

Schafft Wissen: Gemeinsames und geteiltes Wissen in Wissenschaft und Technik: Proceedings der 2. Tagung des Nachwuchsnetzwerks „INSIST“; 07.-08. Oktober 2016, München

Engelschalt, Julia (Ed.); Maibaum, Arne (Ed.); Engels, Franziska (Ed.); Odenwald, Jakob (Ed.)

Veröffentlichungsversion / Published Version
Konferenzband / conference proceedings

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Engelschalt, J., Maibaum, A., Engels, F., & Odenwald, J. (Hrsg.). (2018). *Schafft Wissen: Gemeinsames und geteiltes Wissen in Wissenschaft und Technik: Proceedings der 2. Tagung des Nachwuchsnetzwerks „INSIST“; 07.-08. Oktober 2016, München* (INSIST-Proceedings, 2). <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0168-ssoar-58220-7>

Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer CC BY-ND Lizenz (Namensnennung-Keine Bearbeitung) zur Verfügung gestellt. Nähere Auskünfte zu den CC-Lizenzen finden Sie hier: <https://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/deed.de>

Terms of use:

This document is made available under a CC BY-ND Licence (Attribution-NoDerivatives). For more information see: <https://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0>

Gebrauchsanleitungen für „lebende Maschinen“? Synthetische Biologie zwischen Ingenieur und Anwender

Michael Funk

Einleitung

Technologien wie Roboter, selbstfahrende Autos, Drohnen oder das Internet der Dinge erregen ein hohes öffentliches Aufsehen – aus guten Gründen. Denn mit Entwicklungen wie diesen sind gesellschaftliche Herausforderungen des sicheren Umgangs mit Daten oder der Ersetzbarkeit menschlicher Arbeit verbunden. Obwohl sich für die synthetische Biologie ähnlich problematische ethische und soziale Fragen stellen, scheint das öffentliche Interesse an dieser Technologie jedoch momentan geringer auszufallen. Vielleicht liegt das daran, dass neue Roboter oder Autos auf allgemeinen Grundverständnissen aufbauen. Wir sind sinnlich an ihre Vorgänger gewöhnt, wohingegen die synthetische Biologie mit mikroskopisch kleinen Einzellern arbeitet, deren sinnlich spektakuläre Anwendungsfälle noch ausstehen. Trotzdem ist der Bedarf an ethischer Reflexion und kritischer Technikfolgenabschätzung auch in diesem Bereich hoch. Es ist schließlich besser, sich vorher Gedanken über Handlungsfolgen zu machen, als wenn es schon zu spät ist. Mit dieser Motivation wird in vorliegendem Beitrag zur Diskussion „Schafft Wissen. Gemeinsames und geteiltes Wissen in Wissenschaft und Technik“ ein (nicht auf Vollständigkeit angelegter) Streifzug durch interdisziplinäre Debatten zur synthetischen Biologie unternommen.

Über den Begriff des synthetischen bzw. künstlichen Lebens schreibt Georg Toepfer: „In conclusion, with the creation of living machines synthetic biology will not necessarily strengthen our purely mechanistic view of life but rather broaden our concept of machines.“ (Toepfer 2016, p. 82) Mit Maschinen werden externe technische Dokumentationen zum bestimmungsgemäßen Umgang geliefert. Meistens haben die Nutzer¹ wenig Ahnung von den technischen Details – der epistemischen Tiefenstruktur. Was sie aber erlernen oder schnell nachschlagen können müssen, ist popularisiertes Umgangswissen – die epistemische Oberflächenstruktur. Wissen zwischen Ingenieuren und Anwendern wird wesentlich mittels Gebrauchsanleitungen geteilt. Wenn „lebende Maschinen“

1. Zur besseren Lesbarkeit werden im Fortgang ausschließlich männliche Wortformen verwendet. Die entsprechende weibliche Wortform ist stets mit gemeint.

nun aber, wie Toepfer schreibt, unseren Begriff von Maschinen erweitern², erweitert oder ändert sich dann auch unser Begriff von Gebrauchsanleitungen³? Der erwähnte Streifzug durch interdisziplinäre Debatten zur synthetischen Biologie soll in vorliegendem Beitrag anhand dieser Frage erfolgen. Was sind Eigenschaften und Besonderheiten einer Gebrauchsanleitung für „lebende Maschinen“? Welche epistemologischen (das Wissen betreffenden) und ethischen (die Moral und Verantwortung betreffenden) Herausforderungen ergeben sich?

Unter der Annahme, dass auch technische Laien in Zukunft mit synthetischen Organismen umgehen werden und entsprechendes Oberflächenwissen für den gelingenden Umgang brauchen – bei gleichzeitigem Fehlen biologischen Tiefenwissens – wird in sechs Abschnitten aus verschiedenen philosophischen Perspektiven die Frage nach einer möglichen Gebrauchsanleitung für „künstliche“, synthetische Organismen gestellt. Nicht berücksichtigt sind politische, ökonomische oder juristische Faktoren wie Normierungen oder rechtliche Regulierung. Auch mediale Einflüsse und die Akzeptanzproblematik seitens verschiedener Bevölkerungsgruppen müssen ausgespart bleiben. Insofern scheinen in vorliegendem Beitrag Indizien darüber auf, was in der Zukunft Gebrauchsanleitungen für „lebende Maschinen“ von Gebrauchsanleitungen herkömmlicher Geräte unterscheiden könnte. Eine abschließende Antwort auf diese Frage lässt sich aber im Voraus nur in einem transdisziplinären Projekt mit Biologen, Medien- und Sozialwissenschaftlern sowie Juristen erarbeiten. Vorliegender Text könnte ein solches Projekt vorbereiten helfen, verfolgt aber primär das Ziel, einen Beitrag zur philosophischen und sozialwissenschaftlichen Grundlagendebatte anzubieten.

Im ersten Teil „Synthetische Biologie – auch Ingenieure feiern Geburtstag“ findet eine Annäherung an die Disziplin der synthetischen Biologie, ihre Vorgeschichte, ihre Definition und ihren Ingenieurcharakter statt. Abschnitt 2 verhandelt unter dem Titel „Von oben sieht unter dem Schirm alles gleich aus – von der Seite betrachtet nicht“ Unterschiede zwischen synthetischer Biologie und Biotechnologie, den „umbrella status“, das Layer-Modell und eine Minimaldefinition. Drittens folgt „Nicht wissen, aber machen – auch Biologie kommt in der Garage vor“, wobei epistemische Unterschiede zwischen Systembiologie und

-
2. Es wird davon ausgegangen, dass es „lebende Maschinen“ bisher noch nicht gegeben hat. Ein Pferd ist keine „lebende Maschine“, auch wenn es durch Züchtung zielgerichtet verändert worden wäre. In diesem Sinne sind auch alle animistischen Deutungen nicht zu berücksichtigen, nach denen prinzipiell jedes Objekt eine Seele oder einen Lebenshauch haben könnte. Wenn durch synthetische Biologie also erstmals „lebende Maschinen“ als neuer Begriff von Maschine möglich werden, dann ist in diesem Zusammenhang zu fragen, ob es auch neue Anforderungen an Begriff und Gestaltung von Gebrauchsanleitungen geben könnte.
 3. In vorliegendem Aufsatz wird konsequent von Gebrauchsanleitungen gesprochen, obwohl es eine Reihe synonyme Begriffe wie Bedienungsanleitung, Betriebsanweisung oder Benutzerhandbuch gibt. Diese sind Teil der externen technischen Dokumentation und sollen in schriftlicher Form zur sicheren und bestimmungsgemäßen Verwendung eines technischen Gerätes anleiten. Details sind in der aktuellen deutschen/europäischen Norm DIN EN 82079-1 (VDE 0039-1:2013-06) „Erstellen von Gebrauchsanleitungen – Gliederung, Inhalt und Darstellung“ geregelt. Ob und wie sich diese Norm durch „lebende Maschinen“ in Zukunft ändern wird, ist nicht ohne juristische Expertise zu beantworten und bleibt als weiterführende Forschungsfrage in vorliegendem Text noch unbeantwortet.

technoscience sowie die Rolle von Nichtwissen Darstellung finden. In der vierten Sektion „Vom dümmsten zum bösesten anzunehmenden Nutzer – kein Traum von der idiotensicheren Anleitung“ stehen ethische Fragen der Verantwortung und Technikzukünfte, des Folgewissens und des *dual use* im Mittelpunkt. Es folgt fünftens „Hermes spielt Gott – metaphorisch“ und eine Erörterung der Hermeneutik impliziten und expliziten Wissens sowie der metaphorischen Rede in der synthetischen Biologie. Zuletzt wird unter dem Titel „Lebende Maschinen und natürliche Kuchenrezepte – Ordnung muss sein“ auf die Kritik an der Programm- und Rezeptmetapher sowie am Genzentrismus und der *genetic firewall* eingegangen. Gedanken zum Begriff des Lebens und dem Prinzip der methodischen Ordnung schließen die Darstellung ab. Im Schlussteil wird eine kurze Zusammenfassung gegeben.

Synthetische Biologie – auch Ingenieure feiern Geburtstag

Die EU-Kommission Health & Consumers hat im September 2014 eine Arbeitsdefinition der synthetischen Biologie vorgelegt, die sich sowohl zur Risikoabschätzung eignet als auch offen für neue technologische Entwicklungen sein soll: „SynBio is the application of science, technology and engineering to facilitate and accelerate the design, manufacture and/or modification of genetic materials in living organisms.“ (EU-Kommission 2014, S. 5)

Synthetische Biologie wird neben Robotics oder Nanotechnologie zu den *emerging technologies* gezählt. Was sie jedoch von anderen aufstrebenden bzw. neu entstehenden Forschungsfeldern unterscheidet, ist ihre exakte Geburtsurkunde. Ungewöhnlich genau lässt sich ihr „Geburtsstag“ auf den 10. Juni 2004 datieren. Am Massachusetts Institute of Technology begann an jenem Tag die Gründungskonferenz „SB 1.0“, und seitdem hat sich das Forschungsfeld mit diversen Journals, Konferenzen und Förderformaten rasant entwickelt (Acevedo-Rocha 2016, S. 10f.; Engelhard et al. 2016a, S. 3f.). Es kann bezweifelt werden, ob die so präzise Datierung des Beginns einer Disziplin überhaupt sinnvoll ist – insbesondere wenn die Möglichkeit der ökonomischen und öffentlichkeitswirksamen Selbstinszenierung neuer Forschungsfelder in Betracht gezogen wird. So wird auch die Arbeit der Craig-Venter-Gruppe 2010, in welcher die Lebensfähigkeit eines Bakteriums mit synthetisiertem Genom beschrieben wurde, als „mediale Geburtsstunde der synthetischen Biologie“ diskutiert (Pühler 2011, S. 11). Auf jeden Fall lässt sich für die synthetische Biologie – trotz ihrer ungewöhnlich exakten Geburtsurkunde und spektakulären medialen Erfolge 2010 – sowohl der Sprache als auch dem Phänomen nach eine längere Vorgeschichte aufzeigen.

Zur sprachlichen Vorgeschichte: Nach einem bereits 1906 erschienen, kleineren Aufsatz veröffentlichte der französische Biologe und Mediziner Stéphane Leduc 1912 ein Buch unter dem Titel *La Biologie Synthétique* und argumentiert mit der Möglichkeit der experimentellen Erschaffung künstlichen Lebens gegen vitalistische Positionen seiner Zeit. 2013, rund 100 Jahre später, spricht Craig Venter in seinem Werk *Life at the Speed of Light. From the Double*

Helix to the Dawn of Digital Life von den Möglichkeiten einer „Software des Lebens“. Er richtet sich ebenfalls – nun mit enorm erweiterten technischen Mitteln – gegen vitalistische Erklärungsversuche biologischen Lebens (Achatz 2014, S. 85f.; Toepfer 2016, S. 77). Auch wenn in der oben genannten Definition der EU-Kommission Begriffe wie „künstlich“ oder „artificial“ nicht explizit auftauchen, lässt sich unter synthetischer Biologie doch die Erschaffung „künstlichen“ Lebens mit experimentellen und technologischen Mitteln verstehen. Diese Idee und der dazugehörige Begriff datieren spätestens auf das Jahr 1912 und wurden in den 1970er Jahren durch Waław Szybalski erneuert (Acevedo-Rocha 2016, S. 10; Bölker et al. 2016, S. 28). Die gegenwärtige disziplinäre Selbstschöpfung fand erst 2004 statt.

Dem Phänomen nach folgt die synthetische Biologie der Biotechnologie seit den 1970er Jahren, diese der Entdeckung der DNA-Doppelhelix durch Watson, Crick und Franklin 1952/53, und diese wiederum den Mendelschen Vererbungsgesetzen sowie der theoretischen Grundlegung der modernen Evolutionsbiologie in Charles Darwins Buch *On the Origin of Species* 1859. Mitte des 19. Jahrhunderts leistete Gregor Mendel fast zeitgleich mit Darwin Weichenstellungen für die heutige Biologie. Zur Darwin'schen Evolutionstheorie traten erste theoretische Regeln der Vererbung organismischer Eigenschaften (Knippers 2012, S. 2-8, S. 215f.; Junker 2004). Diese theoretischen Regeln gingen über zum Teil 10.000-12.000 Jahre altes (kunst-)handwerkliches Züchtungswissen hinaus (Irrgang 2003; Ders. 2004b). Der Schritt von einer Biologie als analytischer Wissenschaft zur Biologie als synthetischem Forschungsprinzip und einem entsprechenden Verständnis belebter Phänomene erfolgte gleichfalls im späten 19. Jahrhundert, diesmal durch die Arbeiten von Albert Blakeslee, Emil Fischer, Jacques Loeb, Stéphane Leduc und Hugo de Vries (Acevedo-Rocha 2016, S. 9f.; Bölker et al. 2016, S. 42; Junker 2004; Steizinger 2016, S. 284f.; Toepfer 2016, S. 76-78).

Mit der Entdeckung der DNA-Doppelhelix 1952/53 durch Watson, Crick und Franklin ließ sich die materielle, molekulare Grundlage biologischer Vererbung konkret benennen (Acevedo-Rocha 2016, S. 10; Knippers 2012, S. 79-95). Der abstrakte Terminus „Gen“ wurde sinnlich konkret und das Bild der Doppelhelix zu einer „Ikone der Biologie“ (Knippers 2012, S. 88). Mit diversen technischen Erfindungen, wie etwa dem biochemischen Zerschneiden der DNA durch Restriktionsenzyme oder Techniken des Gentransfers, wurden in der Folge die Grundlagen der Biotechnologie bzw. des *genetic engineering* gelegt. Hinzu trat das Wissen um die Universalität des genetischen Codes. In der Folge ließ sich das Phänomen des biologischen Lebens seit den 1970er Jahren nicht mehr nur durch Zuchtauswahl verändern, sondern durch diverse technische Verfahren auf Basis theoretischer Erkenntnisse in Laboratorien – einschließlich vielfältiger disziplinärer Zugänge durch Bioinformatik, chemische Verfahren oder Systembiologie (Acevedo-Rocha 2016, S. 10f.; Bölker et al. S. 28f.; Engelhard et al. 2016a, S. 4; Knippers 2012, S. 133-154). Die synthetische Biologie schließt unmittelbar an diese Entwicklungen an. Somit stellt sie sich wie in der EU-Definition als „the

application of science, technology and engineering to facilitate and accelerate the design, manufacture and/or modification of genetic materials in living organisms“ dar (EU-Kommission 2014, S. 5).

Momentan und in absehbarer Zukunft geht es dabei um einzellige Lebensformen. Komplexere Organismen, Wirbel- oder gar Säugetiere liegen (noch) nicht in Fokus und Kompetenz der Forscher. Die synthetische Biologie befindet sich in einem Proof-of-principle-Stadium. Trotz beachtlicher Erfolge und vielversprechender Anwendungsszenarien⁴ stehen noch keine konkreten Ergebnisse für den tatsächlichen Einsatz zur Verfügung (Achatz & Knoepfler 2014, S. 7). Im Unterschied zur Biotechnologie, durch welche bestehende Lebensformen gentechnologisch modifiziert werden, geht es jedoch in der synthetischen Biologie um das Erschaffen kompletter Zellen. Die synthetische Biologie ist die Fortführung der Biotechnologie (Bölker et al. 2016, S. 28). Da die DNA als biochemische Operationseinheit einen Durchmesser von nur 2 Nanometern aufweist, spricht Armin Grunwald in diesem Zusammenhang auch von „konsequenter Weiterentwicklung der Nanobiotechnologie“ (Grunwald 2012, S. 178) und „Fortführung der Molekularbiologie mit nanotechnologischen Mitteln“ einschließlich „Nanobio-nik“ (Ebd., S. 188; siehe auch Simmel 2011). Beiden Bereichen – Biotechnologie und synthetischer Biologie – gemeinsam sind Ingenieurmethoden, die zur Bezeichnung „Bioingenieurwesen“ geführt haben. In Gestalt der synthetischen Biologie strebt das Bioingenieurwesen, wie gesagt, nicht (nur) die Veränderung bestehender Lebensformen an, sondern die Konstruktion komplett künstlicher Organismen – Leben soll nicht nur verändert, sondern wie eine Maschine vom Reißbrett designt werden (Engelhard et al. 2016a, S. 2; Bölker et al. 2016, S. 29). Dementsprechend definiert Klaus Mainzer im Jahr 2011:

Die Synthetische Biologie ist also eine Technikwissenschaft des Künstlichen und Komplexen. Sie gehört zu den Wissenschaften vom Künstlichen, sofern sie auf Computersimulation und mathematische Modelle zurückgreift. Als Wissenschaft vom Komplexen modelliert sie die Evolution des Lebens durch die Selbstorganisation komplexer Systeme. Als Technikwissenschaft untersucht sie Bedingungen, unter denen neue Systeme entstehen und realisiert werden können. (Mainzer 2011, S. 31)

Dabei dominieren vier Methoden: *top-down*, *bottom-up*, parallel und orthogonal (Acevedo-Rocha 2016, S. 12-15). Zu den charakteristischen klassischen Inge-

4. Mögliche zukünftige Anwendungen sind die Erzeugung pharmazeutischer Wirkstoffe oder nicht-fossiler Treibstoffe, außerdem die Umweltsanierung oder Schadstoffbeseitigung. Auch diverse Anwendungen in der Lebensmittelindustrie, in der Landwirtschaft und im privaten wie gewerblichen Gartenbau sind denkbar. In all diesen Situationen wird durch Gebrauchsanleitungen der sachgemäße Umgang kommuniziert werden müssen. Besondere Herausforderungen stellen sich, wenn die Endanwender technische Laien sind. Es kann nur in den wenigsten Anwendungsszenarien unterstellt werden, dass die Nutzer gleichermaßen viel über synthetische Biologie wissen wie die Entwickler und Produzenten. Das Problem der Wissenspopularisierung stellt sich nicht nur zwischen Ingenieuren und technischen Laien, sondern auch schon beim Übergang zwischen verschiedenen wissenschaftlichen oder technischen Disziplinen. Ein klassischer Maschinenbauer kann sich in seinem Bereich als hoch kompetent ausweisen, aber für den gelingenden Umgang mit „lebenden Maschinen“ doch auf entsprechend aufbereitete Kenntnisse seiner Kollegen aus der synthetischen Biologie angewiesen sein.

niurmethode n zählen *top-down*-Verfahren, wobei Teil für Teil einem übergeordneten Plan folgend das Produkt erstellt wird. So gesehen ähnelt die synthetische Biologie in ihrem Konstruktionsanspruch klassischen Ingenieurfächern wie Maschinenbau oder Elektrotechnik. Als weitere bekannte Ingenieurprinzipien treten Modularisierung und Standardisierung hinzu. Dies schließt vorgefertigte Bauteile oder ganze Gruppen – die sogenannten „Biobricks“ – mit ein. Leben ist hier mehr als ein Naturphänomen; es soll als technisches Mittel gestaltet werden (Bölker et al. 2016, S. 31f.; Engelhard et al. 2016a, S. 4; Grunwald 2012, S. 189f.; Mainzer 2011, S. 29f.). Die Mittel der aktuellen Biologie gehen dabei in ihrem Ingenieurcharakter und theoretischen Anspruch, sowie dem zugrunde liegenden Wissen über seit Generationen bekannte Züchtungsverfahren hinaus. Eine Gebrauchsanleitung müsste das berücksichtigen und würde nicht zur Popularisierung handwerklicher Züchtungsregeln dienen. Nur insofern Ingenieure auch kunsthandwerkliches Wissen besitzen, wären solche Kenntnisse für eine Gebrauchsanleitung „lebender Maschinen“ bedeutsam. Gibt es noch darüber hinausgehende Unterschiede zwischen synthetischer Biologie und dem herkömmlichen Bioingenieurwesen?

Von oben sieht unter dem Schirm alles gleich aus – von der Seite betrachtet nicht

Auf der Webseite der Synthetic Biology Community findet sich eine Definition ähnlich der eingangs erwähnten Formulierung der EU-Kommission: „Synthetic Biology is A) the design and construction of new biological parts, devices, and systems, and B) the re-design of existing, natural biological systems for useful purposes.“ (www.syntheticbiology.org [letzter Zugriff am 5.6.2017]) Dabei lassen sich – auch in Anbetracht unscharfer Übergänge – zumindest zwei neue Eigenschaften der synthetischen Biologie benennen, wie erstens die Absicht, neue biologische Elemente oder Systeme zu entwerfen und zu konstruieren. Im Gegensatz zu genetisch modifizierten Organismen (GMO) geht der Eingriff in den Organismus bei synthetischen Zellen sehr viel tiefer. Hinzu treten Xeno-Organismen⁵, durch welche nicht-natürliche chemische Komponenten in lebende Systeme eingebracht werden. Insofern unterscheidet sich die synthetische Biologie auch durch Orthogonalität von der Biotechnologie und vom *genetic engineering* (Engelhard et al. 2016a, S. 7; Bölker et al. 2016, S. 29). Unter Berücksichtigung der vielen beteiligten Disziplinen, Verfahren und Ansätze kommen Engelhard et al. im Jahr 2016 zu einer Minimaldefinition, die ähnlich wie in den gegenwärtigen Debatten um den Begriff des Lebens von einem „umbrella term“ (siehe auch

5. Xeno-Organismen, Xeno-Zellen und Xeno-Leben sind Gegenstand der Xenobiologie und somit Teil der synthetischen Biologie. „Xeno“ bedeutet im Altgriechischen „Gast“ oder „Fremder“. Bildlich sind damit nicht-natürliche Elemente gemeint, die auch als Erweiterung des genetischen Codes in DNA (Desoxyribonukleinsäure) eingebracht werden. Diese wird dadurch zur XNA (Xenonukleinsäure).

Eichinger 2016, S. 276; Falkner 2016, S. 255; Hagen et al. 2016, S. 4; Steizinger 2016, S. 278) ausgeht:

Today, synthetic biology is a very diverse field. It comes along in a mosaic-like structure for which there exists no sharply-cut and generally accepted definition. [...] Thus, the label 'synthetic biology' serves more as an umbrella term. (Engelhard et al. 2016a, S. 6)

Entsprechend eines klassifikatorischen Layer-Modells sind für Bölker et al. dabei mindestens drei Ebenen des Umgangs mit synthetischen Organismen zu unterscheiden. Jede Ebene entspricht einem Hauptforschungsansatz und führt zu einem zugeordneten terminologischen Konzept natürlicher und synthetischer Organismen:

Engineering Biology, aiming at the transformation of biology into an engineering discipline by introducing standardized modules, parts and devices with well-described characteristics that can be used to construct novel biological systems or to redesign existing living systems.

Orthogonal Biology, trying to create cells that are unable to exchange genetic information with natural organism either by integrating non-natural molecular compounds (xeno-life) or by reassignment of the natural genetic code (recoded life).

Protocell Research, aiming at recapitulation of prebiotic evolution by building simple cellular vesicles that fulfil at least some criteria of living systems. (Bölker et al. 2016, S. 30 [Hervorhebungen im Original]; siehe auch Ebd., S. 36-47)

Es zeigt sich, dass unter dem Schirm der synthetischen Biologie diverse Ansätze und Verfahren Platz finden. Der Begriff des Arbeitsergebnisses, also des „synthetischen Organismus“, nimmt dabei einen ähnlichen „umbrella status“ ein. Was unter einem solchen zu verstehen ist, hängt vom Verfahren seiner Erzeugung ab. Eine reine Betrachtung des Ingenieurcharakters macht also Unterschiede zwischen Züchtung (Handwerk) und Biotechnologie bzw. Gentechnik (Ingenieurwesen) sichtbar. Zur Klärung der Besonderheiten synthetischer Biologie ist außerdem noch der Blick für die Eingriffstiefe in lebende Organismen, sowie biochemische Besonderheiten des orthogonalen Ansatzes („Xeno-Zellen“) und der Protocellen-Forschung („Minimalzellen“) nötig. Aus Sicht der Forscher gibt es dementsprechend mindestens drei Formen synthetischer Biologie und damit verbunden auch mindestens drei Begriffe „künstlichen Lebens“. Carlos G. Acevedo-Rocha diskutiert sogar sechs Begriffe von „Genetically Modified Organism“ (GMO) über „Genomically Edited Organism“ (GEO) bis hin zu „Chemically Modified Organism“ (CMO) (Acevedo-Rocha 2016, S. 15-31).

Für die Frage nach Gebrauchsanleitungen ergibt sich folgende Option: Entweder muss für jede mögliche Form künstlicher Organismen (mindestens drei bis sechs verschiedene) ein je eigenes Konzept der Gebrauchsanleitung bedacht werden, oder aber es gibt andere Kriterien, nach denen sich Gebrauchsanleitungen zu richten haben. Da eine Unterscheidung der dargelegten Ebenen und Begriffe auf der Grundlage komplexen ingenieurtechnischen und naturwissenschaftlichen Wissens möglich ist, kann diese nicht ohne Weiteres an Techniknutzer herangetragen werden. Die verschiedenen Layer und Termini begründen

sich also aus der Perspektive einer epistemischen Tiefenstruktur: Man muss sich fachlich schon sehr gut auskennen, um die Unterschiede zu begreifen. Eine Gebrauchsanleitung soll jedoch Wissen popularisieren, also eine für Laien einfach zugängliche Oberflächenstruktur bieten. Das spricht für die zweite Option. Außerdem gibt es eine Anzahl nicht-technischer Kriterien, zum Beispiel juristische Normen, denen eine Gebrauchsanleitung ebenfalls gerecht werden muss.

Dementsprechend können wir davon ausgehen, dass sich die Herausforderung der Wissenspopularisierung im Umgang mit synthetischen Organismen nicht nach dem jeweiligen Layer richtet (denn diese begründen sich aus Sicht der Forscher), sondern nach der konkreten Nutzungsform synthetischer Organismen (aus Sicht der Anwender plus ethische und juristische Regulierung). Diese Annahme gilt für Gebrauchsanleitungen – die Schnittstelle des geteilten Wissens zwischen Ingenieur und Nutzer –, nicht jedoch für die intensiv geführten Debatten zur Risikoabschätzung und Biosicherheit. In diesen Bereichen spielt das Layer-Modell offensichtlich eine wichtige Rolle (Bölker et al. 2015, S. 33, S. 39, S. 47; siehe auch: Acevedo-Rocha 2016, S. 32ff.; Engelhard 2016b; Illies 2016). Um zu begreifen, was für Nutzer popularisiert an die epistemische Oberfläche gebracht werden soll (und damit auch die ethische Problematisierung vorzubereiten), ist also zu fragen: Wie wissen die Experten? Haben wir hier unter Experten Naturwissenschaftler, Ingenieure oder Garagen-Tüftler zu verstehen?

Nicht wissen, aber machen – auch Biologie kommt in der Garage vor

Fast zu einem Topos des Ingenieuransatzes im Umgang mit Leben wurde eine Aussage Richard Feynmans: „What I cannot create, I do not understand.“ Im Zusammenhang mit synthetischer Biologie wird dieses Zitat oft in unterschiedlichen Kontexten wiederholt (Acevedo-Rocha 2016, S. 14, S. 24; Nordmann 2014, S. 3ff.; Steizinger 2016, S. 279). Der Feynmansche Slogan lässt sich zum Beispiel als Maxime des Bioingenieurwesens lesen, als Aufforderung, Leben durch Nachbauen zu begreifen. Er kann als konstruktivistisches Paradigma der synthetischen Biologie dienen und dabei gleichzeitig den ingenieurtechnischen Anspruch dieser jungen Disziplin illustrieren. Wenn es der Genetik mit herkömmlichen Mitteln nicht gelingt, dem Leben auf die Spur zu kommen, dann – so die Motivation mancher Forscher – eben mit der synthetischen Biologie (Knippers 2012, S. 348ff.). So lassen sich weitere Definitionen der synthetischen Biologie entwickeln. Für Acevedo-Rocha geht es theoretisch betrachtet nur um Ingenieurleistungen, nicht mehr um Wissenschaft. Praktisch gesehen ist synthetische Biologie hingegen eine Zusammensetzung unterschiedlicher „research tribes“ in interdisziplinären Arbeitsgruppen, sowie „Do-it-yourself“-Biologen (Acevedo-Rocha, S. 11) – Garagen-Tüftler.

Die Frage nach dem Verhältnis zwischen Natur- und Technikwissenschaften sowie dem Wissen technischer und wissenschaftlicher Handlungsformen bzw. Disziplinen wird neu gestellt. Alfred Nordmann betont in diesem Zusammenhang die Rolle des Künstlichen und des auf Grundlage materiellen Wissens

Gemachten. Im praktischen Sinne bezeichnet synthetische Biologie eine Form der technischen, nicht jedoch der wissenschaftlichen Komplexitätssteigerung:

Synthetic biology is thus „synthetic“ firstly in the sense of not being analytic, of generating rather than reducing complexity, and secondly in the sense of being non-natural, artificial biology, that is, in virtue of engineering not within the domain of the natural, but entirely within the sphere of the synthetic even as it utilizes knowledge about and materials from the material sphere of the biological. This is what sets it apart from molecular biology as well as genetic engineering. (Nordmann 2014, S. 19f.)

Nordmann unterscheidet zwei „epistemic ideals“ bzw. „mind-sets“. Auf der einen Seite stehen die Vertreter einer Systembiologie, die unter synthetischer Biologie eine theoretische Wissenschaft verstehen, in welcher aus methodischen Gründen Komplexität reduziert werden muss. Davon ist der an Praxis orientierte *technoscience*-Ansatz (siehe auch Müller 2016) zu unterscheiden. Denn entgegen dem systembiologischen Paradigma vertreten dessen Befürworter keinen Reduktionismus, sondern weisen auf die Erzeugung nicht-theoretisierter Komplexität durch die Verbindung wissenschaftlichen Wissens und technischer Fähigkeiten hin. Dem systembiologischen Ansatz geht es um wissenschaftliches Wissen und rationale Ingenieurmethoden. Nichtwissen soll abgebaut werden. Für *technoscience* steht hingegen das Bewirken praktischer Resultate – trotz begrenztem theoretischen Wissen – im Mittelpunkt. Entsprechend ist eine ausdrückliche Toleranz gegenüber Nichtwissen und „black-boxes“ vorhanden (Nordmann 2014, S. 10-14, S. 21).

Ein Beispiel für den *technoscience*-Ansatz in der synthetischen Biologie und das entsprechende Fertigkeitwissen sieht Nordmann in strategischen Designprozessen von iGEM-Arbeitsgruppen. iGEM⁶ ist ein jährlich stattfindender Wettbewerb für Nachwuchswissenschaftler auf dem Gebiet der synthetischen Biologie, der in verschiedenen Kategorien an verschiedenen Orten ausgetragen wird. „Working knowledge“, Arbeitswissen und das Ausprobieren, wie viel sich auch ohne theoretische Erklärung praktisch bewirken lässt, charakterisiert das epistemische Selbstverständnis der beteiligten Forscher und Tüftler. Der praktische Umgang mit Nichtwissen ist ein prägender Bestandteil. Insofern folgen sie eher einer Methodik der *technoscience* als der systembiologischen Herangehensweise (Ebd., S. 12, S. 15). Die von Nordmann dargestellte epistemische Diskrepanz zwischen synthetischer Biologie als „applied systembiology“ (Ebd., S. 10) und dem *technoscience*-Ansatz verweist auf eine generelle epistemische Diskrepanz: Was der Theoretiker vermeiden will, sucht der Praktiker geradezu. Von diesem epistemischen Spannungsverhältnis – (theoretisches) Nichtwissen meiden oder anstreben – ist das Forscherverständnis der synthetischen Biologie geprägt. Kennzeichnend für den *technoscience*-Ansatz ist es,

einer Forschungspraxis gerecht zu werden, für die die Trennung von Darstellung und Eingriff nicht mehr gilt. Wissenschaft und Technik seien eben darum ununterscheidbar geworden, weil die Darstellung der Natur

6. iGEM ist die Abkürzung für „International Genetically Engineered Machine“. Weitere Infos zur Foundation, Community und dem Wettbewerb finden sich auf igem.org.

immer schon mit einer technischen Naturveränderung einhergeht – was dargestellt wird, ist nicht das Bleibende der Natur an sich, sondern bereits ein Erzeugnis technowissenschaftlicher Praxis. Auch die Ablösung des rein innerwissenschaftlichen Argumentierens von den materiellen Gegebenheiten im Labor gehört hiernach nicht mehr zum Selbstverständnis der Forscher. (Nordmann 2005, S. 213)

Die Materialität des Forscherhandelns und Sprechens (im Labor) und die nicht mehr mögliche Trennung von Technik und Wissenschaft kennzeichnen auch die Epistemologie der *emerging technologies* – wie die synthetische Biologie. Das Wissen um ein Phänomen lässt sich nicht von materiellen, technischen Bedingungen der Erzeugung des Phänomens abtrennen. Es gibt kein theoretisches Wissen um künstliche Organismen abgesondert von den Fertigkeiten der Forscher, die eine wiederholbare Erzeugung dieser Organismen ermöglichen.

Nordmann bringt diesen Umstand auf die prägnante Formel: „Selbst einen wissenschaftlichen Fortschritt kann es also auf der Ebene reiner und gewissermaßen sprachloser Phänomenbeherrschung geben.“ (Nordmann 2011, S. 570) Für Ingenieurdisziplinen sollte dies allemal gelten. In fünf Attributen lassen sich die Eigenschaften technowissenschaftlichen Fertigkeitenswissens zusammenfassen:

1. Dieses Fertigkeitenswissen ist nämlich erstens objektiv und öffentlich, indem es ausgestellt und dokumentiert wird.
2. Es ist zweitens nicht allgemein wie das auch Laien verfügbare Dingwissen sondern setzt eine je spezifische Wissenskultur voraus.
3. Drittens ist es kommunizierbar, auch ohne dass damit die Fertigkeit selbst oder ein bestimmtes Verstehen schon kommuniziert oder gelehrt wäre.
4. Das Fertigkeitenswissen beinhaltet viertens eine Kenntnis von Kausalbeziehungen
5. und sedimentiert sich fünftens als Verhaltensgewohnheit im Sinne von Charles Sanders Peirce. (Ebd., S. 575f.)

Damit sind auch Kriterien für die Unterscheidung zwischen handwerklichem Züchtungswissen und bioingenieurtechnischem Wissen gegeben. Für die Frage nach Gebrauchsanleitungen birgt das zweite Attribut einen besonders interessanten Hinweis. Das Fertigkeitenswissen ist aus Sicht der Forscher und Tüftler nicht allgemein: Es bleibt gebunden an eine Wissenskultur, die eben auch die erwähnten materiellen Aspekte einschließt. Damit ist so etwas wie eine Expertenkultur gemeint. Für Laien muss dieses Wissen jedoch in eine übergreifende Form übersetzt werden, um als Gebrauchsanleitung allgemeingültig anwendbar zu sein. Mit anderen Worten: Die Fertigkeiten der Anwender unterscheiden sich von den Fertigkeiten der Entwickler. Es wäre ein Fehler, so zu tun, als ob der Unterschied zwischen beiden Gruppen nur im Verfügen von objektiv-theoretischem und sprachlich verfasstem Wissen bestünde. Offensichtlich sieht es mit den Fertigkeiten im Umgang mit synthetischen Organismen auf beiden Seiten relativ dünn aus. Für Züchtungswissen gibt es mittlerweile bis zu 12.000 Jahre Erfahrungsbasis, *trial-and-error*-Prozesse und Meister, die ihr Wissen an Gesellen weitergeben. Für den Umgang mit Produkten der Biotechnologie liegen Erfahrungen erst

seit Kurzem vor (für synthetische Organismen praktisch gar nicht). Trotzdem schreitet die Forschung rasant voran. Ist das nicht gefährlich? Sollten bei Gebrauchsanleitungen hier nicht besondere Vorsichtsmaßnahmen integriert werden?

Vom dümmsten zum bösesten anzunehmenden Nutzer – kein Traum von der idiotensicheren Anleitung

Der ingenieurtechnische Umgang mit Einzellern in Laboratorien – folge dieser einer systembiologischen oder technowissenschaftlichen Leitlinie, *top-down*, *bottom-up*, parallel oder orthogonal – wirft nicht nur methodische und epistemologische, sondern ebenfalls eine Vielzahl ethischer, politischer, juristischer und sozialer Fragen auf. Das eine hängt mit dem anderen zusammen: Technische Handlungen (das Erzeugen „lebender Maschinen“ im Labor – oder wenigstens die Intention dazu/der Versuch) ziehen normative Reflexionen nach sich (Dürfen wir das? Sind die Risiken vertretbar? Wie müssen wir legislativ regulieren?). Im Idealfall findet die Folgenabschätzung schon vor den potentiell kritischen Handlungen statt. Es verwundert nicht, dass es im Umfeld der synthetischen Biologie intensive ethische Debatten gibt – wobei das Motto „Vorsicht ist besser als Nachsicht“ breite Zustimmung erfährt. So schreibt Christian Illies:

It is obvious that synthetic biology could also have harmful effects; it has the potential to change things radically. It is therefore desirable that ethical reflection accompanies synthetic biology from the outset. And luckily synthetic biology been accompanied by ethical reflection from the very beginning. (Illies 2016, S. 91)

Johannes Achatz und Nikolaus Knoepffler formulieren es so:

Gerade jetzt, in der Frühphase der Forschung, in der weitreichende Erfolgsaussichten und vielversprechende Anwendungsszenarien vorgelegt werden [...], aber konkrete Anwendungen noch ausstehen und keine marktreifen Produkte vorliegen, ist der richtige Zeitpunkt, um auch die gesellschaftlichen Konsequenzen dieser erhofften Fortschritte sowie ihre Risiken und Chancen zu überdenken. (Achatz & Knoepffler 2014, S. 8)

Für Armin Grunwald spielt das Konzept der Technikzukünfte in der Folgenabschätzung eine herausragende Rolle und deutet den progressiven Charakter der Reflexion auch sprachlich an („...zukünfte“):

Denn bevor man mit ethischen Kriterien an Herausforderungen und Verantwortungsfragen des technischen Fortschritts geht, muss man sich Vorstellungen vom *Gegenstand* ethischer Reflexion und von Verantwortungszuschreibung machen. Diese 'Vorstellungen' sind vielfach Vorstellungen über *zukünftige* Entwicklungen von Technik, über ihre Nutzung und die Folgen ihres Einsatzes, über deren Verantwortbarkeit befunden werden muss – Technikzukünfte bilden einen zentralen Gegenstand ethischer Reflexion zu Verantwortung und Verantwortbarkeit im wissenschaftlich-technischen Fortschritt. (Grunwald 2014, S. 37 [Hervorhebungen im Original])

Es ließe sich nun einwenden, dass insbesondere Risiko-Debatten und Fragen der Biosicherheit wichtig sind und eher brennende ethische Probleme adressieren als Gedanken über Gebrauchsanleitungen. Ja, das stimmt. Aber warum in diesem Zusammenhang nicht auch über Gebrauchsanleitungen nachdenken? Hinsichtlich der Verantwortungsanalyse unterscheidet Armin Grunwald zum Beispiel fünf Faktoren: „(1) Jemand ist verantwortlich (2) für etwas (3) vor einer Instanz (4) relativ zu einem Regelwerk und (5) relativ zu einem Wissensstand.“ (Ebd., S. 43; siehe auch ders. 2011). Wenn Grunwald damit Recht hat, dann adressiert die Frage nach gemeinsamem und geteiltem Wissen besonders den fünften Aspekt, womit die Frage nach Gebrauchsanleitungen auch zu einem Teil der Verantwortungsproblematik wird. Denn sie betrifft den Wissensstand – relativ zum Nutzer. Das bedeutet im Umkehrschluss außerdem, dass Gebrauchsanleitungen nicht normativ neutral sind. Sie sind Teil des verantwortungsvollen Umgangs mit synthetischen Organismen und „lebenden Maschinen“. Welches Wissen dürfen oder müssen wir wie popularisieren?

Eine besondere ethische Herausforderung ist mit *dual use* – der Umnutzung – verbunden. Denn ein Entwickler kann zwar aus seiner Sicht Technik so sicher wie möglich gestalten. In der synthetischen Biologie und im weiter oben erwähnten Layer-Modell auf der Ebene des orthogonalen Ansatzes wird hierzu die *genetic firewall* als „ultimate safety tool“ diskutiert. Dadurch, dass die XNA⁷ einer Xeno-Zelle biochemisch (eigentlich) nicht mit der DNA eines natürlichen Organismus interagieren kann, sollte eine genetische Wechselwirkung zwischen „künstlichem“ und „natürlichem“ Leben ausgeschlossen sein (Bölker et al. 2016, S. 33, S. 39, S. 43-45; Marlière 2009; Schmidt, M. 2010; Schmidt, M. 2011; Schmidt, M. & de Lorenzo 2012). Aber was ein Anwender wirklich mit einer Technik macht, übersteigt regelmäßig die kühnsten Erwartungen der Entwickler. Manchmal wird von „Zweckentfremdung“ gesprochen oder sogar vom „dümmsten anzunehmenden Nutzer“. In der Technikphilosophie hat sich für nicht intendierte Umnutzung neben *dual use* der Terminus „multistability“ etabliert (Ihde 1990). Gebrauchsanleitungen sind insofern nicht neutral, als sie einem Anwender auch das Wissen um potentielle Zweckentfremdung liefern (auch wenn sich der Entwickler/Produzent alle Mühe gibt, die intendierte Funktion möglichst „idiotensicher“ darzustellen). Ethisch am besorgniserregendsten ist jedoch nicht der „dümmste“, auch nicht der „böseste“, sondern der „intelligenteste und fahrlässigste anzunehmende Nutzer“.

In Verantwortungsdebatten z. B. zur Synthetischen Biologie muss der Stand des verfügbaren Wissens über die zu verantwortende Zukunft erhoben und unter epistemologischen Aspekten, d. h. in Bezug zur Qualität und Belastbarkeit des Folgenwissens, kritisch reflektiert werden. (Grunwald 2014, S. 43)

7. XNA bedeutet Xenonukleinsäure. Im Gegensatz zur DNA (Desoxyribonukleinsäure) enthält sie zumindest ein künstliches Element und ist somit als Gegenstand der Xenobiologie auch der synthetischen Biologie zuzuordnen. Mit dem Einbringen künstlicher Elemente geht eine Erweiterung des genetischen Codes um neue („nicht-natürliche“) Aminosäuren einher. Kann DNA durch Züchtung indirekt verändert werden, braucht es bei XNA ein biotechnologisches Laboratorium.

Hermes spielt Gott – metaphorisch

Vorliegender Aufsatz zur interdisziplinären Diskussion „Schafft Wissen. Gemeinsames und geteiltes Wissen in Wissenschaft und Technik“ soll nicht nur einen Beitrag zur progressiven sozialen Reflexion der synthetischen Biologie leisten, sondern gleichzeitig auch einen Beitrag zur epistemologischen Grundlagendebatte, die direkt ethische Probleme im verantwortungsvollen Umgang mit deren Produkten betrifft. Hierfür sind hermeneutische Ansätze hilfreich. Für Armin Grunwald ist eine Auseinandersetzung mit Technikzukünften in Form einer kritischen Hermeneutik möglich.

In der Synthetischen Biologie zum Beispiel werden heute Visionen geäußert, die einen guten Teil der gesellschaftlichen Debatte mitbestimmen, deren heilsähnlichen Erwartungen von der Rettung aus der drohenden globalen Energiekrise bis hin zu den Befürchtungen des ‚Gott Spielens‘ reicht. Aufgabe einer Hermeneutik wäre hier die Deutung der Visionen und der die durch sie ausgelösten Kontroversen. (Grunwald 2012, S. 284)

In der Technikhermeneutik (Irrgang 1996) wird davon ausgegangen, dass dem Umgang mit Technik vergleichbare Verstehensprozesse zugrunde liegen wie dem Umgang mit Texten und Sprache – nur eben stärker leiblich-materiell eingebettet. Sowohl epistemologisch, als auch ethisch lässt sich auf diese Weise ein kritischer Zugang zur synthetischen Biologie gewinnen (Irrgang 2003; Ders. 2004b; Funk 2016).

Debatten werden sprachlich geführt; Gebrauchsanleitungen sind ebenfalls sprachlich verfasst. Methodisch ist also ein Zugang durch Technikhermeneutik und hermeneutische Technikfolgenabschätzung möglich, da Gebrauchsanleitungen nicht nur Formen der Wissenspopularisierung sind, sondern auch Übersetzungsleistungen, mit denen ein sachliches Anwendungsverständnis vermittelt werden soll. Visualisierungen und die technische Aufbereitung von Bildern spielen bei hermeneutischen Prozessen dieser Art eine wichtige Rolle (Ihde 1998). Sehr bekannt sind die Mischungen aus Aufbau- und Gebrauchsanleitungen großer skandinavischer Möbelhäuser, in denen eine leibliche Handlung (technische Praxis) allein durch Bilder und Symbole vermittelt wird. Bis hin zu Gebrauchsanleitungen in App-Form sind mediale Varianten verschiedenster Bildsprachen bekannt, in denen Gesten und somit Umgangsverständnis geteilt werden. Dem entsprechen eigene Wissensbereiche.

Das Kommunizieren von Wissen zwischen Ingenieuren und Anwendern geschieht auf verschiedenen epistemischen Ebenen. In der theoretischen Philosophie gibt es hierfür Verfahren zur Analyse von Wissensformen technischen und nicht-technischen Erkennens (Abel 2012; Irrgang 2004a; Kornwachs 2012). Vielen Verfahren liegt eine Grundunterscheidung zwischen Formen impliziten Wissens und Formen expliziten Wissens zu Grunde. Diese Unterscheidung lässt sich anhand der synthetischen Biologie mit der erwähnten Differenzierung Nordmanns zwischen der systembiologischen Herangehensweise und der *technoscience* illustrieren. Im systembiologischen Paradigma wird versucht, zu Gunsten

theoretischen Wissens praktische Komplexität zu reduzieren. Gegenüber *black boxes* und (theoretischem) Nichtwissen herrscht jedoch im *technoscience*-Paradigma eine ausdrückliche Toleranz. Mehr noch, es wird praktische Komplexität absichtlich erzeugt, auch wenn sich diese einer theoretischen Beherrschung entzieht. Die Systembiologie arbeitet somit unter dem Primat expliziten Wissens: Es geht um das Wissen, welches sich klar und eindeutig aussprechen lässt. Umgekehrt die *technoscience*: Der Polanyische Slogan „we can know more than we can tell“ (Polanyi 2009, S. 4) wird regelrecht zu einer Parole und einem Kondensat technowissenschaftlichen Fertigkeitenswissens, wie Nordmann es beschreibt.

Sprache und Bilder in Gebrauchsanleitungen sind so wenig neutral wie Technik. Bilder und Worte übersetzen nicht nur sachliche technische Abläufe, sie funktionalisieren nicht nur die Popularisierung komplexer Operationen. Sie drücken auch nicht nur soziale Präferenzen, Ideologien, juristische Normen oder politische Werte zumindest indirekt aus. Gebrauchsanleitungen popularisieren vor allem ein Umgangsverständnis und eine konkrete epistemisch und ethisch bedeutsame Perspektive – sie sind Teil der ohnehin kontroversen öffentlichen Debatten im Umfeld der synthetischen Biologie. Hier kann eine kritische Technikhermeneutik ansetzen.

Eine 'hermeneutische Technikfolgenabschätzung' würde einerseits gegenwärtige Debatten über sich selbst aufklären und kommende Debatten vorbereiten, in denen es dann z. B. um die konkrete Technikgestaltung gehen könnte. (Grunwald 2014, S. 52)

Neben der Analyse konkreter Wissensformen (implizites und explizites Wissen) oder Darstellungsformen von Werten und Operationen (Texte, Bilder etc.) sind in den Debatten zur synthetischen Biologie besonders Metaphern in den Blickpunkt geraten (Falkner 2016; Keller 2003; Martern et al. 2016). Wie wir über synthetische Biologie und allgemeiner über Genetik reden, ist vielfach aus historischen und sachlichen Gründen metaphorisch gewachsen. Einer der sachlichen Gründe ist die für technische Innovationen nicht unübliche Verlegenheit, die entsteht, wenn für etwas Neues noch keine Worte bestehen. Oft werden bekannte Termini dann einfach mit einer neuen Bedeutung versehen. Ein klassisches Beispiel ist das Wort „Maus“, welches seit dem Zeitalter der PCs nicht mehr nur ein Nagetier bezeichnet. Weiterhin spielt die Computermodellbildung eine wichtige methodische Rolle in der Genetik bis hin zum Entstehen neuer Disziplinen wie der Bioinformatik, in welcher der Umgang mit Sequenzierungsdaten im Mittelpunkt steht. Es macht sachlich an einigen Stellen durchaus Sinn, wenn biologische Begriffe aus der Informatik entlehnt werden.

Generell sind viele Metaphern der synthetischen Biologie und Genetik auch aus historischen Gründen den Computerwissenschaften einschließlich der KI-Forschung entnommen (Achatz 2014, S. 83-95; Falkner 2016, S. 258-260; Mainzer 2011, S. 19-24). Beispiele sind Phrasen wie „Entschlüsselung des genetischen Codes“, „genetisches Programm“ oder die bereits erwähnte *genetic firewall*. Auch „lebende Maschinen“ gehört hierzu. Daniel Falkner spitzt die Rolle

von Metaphern in der synthetischen Biologie auf drei Funktionen bzw. Perspektiven zu:

1. An *innovative function* and the epistemic normativity of metaphors as the condition and driving forces of scientific inquiry, paradigm shifts, technological progress and political/social/ethical discourses
2. A reflexive *critical function* of metaphors to introduce a new description language, open up new perspectives, and thereby correct and replace old, established concepts on the level of theory building and philosophical discourses on truth [...]
3. An *argumentative function* of metaphors as truth-apt statements in the social praxis of reasoning, involving a specific rationality and “logic of plausibility” and bearing the potential of innovation and progress as well as ideological disturbance. (Falkner 2016, S. 258; siehe auch S. 263; [Hervorhebung im Original.])

Metaphern können in Gebrauchsanleitungen als sprachliche Mittel auf allen drei Ebenen dienen. Jedoch ist mit Einsatz von Metaphern auch immer die Gefahr der Ideologisierung und unsachlichen Behandlung eines Themas verbunden. Johannes Achatz kritisiert zum Beispiel eine „ideological disturbance“ (= Funktion drei bei Falkner), ausgelöst durch Craig Venters Proklamation eines neuen Zeitalters der „digitalen Biologie“ mit synthetischen Mitteln:

Doch Venters ‚Beweis, dass DNA die Software des Lebens‘ ist, kann damit noch nicht als Begründung eines neuen Zeitalters gelten, sondern vielmehr als weiterer Beleg dafür, „daß wir alle nur zu sehr aus Welt einen Computer gemacht haben“, wie Weizenbaum 1978 schrieb. Anstatt *mittels* Computertechnologie die Welt zu erklären, wird im Framing der ‚digitalen Biologie‘ die Computertechnologie *zur Welt* erklärt. Mit diesem rhetorischen Trick sind wir faktisch ebenso wenig in einem ‚Zeitalter digitaler Biologie‘ wie in einem „Zeitalter künstlicher Intelligenz“ angelangt. (Achatz 2014, S. 100 [Hervorhebungen im Original.])

So besteht auch die Gefahr, dass computergestützte Gebrauchsanleitungen – etwa in Form einer Smartphone-App – dem Nutzer eine nicht angemessene Erwartungshaltung an das Produkt vermitteln. Diese Gefahr mag für alle Gebrauchsanleitungen in digitaler Form gelten, besonders immer dann, wenn der Nutzer längst schon User geworden ist – also das Smartphone selbstverständlich für die Welt hält. Im Fall der synthetischen Biologie ist aufgrund der vielen maschinen- und informationstechnischen Metaphern das Potential irreführenden Scheinverstehens besonders hoch. Zu verlockend scheint der Kurzschluss, biologisches Leben wie *social media life* behandeln zu können.

Lebende Maschinen und natürliche Kuchenrezepte – Ordnung muss sein

Wissenschaftliche Konzepte können durch den Gebrauch von Metaphern verschleiert werden. „Dies gilt besonders für den unreflektierten Einsatz genetischer Metaphern an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit.“

(Schmidt, K. 2016, S. 65) Besonders problematisch ist die „notwendige Diskrepanz zwischen der sprachlichen Ebene der metaphorischen Beschreibung und der ontologischen Ebene der biologischen Phänomene [...] [bei der] Rede vom genetischen Rezept oder Programm“ (ebd.). Das Konzept des genetischen Programms und seiner metaphorischen Sprachformen stellt einen Mittelweg zwischen Präformationismus und Epigenese dar. Demnach sind alle Instruktionen zur Individualentwicklung als zielgerichteter Ablauf in der DNA gespeichert. François Jacob und Jacques Monod verbinden 1961 die Metapher des „genetischen Programms“ mit anderen wie „Blaupause“ oder „Bauplan“ (Ebd., S. 57f.). Hinzu tritt die Rezeptmetapher. Sie dient in manchen populärwissenschaftlichen Darstellungen zur Illustrierung der Embryonalentwicklung. Im Gegensatz zu einem Bauplan wird die Ontogenese als Verfahren bzw. Prozess dargestellt, und wie beim Kuchenbacken muss implizit die Existenz eines ausführenden Bäckers unterstellt werden.

[..] für die biophilosophische Diskussion ist vor allem wichtig, dass die Idee eines genetischen Rezepts oder Programms, das die Entwicklung steuert, im Allgemeinen zumindest als eine überzeugende *Metapher* zur anschaulichen Darstellung der komplexen Individualentwicklung angesehen wird, d. h. als ein sprachliches Bild, das den *grundsätzlichen* Ablauf eines biologischen Entwicklungsprozesses (bei allen Ungenauigkeiten im Detail) plausibel und anschaulich verdeutlicht. (Ebd., S. 61 [Hervorhebungen im Original.])

Metaphern dieser Art mögen der Wissenspopularisierung dienen, sind jedoch in der Fachdiskussion umstritten (Condit 2001, Dawkins 2008, S. 581f., Schmidt, K. 2016, S. 60f.). Mit dem neuen Genkonzept stoßen die Programmmetapher und der damit verbundene Genzentrismus an Grenzen. Wird die Kontextabhängigkeit von Proteinsynthese, Genexpression, Individualentwicklung und des genetischen Codes berücksichtigt,

wird deutlich, warum die Entwicklung eines Lebewesens durch ein in den Genen eindeutig festgeschriebenes Rezept oder Programm vielleicht metaphorisch umschrieben, aber nicht einmal annähernd wissenschaftlich erklärt werden kann. (Schmidt, K. 2016, S. 68; siehe auch S. 53; S. 63; S. 76)

Wenn, dann liegt das Entwicklungsprogramm im ganzen Organismus; Gene sind bestenfalls ein Teil des „Datensatzes“ (Ebd., S. 77; Keller 2006). In einer Gebrauchsanleitung müsste vermutlich aber mit genau solchen strittigen sprachlichen Wendungen operiert werden. Etwas Komplexes müssen auch unerfahrene Nutzer mit wenig Vorwissen einfach begreifen können. Die inhaltliche und sprachliche bzw. bildliche Reduktion von Komplexität stellt besondere Herausforderungen, insbesondere hinsichtlich der Verantwortungszuschreibung. Welches Wissen dürfen wir mit unscharfen Metaphern aus welchen Gründen vernebeln? Wer ist verantwortlich für resultierende Fehler und Unfälle?

An diesem Punkt wird eine ethische Abwägung auf Grund fehlenden eindeutigen empirischen Wissens schwierig. Wie bereits erwähnt, könnten der orthogonale Ansatz und die *genetic firewall* der Xenobiologie als Sicherheits-

mechanismen dienen. Wer sich mit IT-Sicherheit beschäftigt, wird jedoch beim Klang des Wortes „firewall“ nicht gleich Freudensprünge machen. XNA und DNA können, das ist die Annahme, biochemisch nicht (so einfach) miteinander interagieren – so die Erklärung der genetischen Firewall in der synthetischen Biologie. In der allgemeinen Genetik ist aber der im 20. Jahrhundert dominante Genozentrismus, auf dem diese Annahme beruht, wie wir gerade gesehen haben, in die Kritik geraten: „Vor allem ist die Zuordnung der DNA-Struktur zu einer spezifischen Aminosäuresequenz viel variabler als nach der ‚Entzifferung‘ des genetischen Codes ursprünglich angenommen wurde.“ (Schmidt, K. 2016, S. 59, Anm. 11; S. 66-75) Einflussreich ist die These von Susan Oyama, wonach sich anstelle der Organismen an sich Organismus-Umwelt-Systeme entwickeln. In der Developmental Systems Theory (DST) gibt es keine Dichotomie zwischen Organismus und Umwelt; alle biologischen Phänomene unterliegen einem starken Prozesscharakter.

Information (zur Herstellung eines Proteins und erst recht für einen komplexen Phänotyp) entsteht erst im aktuellen Prozess in der Zelle: Es gibt eine Ontogenese, eine Individualentwicklung der Information, wie es eine Ontogenese des Organismus gibt. (Ebd., S. 78; Oyama 2000)

Wenn das stimmt, dann könnte die Firewall aufgrund ihrer internen Dynamik eventuell immer mal wieder Lücken aufweisen. Das zu klären, ist jedoch Aufgabe der empirischen Forschung.

Die biochemische Firewall wäre zumindest in der Theorie dann funktional, wenn ein Prozess zwischen Organismus und Umwelt linear abliefe. Mit anderen Worten: „Künstliche“ oder synthetische Zellen wären tatsächlich kein Leben mehr, so wie es Zellen mit DNA als Organismus-Umwelt-Systeme mit entsprechendem evolutionärem Prozesscharakter sind.

With this organismic and individualistic approach, the sequence of organisms in time and the possibility of evolution is rather neglected, or, for reasons of safety and sustainable use, even intentionally suppressed. Life in synthetic biology is the reproducible set of functions and activities resulting from the composition of individual organisms that ideally remains the same across generations. (Toepfer 2016, S. 84)

Vielleicht stünde die Genetik dann vor der Herausforderung, zwei Begriffe des Lebens zu entwickeln. Einer dieser beiden – der der „lebenden Maschinen“ – unterliegt vorhersehbarer strikter Funktionalität und wäre in einer Gebrauchsanleitung eindeutig beschreibbar. Anleitungen wären dann in den Worten und Metaphern funktionaler technischer Verfahren formuliert – was wohl für so ziemlich jede Gebrauchsanleitung gilt. Verbunden damit bliebe ein klassisches sprachkritisches Argument, wonach die Funktionalisierung der Sprechweise und Metaphern einen Reduktionismus bedingt, durch welchen die sprechende Person mehr über ihr Verhältnis zur Welt ausdrückt, als über die Welt an sich (Janich 2006; Kambartel 1989; Rentsch 1999). „Lebende Maschinen“ und „künstliche“ Zellen sind nicht Leben per se, sondern eine sprachlich – auch in Gebrauchsanleitungen – eng geschnittene Ausnahme all dessen, was wir Leben nennen. Die Darstellung dieses sprachlichen Ausschnittes erfolgt in Gebrauchsanleitungen

dann aber tatsächlich in Form eines Kuchenrezeptes. Nicht weil sich DNA oder XNA wie ein solches verhielten, sondern weil es um den Bäcker, also den Nutzer, geht. Epistemisch – nicht ontologisch – behält die Rezeptmetapher am Ende doch Recht, denn sie verkörpert ein methodologisches Prinzip, das in der Wissenschafts- und Technikphilosophie als „methodische Ordnung“ bezeichnet wird. Eine Anleitung stellt demnach regelmäßig zum Erfolg führende Schrittfolgen dar. Wesentlich ist

die Reihenfolge von Teilhandlungen in Handlungsketten, die nur bei Strafe des Mißerfolgs verletzt werden darf. [...] Niemand würde eine Gebrauchsanleitung, eine Bauanleitung oder ein Kochrezept akzeptieren, die durch Vorschreiben falscher Schrittfolgen regelmäßig zum Mißerfolg führen. (Janich 2006, S. 27 et passim)

Wird Evolution in „lebenden Maschinen“ unterdrückt und werden planbare funktionale Verfahren angestrebt, dann folgen diese auch einer methodischen Ordnung – nicht weil die Natur die DNA in Rezeptform hervorbrachte, sondern weil wir Menschen sie mit Mitteln der synthetischen Biologie dazu gestalten. Der zweckorientierte Umgang mit den Produkten lässt sich wieder dem Prinzip der methodischen Ordnung folgend anleiten – was aber nicht bedeuten kann, dass „lebende Maschinen“ einhundert prozentige Sicherheit erreichen. Das gibt es bei keiner Technik, so wie auch keine Technik normativ neutral ist. Im Übrigen treffen sich hier auch wieder Computerwissenschaften und Biologie: Vielleicht wird die Metapher der Firewall in beiden Bereichen zum Symbol eines falschen Gefühls absoluter Sicherheit. Keine Technik ist zu einhundert Prozent sicher. Das gilt auch für die synthetische Biologie. Dementsprechend lassen sich Gebrauchsanleitungen als eine Art Risikoregulierung für Handlungen unter Unsicherheit interpretieren – nicht jedoch als epistemische Firewall zwischen Ingenieur und Anwender.

Schluss

In vorliegendem Beitrag wurde unter der Frage nach den Eigenschaften und Besonderheiten einer Gebrauchsanleitung für „lebende Maschinen“ ein Streifzug durch interdisziplinäre Debatten der synthetischen Biologie unternommen. Der Fokus lag im Besonderen auf philosophischer Epistemologie und Ethik. Es wurde gefragt, wie Wissen zwischen Ingenieuren und Nutzern geteilt wird und was das normativ bedeuten kann. In sechs Exkursen fanden hierzu verschiedene Betrachtungen statt, angefangen bei der Suche nach einer Definition von synthetischer Biologie bis hin zu einer sprachkritischen Auseinandersetzung mit metaphorischer Rede. Dem Anspruch der Vollständigkeit konnte und wollte dieser Aufsatz nicht genügen. Es ließen sich noch mehr Informationen über potentielle Gebrauchsanleitungen zusammentragen, natürlich auch aus politikwissenschaftlicher, ökonomischer, juristischer oder soziologischer Perspektive – unter Berücksichtigung empirischer Studien. Auch bleibt manches Spekulation in Anbetracht der Tatsache, dass marktreife synthetische Organismen aktuell noch

nicht vorliegen. Mit Blick auf Folgewissen, Sicherheitsfragen und Risikoaspekte ist eine möglichst frühe Auseinandersetzung mit Gebrauchsanleitungen für „lebende Maschinen“ jedoch durchaus geboten – auch wenn diese noch nicht der Weisheit letzter Schluss sein mag. Wenn „lebende Maschinen“ unsere Vorstellungen von Maschinen erweitern, gilt das dann auch für Gebrauchsanleitungen?

Es zeigte sich, dass 1. Gebrauchsanleitungen für einen „künstlichen“ Organismus Ingenieurwissen popularisieren, das zwar auch handwerkliche Aspekte enthält, jedoch nicht mit Züchtungswissen zu verwechseln ist; 2. die Oberflächenstruktur der Anleitung sich wohl eher nach den Anwendungsweisen des Produktes richtet als nach den möglichen Klassifikationen verschiedener „künstlicher“ Lebensformen oder Ebenen der synthetischen Biologie, für die ein komplexeres Tiefenwissen nötig ist – den Nutzer interessiert vor allem, was er damit machen kann; 3. Wissen allgemein popularisiert wird, um für viele Nutzer in vielen Situationen Anwendungskompetenzen zu liefern (Unterschiede zwischen dem Wissen von Entwicklern und Anwendern lassen sich nicht auf Theorie und Sprache allein reduzieren); 4. Gebrauchsanleitungen nicht neutral sind, sondern normativer Bestandteil der öffentlichen Debatte und des verantwortungsvollen Umgangs; 5. Übersetzungsleistungen mit Worten und Bildern ein konkretes Verständnis vermitteln sollen, wobei Metaphern vor allem aus den Computerwissenschaften eine wichtige Rolle spielen (die jedoch auch die Gefahr der Ideologisierung und Irreführung bergen); 6. Anleitungen dem Prinzip der methodischen Ordnung folgen – sie stellen Schrittfolgen gelingender Handlungsketten dar, die sprachlich verfasst sein müssen und dem entsprechend mit potentiell unscharfen Metaphern operieren. Die Metapher der *genetic firewall* könnte zum Beispiel ein unscharfes und irreführendes Verständnis biotechnologischer Sicherheit bedingen.

Eine der wichtigsten Einsichten lautet, dass Gebrauchsanleitungen nicht neutral sind, sondern selbst Teil der öffentlichen Diskussion, dass sie Werten folgen und oft sprachlich oder mit Bildern Ideologien vermitteln. Hinsichtlich der Kommunikation von Folgewissen für potentiell riskante Handlungen und im Kontext des *dual use* kommt ihnen in der Verantwortungsanalyse ein besonderer Stellenwert zu. Eine gute Anleitung gehört quasi zum Verantwortungsbereich eines seriösen Herstellers – gerade wenn aus dem alltäglichen Umgang mit dem Produkt noch geringe Erfahrungswerte vorliegen. Auf der anderen Seite können Forscher und Produzenten nicht alle möglichen Formen der Zweckentfremdung vorhersehen. Nicht nur hinsichtlich der Umnutzung gilt: Keine Technik ist zu einhundert Prozent sicher. Das trifft auch auf die synthetische Biologie zu. Dementsprechend lassen sich Gebrauchsanleitungen verstehen als eine Form der Risikoregulierung für Handlungen unter Unsicherheit. Perfekte, unfehlbare Eindeutigkeit ist nicht realistisch. Auch Techniknutzer haben entsprechend ihres Wissensstandes Verantwortung zu übernehmen. Davon kann keine noch so pedantisch ausgearbeitete Gebrauchsanleitung befreien.

Vermutlich werden mediale Entwicklungen und Kommunikationsgewohnheiten unser Verständnis von Gebrauchsanleitungen stärker prägen als „lebende Maschinen“. Sollte jedoch in „lebenden Maschinen“ Evolution nicht un-

terdrückt werden und sich diese funktional unvorhersehbar entwickeln (wie auch immer das in einer legalen und moralisch sinnvollen Anwendung aussehen könnte), dann müssten Gebrauchsanweisungen tatsächlich noch fundamentaler überdacht werden. Wie lässt sich eine methodische Ordnung im Umgang mit einem technischen Objekt vermitteln, das sich selbst organisch funktional verändert? Die Gebrauchsanleitung müsste vielleicht in Form einer komplexen App „mitwachsen“. Eventuell müsste überprüft werden, ob und in welchem Maße Roboter als Gebrauchsanleitung in Form eines informationstechnischen Lehrkörpers zweckdienlich und moralisch legitim eingesetzt werden. Die Grenzen zur Science Fiction sind fließend.

Aus rationaler Perspektive ist ein sprachkritischer Zugang, der Bildinterpretation einschließt, mit oder ohne Gebrauchsanleitungs-Roboter erforderlich. Denn die vielen Maschinen- und Computer-Metaphern in der Rede von synthetischer Biologie eröffnen nicht nur neue Perspektiven, sondern werfen ebenfalls Gefahren der Ideologisierung, sowie der Irrwege und Missverständnisse auf. Eine der Hauptgefahren könnte darin bestehen, dass nicht nur Computer zur Welt erklärt werden, sondern durch die KI-Metaphern der synthetischen Biologie begünstigt außerdem noch das Leben per se auf berechenbare Funktionalität reduziert und normativ stigmatisiert wird. Schlecht gestaltete Gebrauchsanleitungen oder ein zu naiver Glaube an die Fähigkeiten künstlicher Intelligenz könnten ihren verheerenden Beitrag dazu leisten. Ein Blick auf die Grenzen der Programmmetapher in der Genetik zeigt, dass wir selbst mit Computern und synthetischen Einzellern noch sehr weit davon entfernt sind, die Prozesse organischen Lebens umfänglich zu verstehen... von sozialem oder kulturellem Leben ganz zu schweigen.

Literatur

Abel, Günter 2012: „Knowledge Research: Extending and Revising Epistemology“, in: Ders. & James Conant (Hg.) 2012: *Rethinking Epistemology*. Berlin Studies in Knowledge Research, Bd. 1. Berlin & Boston, S. 1–52.

Acevedo-Rocha, Carlos G. 2016: „The Synthetic Nature of Biology“, in: Hagen, Kristin, Margret Engelhard & Georg Toepfer (Hg.) 2016: *Ambivalences of Creating Life. Societal and Philosophical Dimensions of Synthetic Biology*. Ethics and Technology Assessment, Volume 45. Springer, S. 9-53.

Achatz, Johannes 2014: „Framing ‚Nature‘ – Synthetische Biologie schreibt (ihre) Geschichte“, in: Ders. & Nikolaus Knoepffler (Hg.) 2014: *Lebensformen – Leben Formen. Ethik und Synthetische Biologie*. Würzburg, S. 83-100.

Achatz, Johannes & Nikolaus Knoepffler 2014: „Einleitung“, in: Dies. (Hg.) 2014: *Lebensformen – Leben Formen. Ethik und Synthetische Biologie*. Würzburg, S. 7-11.

Bölker, Michael et al. 2016: „Synthetic Biology. Diverse Layers of Life“, in: Engelhard, Margret (Hg.) 2016: *Synthetic Biology Analysed. Tools for Discussion and Evaluation*. Ethics and Technology Assessment, Volume 44. Springer, S. 27-50.

Condit, C. M. & Condit, D. M. 2001: „Blueprints and Recipes. Gendered Metaphors for Genetic Medicine“, in: *Journal of Medical Humanities* 22. Issue 1, S. 29-39.

Dawkins, Richard 2008: *Geschichten vom Ursprung des Lebens*. Berlin.

Eichinger, Tobias 2016: „Debasement of Life? A Critical Review of Some Conceptual and Ethical Objections to Synthetic Biology“, in: Hagen, Kristin, Margret Engelhard & Georg Toepfer (Hg.) 2016: *Ambivalences of Creating Life. Societal and Philosophical Dimensions of Synthetic Biology*. Ethics and Technology Assessment, Volume 45. Springer, S. 267-274.

Engelhard, Margret et al. 2016a: „The New Worlds of Synthetic Biology-Synopsis“, in: Engelhard, Margret (Hg.) 2016: *Synthetic Biology Analysed. Tools for Discussion and Evaluation*. Ethics and Technology Assessment, Volume 44. Springer, S. 1-25.

Engelhard, Margret et al. 2016b: „Old and new Risks in Synthetic Biology. Topics and Tools for Discussion“, in: Engelhard, Margret (Hg.) 2016: *Synthetic Biology Analysed. Tools for Discussion and Evaluation*. Ethics and Technology Assessment, Volume 44. Springer, S. 51-69.

EU-Kommission 2014: *Opinion on Synthetic Biology I. Definition*. SCHER, SCENIHR, SCCS: 23.-25. September 2014. (doi: 10.2772/76553) Online: https://ec.europa.eu/health/sites/health/files/scientific_committees/emerging/docs/scenih_r_o_044.pdf (letzter Zugriff am 14.3.2017).

Falkner, Daniel 2016: „Metaphors of Life. Reflections on Metaphors in the Debate on Synthetic Biology“, in: Hagen, Kristin, Margret Engelhard & Georg Toepfer (Hg.) 2016: *Ambivalences of Creating Life. Societal and Philosophical Dimensions of Synthetic Biology*. Ethics and Technology Assessment, Volume 45. Springer S. 251-265.

Funk, Michael 2016: „Synthetic Biology between Engineering and Natural Science. A Hermeneutic Methodology of Laboratory Research Practice“, in: Hagen, Kristin, Margret Engelhard & Georg Toepfer (Hg.) 2016: *Ambivalences of Creating Life. Societal and Philosophical Dimensions of Synthetic Biology*. Ethics of Science and Technology Assessment, Volume 45. Berlin & Heidelberg, S. 313-323. (doi: 10.1007/978-3-319-21088-9).

Grunwald, Armin 2011: „Synthetische Biologie. Gesellschaftliche Verantwortung der Wissenschaft“, in: Pühler, Alfred, Bernd Müller-Röber & Marc-Denis Weitzel (Hg.) 2011: *Synthetische Biologie. Die Geburt einer neuen Technikwissenschaft*. Berlin & Heidelberg, S. 103-109.

Grunwald, Armin 2012: *Technikzukünfte als Medium von Zukunftsdebatten und Technikgestaltung*. Karlsruher Studien Technik und Kultur, Bd. 6. Karlsruhe.

Grunwald, Armin 2014: „Synthetische Biologie. Technikzukünfte im Kontext von 'Responsible Research and Innovation' (RRI)“, in: Achatz, Johannes & Nikolaus Knoepffler (Hg.) 2014: *Lebensformen – Leben Formen. Ethik und Synthetische Biologie*. Würzburg, S. 37-53.

Hagen, Kristin et al. 2016: „Editorial. Ambivalences in Societal and Philosophical Dimensions of Synthetic Biology“, in: Hagen, Kristin, Margret Engelhard & Georg Toepfer (Hg.) 2016: *Ambivalences of Creating Life. Societal and Philosophical Dimensions of Synthetic Biology*. Ethics and Technology Assessment, Volume 45. Springer, S. 1-8.

Ihde, Don 1990: *Technology and the Lifeworld. From Garden to Earth*. Bloomington.

Ihde, Don 1998: *Expanding Hermeneutics. Visualism in Science*. Evanston.

Illies, Christian 2016: „New Debates in Old Ethical Skins“, in: Engelhard, Margret (Hg.) 2016: *Synthetic Biology Analysed. Tools for Discussion and Evaluation*. Ethics and Technology Assessment, Volume 44. Springer, S. 89-125.

Irrgang, Bernhard 1996: „Von der Technologiefolgenabschätzung zur Technologiegestaltung. Plädoyer für eine Technikhermeneutik“, in: *Jahrbuch für christliche Sozialwissenschaften* 37, S. 51–66.

Irrgang, Bernhard 2003: *Von der Mendelgenetik zur synthetischen Biologie. Epistemologie der Laboratoriumspraxis Biotechnologie*. Dresden.

Irrgang, Bernhard 2004a: „Konzepte impliziten Wissens und die Technikwissenschaften“, in: Banse, Gerhard & Günter Ropohl (Hg.) 2004: *Wissenskonzepte für*

die Ingenieurpraxis. *Technikwissenschaften zwischen Erkennen und Gestalten*. VDI-Report 35. Düsseldorf, S. 99-112.

Irrgang, Bernhard 2004b: „Epistemologie der Bio- und Gentechnologie“, in: Kornwachs, Klaus (Hg.) 2004: *Technik – System – Verantwortung*. Münster, S. 285–297.

Janich, Peter 2006: *Kultur und Methode. Philosophie in einer wissenschaftlich geprägten Welt*. Frankfurt a. M.

Junker, Thomas 2004: *Geschichte der Biologie. Die Wissenschaft vom Leben*. München.

Kambartel, Friedrich 1989: *Philosophie der humanen Welt. Abhandlungen*. Frankfurt a. M.

Keller, Evelyn Fox 2003: *Making Sense of Life. Explaining Biological Development with Models, Metaphors, and Machines*. Cambridge.

Keller, Evelyn Fox 2006: „Beyond the Gene but Beneath the Skin“, in: Neumann-Held, Eva M. & Christoph Rehmann-Sutter (Hg.) 2006: *Genes in Development. Re-Reading the Molecular Paradigm*. Durham, S. 290-312.

Knippers, Rolf 2012: *Eine kurze Geschichte der Genetik*. Berlin & Heidelberg.

Kornwachs, Klaus 2012: *Strukturen technologischen Wissens. Analytische Studien zu einer Wissenschaftstheorie der Technik*. Berlin.

Marlière, Philippe 2009: „The farther, the safer. A manifesto for securely navigating synthetic species away from the old living world“, in: *Syst Synth Biol*. 2009 Dec. 3(1-4), S. 77-84. (doi: 10.1007/s11693-009-9040-9).

Mainzer, Klaus 2011: „Eine Wissenschaft vom Künstlichen und Komplexen. Synthetische Biologie als Technikwissenschaft des 21. Jahrhunderts“, in: Pühler, Alfred, Bernd Müller-Röber & Marc-Denis Weitze (Hg.) 2011: *Synthetische Biologie. Die Geburt einer neuen Technikwissenschaft*. Berlin & Heidelberg, S. 111-127.

Matern, Harald, Jens Ried, Matthias Braun & Peter Dabrock 2016: “Living Machines. On the Genesis and Systematic Implications of a Leading Metaphor of Synthetic Biology”, in: Boldt, Joachim (Hg.) 2016: *Synthetic Biology. Metaphors, Worldviews, Ethics and Law*. Wiesbaden, S. 47-60.

Müller, Martin 2016: „‘First Species Whose Parent Is a Computer’ – Synthetic Biology as Technoscience, Colonizing Futures, and the Problem of the Digital“, in: Hagen, Kristin, Margret Engelhard & Georg Toepfer (Hg.) 2016: *Ambivalences of Creating Life. Societal and Philosophical Dimensions of Synthetic Biology*. Ethics and Technology Assessment, Volume 45. Springer S. 101-113.

Nordmann, Alfred 2005: „Was ist TechnoWissenschaft? – Zum Wandel der Wissenschaftskultur am Beispiel von Nanoforschung und Bionik“, in: Rossmann, Torsten & Cameron Tropea (Hg.) 2005: *Bionik. Aktuelle Forschungsergebnisse*

in *Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaft*. Berlin, Heidelberg & New York, S. 209-218.

Nordmann, Alfred 2011: „Was wissen die Technowissenschaften?“ in: Gethmann, Carl Friedrich (Hg.) 2011: *Lebenswelt und Wissenschaft*. XXI. Deutscher Kongress für Philosophie. 15.-19. September 2008 an der Universität Duisburg-Essen. Kolloquiumsbeiträge. Hamburg, S. 566-579.

Nordmann, Alfred 2014: „Synthetic Biology at the Limits of Science“, in: Bernd Giese, Christian Pade, Henning Wigger, Arnim von Gleich (Hg.) 2014: *Synthetic Biology. Character and Impact*. Berlin: Springer, S. 31-58. (Seitenangaben entsprechend der Online-Version http://www.philosophie.tu-darmstadt.de/media/institut_fuer_philosophie/diesunddas/nordmann/PhilosophyofSyntheticBiology.pdf, letzter Zugriff am 11.4.2017).

Oyama, Susan 2000: *The Ontogeny of Information. Developmental Systems and Evolution*. Durham.

Polanyi, Michael 2009: *The Tacit Dimension*. With a New Foreword by Amartya Sen, Chicago & London.

Pühler, Alfred 2011: „Einblicke in die synthetische Biologie“, in: Ders., Bernd Müller-Röber & Marc-Denis Weitze (Hg.) 2011: *Synthetische Biologie. Die Geburt einer neuen Technikwissenschaft*. Berlin & Heidelberg, S. 11-17.

Rentsch, Thomas 1999: *Die Konstitution der Moralität. Transzendente Anthropologie und praktische Philosophie*. Frankfurt a. M.

Schmidt, Kirsten 2016: „Vom genetischen Programm zum Entwicklungssystem. Warum das Genom kein Kuchenrezept ist“, in: Heinemann, Gottfried & Rainer Timme (Hg.) 2016: *Aristoteles und die heutige Biologie. Vergleichende Studien. Lebenswissenschaften im Dialog*, Bd. 17. Freiburg & München, S. 53-79.

Schmidt, Markus 2010: „Xenobiology. A new form of life as the ultimate biosafety tool“, in: *Bioessays* 2010 Apr 32(4), S. 322–331. (doi: 10.1002/bies.200900147).

Schmidt, Markus 2011: „Biosicherheit und synthetischer Biologie“, in: Pühler, Alfred, Bernd Müller-Röber & Marc-Denis Weitze (Hg.) 2011: *Synthetische Biologie. Die Geburt einer neuen Technikwissenschaft*. Berlin & Heidelberg, S. 111-127.

Schmidt, Markus & Víctor de Lorenzo 2012: „Synthetic constructs in/for the environment. Managing the interplay between natural and engineered biology“, in: *FEBS Lett.* 2012 Jul 16. 586(15), S. 2199–2206. (doi: 10.1016/j.febslet.2012.02.022).

Simmel, Friedrich 2011: „Synthetische Biologie mit künstlichen Nukleinsäurestrukturen“, in: Pühler, Alfred, Bernd Müller-Röber & Marc-Denis Weitze (Hg.) 2011: *Synthetische Biologie. Die Geburt einer neuen Technikwissenschaft*. Berlin & Heidelberg, S. 53-59.

Steizinger, Johannes 2016: „Engineers of Life? A Critical Examination of the Concept of Life in the Debate on Synthetic Biology“, in: Hagen, Kristin, Margret Engelhard & Georg Toepfer (Hg.) 2016: *Ambivalences of Creating Life. Societal and Philosophical Dimensions of Synthetic Biology*. Ethics and Technology Assessment, Volume 45. Springer S. 275-292.

Toepfer, Georg 2016: “The Concept of Life in Synthetic Biology”, in: Engelhard, Margret (Hg.) 2016: *Synthetic Biology Analysed. Tools for Discussion and Evaluation*. Ethics and Technology Assessment, Volume 44. Springer, S. 71-88.