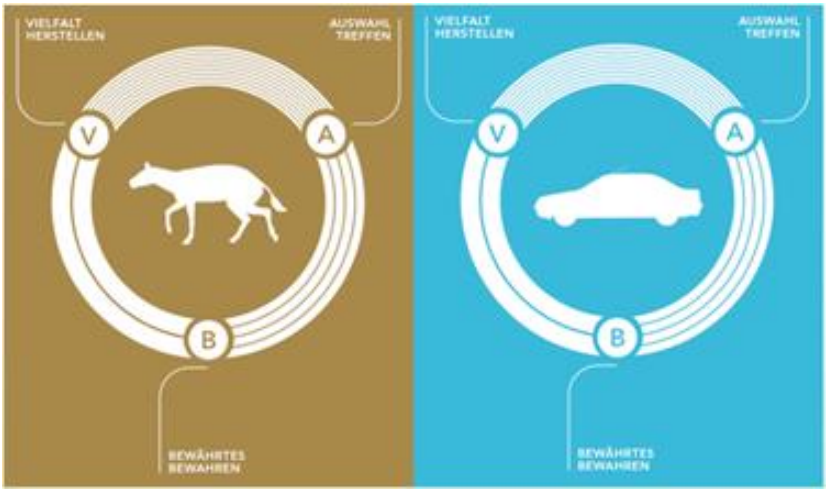


Abbildung 8-3: VAB-Modell in Natur und Technik, ©evoco GmbH.

Die Bewährung wird laut Vollmer in der Technik im Unterschied zur Natur schon weitgehend vor der Realisation beurteilt.

Wie im vorherigen Abschnitt ausgeführt, wird die Bewährung in der Technikentwicklung zwar schon vor der Realisation antizipiert, aber sehr viele Pro-

dukte gehen auf dem Markt unter, auch wenn sie vorher als erfolgreich beurteilt wurden. Die vorherige Antizipation kann die entscheidende Auswahl auf dem Markt nicht ersetzen. Wenn dies möglich wäre, hätten die Unternehmen sehr viel niedrigere Entwicklungskosten und es gäbe keine »Flops« mehr.

Nach Vollmer wird in der Technikentwicklung jedes Einzelteil gesondert, aber in Sicht auf das Ganze optimiert.

Die Natur optimiert viel besser in Sicht auf das Ganze als die heutige Technik. Diejenigen Innovationen in der Natur, die sich durchsetzen, die sich bewährt haben und bewahrt werden, sind in der Regel solche, die sich eben nicht als Einzelteil perfektioniert haben, sondern die sich in das gesamte Ökosystem und dessen Leben einpassen. Meine These an dieser Stelle lautet, dass die Natur dabei viel ganzheitlicher vorgeht und die Realisierung orientiert am Ganzen viel stärker ausübt, als das in der Technikentwicklung der Fall ist. Die Verliebtheit in neue technische Lösungen von Ingenieuren verhindert oftmals diese Sicht auf das Ganze. Die Entwickler der bekannten Kaffeekapseln aus Aluminium hatten bei dieser Innovation eben nicht das Ganze im Blick, sondern allein den speziellen Geschmack von Kaffee-Genießern und deren Bequemlichkeit, ohne die Abfallprobleme zu berücksichtigen. Es ist genau die Herausforderung einer nachhaltigen Technikentwicklung, in stattfindenden Transformationsprozessen die Komplexität der Technikfolgen im Blick zu haben und daraus resultierend langfristig nachhaltige Produkte zu entwickeln.

Informationsspeicher ist für Vollmer das erworbene Wissen der Menschheit.

Ist der Informationsspeicher für die technische Entwicklung das erworbene Wissen der Menschheit? Er ist es auch, aber die Natur selbst ist ein viel größerer Informationsspeicher und wir sind noch längst nicht in der Lage, diesen Informationsspeicher mit seinen unendlich vielen guten Lösungen im breiten Maße zu öffnen. Wenn wir ihn an einer Stelle öffnen, führt er uns oft zu neuen Geheimnissen, die zu öffnen eine weitere Herausforderung ist. Die Natur ist schon mit den verhältnismäßig einfachen Organismen in der Lage, Fotosynthese zu betreiben und dadurch viele ihrer Energieprobleme zu lösen. Wüssten wir, wie das gelingt, hätten wir die Energiewende schon längst gemeistert. Der österreichische Biologe Rupert Riedl geht davon aus, dass die Informationseinheiten in die Natur eingeschrieben sind: »Alle lebendige Struktur enthält gespeichertes Wissen, etwas wie ein Urteil über die Gesetze, unter welchen sie existiert.« (Riedl 1981, S. 26) Die materialisierten Lösungen der Natur, aber z. B. auch die DNA sind solch ein gespeichertes Wissen in der Natur. Die große Chance der biologischen Transformation liegt darin, das gespeicherte Wissen der Natur zu nutzen, das um ein Vielfaches größer ist als das gespeicherte Wissen von Homo sapiens.

Die vorangegangenen Ausführungen stützen also die These, dass Evolution in der Technik auf den gleichen Gesetzmäßigkeiten und Prozessen basiert wie die natürliche Evolution. Erste Formen der Technikentwicklung gibt es schon vor dem Menschen beim Werkzeuggebrauch von Tieren, etwa bei Affen, die

mit Stöcken Termiten aus dem Bau holen oder mit Steinen Nüsse knacken. Was bei Tieren noch nicht zu finden ist, sind Werkzeuge zur Herstellung von Werkzeugen. Das hat erst der Mensch erfunden. Die technische Evolution des Menschen hat also Dinge hervorgebracht, die in der vormenschlichen natürlichen Evolution so noch nicht zu finden sind. Aber wie vorher bereits ausgeführt, gehört auch das zum Prinzip der Evolution: Spätere Entwicklungen bringen oft Neues hervor, das es so vorher nicht gab. Kulturelle Evolution baut auf der evolutionären Entwicklung der Pflanzen und Tiere auf, aber sie entwickelt sie weiter; deswegen kann sie nicht gleich sein, aber sie verläuft nach den Grundgesetzmäßigkeiten der Evolution.

Erfolgreiche Transformationen mit Evolutionsmanagement

Die bisherigen Ausführungen machen deutlich, dass ein Vergleich zwischen der natürlichen Evolution und der kulturellen, wirtschaftlichen und technischen Entwicklungen nicht nur möglich, sondern auch sinnvoll ist. Deswegen arbeiten wir in der Evoco GmbH bei unserer Beratungsarbeit mit »Evolutionsmanagement«, bei dem es darum geht, zu schauen, was man aus der Natur für wirtschaftliche und organisatorische Prozesse lernen kann. Dabei gibt es fünf Prinzipien, die im Evolutionsmanagement genutzt werden: (Otto et al. 2007, S. 4) Erstens gibt es das Lernen aus einzelnen Naturvorgängen für wirtschaftliche Prozesse. Dieser Mikroblick, der einzelne innovative Lösungen aus der Natur untersucht und auf wirtschaftliche und organisatorische Prozesse überträgt, ist auch in der Bionik stark vertreten. Zweitens bedienen wir uns im Evolutionsmanagement des Makroblicks und schauen, wie größere evolutionäre Prozesse in der Natur verlaufen und was man hier für Wirtschaft und Organisationen lernen kann. Aus diesem evolutionären Gesamtblick lassen sich auch Antworten darauf finden, wie langfristige nachhaltige Lösungen für die Wirtschaft der Zukunft gefunden werden können. Er scheint uns besonders wichtig für die Weiterentwicklung der notwendigen Transformationsprozesse. Drittens lernen wir von der Neurobiologie, wie die Prozesse in dem wohl komplexesten Organ in der Natur, dem menschlichen Gehirn, ablaufen. Ein interessantes Beispiel ist hier, dass zwei Neuronen nicht in Dialog miteinander treten können: Ein Neuron gibt eine Nachricht an ein anderes Neuron; wenn dieses zweite Neuron antworten will, kann es das nicht direkt tun, sondern muss die Nachricht über ein drittes Neuron an das erste zurückgeben. Dadurch wird das Hochschaukeln von Prozessen verhindert. Unser Gehirn lässt Prozesse nicht durch Endlosfeedbackschleifen umkippen. Wir sehen es gerade in den sozialen Medien, wie schnell Fake News sich ausbreiten und nicht mehr kontrollierbar sind. Viertens geht das Evolutionsmanagement davon aus, dass die Evolution einerseits geschieht, aber gleichzeitig der Mensch in einem konkreten Prozess einzelne evolutionäre Entwicklungen kraft seines Bewusstseins auch aktiv mitgestalten kann. Ein CEO eines Unternehmens schaut nicht einfach zu, wie sich das Unternehmen entwickelt und womöglich

untergeht, sondern versucht, diesen Teilprozess einer evolutionären Entwicklung zu gestalten. Er oder sie leitet Schritte ein, die das Überleben des Unternehmens und damit auch die Arbeitsplätze für die Beschäftigten sichern. Dafür sitzt er oder sie an dieser Stelle und hoffentlich werden dabei die Führungskräfte und die Beschäftigten in diesen Prozess als Mitgestalter einbezogen. Als letzter, fünfter Punkt hat das Evolutionsmanagement eine ethische Dimension: Wirtschaftliche Entwicklungen sollen eingebettet werden in ein langfristiges Evolutionsgeschehen, Wirtschaft soll sich nachhaltig und naturbewahrend entwickeln und ihren Beitrag zum Klimaschutz leisten. Das ist die große Herausforderung unserer heutigen Transformationsprozesse.

In dem folgenden Abschnitt möchte ich anhand von drei konkreten Transformationsprozessen der Vergangenheit aufzeigen, was wir daraus für heutige Transformationsprozesse übertragen können.

Aus vergangenen Transformationsprozessen lernen

Vom Land aufs Wasser

Die Vorgänger unserer heutigen Wale als Meeressäugetiere waren Huftiere an Land. Es gab für sie einen Transformationsprozess, in dessen Zuge diese Tiere ihren Lebensraum in das Wasser verlegt haben. Eine Forschergruppe um Michael Hiller vom Dresdner Max-Planck-Institut für Molekulare Zellbiologie und Genetik fand 85 Gene, deren Verlust diesen Tieren ein Leben unter Wasser erst ermöglicht hat. (Huelsmann 2019) Sie haben das Gen verloren, das verhindert, dass die Lungen zusammenklappen, was für ihr Leben unter Wasser notwendig wurde. Außerdem haben sie sämtliche Melatonin-Gene verloren. Nur ohne diese Gene können die Gehirnhälften abwechselnd schlafen und immer eine Gehirnhälfte kann wach sein. So können Wale zu jeder Tages- und Nachtzeit rechtzeitig zum Luftholen auftauchen, was für sie als Säugetiere mit Lungen überlebensnotwendig für ein Leben im Wasser ist. Hier wird deutlich, dass in Transformationsprozessen nicht nur Neues zu lernen ist, sondern wir auch die Bereitschaft brauchen, Dinge zu verlernen, um in der Transformation erfolgreich zu sein. Dieser Punkt könnte vor allem bei der Veränderung unseres bisherigen erlernten Konsumverhaltens, unserem Umgang mit Energie, aber auch einer zukunftsorientierten Gewichtung der Profitgenerierung bei der Erreichung von Nachhaltigkeitszielen in den Unternehmen wichtig sein.

Lehren aus dem großen Meteoriteneinschlag

Nach dem großen Meteoriteneinschlag vor 65 Millionen Jahren haben sich die viele Ressourcen verbrauchenden riesigen Dinosaurier nicht schnell genug an die neuen Gegebenheiten anpassen können und sind ausgestorben. Die Evolution hatte mit ihnen Tiere hervorgebracht, die außerordentlich groß und stark waren: Tyrannosaurus Rex hatte eine Höhe von 6 Metern, war 13 Meter lang, 6 Tonnen schwer und seine Beißkraft entsprach etwa 3.500 bis 5.700 Kilogramm Gewicht, die auf die kleine Fläche der Zahnspitze konzentriert

wurden. In Folge des Meteoriteneinschlags ist der Herrscher seiner Zeit untergegangen, dafür haben kleine, gut angepasste, wenig Energie verbrauchende Säugetiere überlebt. Von den Dinosauriern haben nur die Vögel überlebt, die viel kleiner sind und durch das Fliegen ein weiteres Element zu Verfügung haben, in dem sie leben. Die Evolution hat danach nie wieder ein so großes und körperlich starkes Landtier wie den Tyrannosaurus Rex hervorgebracht. Homo sapiens ist zwar viel kleiner und nicht so kräftig wie Tyrannosaurus Rex, hat aber eine dominierende Herrschaft auf Kosten anderer Lebewesen aufgebaut. Der Anthropologe Gregory Bateson hat dazu folgendes gesagt: »Das Lebewesen, das im Kampf gegen seine Umwelt siegt, zerstört sich selbst.« (Bateson 2017) Eine Gesetzmäßigkeit der Evolution ist es also, dass zu mächtige Lebewesen Gefahr laufen, unterzugehen. Homo sapiens hat nicht die Größe und körperliche Stärke wie die Dinosaurier. Aber sein verhältnismäßig großes Gehirn hat es ihm ermöglicht, eine dominierende Stellung auf diesem Planeten aufzubauen und seine Anzahl in den letzten Jahrhunderten exponentiell ansteigen zu lassen verbunden mit einer massiven Naturzerstörung und Einschränkung der Artenvielfalt. Hier braucht es neue Lebensweisen.

Neolithische Transformation

Ein umfassender Transformationsprozess in der Geschichte der Evolution im Zuge der Entwicklung der Menschheit ist die neolithische Transformation vor ca. 10.000 Jahren gewesen, die den Ackerbau und mehr Unabhängigkeit des Menschen von der Natur durch neuentwickelte Vorratshaltung hervorgebracht hat. Dieser neue Überfluss hat die Ausweitung von Arbeitsteilung ermöglicht, die kulturelle Evolution massiv gefördert und damit die Entwicklung von Städten möglich gemacht. Die neolithische Transformation wird gemeinhin als große Entwicklungsleistung der Menschheit verstanden. Der Historiker Yuval Harari macht aber deutlich, dass die Errungenschaften der neolithischen Transformation nicht nur Vorteile gebracht haben. (Harari 2013) So gab es eine starke Ausbreitung von Epidemien durch das enge Zusammenleben der Menschen und durch die Übertragung von Krankheitserregern aus der Viehzucht. Mittlerweile sind in der Folge der Ausweitung der Landwirtschaft und der übermäßigen Jagd der Menschen 96 % der Landsäugetiere auf der Erde Nutztiere des Menschen, nur noch 4 % sind Wildtiere. (Wikipedia 2020) Wir befinden uns in einem großen durch die Menschen ausgelöstes Artensterben, das die bisherigen großen Aussterbekatastrophen in der Geschichte der Evolution bei Weitem übertrifft.

Transformationsprozesse bringen also oft mehr Komplexität und Neues, sie bergen aber auch Risiken und können Nachteile mit sich bringen. Wir können das im Moment sehr gut an der digitalen Transformation beobachten. Auf der einen Seite bringt sie uns viele positive Neuerungen, wir haben einen unglaublichen, schnellen Zugriff auf die vielfältigsten Informationen, wie er so noch nie da gewesen ist. Aber die auch dadurch sich immer schneller verändernden Prozesse haben das Gefühl von Unsicherheit und Angst bei den Menschen

massiv verstärkt. Davon profitieren populistische Parteien, was zusammen mit den Gefahren eines möglichen Überwachungsstaates zur Gefährdung unserer demokratischen Strukturen führt. Das Versprechen eines angenehmeren Lebens durch die Digitalisierung wird nur bedingt eingehalten. Die Preistransparenz heizt die Konkurrenz der Unternehmen an und führt in den Unternehmen zu massiven Sparprogrammen, verbunden mit Personalabbau und zunehmendem Stress im Arbeitsalltag verbunden mit einer Zunahme von psychischen Erkrankungen. Natürlich kann es nicht darum gehen, die Digitalisierung zu stoppen, aber darum, bewusster darauf ein zu wirken, dass die Digitalisierung wirklich unser Leben einfacher macht und unsere Lebensqualität steigen lässt. Das Gleiche gilt auch für die biologische oder bioinspirierte Transformation. Sie bietet viele Chancen, zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise zu kommen. Aber sie birgt auch Gefahren, die vermutlich noch schädlichere Auswirkungen als die digitale Transformation haben können. Das Spiel mit der unkontrollierten Beeinflussung von Lebensprozessen ist weit weniger steuerbar als das von technischen Prozessen, was eine noch größere Vorsicht und Achtsamkeit braucht.

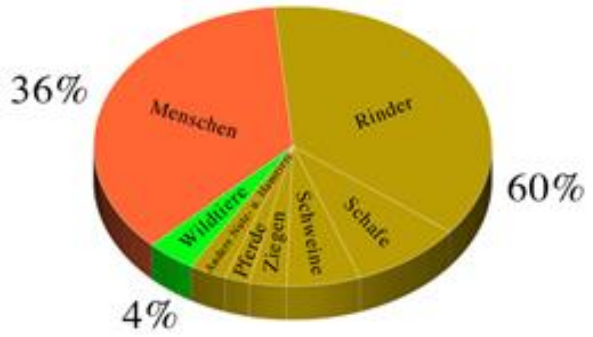


Abbildung 8-4: Landsäugetiere (Biomasse/Gewicht) (Wikipedia 2020)

Kompetenzentwicklung für ökosystemares Denken

Wie eingangs schon erwähnt, braucht es für den Umgang mit der immer weiter steigenden Komplexität und für erfolgreiche Gestaltung von Transformationsprozessen ein ganzheitliches, ökosystemares Denken. Dabei ist es wichtig, biotische (lebende) und abiotische (nicht-lebende) Faktoren in ihrem Zusammenspiel verstehen. Beispiele für dieses Zusammenspiel sind die Industrie 4.0 und das Internet der Dinge. Der Vorstandsvorsitzende von Nokia, Stephen Elop, sagte über das untergehende Unternehmen in der großen Krise von Nokia: »Unsere Wettbewerber nehmen uns nicht über ihre Geräte Marktanteil ab, sie nehmen ihn uns mit einem kompletten Ökosystem ab. (Heuzeroth 2011)« Gemeint waren Google und Apple, die Nokia in die Knie zwangen. Dass ökosystemares Denken immer wichtiger wird, zeigt auch das

stetig wachsende und erfolgreiche neue Geschäftsmodell Plattform-Ökonomie wie es z. B. von Amazon oder HRS praktiziert wird. Frank Riemensperger, Deutschland-Chef der Firma Accenture, äußerte sich dazu kürzlich wie folgt:

»Wir denken immer noch in den alten Marktregeln. In der Plattform-Ökonomie kann aber niemand Erfolg haben, der alles kontrollieren will. So funktioniert die digitale Welt nicht. Plattformen sind in der Regel offene Ökosysteme, in denen jeder mitmachen kann und wo die Erfolge geteilt werden. Der Bau von Geschäftsmodellen auf Basis von Plattformen und offenen Ökosystemen ist ein komplett anderer Ansatz als Exzellenz im Ingenieurwesen und in der Produktion.« (Gneuss 2020)

Es wird wichtig sein, dieses Denken auch in andere Geschäftsmodelle und besonders auch in die Technikentwicklung stärker zu integrieren.

Wir brauchen ein ökosystemares Denken, das nicht primär aus technischen Systemen abgeleitet ist, sondern lebende Systeme und ihr Zusammenspiel im Ökosystem versteht, denn nur so ist eine nachhaltigere, ethische Wirtschaft zukünftig realisierbar. Die Bereicherung nur einer kleinen Gruppe von Menschen hat langfristig keine Perspektive, insofern ist der Fraunhofer-Gedanke der Ermöglichung des »Wohlstands für alle« in der Welt durch neue Verfahren aus der biologischen Transformation sinnvoll. Dabei sollten wir aber nicht nur das Wohlergehen von Homo sapiens im Mittelpunkt haben, sondern die Vielfalt des Lebens bewahren. Um die Herausforderungen der biologischen Transformation anzugehen, um eine gute Zukunft für alle zu schaffen, braucht es ein neues Zusammenspiel von Ingenieur-, Natur- und Gesellschaftswissenschaften. In die ingenieurwissenschaftliche Ausbildung sollte das ökosystemare Denken einbezogen werden, um neue technische Lösungen zu finden, die sich einbetten in das gesamtgesellschaftliche Geschehen und die Prozesse in der Natur. Aber das reicht nicht aus. Der hochkomplexen Transformation, an deren Anfang wir stehen, lässt sich am besten durch eine transdisziplinäre Wissenschaft begegnen, die die Entwicklung von Lösungen nicht auf die Wissenschaft beschränkt, sondern aus dem Zusammenspiel von Wissenschaftler*innen und Praktiker*innen, von Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft zu neuen Lösungen kommt. Dies geschieht z. B. im Konzept der Citizen Sciences. Diese neuen Lösungen sollten nicht nur technisch funktionieren, sondern auch die Unterstützung der Menschen finden und die Menschen bei ihrer Entwicklung einbeziehen. Eine nachhaltige Klima- und Umweltpolitik wird nur umzusetzen sein, wenn sie nicht nur getragen ist von Eliten, sondern von breiten Teilen der Bevölkerung unterstützt wird. Es braucht ein grundlegendes Umdenken. Wenn Homo sapiens seine Überheblichkeit und seinen Anthropozentrismus ablegt, öffnet dies auch seinen Blick für die unendlich vielen guten Lösungen, die in der Geschichte des Lebens auf diesem Planeten entstanden sind und uns für gute Transformationsprozesse inspirieren werden.

1. Die biologische Transformation wird Neues entwickeln, dabei Bewährtes bewahren und Altes wieder aufleben lassen.
2. Die eigene Geschichte besser zu verstehen, kann helfen, geeignete Transformations-Wege zu finden und diese erfolgreich zu gestalten.
3. Für gesellschaftliche Transformationsprozesse sollten wir die Entwicklung der Evolution seit Entstehung des Lebens analysieren, nicht nur seit Entstehung der menschlichen Kultur.
4. Krisen bergen auch Chancen, um Transformation voranzubringen (Fukushima-Effekt). Diese sollten wir nutzen.
5. Wir brauchen ein ökosystemares Denken, das nicht primär aus technischen Systemen abgeleitet ist, sondern aus lebenden Systemen und ihrem Zusammenspiel von biotischen und abiotischen Faktoren.
6. Es braucht für die Transformation ein konsequent nachhaltiges Wirtschaftssystem, orientiert an den erfolgreichen Stoffkreisläufen der Natur.
7. Für die Herausforderungen der großen Transformation braucht es eine Weiterentwicklung der Technik; sie kann uns Vieles erleichtern und sollte eine dienende Funktion für eine erfolgreiche gesellschaftliche Veränderung einnehmen.
8. Transformation bedeutet in der Regel Komplexitätsentwicklung; in der Transformation braucht es aber auch Vereinfachungen, um die Komplexität meistern zu können.
9. Die biologische Transformation bietet viele Chancen, aber auch Gefahren, die noch schädlichere Auswirkungen haben können als die der digitalen Transformation.
10. Transformation kann nur gelingen, wenn breite Teile der Bevölkerung eine mitgestaltende Rolle einnehmen. Dazu brauchen die Menschen die Befähigung, mit Umbruchsituationen umzugehen.
11. Arroganz von Führung und Eliten behindert erfolgreiche Transformationsprozesse.
12. Die Vernunft-Ebene allein reicht nicht aus, um die Menschen zu erreichen; Emotionen sind Teil unserer Lebendigkeit und sind konstruktiv einzubeziehen.
13. Die Transformation erfordert ein neues Zusammenspiel von Natur-, Ingenieur- und Geistes-/Gesellschaftswissenschaften.
14. Es braucht transdisziplinär Zusammenarbeit über die Wissenschaft hinaus, ein anderes Zusammenspiel von Wissenschaft und Praxis, von Wissenschaft, Wirtschaft Politik und Zivilgesellschaft, die Beteiligung der Bürger*innen.

Abbildung 8-5: Leitsätze für die biologische Transformation

Literaturverzeichnis

Bateson, G. (2017): Ökologie des Geistes. Anthropologische, psychologische, biologische und epistemologische Perspektiven. 12. Aufl. Frankfurt am Main: Suhrkamp (Suhrkamp-Taschenbuch Wissenschaft, 571).

Damasio, A. R. (2018): Der Spinoza-Effekt. Wie Gefühle unser Leben bestimmen. 9. Auflage. Berlin: List (List-Taschenbuch, 60494).

Gneuss, M. (2020): Wir müssen den Wettbewerb annehmen. Hg. v. welt online. Online verfügbar unter https://www.welt.de/print/die_welt/wirtschaft/article204818100/Wir-muessen-den-Wettbewerb-annehmen.html, zuletzt geprüft am 02.03.2020.

Grassmann, P. (1985): Lässt sich die technische Entwicklung mit der biologischen Evolution vergleichen? In: *Naturwissenschaften* 72, S. 567–573.

Harari, Y. N. (2013): Eine kurze Geschichte der Menschheit. 3. Aufl. München: Dt. Verl.-Anst.

Heuzeroth, T. (2011): Bei Nokia bleibt kein Stein auf dem anderen. Hg. v. welt online. Online verfügbar unter https://www.welt.de/wirtschaft/webwelt/article12516800/Bei-Nokia-bleibt-kein-Stein-auf-dem-anderen.html, zuletzt geprüft am 02.03.2020.

Huelsmann, M.; Hecker, N.; Springer, M.; Gatesy, J.; Sharma, V.; Hiller, M. (25): Genes lost during the transition from land to water in cetaceans highlight genomic changes associated with aquatic adaptations (5). Online verfügbar unter https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6760925/, zuletzt geprüft am 14.08.2020.

Lorenz, K. (1984): Die Rückseite des Spiegels. Versuch einer Naturgeschichte menschlichen Erkennens. Ungekürzte Ausg., 7. Aufl. München: Dt. Taschenbuchverl. (Dtv, 1249).

Otto, K.-S.; Nolting, U.; Bässler, C. (2007): Evolutionsmanagement. Von der Natur lernen ; Unternehmen entwickeln und langfristig steuern. 1. Aufl. München: Hanser.

Reckter, B. (2019): Unser Ziel ist eine unbedingte Nachhaltigkeit, Interview mit Reimund Neugebauer. In: *VDI Nachrichten*, 24.01.2019.

Riedl, R.; Kaspar, R. (1981): Biologie der Erkenntnis. Die stammesgeschichtlichen Grundlagen der Vernunft. 3. durchges. Auflage. Berlin: Parey.

Vollmer, G. (2017): Im Lichte der Evolution. Darwin in Wissenschaft und Philosophie. Stuttgart: S. Hirzel Verlag.

Wikipedia (2020): Biomasse. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Biomasse, zuletzt geprüft am 02.03.2020.

9 Biologische Technik – Technische Biologie. Ethische Einordnungen

Joachim Boldt, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Formen technischer Biologie und biologischer Technik und das Beispiel molekularer Biotechnologien

Biologie und Technik können sich auf verschiedene Arten und Weisen begegnen. Biologische Formen und Funktionen, können, wie in der Bionik, erstens Vorlage sein für technische Lösungen. In diesem Fall übernimmt die Technik Anregungen aus der Welt der Biologie, ohne die spezifischen Eigenschaften des Lebendigen, das heißt vor allem evolutionäre Veränderung und Selbstorganisation, mit zu übertragen. Hier ist die belebte Natur Vorbild und Inspirationsquelle für dann genuin technische Anwendungen.

Umgekehrt lassen sich zweitens auch Funktionen und Eigenschaften, die aus der Technik bekannt sind, in biologischer Form umsetzen, wenn zum Beispiel logische Schalter mit Hilfe von Nukleinsäuren und deren Verbindungsmöglichkeiten nachgebaut werden und dann in vitro oder auch in vivo eingesetzt werden. Hier werden Vorbilder aus dem Bereich der Technik genutzt, deren Funktionen dann mit Hilfe biologischer Grundbausteine oder auch als Teil von Organismen auf materiell »biologischere«, neue Art und Weise realisiert werden.

Im Rahmen der Biotechnologie werden drittens biologische Prozesse genutzt um in Ergänzung zu oder als Ersatz für chemische Syntheseverfahren eine Vielzahl von Stoffen für Anwendungsbereiche in der Medizin, Landwirtschaft und Ernährung und anderen zu produzieren. In diesem Fall werden Fähigkeiten von Organismen im Hinblick auf ein für den Menschen nützliches Produkt optimiert und genutzt. Ein auf die Produktion eines bestimmten Stoffes ausgerichteter Herstellungsprozess wird mit Hilfe von für diesen Zweck optimierten metabolischen Abläufen in Mikroorganismen realisiert. »Technisch« werden die biologischen Vorgänge in diesem Fall vor allem dadurch, dass sie in eine technische Logik effizienter Herstellung eingebunden und daraufhin ausgerichtet werden.

Diese Übertragung einer technischen Herstellungs- und Verwertungslogik lässt sich auch ganz breit auf das Feld des Lebendigen übertragen, so wie auch umgekehrt Konzepte und Begriffe, die für das Feld des Biologischen zentral sind, auf technische Forschungs- und Entwicklungsprozesse angewendet werden können. Man kann versuchen, Forschung, technische Entwicklung und technische Innovation und deren Umsetzung und gesellschaftlichen Erfolg mit Begriffen wie Evolution, Variation, Selektion oder Vererbung zu beschreiben und darauf aufbauend zu gestalten. Umgekehrt kann man auch den Bereich der belebten Natur mit Begriffen wie Design, Maschine, Hardware und

Software und anderer technomorpher Metaphern als ein Feld technischer Lösungsfindung und technischer Nutzbarmachung konzeptualisieren.

Letzteres Vorgehen ist charakteristisch für das Forschungsfeld der Synthetischen Biologie. Lebewesen werden insbesondere auf der Ebene der molekularen, intra- und interzellulären Prozesse als quasi-technische Lösungen der Natur für bestimmte Problemstellungen interpretiert. Als solche sind diese Lösungen dann potentiell immer auch technisch zu ändern, zu verbessern und für spezifische Zwecke zu nutzen. In diesem Fall ist, so könnte man sagen, der Blick auf die belebte Natur ein technischer Blick und Biologie wird auch dann schon als Feld des Technischen wahrgenommen, wenn noch keine technischen Veränderungen am Biologischen vorgenommen oder technische Lösungen aus dem Biologischen abgeleitet worden sind. Anders als bei der Bionik, die ja auch die belebte Natur als Ort technischer Lösungen (oder zumindest als Ort für die Inspiration zu technischen Lösungen) wahrnimmt, bleibt in der Synthetischen Biologie die belebte Natur nicht das Template, dem folgend ein Artefakt gestaltet wird, sondern die belebte Natur selbst wird zum Ort des technischen Eingreifens und sie wird gemessen am Maßstab der vom Menschen gesetzten Kriterien dafür, was als eine gute technische Lösung gelten kann. Abschnitte aus dem Genom verschiedenster Spezies werden verstanden als »BioBricks«, die wie elektrotechnische Module in verschiedenen Variationen auf standardisierte zusammengesetzt werden können, um bestimmte nützliche Effekte zu erzeugen oder Produkte hervorzubringen.

Molekulare Biotechnologien, wie die Synthetische Biologie eine ist, mit ihren weiten Anwendungsfeldern, sollen im Folgenden beispielhaft Pate stehen, wenn es um die Frage geht, welche ethischen Herausforderungen sich bei Verschmelzungsprozessen von Technik und Biologie stellen.

Anwendungsfelder molekularer Biotechnologien

Mit ihrem Fokus auf genetisch gesteuerte intra- und interzelluläre molekulare Prozesse eröffnet die Synthetische Biologie ein sehr weites Feld von Anwendungen (El Karoui 2019). Es reicht vom Bereich der Energie über Umwelt, Ernährung und Landwirtschaft bis hin zur Gesundheit. Umfassend gentechnisch veränderte, »synthetische« Mikroorganismen können zum Beispiel für die Produktion von Ethanol eingesetzt werden, sie können zum Abbau von Schadstoffen aus der Natur beitragen, an Pflanzenwurzeln für die Bereitstellung von Stickstoff sorgen, zur Biomasseproduktion verwendet werden oder medizinisch wirksame Stoffe wie Artemisinin, eine Substanz zur Therapie bei Malaria, herstellen.

Molekulare Biotechnologie wie die Synthetische Biologie knüpfen damit an die Anwendungsfelder der Gentechnik an. Von der Gentechnik unterscheidet sie dabei, dass sie molekulare Prozesse umfassender, mit größerer Eingriffstiefe umgestalten. Statt nur einzelner Gene werden zum Beispiel ganze gene-

tisch gesteuerte metabolische Netzwerke designt und in Zielorganismen implantiert. Besonders eindrücklich wird diese Eingriffstiefe, wenn man auf eher spielerisch-kreative und weniger nutzenorientierte Anwendungen schaut, wie zum Beispiel ein Kickstarter-Projekt, das Pflanzen mit Biolumineszenz-Genen zum Glimmen gebracht hat und dessen erklärtes Ziel es war, so auch Bäume zum Leuchten zu bringen (Zhang 2017). Das Eingriffspotential wird auch deutlich an Forschungsrichtungen in der synthetisch-biologischen Grundlagenforschung, wo beispielsweise die natürliche DNA mit in der natürlichen DNA nicht vorkommenden Basenpaaren erweitert wird. So besteht die Hachimoji-DNA aus vier zusätzlichen Basen, die prinzipiell wie natürliche DNA-Basen transkribiert und translatiert und damit für die Herstellung neuartiger Proteine genutzt werden könnten (Hoshika 2019).

Ein solch breit gefasstes Feld von Anwendungen ist eine große Herausforderung für die ethische Einordnung. Neu entstehende Technosciences lassen sich nicht als solche ethisch bewerten, sondern dies kann immer nur mit Bezug auf eine Anwendung oder einigermaßen einheitliche Cluster von Anwendungen und deren gesellschaftliche, soziale, technische und politische Kontexte erfolgen. Während es bei einer therapeutischen Anwendung - neben unter Umständen Fragen zu Kosten und Zugangsmöglichkeiten - vor allem um eine Abwägung von individuellem Schaden und Nutzen geht, wirft die Biomasseproduktion unter anderem Fragen zu globaler Gerechtigkeit und zu Auswirkungen auf die Umwelt auf. Die Gegenüberstellung zeigt, dass die Breite der Anwendungsoptionen auch ein breit gefächertes Feld ethisch zu beachtender Aspekte mit sich bringt.

Vielfalt ethischer Theorien und ihre Spannungsverhältnisse

Vor diesem Hintergrund würde man sich wünschen, dass zumindest die Maßstäbe der ethischen Bewertung dieses weit ausgreifenden Feldes von Anwendungen einigermaßen klar umrissen sind und auf allgemeinem Konsens fußen. Das ist aber nicht der Fall, zumindest dann nicht, wenn man auf das Feld grundsätzlicher ethischer Theoriebildung schaut. Ethische Theorien differieren erheblich in Bezug auf die Werte und Methoden, die zur ethischen Bewertung einer technischen Anwendung herangezogen werden sollen. Geradezu emblematisch und viel diskutiert sind in dieser Hinsicht die Gegensätze zwischen utilitaristischen und deontologischen Theorien.

Utilitaristisch gesehen ist bei einer ethischen Bewertung danach zu fragen, welche Handlungsoption für die von den Handlungskonsequenzen Betroffenen insgesamt den größten Nutzen beziehungsweise den geringsten Schaden verursachen. Nutzen und Schaden wird dabei üblicherweise auf Interessen bezogen verstanden, so dass letztlich aufsummiert werden soll, in welchem Maß insgesamt den Interessen Betroffener entsprochen wird beziehungsweise in

welchem Maß diese Interessen verletzt werden. Übertragen auf neue Technologien würde dies heißen, dass man eine Reihe von Optionen in Bezug auf die Einführung der Technologie unterscheidet, also zum Beispiel die Nicht-Einführung der Technologie, die Einführung der Technologie mit bestimmten Begleitmaßnahmen und die Einführung ohne solche Begleitmaßnahmen. Dann müsste untersucht werden, welche Interessen die von der Anwendung der Technologie Betroffenen haben und wie subjektiv bedeutsam diese Interessen sind. Auf dieser Grundlage sollte dann bestimmt werden, bei welchem Anwendungsszenario sich der größte Nutzen ergibt.

Abgesehen von der Herausforderung, Interessen umfänglich zu kartographieren und in ihrer jeweiligen subjektiven Bedeutsamkeit zu erfassen, ist ein klassisches Problem dieser Art von ethischer Bewertung, dass Handlungen empfohlen werden können, bei denen der Schaden für wenige sehr hoch ist, wenn gleichzeitig ein nur geringer Nutzenzuwachs für sehr viele zu erwarten ist. Wenn eine molekularbiologische Technologie zum Beispiel auf Ressourcen angewiesen ist, deren Gewinnung in einem bestimmten lokal begrenzten Bereich unvermeidlich zu schweren Gesundheitsschäden der dortigen Bevölkerung führt, dann kann die Einführung dieses Verfahrens utilitaristisch immer noch richtig erscheinen, solange zum Beispiel gleichzeitig eine große Zahl von Menschen in anderen Teilen der Welt einen gewissen Zuwachs an Lebensqualität von der Technologie zu erwarten hat.

Deontologische Ethiken bewerten solche Situationen anders. Eine der Testformeln für die ethische Vertretbarkeit von Handlungen, die uns Immanuel Kant in seiner deontologischen Ethik an die Hand gibt, besagt (etwas verkürzt wiedergegeben), dass Handlungen und deren Intentionen dann ethisch akzeptabel sind, wenn der Handelnde diejenigen, die Auswirkungen der Handlung zu erleiden haben, »jederzeit zugleich als Zweck, niemals bloß als Mittel« (Kant 1991) gebraucht. Was es im Kantischen Sinn genau heißen soll, einen Menschen »bloß als Mittel« zu gebrauchen, ist in der Nachfolge Kants Stoff für viele Diskussionen geworden. Eine Minimalinterpretation ist diese: Es geht darum, dass mit einer Handlung nicht nur private Zwecke verfolgt werden, egal wie gut diese für alle sein mögen, sondern dass diese Handlung zu einem Projekt gehört, das alle, die davon betroffen sind, als gut und richtig anerkannt haben. Mit einer solchen Forderung bekommt der Schutz von Individuen ein viel größeres Gewicht als dies im Utilitarismus der Fall ist. Wenn man zum Beispiel vermuten muss, dass ein auf Ressourcenabbau angewiesenes Biotechnologie-Projekt auf Widerspruch bei der lokalen Bevölkerung stoßen wird, dann würde die Bevölkerung »bloß als Mittel« gebraucht werden, wenn das Projekt gegen ihren vermuteten Willen, zum Beispiel heimlich, durchgeführt wird. Diese Handlung wäre also aus deontologischer ethisch zu verurteilen, auch dann, wenn die Gesamtnutzenbilanz positiv ist.

Die Liste solcher Konflikte zwischen ethischen Theorien ließe sich verlängern. Neben Utilitarismus und Deontologie finden sich in der aktuellen Debatte tu-

gendethische Ansätze, Ansätze, die ihre Wurzeln in Hermeneutik und Existenzphilosophie haben, care-ethische Ansätze und viele weitere (Hähnel 2018). Wenn man ein Set von ethischen Bewertungsprinzipien oder -kriterien für die Synthetische Biologie zusammenstellen möchte, stellt sich damit nicht nur die Frage, wie man der Breite der Anwendungsfelder gerecht werden, sondern auch, wie man der Vielfalt und den internen Spannungsverhältnissen der ethischen Theorien Rechnung tragen kann.

Prinzipien mittlerer Reichweite

Konfrontiert mit der Problematik divergierender Theoriebildung hat man im Bereich der angewandten Ethik in der Medizin auf sogenannte »Prinzipien mittlerer Reichweite« zurückgegriffen. Die Idee ist, dass sich ethische Theorien zwar in der Gewichtung bestimmter Prinzipien unterscheiden, dass also zum Beispiel der Schutz individueller Interessen in der Deontologie höher gewichtet wird als im Utilitarismus, dass es aber doch einen Kernbestand solcher Prinzipien gibt, die in allen Theorien in der ein oder anderen Form Berücksichtigung finden. Dies sind die Prinzipien mittlerer Reichweite. Der Moralphilosoph Beauchamp und der Ethiker Childress haben in diesem Sinn für den Bereich Medizin die Prinzipien Autonomie, Nicht-Schaden, Wohltun und Gerechtigkeit als Prinzipien mittlerer Reichweite identifiziert (Beauchamp 2019).

Tabelle 9-1: Vier Prinzipien in der Medizinethik (Beauchamp 2019)

Medizinethisches Prinzip	Inhalt
Autonomie (Autonomy)	Beachtung des Willens der Patientin / des Patienten
Nicht-Schaden (Non-Maleficence)	Vermeidung von Nebenwirkungen und Belastungen für Patientinnen und Patienten
Wohltun (Beneficence)	Auf Heilung, Linderung, Stabilisierung des Zustandes einer Patientin / eines Patienten hinarbeiten
Gerechtigkeit (Justice)	Knappe Ressourcen nach gerechten Maßstäben verteilen

Mit Hilfe dieser Prinzipien lassen sich ethische Problemstellung in der Klinik bei der Versorgung von Patientinnen und Patienten gut systematisieren. Das schafft häufig schon größere Klarheit für alle Beteiligten. Auf der Basis der Prinzipien lassen sich außerdem häufig Lösungswege skizzieren, die ethisch vertretbar und konsensfähig sind. Zwei Bedingungen müssen allerdings erfüllt sein, damit aus der Berücksichtigung von Prinzipien mittlerer Reichweite auf ethisch sinnvolle Handlungswege geschlossen werden kann.

Erstens müssen die Inhalte und Grenzen der Begriffe hinreichend klar sein und diese Klarheit sollte nicht wiederum ethische Schwierigkeiten auslösen. Zweitens muss einen Konsens irgendeiner Art geben, wie bei einem nicht zu vermeidenden Konflikt zwischen Prinzipien zu verfahren ist. Es geht bei diesem Problem mit anderen Worten darum, wie die Prinzipien untereinander zu gewichten sind.

Ein Beispiel kann diese doppelte Problematik verdeutlichen. Zum Beispiel ist in Bezug auf den Begriff der Autonomie zu fragen, nach welchen Kriterien entschieden werden soll, welchen Patientinnen und Patienten die Fähigkeit zur Selbstbestimmung zugesprochen werden soll und welchen nicht. Ist jemand, der im Zustand der Demenz zwar einen Willen hat und äußert, die Konsequenzen des eigenen Handelns aber nicht mehr überblickt, autonom oder nicht? Ohne genauere Bestimmung des Autonomiebegriffs würde unklar bleiben, ob das Prinzip der Autonomie verletzt wird, wenn man gegen den Willen eines Demenzkranken handelt.

Die übliche Antwort in der Medizinethik erläutert Autonomie mit Hilfe der »Einwilligungsfähigkeit«, zu der die Fähigkeit, die Konsequenzen des eigenen Handelns zu überblicken, unerlässlich dazu gehört. Der Wille des Demenzkranken würde damit nicht als Ausdruck von Selbstbestimmung verstanden. Mit dieser Festlegung wird der Autonomiebegriff handhabbar und die Problematik unklarer Begrifflichkeit gelöst.

Gleichzeitig ist diese Festlegung jedoch ethisch nicht unumstritten. Das Beispiel lässt sich weiterspinnen. Wenn eine Patientin, die weiß, dass sie bald in einer Phase fortgeschrittener Demenz sein wird, im Zustand der Einwilligungsfähigkeit in einer Patientenverfügung festhält, dass sie in dieser zu erwartenden Krankheitsphase bei Auftreten einer Lungenentzündung keine antibiotische Therapie möchte, dann ist diese Willensäußerung eine autonome Willensäußerung. Wenn es dann zu der beschriebenen Situation kommt und wenn die Patientin in dieser Phase Lebenszufriedenheit zeigt und sagt »Nicht sterben!«, wie soll dann entschieden werden? (Ethikrat 2012)

Wenn auch die letzte Äußerung als autonome Willensäußerung gelten würde, könnte man von einer Willensänderung sprechen. Unserer begrifflichen Klärung zufolge, ist dies aber nicht der Fall. Es ergibt sich jetzt stattdessen ein Konflikt zwischen unterschiedlichen Prinzipien, nämlich einerseits dem Prinzip der Autonomie und andererseits den Prinzipien Nicht-Schaden und Wohltun. Wie soll gewichtet werden? Dies ist eine Frage die auf der Ebene der Prinzipien nicht mehr einfach zu klären ist.

In der Praxis löst dieses Gewichtungsproblem erst, wie oben erwähnt, der rechtliche Rahmen, demzufolge die Ablehnung einer Therapie immer zu respektieren ist und die Patientenverfügung ein verlässliches und gültiges Mittel ist, einem solchen Therapieverzicht auch für Situationen in der Zukunft verbindlich Ausdruck zu verleihen.

Insgesamt zeigt das Beispiel, dass mit den nötigen begrifflichen Festlegungen und einem passenden rechtlichen Rahmen den Problematiken mangelnder inhaltlicher Klarheit und von Gewichtung von Prinzipien begegnet werden kann. Zwar bleibt im Hintergrund die Frage offen, ob die kriterielle Eingrenzung des Autonomiebegriffs angemessen ist, aber, wenn man dies einmal akzeptiert, ergibt sich ein ethisch-rechtlich transparent und nachvollziehbar angeleiteter Lösungsweg für ethische Problemstellungen.

Prinzipien mittlerer Reichweite für molekulare Biotechnologien

Angesichts der im Verein mit rechtlichen Regelungen guten Operationalisierbarkeit von Prinzipien mittlerer Reichweite liegt es nah, einen solchen Ansatz auch für den Bereich von Biotechnologien zu verfolgen.

Die vier medizinethischen Prinzipien sind allerdings auf die Situation der Behandlung von Patientinnen und Patienten zugeschnitten. Viele ethische Fragestellungen, die sich durch die Breite der Anwendungsfelder von Biotechnologen ergeben, bleiben so unberücksichtigt. Einige Bestrebungen in den letzten Jahren gingen deshalb dahin, ethische Prinzipien mittlerer Reichweite für diesen breiteren Bereich zu entwickeln (Boldt 2016).

Dies haben zum Beispiel die US-amerikanische »Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues« (PCSBI 2010) im Jahr 2010 und der Nuffield Council aus Großbritannien 2012 getan (Nuffield Council on Bioethics 2012). Beispielhaft sei der Vorschlag der PCSBI vorgestellt. Die PCSBI unterscheidet insgesamt fünf Prinzipien:

»Intellectual Freedom and Responsibility« ist ein vor allem auf Forschungsfreiheit bezogenes Prinzip. Betont wird das Recht zur Forschung an und Entwicklung von neuen technischen Anwendungen, dies allerdings, das wird im selben Atemzug betont (»and Responsibility«), gezügelt durch Verantwortung von Forschung und Entwicklung für die Folgen des eigenen Tuns für andere.

»Public Beneficence« nimmt »Nicht-Schaden« und »Wohltun« auf, allerdings bezogen auf eine größere Anzahl von Betroffenen. Erreicht werden soll ein gesellschaftlicher Gesamtnutzen, der nach utilitaristischen Nutzenmaximierungskalkül bestimmt werden könnte, der aber auch andere Elemente beinhalten könnte, wie zum Bespiel einen Bezug auf soziale Gruppen statt Individuen oder den Ausschluss bestimmter hoher Schäden, auch wenn diese nur bei wenigen zu erwarten sind.

»Justice and Fairness« betrifft die Frage, ob Nutzen und Schaden zwischen verschiedenen Bevölkerungsgruppen angemessen verteilt sind oder ob eine oder mehrere Gruppen unangemessen stark profitieren oder unangemessen stark von Belastungen betroffen sind.

»Responsible Stewardship« ist ein auf die Zukunft gerichtetes Prinzip, bei dem es um Erhalt natürlicher Ressourcen geht. Anwendungen aus den

Biosciences sollen so angelegt sein, dass auch über längere Zeiträume hinweg Ressourcen geschont und Ökosysteme erhalten bleiben.

Schließlich verlangt das Prinzip der »Democratic Deliberation«, dass Entscheidungen über die Einführung einer neuen, weitreichenden Technologie, beziehungsweise deren politische Förderung, und Entscheidungen über den regulatorischen Rahmen, der für solche Technologien gelten soll, demokratisch legitimiert sind.

Tabelle 9-2: Fünf bioethische Prinzipien (PCSBI 2010)

Bioethisches Prinzip	Inhalt
Intellectual Freedom and Responsibility	Beachtung von Forschungsfreiheit und der damit einhergehenden Verantwortung
Public Beneficence	Anstreben eines gesellschaftlichen Gesamtnutzens
Justice and Fairness	Gerechte Verteilung von Zugewinnen und Belastungen
Responsible Stewardship	Langfristiger Erhalt natürlicher Ressourcen
Democratic Deliberation	Demokratische Legitimation von Entscheidungen über Einführung neuer Technologien

An der Erweiterung dieser Prinzipienliste im Vergleich zu den medizinethischen Prinzipien lassen sich die besonderen Problemstellungen ablesen, mit denen die ethische Beurteilung von Anwendungen aus dem Bereich molekularer Biotechnologien konfrontiert ist und welche ethischen Prinzipien entsprechend darüber hinaus relevant werden.

Während in der Medizin eine überschaubare Zahl von Akteuren von Therapieentscheidungen betroffen ist und diese fällen muss, ist es im Fall von Biotechnologie eine *Vielzahl von Akteuren*, die eine solche Technologie auf den Weg bringen und von ihren Auswirkungen betroffen sein kann. Auch geographisch können diese Akteure weit gestreut sein, wenn zum Beispiel Rohstoffbeschaffung, Produktion und Einsatzort der Technologie an ganz verschiedenen Orten und damit potentiell auch im Geltungsbereich unterschiedlicher politischer Ordnungen stattfinden. Dies erschwert die Beachtung des Prinzips der Autonomie ebenso wie des Prinzips der »Beneficence« und der »Justice«. Die PCSBI trägt dieser Problemstellung Rechnung, wenn sie auf »public« Beneficence verweist. Man könnte hier auch von »gesellschaftlicher« (»societal«) »Beneficence« sprechen. Schaut man sich die Erläuterungen der PCSBI zu ihren Prinzipien an, dann würde man sich an einigen Stellen wünschen, dass diese Problemstellung der Vielzahl von Akteuren konsequenter Beachtung findet. Zum Beispiel könnte und sollte man über »Public Beneficence«

hinaus auch unter dem Stichwort der Autonomie Abwehr- und Gestaltungsrechte von Bevölkerungsgruppen oder Drittländern, die durch Technologien potentiell belastet sind, stärker thematisieren, als die PCSBI dies tut. Im Prinzip bietet die Liste der PCSBI aber die Orte an, an denen solche Themen aufgegriffen werden können.

Eine zweite Problemstellung besteht darin, dass sich Auswirkungen von Biotechnologie bis weit in die Zukunft hinein erstrecken können und entsprechend schwer zu prognostizieren sind. Es fragt sich, welche ethischen Maßgaben für die Bewertung von solchen Auswirkungen angesichts dieser *prognostischen Unsicherheit* gelten sollen. Die PCSBI führt an dieser Stelle das Prinzip der »Responsile Stewardship«, also etwa der »verantwortungsvollen Verwalterschaft« ein, welches beinhaltet, das mit angemessener Vorsicht, die PCSBI schreibt »prudent vigilence«, zu handeln sei. Im europäischen Kontext ist »precaution« hier der Terminus der Wahl, der aus Sicht der PCSBI zu restriktiv und fortschrittshemmend ist, wie sie schreibt. Diese etwas stereotype Zuschreibung sollte man angesichts der generellen Übereinstimmung, dass zukünftigen Konsequenzen einer Technologie wachsam und mit Vorsicht zu begegnen sei, nicht überbewerten. Die größere Frage wird hier sein, wie diese Vorsicht am besten konkret auszubuchstabieren ist und wer institutionell die Verantwortung für Evaluation einer Technologie und Einhaltung der Vorgaben trägt.

Drittens sind nicht nur Menschen von den Auswirkungen neuer Biotechnologien betroffen, sondern auch nicht-menschliche Lebewesen, Pflanzen und Tiere. Es ist eine grundlegende Frage der Ethik, wie und aus welchem Grund *nicht-menschliches Leben zu schützen* ist. Für anthropozentrische Ethiken geht es bei dem Schutz nicht-menschlichen Lebens darum, schädliche Folgen für den Menschen zu vermeiden. Nicht-menschliches Leben ist dann und nur dann zu schützen, wenn dessen Beschädigung zu nachteiligen Auswirkungen auf menschliches Leben führt. Biozentrische Ethiken dagegen argumentieren, dass nicht-menschliches Leben als solches, Schutz und Rücksicht verdient. Es gibt, dieser Auffassung zufolge, einen Eigenwert nicht-menschlichen Lebens, der bei Folgenabwägungen zu beachten ist. Die PCSBI geht auf diese Kontroverse nicht direkt ein, und das ist im Rahmen eines Ansatzes, der auf Prinzipien mittlerer Reichweite setzt, auch nicht zu erwarten. Neben dem deutlich auf menschliches Wohl bezogenen Prinzip der »Public Beneficence« bietet aber das Prinzip der »Responsible Stewardship« Platz für Maßnahmen, die insbesondere auf den Erhalt nicht-menschlichen Lebens ausgerichtet sind, dies zunächst einmal ganz unabhängig von der Begründung und Reichweite dieses Schutzes.

Viertens und letztens bringen die genannten drei Problemstellungen mit sich, dass ethisch gute Entscheidungen über die Einführung neuer Biotechnologien und begleitende Regularien und Prozesse nicht in kleinem Rahmen von Expertengremien getroffen werden können. Wenn viele Akteure betroffen sind, wenn es Unsicherheit über Konsequenten gibt und wenn sehr grundlegende

Vorstellungen vom Wert von Natur und Leben eine Rolle spielen, dann sollten diese Entscheidungen für alle mit zu beeinflussen sein, das heißt es sollten partizipative, möglichst viele der potentiell Betroffenen einbeziehende Entscheidungswege etabliert werden. Das bei der PCSBI an letzter Stelle stehende Prinzip der »Democratic Deliberation« gewinnt vor diesem Hintergrund besondere Bedeutung. Es geht hier nicht nur um eine noch einmal pro forma demokratisch unterfütterte Entscheidung, die der Sache nach genauso gut von Expertengremien allein getroffen werden könnte, sondern es geht auch um Wert- und Haltungsfragen, die nicht fachwissenschaftlich, sondern nur im gesellschaftlichen Austausch zu beantworten sind.

Notwendige Ergänzungen zu den PCSBI-Prinzipien

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es der PCSBI mit ihrer Liste von fünf ethischen Prinzipien einigermaßen überzeugend gelingt, die Spannbreite ethischer Fragestellungen in Bezug auf Biotechnologien abzubilden. Zwar gibt es im Detail, im Zuschnitt der Prinzipien an einigen Stellen Ergänzungs- und Erweiterungsbedarf, insgesamt aber werden Prinzipien eingeführt, die den zentralen Herausforderungen der ethischen Beurteilung von Biotechnologien, wie der langen zeitlichen Erstreckung von Nutzen und Schaden bringenden Auswirkungen und der Anzahl aktuell und potentiell Betroffener Rechnung tragen.

Blickt man auf die Diskussionen und Entwicklungen der letzten Jahre, dann fallen zwei Bereiche auf, die in der PCSBI-Liste bisher nicht integriert sind, die aber leicht zu ergänzen wären.

Dies ist zum einen die Frage der Zurechenbarkeit von Handlungen und Aufgaben. Es sollte spezifiziert werden, welche Akteure von welchem Prinzip angesprochen werden, es sollte die Transparenz der Aufgabenerfüllung sichergestellt und es sollte klargestellt sein, dass Akteure für ihr Handeln oder ihre Untätigkeit zur Rechenschaft gezogen werden können. Angesichts der Vielzahl von Akteuren ist eine solche Ergänzung wichtig, um zu verhindern, dass die Einhaltung ethischer Prinzipien von allen Seiten gutgeheißen und unterstützt wird, dann aber jeder die Möglichkeit hat, sich hinter unklaren Aufgabenzuteilungen zu verstecken. Der Nuffield Council führt diese Forderungen als ein eigenes Prinzip der »Accountability« ein. Denkbar wären auch entsprechende Ergänzungen bei den jeweiligen, schon gegebenen Prinzipien.

Zum anderen hat sich in den letzten Jahren im Umfeld des auf Studierende ausgerichteten iGEM-Wettbewerbs eine Szene von jungen Menschen gebildet, deren Ziel es ist, die Anwendung und Entwicklung molekulare Biotechnologien für engagierte, nicht institutionell in der Wissenschaft oder der Industrie verankerte Interessierte zugänglich zu machen. Dem Vorbild der IT-Hacker folgend übertragen diese »Biohacker« Ideale wie »open source« auf den Bereich der Gentechnik und eröffnen »community labs«, die Zugang zu Geräten und Know-How bieten (Bennett 2009). Wenn sich diese Bewegung verstetigt,

dann stellt sie die schematische Unterscheidung von Wissenschaft und Technologieentwicklung auf der einen Seite und Öffentlichkeit auf der anderen Seite in Frage. »Democratic deliberation« sollte dann in Richtung Partizipation erweitert werden, und diese Partizipation sollte auch die Möglichkeit zur Partizipation an Forschung selbst, nicht nur an Entscheidungen über Forschung, beinhalten, dies natürlich unter Beachtung der übrigen Prinzipien, insbesondere zu Verantwortung, »Beneficence« und »Stewardship«.

Diese und mögliche weitere Ergänzungen und Spezifizierungen einer Prinzipienliste wären ohne Modifikation an der Grundidee einer solchen Liste zu verwirklichen. Trotz dieses insgesamt also positiven vorläufigen Befundes ist aber festzustellen, dass sich weder die Prinzipienliste der PCSBI, erweitert oder nicht erweitert, noch eine der ähnlichen Listen anderer Gremien bisher als Standard zur ethischen Beurteilung neuer Biotechnologien durchgesetzt haben. Nach wie vor gibt es die unterschiedlichsten Ansätze zur Beurteilung neuer Technologien, mannigfaltige Prinzipienansätze und pragmatisch und auch sehr konkret angelegte Aufreihungen von in ethischer Hinsicht zu prüfenden Aspekten, wie zum Beispiel die Vorgaben der Europäischen Kommission zur ethischen Beurteilung von Forschungsanträgen. Die Gründe für diesen Zustand werden, wie im Folgenden abschließend dargestellt werden soll, wenn überhaupt, dann nur in größerem Zeitrahmen und mit größeren politischen und gesellschaftlichen Anstrengungen zu beheben sein.

Verbleibende Herausforderungen

Wie im Fall der vier medizinethischen Prinzipien gezeigt, ermöglicht eine Liste von Prinzipien mittlerer Reichweite eine Systematisierung ethischer Aspekte von zur Wahl stehenden Handlungsoptionen und kann damit Lösungswege vorzeichnen. Dieses Vorgehen stößt an eine Grenze, wenn es zu Konflikten zwischen Prinzipien kommt, wenn also eine Handlung zwar einem Prinzip entspricht, dafür aber einem anderen widerspricht. Solche Widersprüche verweisen oft auf tieferliegende Wertekonflikte. Im Bereich der Medizinethik sind die Einstufung und der Umgang mit dem Willen Demenzkranker ein Beispiel für einen solchen Konflikt. Es ist erst der rechtliche Rahmen im Hintergrund, der in einer solchen Situation eine allgemeinverbindliche Gewichtung der Prinzipien zulässt.

In der Medizin, bei der Behandlung von Patientinnen und Patienten, gibt es diesen rechtlichen Rahmen. Bei Biotechnologien gibt es diesen Rahmen dagegen nicht oder nur sehr unvollständig und flickenhaft. Benötigt werden hier angesichts der geographischen Weite der Auswirkungen solcher Technologien internationale Übereinkünfte, die eine Vielzahl von Aspekten zu regeln hätten, u.a. Fragen von volkswirtschaftlichem Schaden und Nutzen, gerechter Bezahlung, Kompensationsleistungen und Umwelt- und Naturschutz. Die »Convention on Biological Diversity« mit dem Cartagena- und dem Nagoya-Protokoll ist ein Beispiel für eine Übereinkunft in diesem Feld, ist aber ganz auf den

Bereich des Umweltschutzes fokussiert. Ohne international bindende und durchzusetzende Regelungen wird eine Prinzipienethik der Biotechnologie in vielen Konfliktfällen zwar analysieren können, worüber gestritten wird, zu einer Lösung dieses Streits aber wenig beitragen können.

Konflikte sind vor allem entlang einer Bruchlinie zu erwarten, die sich auch an den Prinzipien der PCSBI recht genau nachzeichnen lässt. Prinzipien wie »Autonomy« und »Beneficence« leben von der Annahme, dass wir die Welt von Morgen biotechnologisch konstruktiv und zum Guten gestalten und verändern können. Unsere Vorstellungen davon, wie eine gute Zukunft aussehen kann, sind verlässlich, und unsere wissenschaftliche und technologische Kreativität versetzt uns in die Lage, Wege zu finden, wie diese Zukunft erreicht werden kann. Dies ist die eine Seite der Bruchlinie.

Im Prinzip der »Responsible Stewardship« dagegen kommt eine zurückhaltendere Vision von menschlicher Gestaltungskraft zum Ausdruck. Etwas verantwortlich zu verwalten und zu pflegen bedeutet nicht, schon zu wissen, woraufhin es zum Besseren umzugestalten wäre. Im Gegenteil, darin kommt zum Ausdruck, dass es etwas zu erhalten gibt, weil es gut ist, so wie es ist. Aus dieser Perspektive läuft gestaltendes Eingreifen immer Gefahr, mehr zu zerstören als zu verbessern. Der Ethiker Erik Parens hat diese zwei Visionen in der Diskussion um verbessernde Eingriffe in die menschliche Natur als »creativity«- und »gratitude«-Frameworks beschrieben (Parens 2014). Die Übertragbarkeit auf die Debatten um Eingriffe in die nicht-menschliche Natur liegt auf der Hand.

Gerade unter den Vorzeichen unsicherer Prognosen können diese Hintergrundvisionen ihre Kraft entfalten. Wenn bei dem Versuch, Konkretes über Folgewirkungen einer Technologie in Erfahrung zu bringen, letztlich ein großer Unsicherheitsfaktor bleibt, liegt es nah, in allgemeinen Annahmen über den Wert des Gegebenen oder der Gestaltungskraft des Menschen Anleitung zu suchen. Wenn sich solche Annahmen dann antagonistisch gegenüberstehen, wie dies bei den beiden genannten Visionen der Fall ist, dann ergibt sich eine Blockadekonstellation, die mit Mitteln der Prinzipienethik gerade nicht mehr aufgelöst werden kann. Hier wird es, wenn man den Blick in die Zukunft richtet, nicht nur um die Etablierung rechtliche Rahmenbedingungen gehen, sondern auch um vertrauenswürdige Monitoring- und Evaluationsinstanzen und um ein gesellschaftliches Debattenklima, das nicht zu vorschnellen dichotomischen Lagerbildungen führt.

Wenn es bei der Beurteilung einer Technologie prognostische Unsicherheiten gibt und wenn darüber hinaus sehr grundsätzliche und normative Haltungen und Überzeugungen angesprochen werden, dann ist es schließlich auch unumgänglich Entscheidungen über die Einführung und Entwicklung solcher Technologien nicht Expertengremien zu überlassen, auch nicht ethischen Expertengremien, sondern sie gesellschaftlich breit angelegten, offenen Foren zu diskutieren und zu legitimieren. Das Prinzip der »Democratic Deliberation« ist auf dieses Problemfeld gemünzt, setzt aber voraus, dass es Strukturen und

Institutionen gibt, die diese Anforderung angemessen umsetzen können, und dass sich eine Kultur entwickelt, die die Teilnahme an und Durchführung von entsprechenden Veranstaltungen unterstützt. Auch dies ist ein nicht kurzfristig zu erreichendes Ziel, ohne das prinzipienethische Analysen und Evaluationen von neuen Biotechnologien wirkungslos bleiben werden.

Literaturverzeichnis

Beauchamp, Tom L.; Childress, James F. (2019): Principles of biomedical ethics. Eight edition.

Bennett, G.; Gilman, N.; Stavrianakis, A.; Rabinow, P. (2009). From synthetic biology to biohacking: are we prepared? In: *Nature Biotechnology* (27), S. 1109–1111.

Boldt, J. (2016): Ethische Prinzipien zur Beurteilung von neuen Biotechnologien. Ein Vergleich von drei Stellungnahmen. In: Joachim Hruschka und Jan C. Joerden (Hg.): Jahrbuch für Recht und Ethik. Bd. 24 (2016). Themenschwerpunkt: Neue Entwicklungen in Medizinrecht und -ethik. 1st ed. Berlin: Duncker & Humblot (Jahrbuch für Recht und Ethik / Annual Review of Law and Ethics, v.24), S. 108–121.

Deutscher Ethikrat (Hg.) (2012): Demenz und Selbstbestimmung. Online verfügbar unter https://www.ethikrat.org/fileadmin/Publikationen/Stellungnahmen/deutsch/DER_StnDemenz_Online.pdf, zuletzt geprüft am 14.09.2020.

El Karoui, M.; Hoyos-Flight, M.; Fletcher, L. (2019): Future Trends in Synthetic Biology. A Report. In: *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 7 (175). DOI: 10.3389/fbioe.2019.00175.

Hähnel, Martin; Schwartz, Maria (2018): Theorien des Guten zur Einführung. Hamburg: Junius (Zur Einführung).

Hoshika, S.; Leal, N. M.; Kim, M.-J.; Kim, M.-S.; Karalkar, N. B.; Kim, H.-J. et al. (2019): Hachimoji DNA and RNA: A genetic system with eight building blocks. In: *Science* 363 (6429), S. 884–887.

Kant, I. (1991): Grundlegung zur Metaphysik der Sitten. In: W. Weischedel (Hg.): Immanuel Kant. Kritik der praktischen Vernunft. Grundlegung zur Metaphysik der Sitten. Frankfurt am Main: Suhrkamp.

Nuffield Council on Bioethics (Hg.) (2012): Emerging biotechnologies. Technology, choice and the public good. London. Online verfügbar unter https://www.nuffieldbioethics.org/publications/emerging-biotechnologies, zuletzt geprüft am 14.09.2020.

Parens, E. (2014). Creativity and Gratitude. In: E. Parens (Hg.): Shaping Our Selves. On Technology, Flourishing, and a Habit of Thinking. New York: Oxford University Press, S. 45–70.

Presidental Comission for the Study of Bioethical Issues (PCSBI) (Hg.) (2010): New Directions: The Ethics of Synthetic Biology and Emerging Technologies.. Online verfügbar unter https://bioethicsarchive.georgetown.edu/pcsbi/synthetic-biology-report.html, zuletzt geprüft am 14.09.2020.

Zhang, S. (2017): Whatever Happened to the Glowing Plant Kickstarter? Hg. v. The Atlantic. Online verfügbar unter https://www.theatlantic.com/science/archive/2017/04/whatever-happened-to-the-glowing-plant-kickstarter/523551/, zuletzt aktualisiert am 20.04.2017, zuletzt geprüft am 14.09.2020.

Anstelle eines Schlusswortes I:

10 Die Sehnsucht nach der guten Technik. Zur Urteilsbildung über die biologische Transformation der Technik

Heike Baranzke

Technik und Naturwissenschaft – eine Allianz im Dienste der Naturbeherrschung

Im weitesten Sinne lässt sich Technik als Erweiterung menschlicher Handlungsmacht unter »Ausnutzung natürlicher Kräfte für menschliche Zwecke« (Hübner 1974, S. 1475) verstehen. Insofern ist naturwissenschaftliches Wissen integraler Bestandteil von Technikentwicklung. Zugleich generiert die neuzeitliche Naturwissenschaft im Unterschied zu der vormodernen, eher kontemplativen Naturbeobachtung ihr Wissen überwiegend durch die Methode des Experiments und hat daher selbst bereits einen technischen Charakter. Denn moderne Naturwissenschaft versteht es, durch kontrollierte Variation der Randbedingungen Naturprozessen im Laborexperiment immer raffinierter abzulauschen, wie ihre Dynamiken ineinandergreifen und auf menschlich definierte Ziele hin umgelenkt werden können. Technik dient demnach der Durchsetzung menschlicher Handlungszwecke entgegen natürlicher Dynamiken und die experimentellen Naturwissenschaften kommen ihr methodisch dafür entgegen. Zugleich vermag sie z. B. durch technische Instrumente (z. B. Fernrohr, Mikroskop, Geigerzähler, Röntgentechnik) auch den menschlichen Wahrnehmungs- und Manipulationsbereich weit über die lebensweltlichen Dimensionen hinaus in den astronomischen wie in den subatomaren Bereich hinein auszuweiten und auf diese Weise den Bereich naturwissenschaftlich möglicher Erkenntnisse zu vergrößern.

Der modernen Allianz von Ingenieurskunst und Naturwissenschaft verdanken sich eine Unmenge von Errungenschaften und Erleichterungen in allen Bereichen des menschlichen Lebens, auf die kaum jemand mehr verzichten will. Allerdings hat der wissenschaftlich-technische Erfolg zwei Seiten. Waren frühe Neuzeit und Aufklärung von Faszination und ungetrübter Begeisterung ob ihrer Erfolge in der Naturbeherrschung geprägt, wächst seit etwa 200 Jahren das Bewusstsein für die Ambivalenz der bereits über die Erde hinausgreifenden technischen Macht des *homo faber* und spaltet die Gesellschaft in jene, die in ihr allein die Verheißungen sehen, und andere, die zurück zur Natur wollen. Liegt es da nicht nahe, jene Ambivalenz durch die Entwicklung »natürlicher Technik« überwinden zu wollen – durch die »biologische Transformation« der Technik? Gibt es also eine begründete Aussicht auf eine eindeutig gute Technik? Doch bevor wir uns mit der Rolle der Natur in Bezug auf das Problem des Gutseins beschäftigen, ist zuvor die Frage nach der Bedeutung von »gut« zu klären.

Inwiefern kann »gute Technik« gut sein?

Die Frage nach der Möglichkeit »guter« Technik wirft die Frage nach der Bedeutung von »gut« auf. Inwiefern kann Technik »gut« sein – gut für was und gut für wen? Kann von einem guten technischen Produkt behauptet werden, dass es absolut gut ist, ohne irgendwelche nicht guten Aspekte? Und was ist das Gegenteil von guter Technik? Der nächstliegende Annäherungsversuch an derartige Fragen ist, gute Technik als eine solche zu verstehen, die die ihr zugedachten Funktionen präzise und zuverlässig erfüllt, z. B. im Fall des US-amerikanischen Mars-Rovers Perseverance zuverlässig Bilder, Tonaufnahmen und Gesteinsproben einzusammeln. Risikotechnologien wie Atomkraftwerke sollten zudem in hohem Maße fehlerunanfällig und mit mehrfach unabhängigen Sicherheitssystemen ausgestattet sein, wie die Katastrophen von Tschernobyl und Fukushima schmerzhaft lehren. Keramikpfannen, Computer, Drohnen und selbstfahrende Autos erfreuen zwar mittlerweile viele Nutzer, der allgemeine Gebrauch solcher Produkte war aber vielfach anfangs gar nicht das Ziel der dahinterstehenden Technologieentwicklung, sondern lediglich ein Abfallprodukt der Raumfahrt- und Militärforschung. Das Stichwort »Dual-Use« für die zivile und militärische Doppelverwendbarkeit von technischen Produkten und Technologien macht deutlich, dass diese erkennbar unterschiedlich verwendet oder sogar missbraucht werden können und ihre Güte zumindest auch wesentlich von den Verwendungszwecken der Nutzer abhängt. Es gibt also offensichtlich mindestens zwei Arten vom möglichen Gutsein von Technik, die zu unterscheiden sind: Eine, die die Funktionalität technischer Produkte in Bezug auf die intendierten Handlungszwecke beurteilt, und eine, die die Güte der Handlungszwecke selbst beurteilt. Erstere kann als technisch-praktische Güte, Letztere als moralisch-praktische Güte bezeichnet werden. Das Kriterium der Beurteilung technisch-praktischer Güte liegt also in der Funktionstüchtigkeit des technischen Produkts für die Erreichung des technischen Zwecks. Alles, was dieses Kriterium nicht erfüllt, ist folglich in geminderter Weise brauchbar oder eben ein völlig unbrauchbares technisches Instrument. Aber was ist das Kriterium für die Beurteilung der moralischen Güte der technischen Handlungszwecke?

Technik und die Frage nach dem Kriterium der moralisch-praktischen Güte

Das Kriterium der technisch-praktischen Güte eines technischen Produkts ist seine Brauchbarkeit oder Funktionalität für den technischen Handlungszweck und ist von Ingenieurwissenschaftlern und von Usern zu beurteilen. Ob technischen Gütern auch eine moralische Güte zuzusprechen ist bzw. durch welche moralische Güte die Handlungszwecke sich auszeichnen, für die die technischen Instrumente konstruiert wurden, ist eine ethische Frage.

Ethik ist die systematische Beurteilung moralischer Praxis (griech. *prattein* = handeln) nach Kriterien eines gelingenden und gerechten menschlichen Zusammenlebens. Zur moralischen Praxis zählen zum einen individuelle Intentionen und freiverantwortliche menschliche Handlungen, aber auch soziokulturelle sittlich-normative Gemeinschaftsüberzeugungen (allgemeinübliche Sitten und Bräuche) sowie menschengemachte strukturelle Handlungsbedingungen (z. B. Rechtsgesetze, Organisationsregeln, berufsethische Kodizes etc.). All diese Elemente sind mögliche Gegenstände der ethischen Beurteilung. Da insbesondere komplexe technische Geräte oder Technologien ebenfalls menschliches Handeln beeinflussen, indem sie bestimmte Handlungsweisen erleichtern und andere unter Umständen ausschließen, gehören auch sie zu den von Menschen zu verantwortenden strukturellen Handlungsbedingungen, die auf ihre moralische Güte hin befragt werden können, also daraufhin, ob sie gerechtes menschliches Handeln eher befördern oder erschweren.

Gerechtes menschliches Zusammenleben steht unter der Bedingung des Axioms, das im ersten Artikel der Menschenrechtsdeklaration der Vereinten Nationen Ausdruck gefunden hat: »Alle Menschen sind frei und gleich an Würde und Rechten geboren.« (Art. 1 AEMR)[37] Der Satz scheint sich in der Form einer Tatsachenbeschreibung zu präsentieren. Aber Freiheit, Würde und Rechte sind keine sinnlich wahrnehmbaren, sondern vielmehr moralische Gegebenheiten. Genau betrachtet handelt es sich um einen rechtsethischen Imperativ, der vorschreibt, das Menschen als gleichberechtigte Rechtssubjekte anerkannt werden *sollen*, nicht zum Spielball beliebiger Machtideologien degradiert zu werden.. Ethik macht keine Aussagen darüber, was der Fall *ist* und auch nicht, was z. B. unter Einsatz technischer Mittel der Fall *sein könnte*, sondern was in Bezug auf menschliches Zusammenleben der Fall *sein soll*. Zugleich beziehen sich moralische (inklusive rechtsethische) Forderungen nicht auf (mathematisierbare) Relationen zwischen Sachverhalten, sondern auf die moralische Qualität der Beziehungsgestaltung zwischen Menschen als Personen. Der Basissatz der Ethik lautet somit: Alle Menschen *sollen* als Gleichberechtigte anerkannt werden! Die Tatsache, dass diese Grundforderung in der Wirklichkeit vielfach nicht erfüllt wird, erweist nicht etwa die Inkorrektheit der moralischen Forderung, sondern eben nur, dass sie oft missachtet wird. Die gegenteilige Forderung, nämlich, dass Ethik die moralische Ungleichheit von Menschen und die Infragestellung der Menschenrechte rechtfertigen und befördern soll, kann niemand ernsthaft befürworten. Das ethische Basisaxiom spiegelt sich folgerichtig auch im ersten Artikel des Grundgesetzes der Bundesrepublik Deutschland. »Die Würde des Menschen ist unantastbar. Sie zu achten und schützen ist Verpflichtung aller staatlichen Gewalt.« (Art. 1 GG)[38]

---

[37] Allgemeine Erklärung der Menschenrechte der Vereinten Nationen https://www.auswaertiges-amt.de/blob/209898/beeab63c2704f684c606a65589cf236c/allgerklaerungmenschenrechte-data.pdf (30.03.2021).

[38] Grundgesetz der Bundesrepublik Deutschland https://www.bundestag.de/grundgesetz (30.03.2021).

Die Menschenwürde ist der höchste Wert der deutschen Verfassung sowie der Verfassung eines jeden Staates, der als moralisch legitimierter Rechtsstaat gelten will. Insofern gilt das ethische Basiskriterium auch für die Technikethik wie für jede andere Bereichsethik. Die brisante Aktualität dieses machtkritischen Kriteriums angesichts einer Vielzahl autokratisch geführter Regimes sowie der Monopolstellung von international agierenden Firmen springt mit Blick auf die Informationstechnologien beispielhaft ins Auge. Technologien als Erweiterung menschlicher Handlungsmacht dürfen nicht Machtverhältnisse zementieren helfen, sondern haben letztlich dem guten und gerechten Zusammenleben aller Menschen zu dienen.

Im Verlaufe der Moderne ist uns – z. T. schubweise – bewusst geworden, dass wir Menschen die Biosphäre durch unsere technischen Erfolge überfordern. Die von Greta Thunberg ins Leben gerufene internationale »Fridays for Future«-Bewegung drängt darauf, angesichts unübersehbar gewordener globaler Folgen der anthropogenen Erderwärmung endlich nicht länger vor den 1972 erstmals und seither alle zwei Jahre erneut vom Club of Rome formulierten Einsichten in die natürlichen »Grenzen des Wachstums« die Augen zu verschließen (Meadows 1972). Das seit ca. 200 Jahren anwachsende Umweltkrisenbewusstsein kann nicht mehr als kulturpessimistische, wissenschaftsfeindliche Träumerei von westlichen Wohlstandskindern abgetan werden. Europa erlebt seit 2015 die schlimmsten Sommerdürren seit 2100 Jahren.[39] Vielmehr sieht sich die protestierende junge Generation unterstützt von unabhängigen Klima- und Umweltforschern und über alle Zweifel erhabenen internationalen Forschungsinstitutionen und Forschungsverbünden, allen voran der Weltklimarat IPCC[40], wenn sie für die Sicherung der Lebensgrundlagen ihrer und nachfolgender Generationen auf die Straße geht. Die wissenschaftlichen Studien zeigen in erschütternder Weise, dass die Erde unseren technologiegetriebenen Lebensstil nicht mehr zu tragen vermag und die Resilienzen der Subsysteme überfordert. Mental müssen wir uns daher von uralten kulturellen Leitbildern einer unerschöpflichen Natur verabschieden und der erschreckenden Übermacht anthropogener Ausbeutung und Transformation der biologischen Arten und Lebensräume auf allen Ebenen ins Auge sehen. Außer dem anthropogenen Treibhauseffekt, das Resultat einer Verfeuerung fossiler Brennstoffe, die sich in Jahrmillionen gebildet haben, innerhalb der zwei Jahrhunderte industrieller Revolution, haben wir einen massiven Rückgang der Biodiversität zu verantworten, sodass erstmals von einem durch eine einzige Spezies, nämlich der des *homo sapiens sapiens,* verursachten Faunenschnitt die Rede ist. Nicht nur große Wildtierarten und Vögel, sondern sogar

[39] Europa von schwerster Dürre seit 2100 Jahren betroffen, in: Süddeutsche Zeitung v. 15. März 2021, https://www.sueddeutsche.de/wissen/duerre-klimawandel-waldsterben-borkenkaefer-trockenheit-1.5235883 (30.03.2021).

[40] Die Berichte des Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) finden sich unter https://www.de-ipcc.de/307.php (30.03.2021).

die sprichwörtlichen Myriaden von Insekten haben wir in einem Maße verdrängt, das aufgrund des Wegfalls von Bestäubungsleistungen die Erzeugung pflanzlicher Nahrungsgrundlagen bedroht ist. Die Weltmeere sind vermüllt und überfischt. Auf menschenleeren Pazifikinseln sterben Meeresvögel durch den angeschwemmten Plastikmüll der zivilisierten Welt einen qualvollen und sinnlosen Tod. Dies sind die Spuren einer Spezies, nach der der niederländische Atmosphärenforscher und Nobelpreisträger Paul J. Crutzen zu Beginn des Jahrtausends nun sogar ein neues geologisches Zeitalter benannt hat – das Anthropozän (Crutzen et al. 2000; Crutzen 2002).

Schon vor Jahrzehnten forderte der deutsch-jüdische Philosoph Hans Jonas angesichts der Umweltkrise und atomarer Bedrohungsszenarien eine technologiebezogene Zukunfts- und Verantwortungsethik, die im Hinblick auf technologische Risikoeinschätzung die Pflicht zum Aufspüren einer »Heuristik der Furcht« zugrunde legt (Jonas 1984, S. 392), in Verantwortung für die Offenhaltung der Möglichkeit »der Permanenz echten menschlichen Lebens auf Erden« (Jonas 1984, S. 36). Doch die Schritte über diese Grenzen sind längst getan! Wie lässt sich Verantwortung denken für eine sichere Endlagerung atomaren Mülls angesichts einer Halbwertszeit von 22 000 Jahren im Fall von Plutonium – ohne den Begriff der Verantwortung zu sprengen? Hier sind Urteilsvermögen und Aufrichtigkeit gefordert.

Macht Natürlichkeit Technik moralisch gut?

Die anthropogene Übernutzung der Biosphäre lässt sich nicht mehr übersehen. Sogar die deutsche Autoindustrie hat sich mittlerweile vom Verbrennungsmotor verabschiedet. Aber mit dem Wechsel zur E-Mobilität droht eine neue Umweltproblematik, nämlich die Vernichtung von Biotopen und Landschaften um der Gewinnung der seltenen Erden willen, die in der Batterieentwicklung gebraucht werden. Auch vor derartigen Ambivalenzen ist die Bedeutung des Begriffs »biologische Transformation« der Technik zu reflektieren.

In Kapitel 2 dieses Buches bieten Wolperdinger und Bauernhansl drei Dimensionen für die »biologische Transformation« der Technik an: 1. Inspiration, 2. Integration, 3. Interaktion. Unter Inspiration verstehen sie den »Transfer von Naturphänomenen (Biomimikry, Biomimetik), die eine bioinspirierte Wertschöpfung ermöglichen«. Als Beispiel dient hier unter anderen der bionische Klassiker, der sogenannte Lotuseffekt, also der der Oberflächenstruktur der Lotuspflanzenblätter abgeschaute Selbstreinigungseffekt. Doch die Nachahmung des Lotuseffekts macht derart gestaltete Produkte, z. B. Fassadenfarbe oder Tischdecken, noch nicht per se umweltfreundlich. Das hängt zum einen von den Eigenschaften der Materialien ab, auf denen der Lotuseffekt umgesetzt wird, ob diese z. B. ökotoxisch oder inert, und daher nicht kompostierbar sind. Zum anderen muss die Ökobilanz des Produktionsprozesses derartiger Produkte berücksichtigt werden. Das zeigt: Bionische Produkte haben mit bi-

ologischer Verträglichkeit erst einmal nichts zu tun und nicht jede Natürlichkeit ist auch naturverträglich. Auch bezüglich der Integration und der Interaktion ist es sicherlich klug, z. B. die Fähigkeiten von Mikroorganismen in Produktions- oder Zersetzungsprozessen zu nutzen. Allerdings entkommen wir auch hierbei nicht der Betrachtung ökosystemischer Belastbarkeitsgrenzen, wenn wir nicht aus dem gesamten Planeten eine biologisch verarmte Technosphäre machen wollen. Insofern stellt sich die Frage, welche Natur wir wollen bzw. welches Maß an *technischer Transformation von Natur* wir anstreben oder vermeiden sollen. Diese Frage ist jedoch weder biowissenschaftlich noch technisch zu beantworten, sondern fällt als moralische Wertentscheidung in den Bereich der Ethik. Die Beantwortung dieser Frage bestimmt dann letztlich, was unter »biologischer Transformation« der Technik zu verstehen sein wird. Insofern gilt es, klar und deutlich zwischen Urteilsarten zu differenzieren, die das Verhältnis von Naturwissenschaft, Technik und Ethik ordnen und menschliches Handeln zu orientieren vermögen. (Abbildung 10-1)

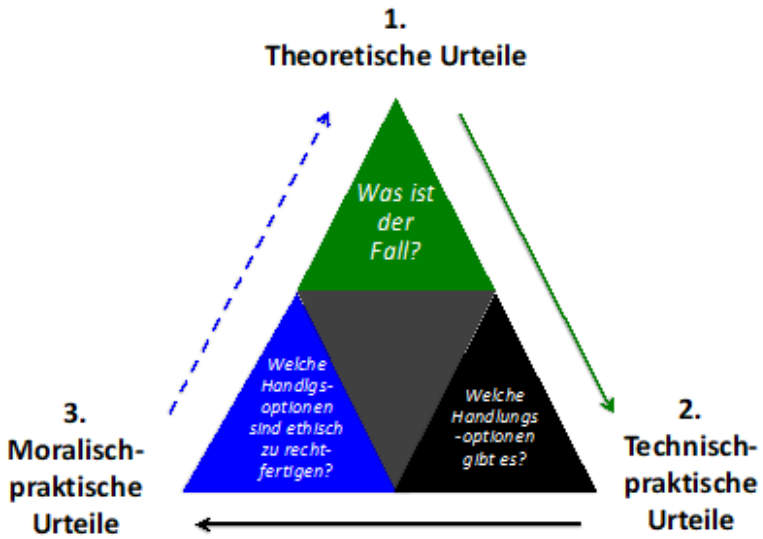


Abbildung 10-1: Differenzierung von Urteilsarten.

1. ***Theoretische Urteile*** dienen dazu herauszufinden, wie mit neuartigen Erfahrungstatsachen umzugehen ist, seien es neue Phänomene, wie das Auftreten einer neuartigen Infektionskrankheit, oder auch Nebenfolgen neuer Technologien, die es abzuschätzen gilt. Leitfragen sind hier: Was ist der Fall? Welche faktenbasierten Erkenntnisse liegen vor? Um das herauszufinden, können weitere Fragen hilfreich sein, wie: Welche Faktoren müssen berück-

sichtigt werden? Welche räumlichen und zeitlichen Maßstäbe sind erforderlich, um z. B. Langzeitwirkungen auf Menschen oder andere Organismen erfassen zu können? Welcher Komplexitätsgrad ist für das Erkenntnisinteresse adäquat? Sind außer biologischen auch soziale Nebenwirkungen zu erwarten?

Theoretische Urteile heißen deshalb »theoretisch«, weil sie unabhängig von subjektiven Interessen zu objektiver Sachkenntnis führen soll. Insofern ist der Prozess theoretischer Urteilsbildung, z. B. eine Technikfolgenabschätzung, auf die Bereitschaft zur moralischen Redlichkeit und Unparteilichkeit derer angewiesen, die ihn durchführen. Voraussetzung ist aber, etwas über die Wirklichkeit und ihre Bildungsgesetzlichkeit erfahren zu wollen. Untersuchungen, in denen Befunde und Erkenntnisse interessegeleitet manipuliert oder unterdrückt werden, mutieren zu Ideologien im Dienst bestimmter Machtinteressen.

Zugleich ist zu bedenken, dass alle empirische Erkenntnis nur vorläufig ist, da gemäß dem Philosophen David Hume keine vollständige Induktion möglich ist. Denn der potentiell unendliche theoretische Urteilsbildungsprozess wird von Handlungs- und Entscheidungserfordernissen in bestimmten Situationen beendet. So stellt das Infektionsgeschehen der SARS-CoV2-Pandemie insbesondere die politischen Entscheidungsträger immer wieder neu vor die Herausforderung, trotz der Unvollständigkeit des Wissens über das Virus und die durch es verursachten gesundheitlichen Langzeitfolgen immer wieder Handlungsempfehlungen oder Verordnungen zu formulieren, mit denen die Mitglieder einer Gesellschaft bestmöglich geschützt werden, und zwar in Abhängigkeit vom jeweiligen Stand der Forschung und in bester Absicht – eben nach bestem Wissen und Gewissen. Für die Entscheidung, ob neuartige Technologien eingeführt werden sollen, empfiehlt sich die Jonassche Heuristik der Furcht je nach dem Ausmaß des mit der Technologie verbundenen Risikos für Mensch und Natur.

2. Der vorurteilsfrei, unparteilich und gemäß dem aktuell verfügbaren Forschungsstand durchgeführten theoretischen Urteilsbildung folgt die ***technisch-praktische Frage nach den Handlungsoptionen*** im Umgang mit den Phänomenen. So wurden auf der Basis erster Erkenntnisse über die Infektiosität des Virus, der Übertragungswege, der Schwere der Erkrankungen, der Risikogruppen etc. die berühmten AHA-Regeln – Abstandhalten, Händewaschen, Alltagsmasken – formuliert. Der Fortschritt des theoretischen Erkenntnisprozesses beeinflusst laufend die Operationalisierungsregeln für den Umgang mit der Infektionslage: Isolationsvorschläge für den Schutz von Risikogruppen, die Größe des empfohlenen Abstands zueinander in Abhängigkeit vom Aufenthalt in Innenräumen oder im Freien, technische Mindestanforderungen an die Ausstattung der Masken, technische Empfehlungen für die Raumdurchlüftung – also die Erweiterung der AHA-Regeln durch Lüften (AHAL) –, die Aufstellung einer Prioritätenordnung bei der Verteilung von Impfstoffen etc. – Aber auch jenseits des akuten Kampfes gegen

die Pandemie befördern Forschungen über die Entstehung dieses Virus und die Abschätzungen von Gefährdungspotentialen für die Beförderungen von Pandemiegefahren die Diskussion über Präventionsmöglichkeiten. So kann die Ausdehnung von Naturschutzgebieten, die Reduzierung von Fleischverzehr oder der Verzicht auf intensive Tiernutzung die Gefahr der Entstehung neuer, von Wildtieren auf den Menschen überspringende Viren senken. Weitere Erkenntnisse werden weitere *Handlungsoptionen als Resultate technisch-praktischer Urteilsbildungen* hervorbringen.

3. Doch mit der Sichtung praktischer Problembewältigungsmöglichkeiten ist noch nicht evident, welche Optionen aus der Reihe der möglichen denn auch moralisch zu rechtfertigen sind. Denn nicht alles, was wir (technisch) können, ist auch moralisch legitim. Daher sind die Resultate der technisch-praktischen Urteilsbildung ethisch zu reflektieren, d. h. einem Prozess moralisch-praktischer Urteilsbildung zu unterziehen. Während bei technisch-praktischen Urteilen quantitative Sachaspekte wie die Effektivität von Maßnahmen, der Wirkungsgrad, Ökonomie, Operabilität u. ä. m. Kriterien darstellen, sind ***moralisch-praktische Urteile*** dem ethischen Axiom von Achtung und Schutz der gleichen Würde und Rechte aller Menschen als Personen unbedingt verpflichtet. Eine zeitlich eng begrenzte Aussetzung der grundsätzlichen menschenrechtlichen Verpflichtung des Staates gegenüber den auf seinem Hoheitsgebiet lebenden Personen ist nur in gesetzlich genau bestimmten Ausnahmefällen unter Wahrung des Verhältnismäßigkeitsgrundsatzes möglich, für die die Staatsorgane zudem stets Rechtfertigung schuldig sind. In Bezug auf Hochrisikotechnologien, die – wenngleich mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit – eine langfristige Einschränkung oder gar völlige Einbuße von Menschen- und Grundrechten nach sich ziehen könnten, ist daher fraglich, ob ein noch so großer Nutzen dieses gravierende, wenngleich wenig wahrscheinlich Risiko aufwiegen kann. Da die Menschen- und Grundrechte zudem der natürlichen Rahmenbedingungen bedürfen, um bestmöglich auch von zukünftigen Generationen genossen werden zu können, tritt die Bewahrung natürlicher Lebensbedingungen als ethisch gerechtfertigte Zweckbestimmung in den Fokus der Aufmerksamkeit, worauf z.B. der noch junge Begriff der »Klimaflüchtlinge« (Klepp 2018) verweist. Das Gelingen der biologischen Transformation der Technik in »gute« Technik wird sich letztlich daran messen lassen müssen, wie weit sie diesen moralischen Zweckbestimmungen dient. Erst dann kann sie sich als moralisch legitimiert betrachten, die Permanenz *echten* menschlichen Lebens mit der biologischen Vielfalt auf *diesem* Planeten zu befördern.

Literaturverzeichnis

Crutzen, Paul J. (2002): Geology of Mankind. In: *Nature* (415), S. 614–621.

Crutzen, Paul J.; Stoermer, Eugene F. (2000): The „Anthropocene“, in: Global Change Newsletter 41, 2000, 17f. http://www.igbp.net/download/18.316f18321323470177580001401/1376383088452/NL41.pdf (30.03.2021). In: *Global Change Newsletter* (41), S. 17–18. Online verfügbar unter http://www.igbp.net/download/18.316f18321323470177580001401/1376383088452/NL41.pdf, zuletzt geprüft am 30.03.2021.

Hübner, Kurt (1974): Art. „Technik“. In: Hermann Krings, Hans Michael Baumgartner und Christoph. Kösel Wild (Hg.): Handbuch philosophischer Grundbegriffe. München (5), S. 1475–1485.

Jonas, Hans (1984): Das Prinzip Verantwortung. Versuch einer Ethik für die technologische Zivilisation. Frankfurt: Suhrkamp.

Klepp, Silja (2018): Klimawandel und Migration. Heterogenes Forschungsfeld und politisierte Debatte. In: *Aus Politik und Zeitgeschichte (APuZ) (Klima)* (21-23), S. 34–39.

Meadows, Dennis L. (1972): Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. 17. Aufl. Stuttgart: Dt. Verl.-Anst.

Anstelle eines Schlusswortes II:

11 Natur, Technik & Ethik – Reflexionen und Fragen zur Natur als Vorbild

Hans Werner Ingensiep

Wird über Natur als Vorbild gesprochen, so ist zunächst relevant zu wissen, dass es »die Natur« in den Naturwissenschaften nicht gibt, sondern unterschiedliche Konzepte, insbesondere in den jeweiligen Fachdisziplinen und in der Geschichte der Wissenschaften. Diese Vielfalt der Naturbegriffe wird im ersten Teil vergegenwärtigt. Ferner ist von Bedeutung, sich kurz die Metaphorik mancher sogenannter Naturbegriffe vor Augen zu halten und die jeweilige Rolle dieser Terme in unterschiedlichen Kontexten der Kommunikation über Wissenschaft und Gesellschaft. Schließlich ist darüber hinaus die ethische Relevanz der »Natur« als Vorbild zu beleuchten, vor allem wenn es um die Übertragung naturalistischer, anthropomorpher bzw. anthropozentrischer Kurzschlüsse auf die Gesellschaft und Moral geht. – Zu diesen drei Diskursfeldern bietet der nachfolgende Beitrag einige Sondierungen, Denkanstöße und Fragen.

Die Vielfalt der Naturbegriffe

Wenn in den Natur- und Technikwissenschaften von »Natur« die Rede ist, sind diverse Bedeutungen im Spiel. Daher möchte ich kurz einige systematische Schneisen durch gängige Naturvorstellungen schlagen und wichtige Elemente oder Bausteine unterschiedlicher zeitgenössischer Naturbegriffe zwecks Selbstvergewisserung skizzieren. Dieser ersten philosophischen Annäherung folgt eine historische Skizze unterschiedlicher Vorstellungen, die jeweils unterschiedliche Zugänge zu aktuellen Natur-Diskursen ermöglichen.

Drei unterschiedliche Perspektiven auf »Natur« in Wissenschaft und Technik:

1. Natur = **Gesetze**. Diese nomothetische Perspektive beschreibt »Natur« als Gesetzeswerk, z. B. als funktionierendes »Ökosystem«, dessen synchrone Stabilität durch ein Räuber-Beute-Gleichgewicht aufrechterhalten wird. »Gesetze« sind abstrakte Konzepte und werden meist auf Formeln gebracht, welche die »natürlichen« Verhältnisse quantitativ beschreiben sollen. Naturforscher und Techniker orientieren sich an qualitativ verschiedenen Grundkräften wie an der Gravitationskraft oder der elektromagnetischen Wechselwirkung und erklären damit quantitativ bestimmte konkrete Prozesse, die dann unter die jeweiligen Gesetzesformeln subsumiert und auf diese Weise wissenschaftlich objektiviert werden.
2. Natur = **Phänomene**. Ausgangspunkte für diesen phänomenalen Naturbegriff sind die vielfältigen subjektiv wahrgenommenen Dinge der Natur, kurz, die Vielfalt der Tiere, Pflanzen, Landschaften usw. Solche

Phänomene werden im Einzelnen konkret beschrieben und sind letztlich, gerade wenn sie mittels medialer Techniken z. B. in Bildern oder Filmen dargestellt werden, immer auf unsere Sinne angewiesen – auf das Sehen, Hören, Schmecken etc. von Subjekten. Im Gegensatz zu den abstrakt formulierten »Gesetzen« der Naturforscher und Techniker, sind solche Phänomene mehr oder weniger unmittelbar sinnlich erfahrbar bzw. subjektiv erlebbar.

3. Natur = **Geschichte**. Diese historiografische Perspektive erzählt von natürlichen Ereignissen in ihrem zeitlichen, historischen Wandel. »Natur« wird dabei beispielsweise als ein naturhistorischer Prozess, als »Evolution« über Hunderte von Jahrmillionen historisch rekonstruiert. Auf diese Weise lässt sich ein diachroner Wandel in der Vielfalt der Arten und Umwelten, entweder eine »Weiterentwicklung« in alle Richtungen oder eine vermeintlich gerichtete »Höherentwicklung« aller Organismenarten, z. B. von der Amöbe bis zum Menschen, schildern. Pragmatisch kann dieser im Kern historische Naturbegriff aus aktueller Sicht noch weiter unterteilt werden in:
   - Natur als Geschichte ohne den Menschen. Eine solche Natur wird manchmal als besonders »natürlich« angesehen, z. B. als durchgängig unbeeinflusst durch menschliche Aktivitäten und daher oft auch unberührte »Wildnis« genannt.
   - Natur als Geschichte mit dem Menschen. Sie wird als anthropogene Natur oder auch als von Menschen beeinflusste oder gemachte »Kultur« verstanden; aktuell wird für diese Anthropogeschichte der Natur manchmal der Name »Anthropozän« verwandt. Ihr moderner Output sind klassische Artefakte oder »Biofakte«, also vom Menschen unter Verwendung natürlicher anorganischer oder organischer Ressourcen produzierte Dinge der Natur.

Wer im Kontext von Bionik über »Natur« als technisches Vorbild spricht, sollte sich also zunächst einmal darüber klarwerden, von welcher »Natur« eigentlich gerade die Rede ist. Ein Beispiel: Weiter unten wird noch von einem superstabilen Käfer die Rede sein, der kaum platt zu drücken ist. In welchem Sinne ist »Natur« in diesem Fall ein Vorbild für die Technik?

Vom Wandel der Naturvorstellungen

Allein der historische Wandel der leitenden Naturbilder im europäischen Denken ist hochkomplex und lässt sich im Hinblick auf die aktuelle Bedeutungsvielfalt nur sehr grob skizzieren. Der klassische Dreisprung – vom animistischen Mythos über die Religion und Theologie bis hin zur Naturwissenschaft – ist ein möglicher Ansatz, wobei gegenwärtig insbesondere den Biowissenschaften, der Chemie und der Physik eine dominierende Definitionshoheit für »Natur« zufällt. Einige Stichworte zu diesen Naturvorstellungen im historischen Wandel seien rekapituliert:

1. Animismus: die Vorstellung einer beseelten Natur, sei es von Pflanzen, Tieren, oder Landschaften, insbesondere bei sogenannten »wilden« Naturvölkern z. B. Jägern, Sammlern oder Hirten.
2. Natur als »Paradies«: Eine religiös motivierte Vorstellung, entstanden in Nomaden- oder Bauernkulturen, heute als zurückprojizierte Utopie und Lebensform verstanden. Nach alttestamentlicher Vorstellung führte ein »Sündenfall« zur Vertreibung gottnaher Kreaturen aus diesem Paradies in eine von Arbeit und Seufzen gezeichnete Jetztnatur. Dieses negative Konzept einer *natura lapsa* kann erst im »Jenseits« (Christentum) oder mittels Wissenschaft und Technik schon im »Diesseits« überwunden werden, so schon in Bacons Utopie.
3. Natur als Stufenordnung: ein sich von der Antike bis zur Neuzeit immer weiter ausdifferenzierendes Naturkonzept, das sich an der jeweiligen Komplexität aller Dinge der Natur orientiert. Unterschieden werden die anorganischen und organische Natur, in letzterer Wesen wie Pflanze, Tier und Mensch, die hierarchisch unterschieden und angeordnet werden. Ein wirkmächtiges antikes und mittelalterliches Beispiel war die aristotelisch-thomistische Drei-Seelen-Lehre auf der Basis der Existenz einer Pflanzen-, Tier- und Menschenseele. In der Neuzeit wurde dieses Naturkonzept in die Vorstellung eines feingestuften Naturkonzeptes transformiert, die *scala naturae*, so im 18. Jahrhundert bei Charles Bonnet. – Diese im Kern hierarchische Naturordnung aller Dinge gründete naturphilosophisch in einer intern-entelechialen und extern-teleologischen Nutzen- und Fressordnung, welche Beziehungen zwischen allen Lebewesen bestimmte: Das Anorganische diente als Lebensgrundlage für alle organischen Lebewesen, im Organischen dienten die niederen Pflanzen manchen Tieren und beide – Pflanzen und Tiere – letztlich dem Menschen als höchstem Seelenwesen, allein ausgestattet mit einer Vernunftseele, einer *anima rationalis*. Dies waren Grundlagen eines rationalistischen Anthropozentrismus.
4. Haushalt der Natur: Diese Naturvorstellung geht von einer oeconomia naturae aus, die letztlich in einer *oeconomia divinae* wurzelt (Linné 1749). Demnach bestehen im Haushalt der Natur synchron wechselseitige, natürliche Abhängigkeiten zwischen allen Lebewesen, Pflanzen oder Tieren, sowie zu ihrem Lebensraum, durch Kreisläufe, die ein natürliches Gleichgewicht und damit eine statische Ordnung aufrecht halten. Anders als in der modernen Ökosystemtheorie ging es um eine konstante Naturordnung und auch Konstanz der Arten, die letztlich durch Gott garantiert wurde.
5. Natürliche Evolution: Diese Naturvorstellung etabliert sich im Verlaufe des 19. Jahrhunderts, zunächst bei Lamarck, ausgehend von einer natürlichen Theorie der Lebensentstehung, der Höherentwicklung und Anpassung aller Organismen an eine spezifische Umwelt mittels vererbter Modifikationen durch Gewohnheiten in deren Lebensumwelt.

Das Evolutionskonzept kulminiert in Darwins Konzept des Artenwandels durch natürliche Selektion, später unter Einbeziehung der sexuellen Selektion, zwecks Erklärung der Entstehung der Artenvielfalt.

6. Natur als Ökosystem: Im 20. Jahrhundert entsteht dieses Naturkonzept in der Ökologie, einerseits gegen holistische Naturkonzepte, andererseits unter Einbeziehung von Interaktionen mit dem Soziosystem (Tansley 1935; Odum et al. 1953). Grundlegend waren Vorstellungen zu einem dynamischen Gleichgewicht und zu Kreisläufen im System, immer gemäß natürlichen Gesetzen, d. h. beschrieben und erklärt durch die herrschenden »Naturgesetze« der Physik, Chemie und Biologie.
7. Natur als Selbstorganisation: Diese Naturvorstellung prägte die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts und schließt teils an Konzepte der Thermodynamik irreversibler Prozesse an. Hier geht es um Nicht-Gleichgewichts-Phasenübergänge und konkrete Anwendungen der Selbstorganisation in der Physik, Chemie und Biologie, kurz, um Synergetik als universelles Erklärungskonzept. Das sich selbst organisierende Naturgeschehen wird gemäß dem Grundprinzip »Ordnung durch Fluktuation« erklärt. Es reicht von Theorien der Ontogenese der Organismen durch molekulare Interaktionen in morphogenetischer Feldern im Mikrokosmos bis hin zur universellen Selbstorganisation im Makrokosmos (Jantsch 1988; Haken 1977; Meinhardt 1982).

Bereits diese kurze historische Skizze führt vor Augen, dass jede Epoche neue bzw. dominante Naturvorstellungen hervorbrachte, die für eine bestimmte Zeit paradigmatisch, also erkenntnisleitend waren bzw. sind. Kurz, jede Naturvorstellung, so ist zu vermuten, ist per se perspektiv, selektiv und konstruktiv. Ihre Basis sind theoretische Konstrukte, welche immer wieder erneut auf ihre Voraussetzungen dahingehend zu prüfen sind, wie weit sie jeweils tragen bzw. objektivierbar sind – durch Beobachtungen, Vergleiche, Systematisierungen und Experimente.

Was bedeutet das für die Frage nach der bionischen »Natur« als technischem Vorbild, z. B. im Fall der Entdeckung eines superstabilen Käfers, der kaum platt zu drücken ist? »Eine Puzzleteil-Verankerung der Flügeldecke macht diesen Käfer quasi völlig druckunempfindlich. Vom Auto überrollen lassen und weiterlaufen, als wäre nichts geschehen? Kein Problem für den »Sechsbeiner« (Osterkamp 2020)«: Klar ist, in diesem Fall handelt es sich zunächst um ein sehr spezielles Phänomen und um eine unerwartete Beobachtung bei einer besonderen Tierart, die auch zu einer technischen Inspirationsquelle werden kann. Im Kontext der Evolutionstheorie kann zunächst weiter gefragt werden, wie dieser Organismus entstanden ist und welchen Vorteil dessen Eigenschaft möglicherweise hatte. Des Weiteren kann reflektiert werden, welcher Art von Naturvorstellung diese Gedanken entspringen? Geistes- und Gesellschaftswissenschaftler könnten fragen: Werden dadurch bestimmte anthropomorphe Naturbilder oder anthropozentrische Interessen befördert? Doch die bionische Frage ist anderer Art und lautet im Kern: Wofür könnte dieses

Ding der Natur mit diesen besonderen Eigenschaften ein technisches Vorbild sein?

Zur Rolle von Metaphern im gesellschaftlichen Natur-Diskurs

Bereits Darwin war sich der Bedeutung von Metaphern im Diskurs über die Natur sehr bewusst. Den Ausdruck »Struggle for existence (of life)« übernahm Darwin von dem Geologen Charles Lyell. Darwin bettete ihn in ein von Malthus geprägtes Konzept zur Entwicklung einer geometrisch wachsenden Population unter arithmetisch begrenzten Ressourcen ein. Im Deutschen wird der Ausdruck prägnant als »Kampf ums Dasein« übersetzt, aber:

»Es sei vorausgeschickt, dass ich die Bezeichnung »Kampf ums Dasein« in einem weiten metaphorischen Sinne gebrauche, der die Abhängigkeit der Wesen voneinander, und was noch wichtiger ist: nicht nur das Leben des Individuums, sondern auch seine Fähigkeit Nachkommen zu hinterlassen, mit einschließt.« (Darwin 1988, S. 101)

Darwin ging es also beim »Kampf ums Dasein« um einen theoretischen Erklärungsbegriff, kurz darum, ein nomothetisches Prinzip, besser noch, eine Bildungsregel für die Entwicklung der Fähigkeiten von Individuen und deren Reproduktion in Populationen – sprich Arten – qua »natural selection« vorzulegen. Es ging Darwin nicht um einen evolutionären Boxkampf. Nichtsdestoweniger ist das Prinzip trivialisiert und im klassischen Sozialdarwinismus naiv und unreflektiert auf gesellschaftliche Verhältnisse übertragen worden. Derart kann eine soziale Norm naturalistisch begründet werden. Metaphern können ontologisiert, trivialisiert und am Ende zu Dogmen werden. Dies geschieht auch in aktuellen Diskursen nicht selten mit biologischen Termen wie »Evolution«, »Ökosystem« oder »DNS«, die dann metaphorisch und reduktionistisch auf gesellschaftliche Prozesse übertragen werden. Insbesondere, wenn es um »die Evolutionstheorie« geht, vergessen aktuell manche Wissenschaftler und viele Laien gerne, dass es »die Evolutionstheorie« nicht gibt, wohl verschiedene »Evolutionstheorien« (Wuketits 1988), sei es Theoriekompilationen wie die sogenannten »Synthetische Theorie der Evolution« (Mayr) oder eine Vielzahl von Teiltheorien wie den Gradualismus (Darwin), Punktualismus, Saltationismus (Gould), Neutralismus (Kimura) oder Evo Devo (Caroll). All das wird meist schnell unter »Evolution« subsumiert, aber im biologischen Kontext differenziert betrachtet (Zrzavý 2010).

Derartige, ursprünglich im Fachdiskurs auf spezielle Gegenstände bezogene, Terme wandern nach und nach immer häufiger in gesellschaftliche Diskurse ein und werden dann zu Ausgangspunkten für ein sehr weites Feld von Assoziationen und Konnotationen. Zumindest die Wissenschaft muss dann rechtschaffen rückfragen und sich immer wieder neu vergewissern, um welche Objekte es geht und in welchen Kontexten, ferner wieweit der jeweilige Gebrauch der Terme plausibel, nachvollziehbar oder legitim ist.

Welche Unterscheidungen sollten beachtet werden? Biologische Terme erweisen in der Wissenschaft und Gesellschaft, kurz gesagt, ihren Dienst in vier unterschiedlichen Diskursfeldern:

1. als innerwissenschaftliche Terme der Kommunikation, Beschreibung u. Erklärung wissenschaftlicher Sachverhalte, Phänomene & Theorien.
   - Wer die merkwürdigen Eigenschaften des Käfers *Phloeodes diabolicus* begreifen will, nimmt teils anthropomorphe Ausdrücke teils ganz elementare biologische Erklärungskonzepte wie die Theorie der natürlichen Selektion in Anspruch, um das merkwürdige Phänomen möglichst adäquat beschreiben und erklären zu können. Aber auch technische Versuche, physikalische oder auch anthropozentrische Vergleiche können der wissenschaftlichen Aufklärung des Phänomens dienen: »Tests mit aus dem Panzer geschnittenen Proben zwischen zwei Stahlplatten zeigen, dass 149 Newton aufgewendet werden müssen, um die Struktur zu zerbrechen. Zum Vergleich: Ein Mensch, der einen Käfer mit Daumen und Zeigefinger zerdrücken wollen würde, könnte je nach Fingerkraft nur rund 35 bis höchstens 63 Newton aufbringen.«
2. als sprachliche Mittel in der inter- und transdisziplinären Heuristik, d. h. bei der kreativen Suche nach neuen wissenschaftlichen Sachverhalten & Theorien.
   - Verlassen solche Terme die engere fachbiologische Perspektive, können sie durchaus in anderen, nicht-biologischen, z. B. rein technischen Feldern, neue Produkte oder Vorgehensweisen anregen. In diesem Sinne stimulieren solche Terme und werden für die Forschung fruchtbar, z. B.in der Bionik. Welche Relevanz könnte dieser Käfer für technische Produkte oder Verfahren haben? Im Artikel wird eine technische Anwendung angesprochen: »Das Konstruktionsprinzip sollte auch die Ingenieurwissenschaft interessieren, meinen die Forscher: Ein Nachbau der über Puzzelteil-Verbindungen stabilisierten Schichten aus dem 3-D-Drucker, bei dem zwei unterschiedliche Materialien kombiniert wurden, erwies sich als stabiler als typische Verbindungen, die heute etwa im Flugzeugbau zum Einsatz kommen. Dabei variieren Festigkeit und Elastizität des Materials stark, abhängig von der Anzahl der Puzzleverbindungen und der Größe und Stärke der einzelnen verbundenen Elemente.«
3. im öffentlichen gesellschaftlichen Diskurs, darüber hinaus der schnellen Aufklärung und Akzeptanzbeschaffung.
   - Selbst in diesem recht unscheinbaren Fallbeispiel kann der kaum platt zu kriegende Käfer einerseits der schnellen Aufklärung über die Bedeutung der natürlichen Selektion dienen oder über die besonders überlebensfähige Architektur eines organismischen Bauplans. Vielleicht lassen sich damit aber auch Akzeptanzprobleme überwinden, wenn es um die Herstellung oder Nutzung militärischer Anwendungsfelder geht, z. B. kleinster, kaum zerstörbarer Spreng- oder Tretminen.

4. im ideologischen Diskurs gerade auch nichtwissenschaftlichen Gruppeninteressen oder dem Machterhalt von gesellschaftlichen Institutionen.
   - Mit Bezug auf rassistische oder sexistische Argumentationen sind biologische Rechtfertigungen nicht gerade selten; sie stabilisieren dann eine Ideologie und fungieren als Instrumente eines totalitären Herrschaftsinteresses in der Gesellschaft. Der extrem überlebensfähige Käfer *Phloeodes diabolicus* wird vielleicht kaum zur Festigung einer Ideologie beitragen. Doch wer weiß, welche Metaphern, Assoziationen und Konnotationen zu dessen Widerständigkeit noch möglich sind: »Vom Auto überrollen lassen und weiterlaufen, als wäre nichts geschehen? Kein Problem für den Sechsbeiner.«, heißt es im Artikel. Zudem, der Käfer sei »deswegen berüchtigt, weil man ihn, einmal gesammelt, kaum wie andere Insekten auf eine Nadel im Schaukasten spießen kann«, so Max Barclay, der Chefkurator des Londoner Naturkundemuseums in »Nature«: »Seine Flügeldecken sind einfach zu fest und undurchdringlich«. – Welche gesellschaftliche Assoziationen zur Überlebenskunst, Resistenz oder Resilienz werden damit evoziert?

Gerade in den Diskursfeldern 3 und 4 wandern biologische Terme bzw. Phänomene in die Gesellschaft und können dann auch zu bloßen »Plastikwörtern« (Pörksen 1988) verkommen, vielleicht aber auch im wissenschaftlichen Naturdiskurs. – Zugegeben, das hier benutzte, bewusst recht unscheinbare Beispiel mag unproblematisch sein; es wird wohl kaum als individualistisches Überlebensparadigma für eine asoziale Gesellschaft taugen. Doch seinem Beinamen *diabolicus* macht der Käfer alle Ehre. Zumindest zeigte ein Experiment, dass er von einem Auto überfahren werden konnte, ohne dabei Schaden zu nehmen. Wenn allerdings das Exempel in eine umfassendere Naturkonzeption eingebettet wird – sei es in Hierarchiekonzepte oder in solche des Gleichgewichts oder Ungleichgewichts etc. in der Natur, bedarf es zunächst einer tiefergehenden historischen oder theoretischen Analyse, sei es, ob oder inwieweit es sich dabei um historisch bedingte soziomorphe Projektionen handelt, oder um Theorieelemente, die zwar nomothetisch betrachtet einen begrenzten Horizont für kausale oder probabilistische Erklärungen eröffnen, die aber als solche nicht als axiologische oder normative ethische Konzepte taugen, insbesondere, wenn dabei vorschnell Seinsaussagen zu Sollensaussagen umgedeutet werden, kurz, wenn ontologische Aussagen zur ethischen Beurteilung sozialer oder technischer Prozeduren oder Produkte bzw. pauschal zur Forschungslegitimation herangezogen werden. Oder noch anders formuliert: Nur weil etwas »Bio« ist oder als solches ausgegeben wird, ist es ethisch betrachtet noch nicht »an sich« gut, sondern bedarf einer unabhängigen ethischen Legitimation »für mich« als ethisches Subjekt oder für die Gesellschaft.

Zur Ethik im Natur-und Technikdiskurs

Inwiefern ist Natur ein Vorbild? Welche Natur für Was? Letztere Frage stellt sich insbesondere angesichts des historischen Wandels der Naturbegriffe, aber auch angesichts vielfältiger disziplinärer Naturbegriffe in der Gegenwart. Seit Rousseau stellte sich eine andere Frage: Welche »Natur« kann Vorbild für die »Kultur« sein? In diesem gesellschaftlich paradigmatischen Naturdiskurs seit dem 18. Jahrhundert ging es zunächst darum, »natürliche« Verhaltensweisen problematischen Verhaltensweisen in einer degenerierten Kulturform gegenüberzustellen. Erscheint der Mensch durch »Kultur« deformiert, unfrei und ungleich, liegt es nahe, die »Natur« zum Vorbild und zur Quelle der Freiheit, Gleichheit und der konkreten Befriedigungen »natürlicher« Bedürfnisse zu erklären – vom freien Leben auf dem Land oder im Wald, über den freien Sexualverkehr bis hin zum Nacktbaden in der Natur sind unzählige Natürlichkeitsformen in der europäischen Kulturentwicklung inspiriert worden.

Angesichts der Natur als Vorbild für die Technik stellen sich andere Fragen. Zum einen ist die Frage, wieweit im klassischen Natur-Kultur-Diskurs von einem Gegensatz von Natur und Technik ausgegangen werden soll. Zumindest hat dieser Weg seit über einem Jahrhundert auch zu einer skeptischen Technikfeindlichkeit geführt – eine Position, die insbesondere aus holistischer oder ökologischer Perspektive eingenommen wurde und wird. In religiöser Einstellung wurde diese Skepsis zusätzlich motiviert durch einen guten Gott, der eine gute Natur schuf – sprich, eine Schöpfung, die es zu bewahren gilt und die nicht durch Technik deformiert werden sollte, z. B. durch Gen- oder Biotechnik. Wenn alles Seiende ohne Zutun des Menschen gut ist, weil ein guter Gott die Quelle alles Seienden ist (*Ens = Bonum*), dann ergibt sich eigentlich kein grundlegendes ethisches Problem im Hinblick auf die Natur. Doch was bedeutet es dann, dass die »Natur an sich« gut ist?

Wenn allerdings heute die Natur zum Vorbild der Technik erhoben wird, erscheint ein solcher klassischer Gegensatz von »Natur« und »Kultur« obsolet oder irrelevant, vor allem dann, wenn die »Natur« primär als wertneutrales Wissenskonstrukt angesehen wird, als nomothetisch, instrumentell und technomorph. Diese Natur ist lesbar und erforschbar, und gibt daher die Prinzipien und Gesetze vor, die dann als Mittel zu beliebigen Zwecken dienen können, welche der Mensch bei der Gestaltung seiner Gesellschaft und von Naturdingen einsetzen kann.

Aus moderner metaethischer Perspektive ergeben sich diverse Grundprobleme im Naturdiskurs, die sich als naturalistische Kurz- oder Fehlschlüsse in der Begründung ethischer Kernpositionen niederschlagen können. Frankena hatte in einer klassischen Analyse eine Kontroverse zwischen »Definisten« und »Intuitionisten« dargelegt. Definisten glaubten, ethische Prinzipien letztlich empirisch bzw. naturalistisch definieren zu können, während »Intuitionisten« wie Kant das bestreiten und glaubten, von intuitiv-rational erkennbaren apriorischen Urteilen über Normen und Werte ausgehen zu können

(Ingensiep 1990, 105 ff.). Dieses Grundlagenproblem münde gemäß Frankena in einen Diskurs zwischen Definisten, die ihrer Methode nach wertblind seien, und moralischen Intuitionisten, die eine moralische Halluzination hätten. Das Grundproblem bleibt aber auch nach Frankena, wie überhaupt aus einem »wertneutralen« Tatsachennaturalismus ethisch relevante »werthafte« Aussagen abgeleitet werden können.

Doch anders stellt sich dieses Problem angesichts der Bionik. Denn Bionik als solche kann zu ethischen Begründungsfragen keinen Beitrag leisten, wohl aber ist die Anwendung bionisch inspirierter Techniken in der Gesellschaft immer begründungsbedürftig. Die Frage ist dabei zunächst, welcher technikphilosophische Standpunkt mit Bezug auf Technikethik und Technikpolitik eingenommen wird (Nordmann 2008, 156 ff.). Es lassen sich, hier stark verkürzt, aktuell folgende fünf Standpunkte einnehmen:

1. Ansatz: Das Herstellen im Schutzraum des technischen Labors ist wertneutral. Erst technische Handlungsanwendungen und Produkte in der Gesellschaft sind ethisch relevant.
2. Ansatz: Technikethik ist eine Berufsethik mit besonderen Tugenden und Pflichten für den Techniker, z. B. wenn es um technische Sicherheit geht oder um »whistleblowing« bei Missbrauch von Techniken. Der Bioniker müsste in diesem Sinne eine eigene professionelle Technikethik explizieren.
3. Ansatz: Die konstruierten Artefakte sind selbst inhärent politisch. Dabei werden auch ethischen Prinzipien in die technischen Artefakte eingeschrieben – quasi als Aktionsprogramme wie in der sogenannten »Roboterethik« das Prinzip, das ein Roboter niemals einen Menschen töten darf.
4. Ansatz: Technik ist ein Menschheitsprodukt und daher die ganze Menschheit und die Natur betroffen, beispielsweise vom Standpunkt einer Klimaethik aus, welche dann u. a. »Nachhaltigkeit« als handlungsleitendes Prinzip in der Produktion von Artefakten einfordert.
5. Ansatz: Technik ist ein Menschheitsprojekt und zugleich ein globales Realexperiment wie im Fall von Kernenergietechnik oder Gentechnik, weshalb primär globale ethische Prinzipien zu deren Bewertung angelegt werden müssen wie Menschenwürde, Freiheit oder Gleichheit.

Welcher Ansatz auch gewählt wird, es ergeben sich sehr unterschiedliche Bewertungsszenarien auch für Techniken und Produkte der Bionik.

Generell aber ist festzuhalten: Das »Bio« in Bionik garantiert nicht per se, dass ein solches Produkt oder eine kopierte Verfahrensweise »an sich« gleich »gut« ist. Dies gilt in der Gegenwart bis hin zu »natürlichen« Ökosystemen, die als Vorbild für ein technisches Ecoengenering dienen. Es gilt bereits für bionische Objekte oder Verfahren, die als Vorbilder oder Modelle für eine technische Produktion dienen – dann auch für den diabolischen Käfer und

dessen Bioarchitektur. Naturprodukte und synthetische Produkte, ob nun biofaktisch hergestellt oder als bionische Vorbilder, sind nicht per se keine ethisch wertneutralen Gebilde, sondern bedürfen immer einer ethischen Reflexion im Handlungsraum der Gesellschaft. Was wer auch immer damit macht oder beabsichtigt zu machen, ist also im Kontext ethischer Wertvorstellungen und Normenreflexion zu entscheiden. – Insofern gibt es auch keine ethisch wertneutrale Biotechnik und Bionik.

Literarurverzeichnis

Darwin, C. (1988): On the Origin of Species by Means of Natural Selection (1859). In: P. H. Barrett und R. B. Freeman (Hg.): The Works of Charles Darwin. London (15).

Haken, Hermann (1977): Synergetik. Eine Einführung. Berlin: Springer.

Ingensiep, Hans Werner (1990): Evolution des Verhaltens. Biologische und ethische Dimensionen. Studienbrief Evolution des Menschen Teil II. DIFF Tübingen, Tübingen.

Jantsch, Erich; Feyerabend, Paul (1988): Die Selbstorganisation des Universums. Vom Urknall zum menschlichen Geist. 4. Aufl., 15. - 18. Tsd. München: Dt. Taschenbuch-Verl. (dtv dtv-Wissenschaft, 4397).

Linné, Carl von (1749): Oeconomia naturae. Upsala.

Meinhardt, H. (1982): Models of biological pattern formation. London: Acad. Press.

Nordmann, Alfred (2008): Technikphilosophie zur Einführung. Hamburg: Junius Verlag (Zur Einführung).

Odum, Howard P.; Howard Eugene P. (1953). Fundamentals of Ecology. Philadelphia: Saunders.

Osterkamp, Jan (2020): Superstabiler Käfer ist kaum platt zu drücken. Hg. v. Spektrum.de. Heidelberg. Online verfügbar unter https://www.spektrum.de/news/superstabiler-kaefer-ist-kaum-platt-zu-druecken/1784876, zuletzt aktualisiert am 22.10.2020, zuletzt geprüft am 08.02.2021.

Pörksen, Uwe (1988): Plastikwörter. Die Sprache einer internationalen Diktatur. Stuttgart: Klett-Cotta.

Tansley, Arthur (1935): The Use and Abuse of Vegetational Concepts and Terms. In: *Ecology* 16 (3), S. 284–307.

Wuketits, Franz M.; Nagl, Walter (1988): Evolutionstheorien. Historische Voraussetzungen, Positionen, Kritik. Darmstadt: Wiss. Buchges (Dimensionen der modernen Biologie, / hrsg. von Walter Nagl und Franz M. Wuketits ; Bd. 7).

Zrzavý, Jan; Storch, David; Mihulka, Stanislav; Burda, Hynek; Begall, Sabine (Hg.) (2010): Evolution. Ein Lese-Lehrbuch. [Nachdr.]. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.