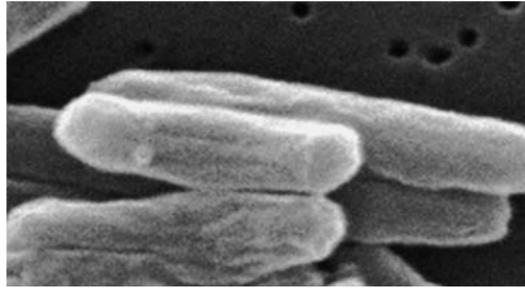


Joachim Boldt
Oliver Müller
Giovanni Maio

Synthetische Biologie
Eine ethisch-philosophische
Analyse



Angaben zu den Autoren

Dr. Joachim Boldt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Ethik und Geschichte der Medizin der Universität Freiburg i.Br. Er arbeitet im Rahmen des Exzellenzclusters «Biological Signaling Studies» zu ethischen Fragen der Synthetischen Biologie. Weitere Arbeitsfelder sind die klinische Ethik und Grundfragen philosophischer Ethik.

Dr. Oliver Müller ist Leiter der Nachwuchsgruppe «Zur Natur des Menschen als Orientierungsnorm in der Bioethik» am Institut für Ethik und Geschichte der Medizin an der Universität Freiburg i.Br. Er arbeitet zu Fragen der philosophischen Ethik, der philosophischen Anthropologie, der Technik- und Kulturphilosophie.

Prof. Dr. Giovanni Maio ist Direktor des Instituts für Ethik und Geschichte der Medizin und geschäftsführender Direktor des Interdisziplinären Ethikzentrums der Universität Freiburg i.Br.

Herausgeber: Eidgenössische Ethikkommission für die Biotechnologie
im Ausserhumanbereich EKAH und Ariane Willemsen, Bern

©EKAH

Gestaltung: Atelier Bundi, Boll

Verlag: Bundesamt für Bauten und Logistik BBL, Bern, 2009

Titelfoto: CDC/Dr. Ray Butler, Janice Carr

Vertrieb: BBL, Verkauf Bundespublikationen, CH-3003 Bern

www.bundespublikationen.admin.ch, Artikelnummer 810.006.d

ISBN: 978-3-905782-04-2

Inhalt

Vorwort	7
1. Einleitung	9
Teil I: Synthetische Biologie im Überblick	12
2. Entwicklung der Synthetischen Biologie	12
3. Was ist Synthetische Biologie?	18
3.1 Definitionsansatz	18
3.2 Charakteristische Forschungsansätze	21
4. Anwendungsfelder	26
4.1 Medizinisch-therapeutische Zwecke	27
4.2 Anwendungen im Bereich Umwelt und Umweltschutz	30
4.3 Biosensoren und Bioschalter	32
5. Was ist neu an der Synthetischen Biologie?	34
Teil II: Ethische Herausforderungen	40
6. Ontologische und anthropologische Implikationen	42
6.1 Leben definieren	46
6.2 Neues Leben oder neue Lebensformen?	51
6.3 Konstitution einer neuen Gegenstandswelt?	55
6.4 Das menschliche Selbstverständnis und die Synthetische Biologie	61
7. Abschätzung von Risiken und Missbrauchsgefahren	65
7.1 Biosecurity: Bewusster Missbrauch der neuen Techniken	66
7.2 Biosafety: Risiken unkontrollierter Verbreitung	73
8. Schlussbetrachtung	80

9. Literatur	83
10. Kommentiertes Quellenverzeichnis	91
10.1 Fachaufsätze und Kapitel aus Monographien	91
10.2 Stellungnahmen und Gutachten	100
10.3 Konferenzen	103
10.4 Berichte in internationalen Zeitungen und Magazinen	104
10.5 Internetquellen	107

Vorwort

Die ethischen Implikationen der Synthetischen Biologie zu erfassen ist nur möglich, wenn philosophisches Denken mit biologisch-medizinischer Sachkenntnis verbunden wird. Dass diese Verbindung überhaupt möglich wurde, liegt an dem wesentlichen Beitrag, den verschiedene Menschen zu der vorliegenden Publikation mit geleistet haben. Allen voran ist den KollegInnen aus der Biologie, Katja Arndt und Kristian Müller, herzlich dafür zu danken, dass sie bei gemeinsamen Treffen zentrale Punkte der Thematik mit uns diskutiert haben. Ihr naturwissenschaftlicher Sachverstand, ihr Einblick in EU-Projekte und ihre Hinweise auf frühe Erwähnungen des Begriffs «Synthetische Biologie» bei Leduc, Loeb und Szybalski haben uns viele wertvolle Perspektiven und Facetten des Themas eröffnet. Diese intensive Auseinandersetzung hat darüber hinaus auch zur gemeinsamen Publikation eines Artikels im Jahrbuch für Wissenschaft und Ethik 2008 geführt.

Zu danken ist ferner allen Vertretern des Freiburger Exzellenzclusters BIOSS (Center for Biological Signalling Studies), an dem das Freiburger Ethik-Zentrum mit einem eigenen Subcluster beteiligt ist. Diese große Infrastruktur mit den verschiedenen Ansprechpartnern und inhaltlichen Austauschmöglichkeiten hat die Behandlung des Themas deutlich gefördert.

An der Umsetzung des Werkes haben darüber hinaus Leander Bindewald und Bernd Friedrich wesentlich mitgewirkt, indem sie mit großer Akribie die entsprechende Literatur recherchiert und zusammengeführt haben. Für ihr besonderes Engagement auch in der redaktionellen Betreuung gebührt ihnen ein großer Dank.

Schließlich ist der Eidgenössischen Ethikkommission für die Biotechnologie im Ausserhumanbereich EKAH aufrichtig für das große Vertrauen zu danken, das sie uns mit der Beauftragung dieses Gutachtens entgegengebracht hat. Wir haben den Auftrag als eine hohe Verpflichtung angesehen und hoffen, dass das vor-

liegende Resultat der weiteren Beschäftigung mit dieser für die Zukunft wichtigen Thematik dienlich sein wird.

Freiburg i.Br., im September 2008

Joachim Boldt
Oliver Müller
Giovanni Maio

1. Einleitung

Die Synthetische Biologie verspricht, unsere Alltagswelt auf ähnliche Weise zu verändern, wie es die synthetische Chemie ein Jahrhundert zuvor getan hat. So selbstverständlich, wie heute Produkte der chemischen Industrie – auf häufig gar nicht mehr bewusst wahrgenommene Weise – unser Leben in allen Bereichen prägen, so selbstverständlich könnten in wenigen Jahrzehnten Produkte der Synthetischen Biologie Bestandteil unseres Alltags sein. Die Biologie, die Wissenschaft vom Leben, schickt sich an, ähnlich wie die Chemie zuvor, technisch umsetzbares Wissen zu generieren.¹ Der Anwendungshorizont ist weit: Die Spekulationen reichen von Mikroben, die pathogene Veränderungen im menschlichen Körper aufspüren und stoppen bis hin zu Bakterien, die Schadstoffe unschädlich machen oder Energieträger erzeugen.

Dabei hat es die Synthetische Biologie – anders als die Chemie – mit der technischen Veränderung der belebten Natur zu tun. In Fortsetzung dessen, was aus der Gentechnik bekannt ist, hat die Synthetische Biologie zum Ziel, die molekularen Grundlagen der Stoffwechsel- und Fortpflanzungsfunktionen einfacher einzelliger Organismen so genau und so vollständig zu verstehen, dass es möglich wird, vorhandene Organismen standardisiert zu manipulieren, umzubauen und mit Eigenschaften auszustatten, die aus der Natur nicht bekannt sind.

Bedingung dieser Entwicklung ist eine Entdeckung aus der Mitte des 20. Jahrhunderts, die inzwischen geradezu zum Entstehungsmythos der modernen Biologie geworden ist: die Entdeckung der molekularen Struktur des Genoms. Mit dieser Entdeckung und den sich daran anschließenden Entwicklungen haben die modernen Naturwissenschaften einen Stand erreicht, auf dem nicht mehr nur die unbelebte, sondern nun auch die belebte Natur in den

¹ Yeh/Lim 2007:521f.

Bereich dessen gerät, was durch Theorie und Analyse lückenlos zu verstehen sein und durch technische Praxis und Synthese manipulierbar und herstellbar werden soll. Mit der Entdeckung des Genoms scheint der molekulare Schlüssel zum Verständnis des Phänomens «Leben» in seiner ganzen Breite gefunden zu sein.

Historisch gesehen handelt es sich dabei um eine Zäsur sowohl im Verständnis vom Phänomen des Lebens als auch im technischen Umgang mit Lebendigem. Bis in die Philosophie der Neuzeit hinein hat man der belebten Natur einen Sonderstatus innerhalb der Stufenordnung der Natur zuerkannt. So ging Immanuel Kant davon aus, dass es einen «Newton des Grashalms» niemals würde geben können. Es erschien undenkbar, dass die in der Natur zu beobachtenden teleologisch anmutenden Prozesse des Wachstums und Sich-Entwickelns jemals durch sie bestimmende, materialkausale und damit nicht-teleologische Vorgänge erklärt werden könnten. Selbst ein so überzeugter Reduktionist wie Julien Offray de La Mettrie bemerkte in seinem 1748 anonym erschienen Buch «L'homme machine», dass der Übergang vom Unbelebten zum Belebten in der Natur ein Rätsel bleibe. Seine Versuche mit Keimzellen des Seeigels veranlassten den Biologen Hans Driesch noch Ende des 19. Jahrhunderts dazu, kausal reduktionistische Theoriebildungen zur Erklärung des Lebendigen zu verwerfen.

Es ist erst die Entdeckung des Genoms, die das Programm der Rückführung der Phänomene des Lebens auf kausale Prozesse auf molekularer Ebene nun systematisch durchführbar werden lässt. Aus der Biologie selbst sind konkurrierende Theorieansätze völlig verschwunden, und auch in der Philosophie sind Verteidigungen der Teleologie als irreduzibler Erklärungskategorie für Naturvorgänge selten.

In Folge der wachsenden Einsichten in die Funktionen und Wirkungsweisen des Genoms haben auch die Fähigkeiten, Genomsequenzen zu manipulieren und zu ersetzen, zugenommen. Was so als einfache Gentechnologie in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts begann, entwickelt sich aktuell unter der Bezeichnung «Synthetische Biologie» zu einer Technik, die es erlaubt, einzellige Lebewesen komplett nach eigenen Wünschen zu modellieren und so ganz neue Lebensformen zu schaffen. Vorläufiger, medienwirksamer Höhepunkt dieser Entwicklung ist der Antrag einer Forschergruppe aus den USA im Jahr 2006, in dem ein im Labor

genetisch minimierter Organismus als «Mycoplasma laboratorium» zum Patent angemeldet wurde.²

Es nimmt kaum Wunder, dass diese Perspektive Reaktionen provoziert. Der Begriff des Lebens ist umgangssprachlich, trotz aller wissenschaftlich-molekularer Theoriebildung, nicht nur ein deskriptiver, sondern immer auch ein normativer Ausdruck. Lebendigkeit ist der Nukleus dessen, was für uns Schutzwürdigkeit impliziert, spätestens dann, wenn dieses Lebendige Schmerzempfinden und einfache Formen des Bewusstseins zeigt; Lebendigkeit bedeutet häufig Unberechenbarkeit und Eigenwilligkeit, und schließlich verbindet man mit Lebendigkeit häufig auch eine Art inhärentes Existenzrecht.

Die Erschaffung von Leben im Labor ist eine der literarisch und kulturell zentralsten Chiffren für die Ziele des modernen Menschen, sowohl in Form des Wunschbildes als auch des Menetekels. Die jüngsten Fortschritte innerhalb der sich in den letzten Jahren mit neuer Energie formierenden Forschungsrichtung der «Synthetischen Biologie» lassen erwarten, dass demnächst von dieser Chiffre wieder mehr zu hören sein wird, ist doch eines der Ziele dieser Subdisziplin der Biologie die Erzeugung von mikrobischen Lebensformen mit Eigenschaften, wie sie in der Natur nicht zu finden sind. Im Anschluss an diese Forschungen werden alte ethische und philosophische Fragen, Erwartungen und Befürchtungen von Neuem und auf neue Weise akut.

² U.S. Patent and Trademark Office: Patent application 20070122826, <http://patft.uspto.gov>.

2. Entwicklung der Synthetischen Biologie

Erste, vereinzelte Nachweise des Begriffs «Synthetische Biologie» finden sich bereits zu Anfang des 20. Jahrhunderts. So veröffentlicht der französische Mediziner und Biologe Stéphane Leduc 1912 ein Buch mit dem Titel «La Biologie Synthétique».³ Neben der analytischen, Fakten sammelnden und klassifizierenden Methode gebe es in der Wissenschaft auch eine synthetische Methode, so Leduc in dieser Schrift, die versuche, die beobachteten Phänomene regelgeleitet und wiederholbar zu reproduzieren. Erst wenn diese zweite Methode verstanden und genutzt werde, könne sich eine Wissenschaft ganz entfalten. In der Biologie seiner Zeit vermisst Leduc die konsequente Durchführung dieses Programms der kontrollierten Reproduktion von Beobachtungen; für sie setzt er sich in seinem Buch ein. So kann man sagen, dass die Überzeugung, wonach die Aufgabe der Theorie vor allem darin besteht, Wissen zu liefern, das Kontrolle und Nutzbarmachung dessen erlaubt, was Gegenstand der theoretischen Betrachtung ist, von Leduc hier in ersten Ansätzen auf den Bereich des Lebendigen übertragen wird. Wissen, und eben auch biologisches Wissen, kann erst dann mit Recht Wissen genannt werden, wenn es praktische Kontrolle und Anwendung erlaubt, weil es erst durch sie bestätigt wird, so kann man diese für die moderne Naturwissenschaft zentrale Annahme formulieren.

Der in Deutschland und den USA lehrende Biologe Jacques Loeb formuliert 1911 ganz ähnlich:

«[Es] ist zu betonen, dass die moderne Biologie eine rein experimentelle Wissenschaft ist, deren Resultate immer nur eine von zwei möglichen Formen annehmen: Entweder gelingt es, eine Le-

benserscheinung so weit zu beherrschen, dass wir dieselbe jederzeit nach Wunsch hervorrufen können (wie beispielsweise Zuckungen eines Muskels oder die chemische Entwicklungserregung gewisser tierischer Eier); oder aber es gelingt, den zahlenmäßigen Zusammenhang zwischen einer Versuchsbedingung und dem biologischen Resultat zu ermitteln (wie beispielsweise im Mendelschen Vererbungsgesetz).»⁴

Voraussetzung dieses naturwissenschaftlichen Verständnisses der Biologie ist, dass sich die Phänomene des Lebendigen restlos zurückführen lassen auf einfache Kräfte und Gesetze, die den Organismus beherrschen und die in ihren Wirkungsweisen eindeutig vorherzusagen sind. Auf die Frage angewendet, wie Leben entstehen kann, muss diese Annahme zu der Forderung führen, dass Lebendiges künstlich zu erzeugen sein muss. Ganz in diesem Sinn und typisch für seine Zeit⁵ erklärt Jaques Loeb im Jahr 1906 die «Abiogenesis», das heißt die Erzeugung von Leben aus unbelebter Materie, zu einem Ziel der Biologie.⁶

John Butler Burke, ein englischer Biologe, betont stärker die Kontinuitäten zwischen dem, was üblicherweise unbelebte Natur und dem, was belebte Natur genannt wird. Zwar sympathisiert er deshalb im Unterschied zu Loeb durchaus auch mit der Idee der «Biogenesis», der These, dass Leben nur aus Lebendigem hervorgehen kann, allerdings in dem eher ungewöhnlichen Sinn, dass er bestimmte Eigenschaften des Lebendigen auch in der unbelebten Materie gegeben sieht. Auch für Burke steht aber fest, dass es einen Übergang vom dem, was als unbelebt gilt, zu dem, was als belebt gilt, geben muss, und er beschreibt die experimentelle Erzeugung von «animalcules» als Aufgabe der Biologie.⁷

Diese frühen wissenschaftsprogrammatischen Ansätze zu einer «synthetischen», also einer «zusammensetzenden» oder «erzeugenden» Biologie verdeutlichen, dass die technische Umsetzung eines jeden Wissensbestandes nicht eine kontingente Zutat zu diesem naturwissenschaftlich verstandenen Wissen ist, sondern

⁴ Loeb 1911:6.

⁵ Keller 2002:19.

⁶ Loeb 1906:223.

⁷ Burke 1906:5.

konstitutiver Bestandteil dieser Forschungen. Die reproduzierbare Anwendung ist die Bestätigung der durch Analyse gewonnenen Ergebnisse und so nicht nur Resultat, sondern gleichzeitig Motor der Forschung. Synthetische Biologie in diesem allgemeinen Sinn ist nicht ein Zweig der biologischen Forschung unter anderen, sondern ein notwendig vorhandener Teil wissenschaftlich betriebener Biologie. Ihre Existenz ist Ausdruck dafür, dass die Biologie sich als programmatische Naturwissenschaft etabliert hat und methodologisch den entsprechenden Anforderungen genügt.

Seit den Anfängen der modernen Biologie hat diese methodologische Grundüberzeugung, wie gezeigt, zwei Teile: Erstens geht es ganz allgemein darum, kontrolliert und reproduzierbar Verhalten und Reaktionen von Lebendigem hervorzurufen. Dies kann bis hin zur Initiierung von Entstehungsprozessen des Lebens gehen, mit allerdings dann lebendigem Ausgangsmaterial. Zweitens verbindet sich damit auch die Aufgabe, Lebendiges aus Unbelebtem nachzubilden, also die allererste Entstehung des Lebens nachzustellen. Wenn es möglich ist, so könnte man diesen Übergang rekonstruieren, Leben wie unbelebte Materie zu kontrollieren und bestimmtes Verhalten zu induzieren, dann kann es auch keine prinzipielle Grenze zwischen unbelebter und belebter Natur geben, die der biologische Wissenschaftler nicht überbrücken könnte. Beide Bereiche – Kontrolle und Induktion von Verhalten auf der einen und Nach- und Neubildung von Lebendigem auf der anderen Seite – sind auch für die aktuelle Synthetische Biologie nach wie vor charakteristisch.

Diese Ausrichtung auf das Nachbilden und Neubilden der Natur, die die Fähigkeit zur Kontrolle des Lebendigen zum zentralen Forschungsziel und zum zentralen Test für Wissensfortschritt macht, ist in der späteren Literatur auch als «ingenieurwissenschaftlicher Standpunkt» oder «ingenieurwissenschaftliches Ideal» beschrieben worden.⁸ Einen solchen Standpunkt im Sinne eines Ideals schon in diesen frühen Entwicklungen der Biologie zu identifizieren, erscheint durchaus nicht abwegig, wenn man bedenkt, wie sehr das Interesse schon damals auf Erzeugung, Nachbildung und Kontrolle ausgerichtet war. Wie sich zeigen wird, ist die Charakterisierung der Synthetischen Biologie als einer ingenieurwissenschaftlich

inspirierten Disziplin nicht nur für die Anfänge, sondern – und zwar noch sehr viel deutlicher – auch für die heutigen Bestrebungen innerhalb der Synthetischen Biologie zutreffend.

Auf der Ebene der intra- und interzellulären molekularen Vorgänge konnte dieses Programm systematisch erst nach der Entdeckung der DNA-Doppelhelix zur Entfaltung kommen. Im Anschluss daran findet der Terminus «Synthetische Biologie» aber auch in diesem Bereich der molekularen Biologie schnell wieder Anwendung, in seiner Bedeutung ganz analog verwendet wie zu Beginn des Jahrhunderts. So schreibt der polnisch-amerikanische Genetiker und Molekularbiologe Waclaw Szybalski 1974 Sätze, die aus heutiger Sicht geradezu prophetisch klingen:

«Up to now we are working on the descriptive phase of molecular biology. [...] But the real challenge will start when we enter the synthetic biology phase of research in our field. We will then devise new control elements and add these new modules to the existing genomes or build up wholly new genomes. This would be a field with the unlimited expansion potential and hardly any limitations to building «new better control circuits» and [...] finally other «synthetic» organisms [...]»⁹

Vier Jahre später, 1978, verfassen Szybalski und Skalka anlässlich der Nobelpreisverleihung in Physiologie und Medizin ein Editorial in der Zeitschrift «Gene» mit inhaltlich ganz ähnlicher Stoßrichtung. Szybalski und Skalka konstatieren dort den Beginn einer neuen Ära der Biologie:

«The work on restriction nucleases not only permits us easily to construct recombinant DNA molecules and to analyze individual genes but also has led us into the new era of «synthetic biology» where not only existing genes are described and analyzed but also new gene arrangements can be constructed and evaluated.»¹⁰

Der aktuell letzte Schritt auf dem Weg dieser Entwicklung sind Bestrebungen zur Etablierung des Fachgebietes «Synthetische Bio-

⁹ Szybalski 1974.

¹⁰ Szybalski/Skalka 1978:181f.

logie», die ihren Anfang um das Jahr 2000 haben. In Fortsetzung des molekularbiologischen Forschungsansatzes, den Szybalski beschreibt, wird hier von einer Gruppe amerikanischer Forscher unter synthetischer Biologie diejenige wissenschaftliche Tätigkeit subsumiert, die zum Ziel hat, komplexe zelluläre Prozesse auf molekularer Ebene in ihren Interaktionen zu analysieren und diese Analysen durch Modellierung und Nachbildung der Prozesse und Strukturen zu testen und technisch nutzbar zu machen. Durch eine enge Verbindung von Biologie und Ingenieurwissenschaften wird so versucht, die bisher eher «handwerklich» geprägte Gentechnik systematischer und in größerem Maßstab betreiben zu können – und dies sowohl in Hinsicht auf ihr analytisches Fundament als auch im Hinblick auf ihre synthetische Umsetzung.¹¹

Inspiziert und getragen wird dieser neuerliche Ansatz zur Etablierung der Synthetischen Biologie zum einen vom wachsenden Wissen im Bereich der Systembiologie, zum anderen und vor allem aber auch von der rasanten Entwicklung der Elektronik, der sich rasch verbessernden Sequenzierertechnik und der immer billiger und immer zugänglicher werdenden DNA-Synthesemöglichkeiten.¹² Gensequenzen müssen nicht mehr im Labor von den jeweiligen Wissenschaftlern selbst synthetisiert werden, sondern sie können per E-Mail bei entsprechend spezialisierten Unternehmen im Postversand bestellt werden. Die Preise für die Sequenzierung eines Basenpaares fallen dabei beständig, die Länge der am Stück synthetisierbaren Gensequenzen steigt.¹³ Prognostisch ist bisher kein Ende dieser Entwicklung abzusehen. Es leuchtet ein, dass mit diesen technischen und ökonomischen Grundlagen auch die Möglichkeiten steigen, Hypothesen über die Funktion molekularer Bausteine einfacher Organismen zunehmend leichter in der Anwendung und im Nachbau zu testen. Damit einhergehend steigen auch die Möglichkeiten zur Nach- oder Neubildung von Gensequenzen und Genomen.

Dieser neue Versuch, unter dem Begriff der Synthetischen Biologie ein Forschungsfeld zu besetzen und zu versammeln, stößt wissenschaftlich und wissenschaftspolitisch auch in Europa auf

Resonanz.¹⁴ Im Rahmen des Programmes «New and Emerging Science and Technology» (NEST) der Europäischen Union erscheint 2003 ein Dokument zur Synthetischen Biologie, in dem der inhaltliche Kern des Feldes im Hinblick auf den Zuschnitt von Förderinstrumenten bestimmt wird und Grenzen zu verwandten Gebieten gezogen werden.¹⁵

Das NEST-Programm hat in der Folge zu einer Reihe weiterer wissenschaftlicher und wissenschaftspolitischer Aktivitäten geführt. Unter dem Titel «Applying Engineering to Biology» berichtet eine Expertengruppe 2005 über den aktuellen Stand der Forschungen innerhalb der Synthetischen Biologie.¹⁶ Spezifische Unterschiede der Forschungen in Europa und den USA stellt der Bericht «Synbiology. An Analysis of Synthetic Biology Research in Europe and North America» dar.¹⁷ Mit Strategien zur weiteren Entwicklung und Förderung der Forschung ist das Projekt «Towards a European Strategy for Synthetic Biology» (TESSY) befasst.¹⁸ Eine sehr hilfreiche Datenbank, in der Forschungen, Publikationen und Forschergruppen der Synthetischen Biologie verzeichnet sind, wird als Teil des Synbiology-Projektes betrieben.¹⁹ Schließlich ist erwähnenswert, dass bereits auch ein EU-gefördertes Projekt zu Fragen der Ethik und Sicherheit der Synthetischen Biologie existiert («Synbiosafe»)²⁰

In Anbetracht der wissenschaftspolitischen Förderung, der vorhandenen technologischen Grundlagen und der breit gefächerten Anwendungsfelder ist zu erwarten, dass sich diese neueren Initiativen im Bereich Synthetische Biologie verstetigen werden. Die ein Jahrhundert alte Idee einer Synthetischen Biologie ist in diesen Jahren dabei, sich als anwendungsorientiertes, molekularbiologisches Fach zu formieren und zu etablieren.

¹⁴ Serrano 2007:4.

¹⁵ European Commission 2003.

¹⁶ European Commission 2005.

¹⁷ European Commission 2006.

¹⁸ TESSY (Towards a European Strategy for Synthetic Biology),

<http://www.tessy-europe.eu>.

¹⁹ Synbiology Project: Datenbank Synthetic Biology, <http://www.synthetic-biology.info>.

²⁰ Synbiosafe Project: Safety and Ethical Aspects of Synthetic Biology,

<http://www.synbiosafe.eu>.

¹¹ Benner/Sismour 2005:534.

¹² Carlson 2003.

¹³ ETC Group 2007:10.

3. Was ist Synthetische Biologie?

3.1 Definitionsansatz

Ein entstehendes Forschungsfeld zu definieren, ist immer ein schwieriges Unterfangen. Dies nicht nur deshalb, weil die Forschung noch jung ist und ihre zukünftige Gestalt schwer abzuschätzen ist, sondern auch deshalb, weil die Definition eines Forschungsfeldes auch darüber entscheidet, welche bereits laufenden Forschungsprojekte dazu gehören und welche nicht, wie Forschungsförderungsprogramme zugeschnitten werden und wer sich auf diese Programme bewerben kann. Definitionen von Forschungsfeldern sind deshalb immer auch das Ergebnis von Aushandlungsprozessen und Kompromisssuchen. Auch im Fall der Synthetischen Biologie lässt sich das zur Zeit beobachten. In einem solchen Prozess einigte man sich bei einem Expertentreffen des europäischen TESSY-Projekts im Juni 2007 auf folgende Definition der Synthetischen Biologie, die hier repräsentativ für viele andere Definitionsansätze genauer betrachtet werden soll:

«[Synthetic biology] aims to 1. engineer and study biological systems that do not exist as such in nature, and 2. use this approach for i) achieving better understanding of life processes, ii) generating and assembling functional modular components, iii) developing novel applications or processes».²¹

Diese Definition besteht aus vier Einzelaspekten: *Erstens* wird die Anbindung der Synthetischen Biologie an das Ziel wissenschaftlich-analytischer Erkenntnis hervorgehoben («achieving better understanding of life processes»). Damit wird auf einen Punkt rekuriert, der schon bei Stéphane Leduc im Vordergrund der

Beschreibung synthetischer Biologie stand. Synthetische Biologie führt über den Weg des Nachentwerfens und Nachbauens auch zur Weiterentwicklung theoretischer Modellbildungen. Der relevante Bereich theoretischen Wissens, der in dieser engen Verknüpfung mit der Synthetischen Biologie steht, ist die Systembiologie.

Zweitens ist der Definition zufolge kennzeichnend für die Synthetische Biologie, dass sie auf die Erschließung neuer Anwendungsmöglichkeiten ausgerichtet ist («developing novel applications or processes»). Diese Ausrichtung wird, wie erwähnt, ermöglicht durch den instrumentellen Charakter des zugrunde liegenden theoretischen Wissens. Wissen, das anhand von experimentellen Umsetzungen generiert werden kann, ist immer auch Wissen, das direkt für Anwendungen nutzbar gemacht werden kann. Mit dieser Ausrichtung auf Anwendung schließt die Synthetische Biologie an Biotechnologie im allgemeinen und Gentechnik im besonderen an.

Es wird *drittens* in der Definition darauf verwiesen, dass die Synthetische Biologie neue, in der Natur so nicht vorkommende biologische Strukturen herstellt und untersucht («engineer and study biological systems that do not exist as such in nature»). Mit dieser Formulierung wird ein zentrales Merkmal der aktuellen Forschungen zur Synthetischen Biologie hervorgehoben, das vor allem in der Kombination mit der Ausrichtung auf Anwendungsmöglichkeiten zum Tragen kommt. Für die Ausschöpfung dieser Möglichkeiten kommt es darauf an, natürliche Organismen und Zellstrukturen nicht nur der Natur nachzubilden, sondern sie auch selbst auf neue Arten und Weisen im Hinblick auf bestimmte Aufgaben zu entwickeln. Diese Vorgehensweise geht über die am Erkenntniszuwachs interessierte Forderung eines Jacques Loeb zur Herstellung künstlichen Lebens hinaus, weil das neue künstliche Leben nicht mehr nur Nachbildung des bekannten Lebens, sondern bisher in der Natur nicht vorkommendes Leben sein soll. Hier zeigt sich, wie prophetisch Waclaw Szybalskis Formulierungen im Nachhinein klingen müssen. Die von Szybalski für die fernere Zukunft avisierten synthetischen Organismen, die mit ganz neuen Genomen ausgestattet sein sollen, sind diejenigen neuen «biologischen Systeme», die von der Synthetischen Biologie heute in greifbare Nähe gerückt werden.

Schließlich ist *viertens* von der Entwicklung funktional beschriebener, modularer biologischer Komponenten die Rede («functional

²¹ TESSY 2008.

modular components»)). Mit diesem Passus wird auf einen – neben der Neuheit der zu schaffenden Entitäten – zweiten Punkt hingewiesen, der für die aktuelle Synthetische Biologie in besonderer Weise charakteristisch ist. Ein großer Teil der Forschungen ist darauf angelegt, biologische Systeme so neu zu schaffen, dass sie als Modul einfach reproduzierbar sind und mit anderen solchen biologischen Modulen beliebig kombiniert werden können. Mit dieser Modularisierung und Standardisierung wird auf Prinzipien der Ingenieurwissenschaft und der Informatik zurückgegriffen. Auch dies ist offenkundig ein Charakteristikum, das in enger Beziehung zur Anwendungsorientierung der Synthetischen Biologie steht.

Diese vier Punkte aufnehmend, lässt sich sagen, dass die Synthetische Biologie einerseits versucht, systembiologische Modellbildungen mittels praktischer Umsetzungen voranzutreiben und zu testen, und andererseits darauf ausgerichtet ist, solche praktischen Umsetzungen im Hinblick auf Anwendungsmöglichkeiten gezielt zu entwerfen und herzustellen. Die so gewonnenen biologischen Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass sie Eigenschaften zeigen, die bei natürlich vorkommenden Organismen nicht bekannt sind und die modularisiert und standardisiert Verwendung finden können. Verkürzt gesagt ist Synthetische Biologie die Verschmelzung von Systembiologie und Gentechnik unter Zuhilfenahme ingenieurwissenschaftlicher Prinzipien.

Im Vergleich zu den ersten programmatischen Erläuterungen zum Terminus «Synthetische Biologie» sind es vor allem die Neuartigkeit der zu entwickelnden biologischen Systeme und die Anknüpfung der Forschung an die Ingenieurwissenschaften, die als besondere Merkmale der aktuellen Entwicklung des Faches ins Auge fallen. Sie sind Anzeichen dafür, dass die aktuellen Forschungen vor allem die Zielsetzung der Anwendung verfolgen, wohingegen die Funktion, analytische Theoriebildung voran zu bringen, eher in den Hintergrund tritt.

Für die ethische und philosophische Beurteilung der Synthetischen Biologie ist dieser verstärkte Anwendungsbezug naheliegenderweise von großer Relevanz, weil nicht nur ein Wissensbestand vergrößert wird, sondern auf besondere Weise verändernd in die Wirklichkeit des Lebendigen eingegriffen wird. Es zeigt sich hier, wie eng die Stichworte von der Erschaffung des Lebens und der Mechanisierung des Lebendigen mit den aktuellen Forschungs-

aktivitäten der Synthetischen Biologie in Zusammenhang stehen, wenn sie zur Entstehung neuartiger, synthetisch erzeugter Organismen und zur Modularisierung synthetischer biologischer Strukturen führen.

3.2 Charakteristische Forschungsansätze

Die Forschungslandschaft innerhalb der Synthetischen Biologie ist zur Zeit einer schnellen Entwicklung unterworfen, was sich auch an den steigenden Veröffentlichungszahlen auf diesem Gebiet zeigen lässt. Die Statistiken der Synbiology-Datenbank verzeichnen für die in-vitro- und in-vivo-Forschungen im Jahr 2000 zusammen genommen weltweit etwa 700 Publikationen. Im Jahr 2005, dem letzten ausgewerteten Jahr, hat sich mit ca. 3850 Publikationen die Publikationszahl mehr als verfünffacht.²² Zwar mag diese Entwicklung zum Teil auch der Tendenz geschuldet sein, bereits bestehende Forschungen unter dem Etikett «Synthetische Biologie» lediglich neu zu positionieren, es wird aber kaum bezweifelt werden können, dass man insgesamt doch von einem spürbaren Anstieg der Forschungsaktivitäten in den letzten Jahren sprechen muss.

Ausgehend von der Annahme, dass es in der Synthetischen Biologie grundlegend darum geht, einfache Lebensformen in ihren molekularen Mechanismen in praxi nachzubilden und auf diese Weise zu verstehen, lässt sich schon vermuten, dass ein konkretes Forschungsziel darin bestehen wird, einen möglichst wenig komplexen einzelligen Organismus im Labor herzustellen.

In der Tat ist dies das Ziel einer ganzen Reihe von aktuellen Forschungsprojekten: Die Herstellung eines Organismus, der über einen Stoffwechsel verfügt, sich vermehren kann und der in der Lage ist, sich in evolutionären Prozessen zu verändern, der also auf möglichst unverfälschte Weise zeigt, wie die Basiseigenschaften des Lebens molekular verwirklicht sein können.

Dabei lassen sich zwei Wege unterscheiden, auf denen versucht wird, dieses Ziel zu erreichen. Es gibt zum einen Ansätze, die anstreben, einen einzelligen Organismus oder eine Zelle im Labor von Grund auf zu erzeugen, zum anderen gibt es Ansätze, das

²² Synbiology Project: Datenbank Synthetic Biology, <http://www.synthetic-biology.info>.

Genom eines existierenden Bakteriums so zu minimieren, bis der Organismus nur noch über die genannten Grundeigenschaften des Lebens verfügt, darüber hinaus aber keine spezifischen Fähigkeiten mehr hat. Ziel der «Aushöhlung» existierender Bakterien ist mit anderen Worten, dass nach Möglichkeit nur diejenigen Gene bestehen bleiben, die den Stoffwechsel und die Fortpflanzungsfähigkeit des Organismus sicherstellen – und die zu Mutationen fähig sind. Entsprechend der Basis, von der aus die Minimalzelle bzw. der Minimalorganismus entwickelt werden soll, unterscheidet man die beiden Hauptrichtungen der Forschung auch als «top-down» und «bottom-up» oder auch als «in-vivo-» und «in-vitro-» Ansatz der Synthetischen Biologie.

Die weiterführende Idee des *top-down-Ansatzes* ist es, den einmal erzeugten Minimalorganismus dann mit nach Bedarf zusammengestellten Genomsequenzen so zu ergänzen, dass er genau definierte Aufgaben erfüllen kann. Der Basisorganismus würde als häufig so bezeichnetes «Chassis» fungieren, auf das jeweils gewünschte, weitere Funktionen nach Belieben aufgesetzt werden könnten.²³ In diesem Zusammenhang finden sich oft auch Formulierungen vom Genom als der «software» und den restlichen Strukturen des Organismus als «hardware». In Anlehnung an einen allerdings auch aus biologischer Sicht etwas fragwürdigen genetischen Essentialismus lässt sich dann sagen, dass es Ziel des top-down-Ansatzes ist, die Hardware einer Zelle mit neuer und maßgeschneiderter Software auszustatten und von ihr steuern zu lassen.

Die de-novo-Erzeugung einer sogenannten Minimalzelle im Labor, paradigmatischer Fall des *bottom-up-Ansatzes*, hat dagegen zum Ziel, eine Basisform des Lebens aus einfacheren Teilen aufzubauen. Hier wird kein vorhandener Organismus genutzt und in vivo verändert, sondern es wird ein Organismus oder allgemein ein biologisches System in vitro von Grund auf geschaffen. Dieser zweite Ansatz lässt sich noch einmal unterteilen: man unterscheidet erstens Ansätze, die bereits vorhandene biologische Bausteine zum Aufbau der künstlichen oder «synthetischen» Zelle nutzen, und zweitens Ansätze, die beginnend mit chemischen Ausgangsstoffen versuchen, eine Art «Protozelle»

(eher ein Zellanalogon, als eine eigentliche Zelle) zu entwickeln.²⁴ Kennzeichnend für diese beiden Forschungsansätze ist, dass sie nicht nur im reinen Nachbau natürlicher Zellen bestehen, sondern auch den Bau von Zellen avisiieren, deren Mechanismen zur Umsetzung der Lebensfunktionen weit von dem entfernt sind, was von natürlichen Zellen bekannt ist. Wo Letzteres der Fall ist, spricht man auch von der Herstellung einer «orthogonalen» Natur. «Orthogonal» bezeichnet in diesem Zusammenhang, in Übertragung des Sprachgebrauchs der Informationswissenschaft, biologische Systeme, die in ihren Grundstrukturen der bekannten Natur so unähnlich sind, dass sie mit ihr nicht oder nur sehr begrenzt interagieren können.

Top-down- bzw. in-vivo- und bottom-up- bzw. in-vitro-Ansatz gehen typischerweise mit zwei unterschiedlichen Forschungsinteressen und Forschungstraditionen einher. Während der in-vivo-Ansatz vor allem an technischer Anwendung orientiert ist und sich zwanglos mit einem ingenieurwissenschaftlichen Zugang der Modularisierung und Standardisierung verträgt, ist der in-vitro-Ansatz eher als Grundlagenforschung zu verstehen, bei der es darum geht, Entstehung und Grundfunktionen des Lebens zu erklären und nachzuvollziehen. Grundlage und treibende Kraft dieser Forschung ist die Frage, wie die Entstehung des Lebens im Lauf der Naturgeschichte erklärt und reproduziert werden kann. Dennoch ist auch dieser Ansatz im Rahmen der Synthetischen Biologie auf Anwendungsfragen bezogen und es ist nicht auszuschließen, dass sich in Zukunft herausstellt, dass ein in-vitro erzeugtes Zellanalogon besser als ein Minimalbakterium geeignet ist, als Basis für technische Umsetzungen zu dienen.

So hilfreich diese dichotome Unterteilung der Forschungslandschaft der Synthetischen Biologie für eine erste Übersicht auch ist, so sehr muss doch hervorgehoben werden, dass es eine Reihe von Forschungsansätzen gibt, die sich nicht ohne Weiteres in dieses Schema einordnen lassen. Dies betrifft vor allem all diejenigen Forschungen, die sich mit der Analyse und der Nach- und Neubildung von metabolischen Prozessen und zellulären Signalstrukturen beschäftigen.

²³ Drubin/Way/Silver 2007:249f.; Fu 2006:695f.
²⁴ Forster/Church 2006:1–3; Forster/Church 2007:1–5; Luisi 2007:615–19; Luisi/Ferri/Stano 2006; Monnard/Deamer 2002:196–205.

Hier geht es darum, Funktionsweisen von Zellbestandteilen, in die das Genom eingebettet ist, zu analysieren und nachzubilden.²⁵ Man wird diese Forschungen am ehesten zu den in-vivo-Ansätzen zählen müssen, die insofern auch dem top-down-Vorgehen folgen, als sie anstreben, komplexe biologische Strukturen in der Analyse und der Synthese in einfacher zu beschreibende Teilbereiche aufzuspalten. Allerdings haben diese Forschungen allgemein nicht zum Ziel, ein Minimalbakterium herzustellen. In dieser Hinsicht setzen sie sich ab von dem für in-vivo-Ansätze sonst oft als typisch bezeichneten top-down-Vorgehen.

Dieser Unterschied lässt sich auch im Rückgriff auf die Metaphorik von Hardware und Software verdeutlichen, die im Minimalbakteriumsprojekt verwendet wird. Arbeiten zum Verständnis der Stoffwechselwege und der Signalübertragungsmechanismen lassen sich nicht fixieren auf die Vorstellung vom Genom als Software der Zelle und den restlichen biologischen Zellstrukturen als Hardware, weil an ihnen deutlich wird, dass auch diese restlichen Strukturen am Verhalten, das ein Organismus letztlich zeigt, integral beteiligt sind und dass diese Strukturen, vice versa, ähnlich wie das Genom dazu genutzt werden können, das Verhalten von Organismen zu steuern. Es ist nicht unwahrscheinlich, dass diese Forschungen zu Zellfunktionen «neben» dem Genom auch ohne Verbindung zu den paradigmatischen und medial griffiger zu vermittelnden Großprojekten der bottom-up- und der top-down-Schule zu technisch folgenreichen Entwicklungen führen werden.

Schließlich gibt es einen weiteren Forschungsbereich innerhalb der Synthetischen Biologie, der ein wenig aus dem Rahmen der dichotomen Ordnung heraus fällt. Dabei handelt es sich um Bestrebungen, genetische Strukturen zu schaffen, die nicht auf derselben materialen Basis beruhen wie aus der Natur bekannt. So gibt es Ansätze, die natürlichen Basenpaare des Genoms durch weitere Basenpaare zu ergänzen, und es wird daran geforscht, Genome zu schaffen, die ganz unabhängig von den vier Basen des natürlichen Lebens funktionieren.²⁶ In erster Linie gehören solche Ansätze zum in-vitro-Bereich der Synthetischen Biologie, weil die synthe-

tischen Genome aus einfacheren Bausteinen aufgebaut werden. So fügen sie sich ein und sind zum Teil auch unmittelbarer Bestandteil von Forschungen im Rahmen der Herstellung einer Minimalzelle. Denkbar ist jedoch auch die Verwendung solcher nicht-natürlicher Genome in natürlichen Zellen und Organismen, also die Verwendung in-vivo.

Forschungsfeld	Top-down-Ansatz (in-vivo-Ansatz)	Bottom-up-Ansatz (in-vitro-Ansatz)
Synthetische Biologie		
Paradigmatisches Forschungsziel	Minimierung des Genoms existierender Bakterien. Einsatz maßgeschneiderter Genome im Minimalbakterium.	De-Novo-Erzeugung einer Minimalzelle. Minimalzelle kann Natur replizieren oder orthogonal zu ihr stehen.
Weitere Forschungsziele	Nachbildung metabolischer Prozesse. Nachbildung von molekularen Signalstrukturen.	Erzeugung nicht-natürlicher oder nur teilweise natürlicher Genome (z.B. Erweiterung des Basensatzes des Genoms).
Forschungstradition	v.a. technische Anwendung	v.a. Grundlagenforschung

²⁵ Drubin/Way/Silver 2007.

²⁶ Benner/Sismour 2005:533–536; Drubin/Way/Silver 2007:250; Forster/Church 2006:2; Luisi 2007:604–609.

4. Anwendungsfelder

Die möglichen Anwendungsfelder für Technologien der Synthetischen Biologie sind so vielfältig, dass schon vom Entstehen einer neuen Wirtschaft, der «bioeconomy», die Rede ist.²⁷ Ähnlich wie die Chemie in der Vergangenheit, so die These, so wird in naher Zukunft die Biologie mit ihren neuen technischen Möglichkeiten die Wirtschaft der Industrienationen und unser Alltagsleben nachhaltig prägen.²⁸

Es ist beim jetzigen Stand der Technik allerdings nach wie vor nicht möglich, im Einzelnen anzugeben, wo tatsächlich Durchbrüche stattfinden werden und welche der heute geäußerten Erwartungen sich als nicht realisierbar erweisen werden. Hinzu kommt, dass viele der vollmundigen Ankündigungen das Anwendungspotential betreffend sicherlich auch der Notwendigkeit des Einwerbens von Forschungsgeldern und anderen, eher kurzfristig-pragmatischen Gründen geschuldet sind. Es ist deshalb nicht möglich, ein verlässliches Bild von den zukünftigen Anwendungen der Synthetischen Biologie zu zeichnen.

Die Visionen der möglichen Anwendungen sind nichtsdestotrotz imponierend und können eindrucksvoll illustrieren, welches Potential in der Synthetischen Biologie steckt. Der Fächer der Anwendungsfelder reicht von der Produktion von Arzneimitteln durch synthetische Organismen über die Herstellung alternativer Treibstoffe durch künstliche Bakterien und die Entwicklung von Viren oder Bakterien, die zu therapeutischen Zwecken im Menschen eingesetzt werden können, bis hin zur Gewinnung von menschlichem Gewebe und der Entwicklung von Biosensoren und biologischen Schaltkreisen.

²⁷ Carlson 2007.

²⁸ Winnacker 1990:373.

4.1 Medizinisch-therapeutische Zwecke

Medizinisch-therapeutische Einsatzmöglichkeiten lassen sich für fast jeden Forschungszweig der Synthetischen Biologie angeben, sei es der Einsatz synthetischer Organismen, seien es synthetisch erzeugte Zellstrukturen oder biologische Systeme in-vitro. Zu nennen sind vor allem folgende Visionen und Projekte:

a) Produktion von Arzneimitteln

Die Produktion von Arzneimitteln mit Hilfe von gentechnisch manipulierten Bakterien ist ein eingeführtes Verfahren, das bereits industriell genutzt wird. So wird Insulin produziert, indem dem Genom eines Bakteriums (*Escherichia coli*) das menschliche Insulin-Gen hinzugefügt wird, so dass der Mikroorganismus mit der dann so genannten «rekombinanten» DNA Insulin herstellt, das im menschlichen Körper verwendet werden kann. Bis zur Einführung dieser Methode wurde Insulin aus dem Pankreas verschiedener Tierarten isoliert und anschließend einem aufwendigen Reinigungsprozess unterzogen, um beim therapeutischen Einsatz mögliche allergische Reaktionen zu vermeiden. Die gentechnische Herstellung von Insulin hat heute die ältere Methode der Gewinnung aus der Bauchspeicheldrüse von Tieren fast vollständig verdrängt.

Mit der Synthetischen Biologie verbindet sich die Hoffnung, diese Form der Arzneimittelproduktion in Zukunft auch für andere Wirkstoffe fruchtbar machen zu können. Insbesondere die Idee, einen genetisch minimierten Basisorganismus mit einer ganz neuen, maßgeschneiderten DNA auszustatten, ist eine Technik, die neue Möglichkeiten in diese Richtung eröffnen könnte.

Diese Erwartung, Arzneimittel in Zukunft effektiver und günstiger mit Hilfe von synthetisch erzeugten Bakterien herstellen zu können, gründet sich vor allem auf die Forschungen und Arbeiten, die zur Zeit mit dem Ziel stattfinden, ein Arzneimittel zur Therapie von Malaria zu entwickeln. Dazu wird ein Bakterium so modifiziert, dass es eine Vorläufersubstanz des gegen Malaria wirksamen Stoffes Artemisinin produziert. Dieser Stoff muss bisher aufwendig und kostspielig aus einer Heilpflanze extrahiert werden. Die Arbeiten sind, wie es heißt, weit voran geschritten,

endgültige Ergebnisse dieser Bemühungen liegen bisher allerdings noch nicht vor.²⁹

Die Produktion von Artemisinin wird sehr häufig als Beispiel für ein weit fortgeschrittenes Anwendungsfeld der Synthetischen Biologie angeführt. Dies vor allem deshalb, weil die synthetische Herstellung von Artemisinin einer der ganz wenigen Bereiche der mit der Synthetischen Biologie assoziierten Forschungen ist, von dem behauptet werden kann, dass hier eine synthetisch-biologische Anwendungstechnik schon jetzt kommerziell weiterverfolgt und realisiert wird.

Ob die Behauptung, dass hier ein erster Anwendungserfolg der Synthetischen Biologie zu beobachten ist, tatsächlich zutrifft, ist allerdings nur schwer eindeutig zu bestätigen. Mit Sicherheit lässt sich sagen, dass der Produktionsprozess keine Umsetzung des Programms der Minimierung und Neugenomisierung eines Bakteriums ist. Der Kern der Arbeit besteht in der Implantierung eines Pflanzengens in das Genom von *Escherichia coli*, ein Prozess, der aus der klassischen Gentechnik geläufig ist und auch bei der Herstellung von Insulin Verwendung findet (dort wird das menschliche Insulin-Gen isoliert und mit der DNA eines Mikroorganismus verbunden).³⁰ Hinzu kommt jedoch, dass im Fall der Produktion von Artemisinin mehrere metabolische Abläufe parallel implantiert werden, die aus unterschiedlichen natürlichen Organismen stammen zu finden sind (neben der Pflanze *Artemisia annua* ist auch Hefe eine Quelle), und dass diese Abläufe systematischen Optimierungsprozessen unterzogen werden. Diese Erweiterungen der Technik rekombinanter DNA mag die Zuschreibung «Synthetische Biologie» zumindest in Teilen erklären und rechtfertigen.³¹

Letztlich zeigt sich an diesem Beispiel, dass die Grundlagenforschung der Synthetischen Biologie noch in ihren Anfängen steckt. Das Programm der Herstellung eines Basisbakteriums und der Modularisierung und Standardisierung biologischer Systeme ist noch Programm und nicht Realität. Gleichzeitig jedoch sind die Bemühungen unverkennbar, die Grenzen der klassischen Gentechnik zu sprengen und die Techniken und Methoden der Synthetischen

Biologie, soweit vorhanden, systematisch zu nutzen und in Anwendungstechnologien zu überführen.

b) Mikroorganismen als Therapeutika

Bakterien und Viren interagieren auf verschiedenen Wegen mit dem menschlichen Körper zu dessen Wohl und Wehe. Mit den Mitteln der Synthetischen Biologie erscheint es möglich, diese Fähigkeiten gezielt zu nutzen und zu ändern, indem Mikroorganismen entwickelt werden, die Veränderungen in Körperzellen aufspüren können und die dann zu einer Interaktion mit den Körperzellen fähig sind, um pathogene Veränderungen zu stoppen.³² So könnte man Mikroorganismen entwerfen, die gezielt Krebszellen erkennen und ihre Weiterentwicklung unterbinden. Diese Organismen könnten beispielsweise auf die systemische Gabe eines bestimmten Wirkstoffes hin ein therapeutisch hilfreiches Verhalten zeigen und so im Körper des Patienten sozusagen ferngesteuert werden. Es könnten auch Viren hergestellt werden, die als «Vektoren» genetisches Material in Körperzellen einschleusen, das dort seinerseits therapeutisches Potential entfalten kann. Schließlich gibt es auch Ansätze, für den Menschen ungefährliche, synthetisch optimierte Viren zu nutzen, um pathogene Viren wie den HI-Virus bei infizierten Patienten in ihrer Wirkung abzuschwächen.

Bei diesen Forschungen handelt es sich wie auch bei den für die Arzneimittelherstellung optimierten Organismen um Anknüpfungen an aus der Gentechnik bekannte Verfahren. Im Einzelfall wird es deshalb immer schwierig sein zu entscheiden, ob die fragliche Forschungsrichtung schon Synthetische Biologie ist oder noch als klassische Gentechnik bezeichnet werden muss. In der Tendenz aber ist auch hier deutlich, dass die hohen Ziele die Forschung zu immer komplexeren Modifikationen von genetischen Strukturen und metabolischen Prozessen führen, die sich immer weiter vom einfachen Rekombinieren existenter DNA entfernen.

²⁹ De Vriend 2006:30f.

³⁰ Ro et al. 2006.

³¹ Tucker/Zilinskas 2006:29.

³² Voigt/Keasling 2005:305.

c) Herstellung humanen Gewebes

Ein weiteres Anwendungsfeld ergibt sich aus der Verknüpfung von Stammzellforschung und Synthetischer Biologie. Wenn es gelingt, humane Stammzellen gezielt zur Vermehrung und zur Spezialisierung anzuregen, dann könnten mit Hilfe dieser Techniken abgestorbene Zellen des menschlichen Körpers durch funktionstüchtige Zellen ersetzt werden und es könnte menschliches Gewebe im Labor nachgezüchtet werden. Solche Techniken könnten für die Behandlung einer Vielzahl von Krankheiten eingesetzt werden, von neurodegenerativen Erkrankungen über chronisch-somatische Krankheitsverläufe bis hin zu akuten Verletzungen.

Viele der Forschungen in diese Richtung befassen sich damit, äußere Bedingungen des Zellwachstums so einzurichten, dass die Zellen zur gezielten Spezialisierung oder zur Vermehrung gebracht werden. Speziell der Synthetischen Biologie zuzurechnen sind vor allem solche Forschungen, die innerhalb der Zelle Signalproteine so verändern, dass sich die gewünschte Vermehrung oder Spezialisierung einstellt. Es konnte experimentell bereits demonstriert werden, welche Rolle einige ausgewählte Signalproteine für diese Prozesse spielen.³³

4.2 Anwendungen im Bereich Umwelt und Umweltschutz

Im Bereich Umwelt und Umweltschutz werden vor allem zwei Einsatzfelder der Synthetischen Biologie diskutiert: Die Herstellung von alternativen Energieträgern und die Verwendung von synthetischen Mikroorganismen bei der Bekämpfung von Umweltverschmutzungen.

a) Herstellung alternativer Treibstoffe

Dieselben Ansätze innerhalb der Synthetischen Biologie, die zur synthetischen Herstellung von Arzneimitteln führen können, können prinzipiell auch genutzt werden, um alternative Energieträger zu erzeugen. Die Herstellung alternativer Treibstoffe ist angesichts

³³ Ibid.

des CO₂-Ausstoßes vieler üblicher Energiegewinnungs- und Energiebereitstellungsverfahren und angesichts der Abhängigkeit von begrenzten Erdölressourcen ein drängendes gesellschaftliches Problem und fester Bestandteil der öffentlichen Diskussion. Entsprechend viel Aufmerksamkeit ist diesen Projekten sicher.

In der Diskussion befinden sich vor allem die Herstellung von Ethanol und Wasserstoff mit Hilfe synthetischer Mikroorganismen.³⁴ Auf konkrete Ergebnisse dieser Forschungen muss derzeit allerdings noch gewartet werden. Man muss bei dem, was in der Literatur derzeit vereinzelt zu finden ist, wohl am ehesten von Ankündigungen sprechen. Dennoch ist auch hier, wie auch bei der Produktion von Arzneimitteln, das Potential bemerkenswert. Wenn es gelingt, das Programm der Modularisierung umzusetzen und komplexe metabolische Prozesse zielgerichtet zu synthetisieren, dann wird es denkbar, dass eines nicht allzu fernen Tages die effiziente Produktion umweltschonender Energieträger Wirklichkeit wird.

Dass auch dieses Projekt aus wirtschaftlicher Sicht für Erfolg versprechend gehalten wird, zeigt sich daran, dass zum Beispiel dasjenige Unternehmen, das die Herstellung von Artemisinin kommerziell voran treibt, auch auf dem Gebiet der Herstellung alternativer Treibstoffe aktiv ist.³⁵ Ganz ähnlich wirbt ein zweites Unternehmen aus den USA, das vor allem an der Herstellung eines Minimalbakteriums forscht, mit den zukünftigen Möglichkeiten der Erzeugung alternativer Treibstoffe.³⁶ Das Ziel ist hier, einem Minimalbakterium ein synthetisches Genom zur Erzeugung von Biokraftstoff einzusetzen.

b) Hilfe bei Umweltschäden

Der Einsatz von gentechnisch modifizierten Organismen, um verseuchtes Erdreich zu reinigen oder Erdölteppiche zu beseitigen, ist als mögliche, effektive Methode zur Hilfe bei solchen Katastrophen häufiger erwogen worden. Mit Hilfe der Synthetischen Biologie könnte es gelingen, Organismen wie zum Beispiel Pilze so

³⁴ Shreeve 2006.

³⁵ Amyris Biotechnologies: Biofuels Project, http://www.amyrisbiotech.com/projects_biofuels.html.

³⁶ Synthetic Genomics, <http://www.syntheticgenomics.com/index.htm>.

umzucodieren, dass sie die Fähigkeit zum Abbau von Schadstoffen erhalten.³⁷ Konkretere Forschungsarbeiten in dieser Richtung, die direkt der Synthetischen Biologie zuzurechnen wären, liegen bisher jedoch nicht vor.

4.3 Biosensoren und Bioschalter

Biosensoren und biologische Schaltkreise können in vielen der genannten Anwendungsbereiche zum Einsatz kommen, die Anwendungsziele leichter oder besser erreichbar machen oder sogar erst ermöglichen.

Biosensoren sind organische Moleküle, die auf Umweltreize reagieren und so zelluläre Prozesse in Gang setzen können. Sie wären zum Beispiel integraler Bestandteil eines Bakteriums, das im menschlichen Körper erste Krankheitszeichen registrieren und bekämpfen soll. Biologische Sensoren lassen sich auf unterschiedliche Weisen konstruieren. Sie können zum Beispiel zellintern angelegt sein, indem eine RNA-Sequenz, die kleine Moleküle bindet, verbunden wird mit einer RNA-Sequenz, die die Genexpression steuert.³⁸ Eine eher spielerische Anwendung, die die Umsetzbarkeit dieses Vorgehens aber dennoch eindrucksvoll aufzeigt, ist die Entwicklung eines biologischen Koffeinsensors, der zwischen Kaffee, Espresso und entkoffeiniertem Kaffee unterscheiden kann.³⁹

Ein zweites Verfahren besteht darin, ein extrazelluläres Protein mit einem intrazellulären Signalübertragungsbereich zu koppeln. Mit diesem Verfahren konnten Bakterienkulturen von *E. coli* so modifiziert werden, dass sie auf die Bestrahlung mit Licht hin ein entsprechendes Hell-Dunkel-Bild reproduzierten.⁴⁰ Es wurde so, mit anderen Worten, ein einfacher biologischer Fotofilm hergestellt, indem einem Organismus eine ganz neue Funktion hinzugefügt wird.⁴¹

Biologische Schaltkreise sind Moleküle, die in ihrem Verhalten logische Operatoren wie «UND» oder «ODER» repräsentieren. Ein «UND»-Operator könnte zum Beispiel sicherstellen, dass eine Zelle erst dann bestimmte metabolische Prozesse in Gang setzt, wenn von einer Anzahl von äußeren Signalen alle aktiv sind. Weil Bioschalter wie Biosensoren auf bestimmte äußere Bedingungen hin eine definierte Reaktion zeigen, ist die Entwicklung von Bioschaltern mit der Entwicklung von Biosensoren eng verwandt. Ähnliches gilt für ihr Einsatzfeld: Auch biologische Schalter bilden wie Biosensoren das Rückgrat für viele der oben genannten biologischen Systeme. Erfolgreiche Entwicklungen zu biologischen Schaltern liegen bereits vor.⁴²

³⁷ European Commission 2005:16.

³⁸ Isaacs/Dwyer/Collins 2006:548f.

³⁹ Voigt/Keasling 2005:305.

⁴⁰ Levskaia et al. 2005.

⁴¹ Drubin/Way/Silver 2007:248.

⁴² European Commission 2005:23.

5. Was ist neu an der Synthetischen Biologie?

Um die spezifischen ethischen und philosophischen Herausforderungen einer neu entstehenden Forschungsrichtung zu erfassen, ist es unerlässlich, sich deutlich vor Augen zu führen, in welcher Hinsicht sich diese Wissenschaft von bereits existierenden Wissenschaftsbereichen unterscheidet. Was also ist neu an der Synthetischen Biologie?

Anwendungsorientierte Wissenschaften – zu denen die Synthetische Biologie gehört – werden üblicherweise unterteilt in «enabling technologies», die die Voraussetzungen schaffen für die Durchführung der entsprechenden Forschungen, in die Forschung zur Grundlagenentwicklung und in die sich daraus ergebenden angewandten Technologien. Im Fall der Synthetischen Biologie gehören zu den technologischen Voraussetzungen vor allem die Gensynthese-Technologien, deren Möglichkeiten sich beständig erweitern. Das Forschungsfeld aus in-vivo- und in-vitro-Ansätzen und den Forschungen um diese paradigmatischen Kerne herum bilden den Bereich der Grundlagenentwicklung. Zu den angewandten Technologien zählen dann die gerade erwähnten technischen Anwendungen, die mit der Synthetischen Biologie perspektivisch verbunden sind. Will man die Frage beantworten, was neu ist an der Synthetischen Biologie, dann sind von diesen drei Bereichen vor allem die technologischen Voraussetzungen und die Grundlagenentwicklung von Interesse.

Wie der kurze Blick auf die Geschichte bereits gezeigt hat, ist die Synthetische Biologie kein Fach, das aus dem Nichts kommt. Es gibt im Großen Kontinuitäten und wissenschaftsinterne Mechanismen, die die Entstehung der heutigen Synthetischen Biologie möglich gemacht haben, darüber hinaus gibt es auch viele konkrete Anknüpfungspunkte im Kleinen an bestehende Forschungsrichtungen. Zu nennen sind hier vor allem die Gentechnik und die Systembiologie, aber auch die Ingenieurwissenschaften, die Infor-

mationstechnik und die Nanotechnik. Aufgrund dieser vielfältigen Bezüge gilt die Synthetische Biologie einigen Kommentatoren geradezu als ein Paradebeispiel für die vielfach beschworenen «converging sciences».⁴³ Insbesondere die Nähe zur Gentechnik lässt dabei durchaus die kritische Frage zu, was denn an der Synthetischen Biologie eigentlich neu ist und, damit zusammenhängend, ob diese Wissenschaft ethisch neue Herausforderungen mit sich bringt.

Man wird darauf zunächst nur mit quantitativen Hinweisen antworten können: Im Bereich der technologischen Voraussetzungen steigen die Fähigkeiten der Gensynthese bis hin zur Synthetisierung ganzer Genome. Im Bereich der Grundlagenentwicklung ist das Ziel je nach Forschungsrichtung nicht nur, einzelne Gensequenzen eines bestehenden Organismus auszutauschen oder zu ändern, sondern einem genetisch minimierten Bakterium ein ganzes, synthetisch erzeugtes Genom einzusetzen. Es wird, wie gesehen, außerdem daran geforscht, metabolische Zellprozesse und Signalübertragungsmechanismen nachzubilden und das «Alphabet des Lebens», bestehend aus vier verschiedenen organischen Basen, durch weitere Basen zu ergänzen oder ganz zu ersetzen und nicht-natürliche Aminosäuren in synthetische Organismen zu inkorporieren.

Es lässt sich deshalb zunächst sagen, dass eine Ausweitung des technisch Manipulier- und Steuerbaren zu konstatieren ist. Mit der Synthese größerer Genome und der Entwicklung, auch große Gen-Fragmente handhaben zu können, rücken nicht mehr nur einzelne, kürzere DNA-Abschnitte, sondern ganze Genome in den Bereich des technisch gestaltenden Zugriffs.⁴⁴ So ist es vor kurzem gelungen, das vollständige Genom von *Mycoplasma genitalium*, eine DNA-Struktur mit über 580000 Bausteinen, synthetisch zu erzeugen, ein deutlicher Unterschied zur klassisch-gentechnischen Synthetisierung eines Plasmids mit 5000 Elementen.⁴⁵ Gentechnische Forschungen wie die Übertragung von Teilen des menschlichen Immunsystems in Mäuse zur Erzeugung menschlicher

⁴³ ETC Group 2007:5.

⁴⁴ Itaya et al. 2008; Itaya et al. 2005.

⁴⁵ Gibson et al. 2008.

Antikörper⁴⁶ und die Implantierung der Beta-Karotinsynthese in Reis⁴⁷ werden auf diese Weise fortgeführt und quantitativ erweitert. Darüber hinaus wird, wie erwähnt, das Genom im Rahmen der Forschungen zur Synthetischen Biologie mit neuartigen Ausgangsmaterialien erweitert und neu gebildet und neben dem Genom werden weitere molekulare Zellstrukturen nachmodelliert und so kontrolliert steuerbar.

Wenn nun auch jeder dieser für die Synthetische Biologie charakteristischen Punkte für sich genommen eher als quantitativer, denn als qualitativer Fortschritt erscheint, wird man in der Summe dieser Entwicklungen doch behaupten können, dass die Synthetische Biologie auch qualitativ ein neues Forschungs- und Technikfeld eröffnet, auch wenn es nicht möglich ist, genau zu definieren, wo der Wechsel von Quantität in Qualität genau anzusiedeln ist.⁴⁸

Entscheidend für diesen Wechsel ist, dass sich der Blick auf den zu erforschenden und zu steuernden Organismus ändert. Basis gentechnischer Manipulationen ist ein vorhandener Organismus mit für den Menschen interessanten Eigenschaften. Diese vorhandenen Eigenschaften werden dann gentechnisch optimiert, so dass sie wirtschaftlich nutzbar werden. Die Perspektive der Synthetischen Biologie jedoch ist nicht mehr zwangsläufig an vorhandenen Organismen orientiert. Weil im Fall der Synthetischen Biologie das gesamte Genom und die gesamte molekulare Struktur einzelliger Organismen technisch gestaltbar sind, sind vorhandene Organismen und vorhandene Eigenschaften für die Synthetische Biologie letztlich nur zufällige Beispiele dafür, was sich mit den Bausteinen der Natur zusammensetzen lässt. Wenn ein Organismus gesucht wird, der bestimmten Interessen dienen soll, dann ist es das Ideal der Synthetischen Biologie, diesen Organismen gezielt auf die Interessen hin zu entwerfen und herzustellen.

Mit der Synthetischen Biologie wird deshalb das Phänomen des einzelligen Lebens bzw. des Lebens auf zellulärer Ebene auf eine Weise der technischen Gestaltbarkeit zugänglich gemacht wie es nie zuvor der Fall war. War die Gentechnik noch gebunden an

bereits existierende Formen des Lebens und beschränkt auf den Austausch einzelner Gensequenzen, so nimmt es die Synthetische Biologie in Angriff, Lebensformen in weitgehender Ablösung von der Natur zu entwerfen und herzustellen. Einhergehend mit einem Herstellungsprozess, der, so die Ambitionen, gekennzeichnet sein wird durch Computersimulation und -konstruktion, Modularisierung und Standardisierung, initiiert die Synthetische Biologie so einen Perspektivwechsel von der gentechnischen Manipulation hin zur synthetischen Kreation, den man als qualitativen Sprung beschreiben kann.⁴⁹

Beispielhaft lässt sich dieser Sprung an einem wissenschaftlichen Wettbewerb verdeutlichen, der sich mit dem Aufkommen der jüngsten Initiativen zur Etablierung der Synthetischen Biologie entwickelt hat: der «international Genetically Engineered Machines»-Wettbewerb (iGEM) fand 2003 zum ersten Mal statt, veranstaltet vom Massachusetts Institute of Technology. 2007 beteiligten sich 54 Teams aus 19 Ländern.⁵⁰ In diesem Wettbewerb konstruieren und entwickeln junge Wissenschaftler und Studierende DNA-basierte biologische Regelkreise, Proteine mit nicht natürlichen Eigenschaften oder künstliche Zell-Zell-Kommunikations- oder Signalleitungsprozesse.

Eine Vorgabe für die Teilnahme ist, dass die genetischen Module, die hierfür entwickelt werden, über kompatible Endstücke verfügen, um das schnelle Zusammenfügen verschiedener Module zu ermöglichen. Zudem müssen die Module in einer Materialbank, der so genannten «BioBricks»-Datenbank, deponiert werden. Neben den Teilnehmern des Wettbewerbs können auch andere interessierten Personen auf diese Datenbank zugreifen und zu ihr beitragen.⁵¹

Diese Materialbank soll als Baukasten genutzt werden, um die zukünftige Entwicklung immer komplexerer synthetisch-biologischer Systeme zu vereinfachen und zu beschleunigen. Genetische Bausteine sollen nicht mehr wie in der Gentechnik üblich ad hoc in Einzelfällen manipuliert und ersetzt werden, sondern sie sollen

⁴⁹ Boldt/Müller 2008.

⁵⁰ iGEM Wettbewerb, <http://www.igem.org>.

⁵¹ BioBricks Foundation, <http://biobricks.org>; Registry of Standard Biological Parts, <http://partsregistry.org>.

in Form von standardisierten Bausteinen (nicht zufällig in Analogie zu Legosteinen «BioBricks» getauft) gezielt zur Verrichtung spezifischer Aufgaben entwickelt und zugänglich gemacht werden können.⁵²

Der iGEM-Wettbewerb verdeutlicht auf diese Weise zwei zentrale Gedanken, die der Synthetischen Biologie zugrunde liegen. Zum einen zeigt sich, wie sehr die Synthetische Biologie das alte gentechnische Verfahren der Verbesserung des Vorhandenen ersetzt durch die Schaffung des Neuen, das bestimmte, genau definierte Aufgaben erfüllen soll, die unter Umständen kein bekannter natürlicher Organismus auch nur ansatzweise erfüllen kann. Zum anderen wird deutlich, wie sehr der Zugriff der Synthetischen Biologie auf die Natur dabei auf Modularisierung und Kompatibilität der erzeugten biologischen Systeme setzt.

Zwar muss bei dem Versuch, die Neuerungen der Synthetischen Biologie zu erfassen, in Rechnung gestellt werden, dass die Ansätze zu Definitionen des Feldes «Synthetische Biologie» bisher noch zu keinem kanonischen Ergebnis geführt haben und zu einem nicht unerheblichen Teil sicherlich auch davon abhängen, wo sich die aktiven Forscher selbst verorten werden und welche Projekte innerhalb der Synthetischen Biologie letztlich nachhaltigen Einfluss ausüben werden. Im Hinblick auf die genannten Tendenzen lässt sich jedoch zumindest eine tentative Annäherung an die Neuerungen der Synthetischen Biologie vornehmen und wie folgt zusammenfassen:

Neuerungen der Synthetischen Biologie im Vergleich zur Gentechnik	
Systematische Analyse und Synthese	Die theoretischen Grundlagen der Gentechnik werden wesentlich weiter gefasst und umfassender genutzt als bisher. Erkenntnisse der analytisch ausgerichteten Systembiologie werden konsequent angewandt und systembiologische Forschung wird initiiert.
Modularisierung und Standardisierung	Diese Erkenntnisse werden mit Hilfe von Anleihen bei den Ingenieurwissenschaften und der Informatik in einem Umfang für die Anwendung umsetzbar und der industriellen Verwertung zuführbar, wie dies in der klassischen, «handwerklichen» Gentechnik nicht möglich war.
Neue Lebensformen	Die Anwendung dieser Erkenntnisse ermöglicht sehr viel weiter reichende Änderungen von Zellen und einzelligen Organismen als in der Gentechnik denkbar. Sie reichen bis zur Erschaffung neuer, bisher nicht natürlich vorkommender Formen des Lebens. Die neuen Formen des Lebens können sich durch besondere, genetisch neu codierte Fähigkeiten auszeichnen, sie können sich aber auch durch neue biologische Substrate des Lebendigen definieren. Der umfassendere Einsatz systembiologischer Forschung bedeutet auch, dass nicht nur gezielte Veränderungen von Genen und Genomen angestrebt wird, sondern auch die von metabolischen Netzwerken und intra- und interzellulären Signalstrukturen
Von der Manipulation zur Kreation	Mit der Möglichkeit der Erschaffung neuer Lebensformen geht ein Perspektivwechsel von der Manipulation vorhandener Organismen zur Neuschaffung biologischer Systeme einher, für die die natürlichen Organismen nicht mehr notwendiges Ausgangsmaterial sind, sondern ein Beispiel unter vielen denkbaren Möglichkeiten für die Gestaltung von Leben.

⁵² Drubin/Way/Silver 2007:251; Ferber 2004:160.

tierbarkeit von Leben diskutiert.⁵³ Auch auf diesen Punkt soll im Folgenden nicht näher eingegangen werden, weil er aus der Gentechnikdiskussion bekannt ist und den Rahmen einer Erörterung, die ethische Implikationen darstellt, sprengen würde.

Aus ethischer und philosophischer Sicht ist bei den Forschungen der Synthetischen Biologie besonders die Verschiebung von der Manipulation in einzelnen Fällen hin zur Kreation bemerkenswert und relevant. «Leben aus dem Labor» ist ein Stichwort, das für Aufmerksamkeit in der Öffentlichkeit sorgen wird und das grundlegende philosophische und anthropologische Fragen aufwirft: Was heißt «Leben», wenn biochemisch von der Synthetisierung von Leben die Rede ist? Inwiefern strebt die Synthetische Biologie an, «neues Leben» zu schaffen? Welche Bedeutung kann man Ausdrücken wie «künstliche Zelle» genau zuschreiben? Was heißt es für den Umgang mit Leben, wenn dieses Leben «künstliches Leben» genannt wird?

Neben diesen ontologischen und anthropologischen Fragen, die sich an den Lebensbegriff knüpfen und die in der Debatte um die sozialen und ethischen Implikationen der neuen Disziplin noch wenig bearbeitet sind, stellen sich dann vor allem auch Fragen in Bezug auf möglichen Missbrauch der Technologie und auf mögliche Schäden für die Natur und den Menschen durch unkontrollierte oder nicht mehr zu kontrollierende Freisetzung von neuen Organismen.

Diskutiert werden in der Literatur außerdem soziale Implikationen des Einsatzes von Verfahren der Synthetischen Biologie für Länder der Dritten Welt. Für diesen Punkt gilt jedoch, dass die damit verbundenen Gefahren im Fall der Synthetischen Biologie nicht auf besondere Weise zusätzlich akzentuiert oder gravierender erscheinen als bei anderen Biotechnologien, die in der Agrar- und Medizinindustrie Anwendung finden. Auf eine umfassendere Darstellung dieses Punktes soll deshalb hier verzichtet werden.

Es werden im Rahmen der ethischen Implikationen der Synthetischen Biologie schließlich rechtliche Erwägungen zur Paten-

⁵³ Bhutkar 2005; Rutz 2007.

6. Ontologische und anthropologische Implikationen

Für die Einschätzung der Synthetischen Biologie ist, zumindest zur Zeit, nicht die Frage entscheidend, ob es ethisch problematisch ist, dass der Mensch «Leben» selbst aus dem Nichts schaffen kann; das ist offenbar auf absehbare Zeit nicht möglich. Trotzdem stellen sich mit der Synthetischen Biologie neuartige ontologische Probleme, die in verschiedener Hinsicht mit dem Lebensbegriff eng verbunden sind.

Der Begriff des Lebens spielt in der Biologie und in ihrer wissenschaftstheoretischen Grundlegung eine ambivalente Rolle. Einerseits ist die Biologie per definitionem die Wissenschaft des Lebens, andererseits tut sie sich schwer damit, Leben so zu definieren, dass tatsächlich alle Facetten des Lebendigeins erfasst sind. Je komplexer die Lebensformen werden, desto unzufriedener wird man mit allzu basalen Bestimmungen sein und desto schwieriger wird es, die Entfaltungsbedingungen der Organismen nicht auch unter normativen Aspekten zu betrachten oder Momente der Zielgerichtetheit zu beschreiben. Die Debatte darüber, inwieweit man teleologische Modelle – also Modelle, die von der Ausrichtung auf «natürliche Ziele»⁵⁴ ausgehen – «teleonom», d.h. mit einer Modellvorstellung, die sich bewusst an Kausalitätszusammenhängen nach Maßgabe der *causa efficiens*, einem Ursache-Wirkungs-Zusammenhang im engeren Sinne, und nicht nach Maßgabe einer Finalursache orientiert, sei als Beispiel für die Schwierigkeiten der angemessenen Beschreibung des Lebendigen genannt. Meist werden daher bei der Definition von Leben verschiedene «Grade», «Stufen» oder Qualitäten des Lebendigeins angegeben,⁵⁵ mit deren Hilfe man bestimmte minimale Definitionen anreichern kann, so dass bei höheren Organismen bestimmte Charakteristika des

⁵⁴ Spaemann/Löw 2005.

⁵⁵ Mayr 1997.

Lebens in differenzierterer Form erscheinen. Ein Beispiel dafür ist das Moment der «Kommunikation» mit der Umwelt. Diese kann zwar bei Einzellern in metaphorischer Hinsicht ein Kriterium des Lebendigen sein, doch wird man erst ab einem gewissen Komplexitätsgrad in einem gehaltvollen begrifflichen Sinn von Kommunikationsstrukturen sprechen.

Dieses Komplexitätsproblem in der Beschreibung des Lebendigen gilt vor allem auch für die Struktur des «Selbst», die in vielfältiger Weise biologische Entitäten zu charakterisieren scheint. Selbst Einzeller scheinen «selbst», «von sich aus» etwas zu machen, etwa sich fortzupflanzen, doch bekommt die Rede vom Selbst bei höheren Organismen eine ganz andere Qualität – eine Qualität, die zweifeln lässt, ob es sich überhaupt um verwandte Selbst-Begriffe handeln kann. Gleichwohl finden sich nicht selten auch bei strengen Biologen versteckte teleologische Ausdrucksweisen – etwa indem Einzellern Wollens- oder Handlungsmuster unterstellt werden oder sogar von «Strategien des Lebens» die Rede ist. Dies kann man als Indiz dafür werten, dass trotz aller biochemischen Reduktionismen, die tendenziell zu einer Einebnung des Unterschiedes zwischen Belebtem und Unbelebtem führen, doch das Bedürfnis da ist, diesen Unterschied deutlich aufrecht zu halten.

Weiterhin charakteristisch für den biologischen Lebensbegriff ist, dass er sich als rein deskriptiven Begriff versteht und normative Aspekte wie die Werthaftigkeit des Lebens kaum berücksichtigt. Gerade hier liegen die größten Probleme und finden sich die wichtigsten Herausforderung des interdisziplinären Diskurses: denn es wird immer diese Doppelperspektive auf das Leben geben müssen, die Perspektive der angemessenen wissenschaftlichen Beschreibung der entsprechenden Entität auf der einen und die Frage nach dem möglichen Eigenwert dieser Entität auf der anderen Seite. Das Verhältnis dieser beiden Perspektiven ist hoch diffizil und muss mit philosophischen und wissenschaftstheoretischen Kautelen (wie etwa die Beachtung der Gefahr des naturalistischen Fehlschlusses) versehen werden. Doch gerade daher bleibt die Herausforderung, das Normativ-Evaluative mit dem Deskriptiv-Empirischen systematisch in Verbindung zu bringen, bestehen.

Wenn es um die ethische Bewertung der Synthetischen Biologie geht, gilt es zunächst eine spezifische Problemsensibilität zu entwickeln. Denn vor der Frage nach dem konkreten Umgang mit

den Produkten der Synthetischen Biologie muss geklärt werden, was es überhaupt für Entitäten sind, die die Synthetische Biologie produziert. Blickt man allein schon auf Begriffe wie «artificial cell», dann stellt sich eine Reihe von Fragen, die in ontologischer und anthropologischer Hinsicht von großer Relevanz sind. Die ethische Einschätzung darf daher nicht nur die Folgen neuer Technologien im Blick haben, sondern sie muss gerade in diesem Fall auch sensibel bleiben für die möglichen Veränderungen unseres Lebensbegriffes – allein durch die forschungspolitischen oder experimentstrategischen Verwendungen der Begriffe «Leben» oder «lebendig». Gleichzeitig muss sie auch gegenüber dem spezifischen ontologischen Charakter der Entitäten, die die Synthetische Biologie produziert oder produzieren will, aufmerksam sein. Im Folgenden sollen vor diesem Hintergrund vier Problemfelder unterschieden werden:

- *Erstens* muss geklärt werden, wie «Leben» im Rahmen der Synthetischen Biologie definiert wird, mit welcher Intention dies geschieht und was die Definition an Vorannahmen und Hintergrundvorstellungen impliziert. Dabei ist bedeutsam zu klären, wo die Grenzen solcher Definitionen liegen und ob die spezifische Verwendungsweise des Lebensbegriffes weiterreichende Konsequenzen für unseren alltäglichen, philosophischen oder normativen Lebensbegriff haben könnte.
- *Zweitens* muss untersucht werden, welche Bedeutung der Begriff des Lebens hinsichtlich neuer Lebensformen hat, denn auch wenn mit Hilfe der Synthetischen Biologie nicht «Leben» selbst geschaffen werden kann, so kann doch «neues Leben» produziert werden in dem Sinne, dass Lebensformen neuer Qualität entstehen, die über punktuell veränderte Lebensformen hinausgehen; in diesem Sinne soll im Folgenden von «neuen Lebensformen» gesprochen werden. Und hinsichtlich solcher neuer Lebensformen stellt sich zurecht die Frage nach den Grenzen sowohl der Herstellung von als des Umgangs mit diesen Entitäten.
- *Drittens* muss kritisch geprüft werden, wie durch bestimmte Begriffe («artificial cell») oder Metaphern («living machines») im Rahmen der Synthetischen Biologie ein neuartiger Gegenstandsbereich auf eine spezifische Weise konstituiert wird. Da-

bei muss es um die Frage gehen, wann und in welcher Weise problematische Ontologisierungen vorgenommen werden – bis hin zu der kritischen Rückfrage, ob sogar etwas zu etwas gemacht wird, was es gar nicht ist.

- *Viertens* müssen die drei Fragen, die den ontologischen Status der Gegenstände betreffen, mit denen es die Synthetische Biologie zu tun hat bzw. die die Synthetische Biologie produziert, durch ein anthropologisches Problemfeld ergänzt werden: Denn wenn es tatsächlich möglich ist, neue Formen von lebendigen Objekten zu produzieren, ändert sich möglicherweise auch das Verhältnis des Menschen zu diesen seinen Produkten. Denn das menschliche Selbstverständnis ist eng geknüpft an die Art und Weise, wie Wirklichkeit konstituiert wird. Und wenn in Zukunft der Verfügbarkeitsrahmen hinsichtlich des Lebendigen in fundamentaler Weise erweitert wird – wenn es um die Möglichkeit des Schaffens gänzlich neuer Lebensformen geht –, kann man davon ausgehen, dass das Bild des Menschen als Homo faber neue Facetten bekommt – der Mensch auch als Schöpfer –, die unter Umständen Identitätsprobleme hervorrufen können.

Um die ontologischen und anthropologischen Probleme der Synthetischen Biologie zu fixieren, müssen hinsichtlich der aufgerissenen Problemfelder insgesamt drei Perspektiven unterschieden werden (die allerdings nicht völlig isoliert voneinander betrachtet werden können):

- Die *biologisch-philosophisch-wissenschaftstheoretische Perspektive* untersucht einerseits den im Kontext der Synthetischen Biologie (strategisch) verwendeten Begriff des Lebens (Was ist «Leben»? Welche Implikationen hat der Lebensbegriff?) und prüft andererseits die biologischen Entitäten auf ihre «Neuheit» (Ab welchem Grad der Veränderung ist eine Lebensform in einem gehaltvollen Sinne als neu zu bezeichnen? bzw.: Welche Kriterien kann es für die Neuheit von Lebensformen geben?).
- Die *ontologisch-phänomenologische Perspektive* auf die Synthetische Biologie untersucht, was für ein Gegenstandsbereich sprachlich-begrifflich-metaphorisch konstituiert wird (Was sind überhaupt «artificial cells» oder «living machines»? Kann es solche hybriden Entitäten überhaupt geben?). Und vor diesem

Hintergrund gilt es zu klären, wo die logischen und normativen Grenzen solcher Ontologisierungen liegen.

- Die *anthropologische Perspektive* fragt, inwiefern die Produkte der Synthetischen Biologie Ergebnisse nicht nur eines Herstellungs- sondern auch eines Schöpfungsprozesses sind und inwiefern sich damit das menschliche Selbstverständnis ändern kann. Damit werden die anderen beiden Perspektiven ergänzt, denn es geht nicht nur um Produkte, sondern auch um Produzenten, die sich selbst wiederum in dem Produktionsprozessen ändern.

6.1 Leben definieren

Anders als sonst bei biologischer Forschung oder biotechnologischer Anwendung spielt die Definition des Begriffs des Lebens in der Synthetischen Biologie eine zentrale Rolle, denn ob es sich um Erkenntnisse über die Entstehungsbedingungen des Lebens oder ob es sich um den Anspruch handelt, Lebensformen zu schaffen, die völlig «neu» sind (in dem Sinne, dass sie über Eigenschaften verfügen, die keine natürlich vorkommenden Organismen haben) – in beiden Fällen ist es notwendig, zu klären, was unter Leben verstanden wird. Die wissenschaftspolitische Strategie, die hinter den Versuchen steht, Leben zu definieren, beschreibt Andreas Brenner wie folgt:

«Vermeiden es Naturwissenschaftler häufig, die Frage zu beantworten, was Leben ist, so sieht das bei den Pionieren der Synthetischen Biologie anders aus, sie sehen sich durch ihre eigene Ambition, Leben zu erschaffen oder, wie es in der Fachsprache heisst, Leben zu <synthetisieren>, darauf verwiesen, zu sagen, was Leben sei. Dieser Herausforderung können sie sich schon aus dem einfachen Grunde nicht entziehen, weil sie andernfalls ihre eigenen Forschungsanstrengungen nicht als zielführend ausweisen könnten.»⁵⁶

Abgesehen von den Problemen um die forschungspolitischen oder forschungsstrategischen Aspekte, die sicher ihren Einfluss auf bestimmte Definitionsverwendungen haben, herrscht trotz aller

⁵⁶ Brenner 2007:156.

begrifflichen und wissenschaftstheoretischen Schwierigkeiten, die der Lebensbegriff mit sich bringt⁵⁷ – inwiefern ist das Lebendige tatsächlich vom Nicht-Lebendigen unterschieden? Wie «offen» muss der Begriff des Lebens konstitutiv bleiben? –, weitgehend Einigkeit, dass mindestens drei Eigenschaften gegeben sein müssen, um von «Leben» in einem basalen biologischen Sinne reden zu können: Reproduktion, Metabolismus und Evolutionsfähigkeit.⁵⁸ Dies ist nicht nur empirisch, sondern auch wissenschaftstheoretisch abgesichert. Georg Toepfer etabliert etwa in seiner integrativen Theorie des Lebens die Begriffe «Organisation», «Regulation» und «Evolution» als fundamentale Prinzipien und fundiert damit die genannte Minimaldefinition in weiteren wissenschaftstheoretischen und philosophischen Rahmen.⁵⁹

Typische Definitionen im Kontext der Synthetischen Biologie sind etwa:

«One may choose quite a general definition, defining life at a cellular level as the concomitance of three basic properties: self-maintenance (metabolism), self-reproduction and evolvability.»⁶⁰

Oder, in einer programmatischen Variante:

«To a synthetic biologist, life is a special kind of chemistry, one that combines a frequently encountered property of organic molecules (the ability to undergo spontaneous transformation) with an uncommon property (the ability to direct the synthesis of self-copies), in a way that allows transformed molecular structures themselves to be copied. Any chemical system that combines these properties will be able to undergo darwinian selection, evolving in structure to replicate more efficiently. In a word, <life> will have been created.»⁶¹

Solche Lebensdefinitionen sind nach bestimmten Maßstäben zweifelsohne «richtig» und sie haben den Vorteil der Operationa-

⁵⁷ Krohs/Toepfer 2005.

⁵⁸ Mayr 1997.

⁵⁹ Toepfer 2005.

⁶⁰ Luisi/Ferri/Stano 2006:1.

⁶¹ Benner 2003.

lisierbarkeit. Dadurch, dass die Kriterien klar benannt sind, kann die Definition Eingang in die entsprechende biochemische Hypothesenbildung finden. Und doch muss gefragt werden, ob mit den biologisch eingeführten Definitionen nicht wesentliche Aspekte verloren gehen, die gerade für die ethische Einschätzung der Synthetischen Biologie von zentraler Bedeutung sind.

In der Reduktion auf die genannten biochemischen Mindesteigenschaften wird Leben in einem analytischen Sinne beschrieben. Damit ist aber nur eine bestimmte Hypothesenbildung möglich, die für die entsprechenden Laboranforderungen ausreichend ist. Man könnte im Sinne von Hans-Jörg Rheinberger solche Lebensdefinitionen als Teil eines Experimentalsystems beschreiben, in dem «Leben» als ein Aspekt von epistemischen Dingen oder sogar selbst als eine Art «epistemisches Ding» fungiert.⁶² Die Art und Weise, wie Lebensschöpfungs- oder Synthetisierungsprozesse beschrieben werden, hängen eng am Versuchsaufbau und an den Beweiszielen der entsprechenden Forschung. Das heißt: das Kriterium des Lebendigseins ist von dem Experimentalsystem nicht zu trennen. Insofern bleibt der Lebensbegriff bloß analytisch: Wenn ich die Kriterien des Lebendigseins festlege, kann ich sie in dem entsprechenden Versuch wieder finden bzw. nachweisen.

Daher ist zunächst festzuhalten, dass alle diejenigen Ansätze innerhalb der Synthetischen Biologie, mit deren Umsetzung in absehbarer Zukunft gerechnet werden muss, nicht zum Ziel haben, Leben *de novo* zu schaffen. Es geht vielmehr darum, die Eigenschaften des Lebendigseins in dem entsprechenden Experimentalsystem so zu verorten, dass nicht mehr die Manipulation eines Organismus im Vordergrund steht, sondern die Fokussierung auf die grundlegenden Eigenschaften des Lebens. Damit verschiebt sich die Perspektive des biotechnologischen Eingriffs grundlegend: Es geht nicht mehr darum, einen Mikro-Organismus auf eine bestimmte Funktion hin zu manipulieren, sondern Ziel ist, die Eingriffe in die Zelle auf die Reproduktionsfähigkeit, den Metabolismus und die Evolution selbst zu richten, um diese Kerneigenschaften des Lebendigseins so zu verändern, dass es nicht mehr um die gezielte Manipulation der Zelle geht, sondern um die Veränderung bzw. Synthetisierung von Lebensprozessen selbst. Das Ziel der Entwicklung eines Mini-

malorganismus innerhalb des top-down-Ansatzes ist das zentrale Beispiel für diese Bemühungen.

Doch trotz dieses entscheidenden Paradigmenwechsels in der Anordnung des Experimentalsystems und der damit verbundenen Integration des Lebensbegriffs in Experimentaufbau und Hypothesenbildung, bleibt die Grundlage für alle diese Versuche immer noch vorhandenes Lebendiges. Vor diesem Hintergrund muss man auch auf den Begriff des «Synthetischen» ein kritisches Augenmerk haben, denn die Vorstellung, man könne Leben synthetisieren im Sinne von «aus chemischen Bausteinen völlig neu schaffen», ist – zumindest bislang noch – schlicht irreführend. «Synthetisch» heißt in diesem Kontext vielmehr, dass subzelluläre Elemente in teilweise neuartigen Kombinationen so zusammengesetzt werden, dass sie eine lebende Zelle oder einen lebenden Mikroorganismus bilden. Daher bleiben programmatische Schlagwörter wie «synthesizing life»⁶³ interpretationsbedürftig.

Für die ethische Reflexion ist in erster Linie entscheidend zu klären, was mit der biologischen Nominaldefinition nicht abgedeckt werden kann. Zentral ist dabei, dass in solchen Definitionen unberücksichtigt bleibt, dass sich «Leben» immer in einem bestimmten Kontext zeigt. Wenn in der Synthetischen Biologie neuartige Lebensformen produziert werden können, dann können sich diese wiederum in Wechselwirkung mit anderen Organismen und über einen längeren Zeitraum hinweg evolutiv verändern. Das Potential zu evolutiven Veränderungen ist zwar in der biologischen Nominaldefinition enthalten, aber damit ist noch keine Beschreibung der konkreten Entwicklung einer solchen Lebensform gegeben. Zuspitzend könnte man sagen, dass in der Synthetischen Biologie zwar biologisch genau gesagt wird und im Sinne der Erfüllung der Definition genau gesagt werden kann, *was* Leben ist, dass man damit aber nicht gleichzeitig aussagen kann, *wie* dieses Leben ist. Die entscheidenden Kriterien dafür zu haben, dass das Ergebnis der biologischen Kombinierungen «lebt», heißt nicht, dass man vollumfänglich wissen kann, wie der «Charakter» der entsprechenden Lebensform ist, wie sich diese Lebensform entwickeln wird. Dies wiederum ist nicht mehr rein analytisch über die Definition des Lebensbegriffs zu ermitteln,

⁶² Rheinberger 2006.

⁶³ Szostak/Bartel/Luisi 2001.

sondern verlangt eine längerfristige Beobachtung der entsprechenden Lebensform.

Dies bedeutet aber, dass die enge Lebens-Definition, die die Synthetische Biologie verwendet, wesentliche Aspekte von Leben nicht einfangen kann. Denn ihr entgeht der Aspekt des Unkontrollierbaren, der im Sich-Entwickeln-Können von Organismen liegt. Das heißt nicht, dass die Lebensdefinition im Rahmen der Forschung nicht zutreffend sei und dass man nicht mit ihr arbeiten könne. Im Gegenteil: Methodische Reduktionismen sind die Voraussetzung für das naturwissenschaftliche Arbeiten. Das Problem liegt darin zu vermeiden, dass methodische Reduktionismen auch zu ontologischen Reduktionismen werden.

Weiterhin liegt eines der zentralen ethischen Probleme darin, dass die knappe biologische Definition eine gewisse Kontrollierbarkeit des Lebendigen suggeriert. Gerade aber die Momente der Eigendynamik, die in der Selbstorganisation des Lebendigen liegt, sind für die ethische Bewertung des Umgangs mit Leben von zentraler Bedeutung. Dieser Aspekt ist selbstverständlich im Detail schwierig zu fassen. Es soll an dieser Stelle aber darauf hingewiesen werden, dass der Definition von Leben, die sich im Rahmen der Synthetischen Biologie findet, einige Charakteristika von Lebendigkeit entgehen können.

Auch wenn es im Rahmen der naturwissenschaftlichen Hypothesenbildung nicht notwendig scheint, diese Dimension zu berücksichtigen, in der ethisch-ontologischen Reflexion bleibt es darüber hinaus wichtig, darauf hinzuweisen: Der Begriff des Lebens hat immer auch normative Konnotationen. Das heißt nicht, dass die biologische Definition im Rahmen der Synthetischen Biologie um normative Aspekte angereichert werden muss, doch ist es von entscheidender Bedeutung, dass man der Grenzen der biologischen Lebensdefinition gewahr ist. Denn diese kann auch nicht erfassen, welchen ontologischen und ethischen Status das Lebendige hat, das die Synthetische Biologie produziert.

Wenn man also auch nachweisen kann, dass man Leben in irgendeiner Form «synthetisiert» hat, ist noch nicht geklärt, welchen Wert dieses Leben hat oder haben könnte. Und hier muss man sicher mehrere Ebenen berücksichtigen: Auch wenn man den Lebensschutz von Bakterien zu Recht nicht hoch einschätzt, so spielt die Frage des Wertes vor allem für das Ökosystem als Ganzes eine

Rolle. Auch wenn man den synthetisierten Zellen selbst keinen absolut verpflichtenden Wert im Sinne des Lebensschutzes zusprechen will, spielt es in der Interaktion mit der Umwelt eben doch eine Rolle, wie sich dieses Leben zu anderem Leben verhält.

Die Frage des Wertes stellt sich umso nachdrücklicher, wenn die Synthetische Biologie neuartige Entitäten zu produzieren sucht, die sie in einer ihrer zentralen Metaphern «living machine» nennt. Denn auf diese Weise wird von der Synthetischen Biologie nicht nur die Existenz von Entitäten behauptet, sondern es wird auch unsere Unterscheidung von Lebewesen und Dingen grundsätzlich in Frage gestellt.⁶⁴ Hier scheint die Synthetische Biologie zweigeteilt zu sein: Zum einen betont sie ausdrücklich die Möglichkeit, Lebendiges herstellen zu können und zum anderen klassifiziert sie dieses Lebendige als Maschine oder Maschinenteil. Dazu später mehr: Hier ist es wichtig, darauf hinzuweisen, dass man mit einem minimalisierten Lebensbegriff Gefahr laufen kann, einen reduktionistisch-technizistischen Blick auf das Leben zu generieren.

6.2 Neues Leben oder neue Lebensformen?

Auch wenn die Synthetische Biologie nicht in der Lage ist, Leben «ex nihilo» zu schaffen, so ergeben sich doch spezifische ontologische Probleme, wenn man versucht, die Entitäten, die die Synthetische Biologie produziert, unter dem Aspekt der Neuheit zu klassifizieren. Denn wenn es zum Programm der Synthetischen Biologie gehört, Lebensformen zu schaffen, die es vorher in der Natur nicht gab,⁶⁵ dann muss geprüft werden, bei welchen Lebensformen in welcher Hinsicht von «neu» gesprochen werden kann. Dass die Synthetische Biologie eben nicht nur «im Grunde eine Biotechnologie mit anderen, ausdifferenzierten Mitteln»⁶⁶ ist, zeigt sich auch daran, dass die Synthetische Biologie andere «ontologische Ziele» verfolgt als herkömmliche Biotechnologien. Die Synthetische Biologie ist zum Teil auch Biotechnologie, das gehört zu ihrer Definition, doch heißt das nicht, dass sie nicht prinzipiell

⁶⁴ Schark 2005.

⁶⁵ Siehe exemplarisch European Commission 2006.

⁶⁶ Brenner 2007:164.

auch die Objektbereiche herkömmlicher Biotechnologien verlassen kann, um Lebensformen zu entwickeln, die in qualitativ anderer Weise «neu» sind als genetisch veränderte Bakterien.

Die entscheidende Frage, die sich mit der ontologischen Einschätzung der Synthetischen Biologie verbinden muss, ist: Sind die Entitäten, die sie herstellt, tatsächlich in einem ontologisch-qualitativen Sinne neu, so dass wir zurecht sagen können, wir reden über Lebensformen, die wir nicht zumindest ansatzweise aus der Natur kennen. Das ist wichtig, denn die ethische Bewertung der Synthetischen Biologie wird nicht zu untersuchen haben, ob der Mensch Leben schaffen darf oder nicht, sondern ob er neue Lebensformen kreieren darf oder nicht.

Auch wenn die Frage nach der Neuheit von Lebensformen biologisch und wissenschaftstheoretisch nicht einfach zu beantworten ist, kann man doch mit einem gewissen Recht in dreierlei Hinsicht von einer «ontologischen Neuheit» sprechen, wenn man sich die Verfahren und Ziele der Synthetischen Biologie genauer ansieht:

- Erweiterung: Es ist möglich, Strukturen eines Organismus derart zu erweitern, dass die neue Struktur kein Vorbild mehr in der Natur hat (a).
- Reduktion: Das Anliegen, minimale Basis-Zellen oder Basis-Organismen zu produzieren, führt zu derart reduzierten Varianten, dass sich auch zu diesen Entitäten keine Vorbilder mehr in der Natur finden lassen (b).
- Modularisierung: Die systematische Isolierung und Sammlung zellulärer Elemente nach technologischen Vorbildern als Grundlage der Kreierung von Lebensformen ist ebenfalls ein Novum (c).

a) Erweiterung

Als neu in einem gehaltvollen Sinne kann man Lebensformen beschreiben, die aufbauend auf einem Minimalorganismus biologisch neuartige Eigenschaften aufweisen, oder auch Organismen, die auf biochemischen Strukturen basieren, die es nicht in der Natur gibt. Ein Beispiel für ersteres sind die Vorstellungen, für bestimmte Einsatzzwecke optimierte Bakterien zu schaffen, die auf einem Minimalbakterium wie dem *M. laboratorium* beruhen. Ein Bei-

spiel für die letztere Variante sind die Versuche, die DNA um zwei weitere Basen zu erweitern. Eine DNA mit sechs Basen gibt es in der Natur nicht; die Versuche, Funktionen und Leistungen der DNA auf der Grundlage einer solchen neu entwickelten Struktur zu produzieren und zu erforschen, ist von anderer Dimension als die punktuelle Manipulation einzelner Gene oder Gensequenzen. Während hier bestehende Organismen in einer bestimmten Weise verändert oder «optimiert» werden sollen, geht es in den Projekten zur Erweiterung der DNA darum, auf einer grundlegenden strukturellen Ebene Neues herzustellen. Biologisch-ontologisch kann man hier sicher zu Recht behaupten, solche Lebensformen seien nicht einfach manipuliert, sondern seien in qualitativer Hinsicht als «neu» einzuschätzen.

Auch wenn der manipulierte Organismus ebenso in gewisser Hinsicht «neu» ist, so wird seine Neuheit nur im Vergleich und in Abgrenzung zum Ausgangsorganismus bestimmt. Daher ist es sinnvoll, zwischen «veränderten» oder «verbesserten» Organismen und wirklich «neuen» Strukturen zu unterscheiden, also Strukturen, die kein Vorbild mehr in der Natur haben. Für die ethische Bewertung der Synthetischen Biologie ist diese Unterscheidung von großer Bedeutung, denn in dieser Hinsicht kann man die Synthetische Biologie von den «klassischen» Formen der Biotechnologie abgrenzen. Auch wenn beim jetzigen Stand der Forschung sich die hergestellten Entitäten zu ähneln scheinen, der Unterschied liegt doch in den unterschiedlichen ontologischen Zielsetzungen – und das sollte die ethische Reflexion berücksichtigen.

b) Reduktion

Viele Ansätze, die die Synthetische Biologie – sei es aus reinem Erkenntnisinteresse oder vor dem Hintergrund einer möglichen kommerziellen Nutzung – verfolgt, haben die Herstellung einer «minimal cell» oder eines Minimalbakteriums zum Ziel. Auch in diesem Fall kann man zurecht argumentieren, dass hier neuartige Lebensformen produziert werden, unabhängig davon, ob ein top-down- oder ein bottom-up-Ansatz verfolgt wird. Das Ziel ist jeweils die Herstellung von Zellen oder einzelligen Organismen, die es in dieser «entschlackten» Form nicht in der Natur gibt. Diese Organismen und Zellen sind auf minimale Funktionen reduziert,

um entweder den Ursprung des Lebens zu erforschen oder um ein möglichst vielseitiges «Chassis» für biotechnologische Zwecke zu erhalten. Nun könnte man sagen, dass auch bereits *E.coli* biotechnologisch als ein Chassis fungieren konnte, doch unterscheidet sich dieser Minimalorganismus in der systematischen Konsequenz, mit der seine Herstellung und Erforschung forciert wird. Dies ist von neuartiger Qualität. Denn mit diesem Versuch, die «Reinform» eines Organismus zu bilden, wird zwar Leben nicht von Grund auf neu erschaffen, aber es wird eine Lebensform kreiert, die keinen erkennbaren natürlichen Vorläufer mehr hat.

c) Modularisierung

Auch die systematische Sammlung von biologischen Bausteinen (wie den bereits mehrfach erwähnten «BioBricks») ist eine Neuheit,⁶⁷ weil hier – vor dem Hintergrund eines ingenieurwissenschaftlichen Paradigmas – das Lebendige konsequent modularisiert wird, um beliebig kombinierbare Elemente zusammenzustellen. In dem Kommentar innerhalb der EU-Förderlinie NEST heißt es programmatisch: «The idea is to design and produce simple biological components that can be «plugged together» like electronic parts. These constructed, artificial systems do not exist in the natural world; they are designed for specific functions ranging from protein engineering to computation.»⁶⁸ Dies scheint prima vista noch nichts über die Neuheit der mit den aus den BioBricks «zusammengebauten» Lebensformen auszusagen, doch ist die systematische Sammlung von Lebensbestandteilen vor dem Hintergrund dieses Baukastenprinzips ontologisch durchaus eine Neuheit: Auf systematisch entfaltete Weise wird hier die Entwicklung von Lebensformen möglich, die ähnlich wie die Minimalorganismen ohne natürliche Vorläufer sind.

Zu der Frage nach der Neuheit der Lebensformen gehört also auch die Systematisierung der «Bestandteile» dieser Lebensformen. Denn die Schaffung des ontologisch Neuen hängt mit dem so entstandenen Pool an kreativen Möglichkeiten eng zusammen. Während die traditionelle Biotechnologie in erster Linie einzelne

Funktionen oder Eigenschaften zu verändern suchte, legt sich die Synthetische Biologie durch BioBricks-Datenbanken einen Möglichkeitsraum zurecht, in dem die Produktion von völlig neuen Lebensformen überhaupt erst realisiert werden kann.

Insgesamt kann man also festhalten: Auch wenn man sich sicherlich in einer wissenschaftstheoretischen Grauzone bewegt, um die Unterscheidung zwischen bereits in der Natur vorhandener Lebensform und neuer Lebensform zu treffen, so scheint es sinnvoll zu sein, eine solche Unterscheidung aufrechtzuerhalten, weil dies für die ethische Einschätzung der Synthetischen Biologie von großer Bedeutung ist. Daher ist es gerade hinsichtlich dieses Punktes notwendig, interdisziplinäre Foren zu schaffen, die die Frage nach der Neuheit dieser Entitäten untersucht, um Kriterien zu finden, die eine immer präzisere Bestimmung des ontologisch Neuen möglich machen.

Damit würden dann zentrale ethische Fragen einhergehen: Denn wenn man tatsächlich von neuen Lebensformen in einem gehaltvollen Sinn reden kann, dann ist es nicht abwegig auch von einer weiterreichenden Verantwortung gegenüber diesen Lebensformen und den möglichen Konsequenzen, die diese Lebensformen im Kontext des Ganzen der Natur mit sich bringen, zu sprechen. Es könnte ein Unterschied bestehen zwischen einem verantwortungsbewussten Handeln generell – darunter würden auch herkömmliche biotechnologische Manipulationen und deren Konsequenzen zu subsumieren sein – und einer Verantwortung gegenüber Lebendigem – und sei es noch so rudimentär –, das seine Existenz einem technischem «Schöpfer» verdankt.

6.3 Konstitution einer neuen Gegenstandswelt?

Neben der Untersuchung der Forschungsziele, in denen die Produktion des ontologisch Neuen verankert ist, und neben der Kritik der Einseitigkeit des Lebensbegriffs der Synthetischen Biologie kann aber auch die Ontologisierung – im Sinne der Konstitution einer neuen Gegenstandswelt – die man anhand der Verwendung bestimmter zentraler Begriffe und leitender Metaphern der Synthetischen Biologie diagnostizieren kann, zum Thema gemacht werden. Denn es sind gerade die alltäglichen (oder alltäglich anmu-

⁶⁷ Ferber 2004.

⁶⁸ European Commission 2003:34.

tenden) Begriffe, derer sich eine Wissenschaft bedient, durch die sich unsere Wirklichkeit konstituiert. Und dies gilt insbesondere auch dann, wenn es sich um Metaphern handelt.

In den Aufsätzen zur Synthetischen Biologie, in der Reflexion über Charakter und Eigenart derselben und vor allem in den wissenschaftspolitischen Positionierungen ist, wie erwähnt, programmatisch oder kritisch von «living machines»⁶⁹, «living technologies»⁷⁰, «artificial life»⁷¹ und von «artificial cells»⁷² die Rede. Zudem finden sich unzählige versteckte oder subtile Anklänge an technizistische Vorstellungen vom Lebendigen, etwa wenn die «minimal organisms» produziert werden sollen, um damit ein «chassis»⁷³ zu gewinnen, das man wiederum mit «BioBricks» aufrüsten will (s.o.).

Offenbar etablieren sich in der Synthetischen Biologie technomorphe Metaphern, die den Gegenstand der Synthetischen Biologie bzw. das von der Synthetischen Biologie Produzierte als eine neuartige Entität zwischen Natur und Technik zu verorten suchen. Auch wenn man sagen kann, dass bereits die traditionellen Biotechnologien Lebendiges im Sinne einer bestimmten reduktionistischen Art und Weise des Umgangs mit Lebewesen «verdinglicht» haben, so ist es doch charakteristisch für die Synthetische Biologie, durch die Wahl der Begriffe und Metaphern, nicht nur instrumentell-verdinglichend über die Dinge zu reden und entsprechende Handlungsoptionen daraus abzuleiten, sondern in ihrer Redeweise auch gleichzeitig eine bestimmte neue Sorte von Dingen zu erfinden – paradigmatisch sind hierfür die «living machines».

Gerade weil diese Wendung im Grunde völlig widersinnig ist – denn das Lebendige und das Maschinelle sind trotz aller Analogien per definitionem strikt getrennte Objektbereiche – und gerade weil sie trotzdem aber offenbar eine Intuition über diese neuartigen Entitäten zum Ausdruck bringen kann, muss auf ihr im Folgenden das Augenmerk liegen. Dabei gilt es zu beachten, dass hier eine Wendung vorliegt, die biologisch, wissenschafts-

theoretisch und philosophisch höchst problematisch ist, die aber trotzdem in der Lage ist zu suggerieren, dass man mit ihr neuartige Entitäten benennen könnte. Sprachverwendungen sind immer auch Ontologisierungen.

Um die zentralen Aspekte und Probleme solcher Ontologisierungen zu erfassen, ist es im Kontext der Synthetischen Biologie notwendig, in dreierlei Hinsicht Wendungen wie «living machines» zu untersuchen:

- Die Begriffs- und Metaphernwahl muss kritisch auf ihren semantischen Gehalt hin überprüft werden: Sind die Ausdrücke in logischer Hinsicht sinnvoll? Was sind die kulturhistorischen Implikationen bestimmter Begrifflichkeiten? (a).
- Mit Blick auf die Erfahrungen und Einsichten hinsichtlich der Reifizierung der DNA durch den Begriff-Metapher-Hybrid «Information» können fruchtbare wissenschaftshistorische wie wissenschaftstheoretische Parallelen zur Synthetischen Biologie gezogen werden (b).
- Es muss untersucht werden, ob sich in ontologisch-ethischer Hinsicht etwas am Status der so bezeichneten Entitäten ändert. Gibt es möglicherweise einen Unterschied in der ethischen Bewertung einer «natural cell» und einer «artificial cell»? Oder ist etwa bereits jetzt zu beobachten, dass einem solchen Wert-Unterschied Vorschub geleistet wird (c)?

a) Semantischer Gehalt

Zunächst ist festzuhalten, dass Begriffe und Metaphern wie «artificial cell» und «living machine» in vieler Hinsicht sehr ungenau sind. Um die Produkte der Synthetischen Biologie sinnvoll zu beschreiben, bietet es sich zunächst an, zwischen genetischer (also herkunftsbezogener) Künstlichkeit und qualitativer Künstlichkeit zu unterscheiden.⁷⁴ Auch wenn hier die Differenzierungen im einzelnen schwierig sein mögen, kann man doch sagen, dass die im Rahmen der Synthetischen Biologie hergestellten Zellen in qualitativer Hinsicht «natürlich» blieben, auch wenn der Herstellungsprozess hochartifizial ist. Daher ist die Formulierung «künstliche

⁷⁴ Siehe Birnbacher 2006:7ff.

⁶⁹ European Commission 2008:5; Tucker/Zilinskas 2006:25.

⁷⁰ The New Atlantis, Editorial 2004:101; European Commission 2007:36.

⁷¹ Ball 2004:625; Benner/Sismour 2005:533; The New Atlantis, Editorial 2004:101.

⁷² Luisi 2002:213; Luisi/Ferri/Stano 2006:1; Pohorille/Deamer 2002.

⁷³ Andrianantoandro et al. 2006:9; Ball 2007:33; De Vriend 2006:10.

Zelle» sehr missverständlich, die Zelle bleibt eine «natürliche» und lässt sich deutlich von technischen Produkten abgrenzen. Mit Blick auf den Herstellungsprozess könnte man zwar sagen, dass es sich hier um «künstlich hergestellte» Zellen handelt, doch dies ist ein gewichtiger begrifflicher Unterschied zu der Rede von einer «künstlichen Zelle».

In der vereinfachten Ausdrucksweise «artificial cell» wird der Herstellungsprozess zur Benennung des Produktes derart verwendet, dass es scheint, als handle es sich phänomenal um eine neue Art Zelle. Aber auch wenn es sich um eine gänzlich neuartige Lebensform handelt, bleibt diese in qualitativer Hinsicht «natürlich» – es sei denn, man kombiniert biologische mit (nano)technologischen Elementen. Das soll nun allerdings nicht heißen, dass es nicht sinnvoll ist, diese auf eine neue Art hergestellten Zellen auf eine neue Art zu bezeichnen. Im Gegenteil: Eine präzise begriffliche Differenzierung wäre nur zu begrüßen. Ad hoc bietet sich für eine begriffliche Klärung zunächst an, die anthropologische Debatte um die «Biofakte» aufzugreifen⁷⁵ und auch auf zellulärer Ebene den Begriff «Biofakt» einzuführen, um den eigentümlichen Charakter dieser Zellen zu erfassen. Allerdings müsste man den Begriff noch spezifizieren, denn auch traditionell biotechnologisch Verändertes wäre als «biofaktisch» zu beschreiben. Ein bildhafter Vorschlag, den eigentümlichen Charakter der von der Synthetischen Biologie produzierten Organismen einzufangen, wäre, in Anlehnung an den Goetheschen «homunculus», von «animuncula» zu reden.⁷⁶ Jedenfalls gilt: An dieser Stelle gibt es also einen veritablen seriösen Begriffsbildungsbedarf.

Ein weiteres Problem kann man darin sehen, dass es unklar ist, ob es sich bei der Wendung «living machine» um einen Begriff oder eher um eine Metapher handelt. Wegen dieser Ungenauigkeit scheint mit ihr mehr impliziert zu sein als bei der «artificial cell». Denn «living machine» erinnert an die problematische Tradition der Beschreibung aller außerhumanen Lebewesen als Maschinen, etwa bei Descartes oder bei La Mettrie. Und so scheint sich diese Form des wissenschaftlichen Reduktionismus in der «living machine» ihren Traum von der lückenlosen Erklär- und Kontrollierbar-

keit des Lebendigen erfüllen zu können: Es ist eines der Probleme solcher Ausdrucksweisen, dass sie die zentralen philosophischen und wissenschaftstheoretischen Debatten ignoriert – und damit die Chance auf eine kulturelle Selbstverständigung über diese Themen verpasst. Denn dieses Fragen wurden unter verschiedenen Vorzeichen schon vielfach diskutiert.

Gleichzeitig bleibt diese Wendung aber auch hinter ihrem reflexiven Potential zurück. Es scheint nicht so, als würde das in ihr steckende Paradoxon zu einer produktiven wissenschaftstheoretischen Verständigung führen können. Die Erkenntnisse etwa, die die historische Epistemologie – es sei nur Georges Canguilhem genannt – über das Verhältnis von Organismus und Maschine gewonnen hat, werden nicht zu Rate gezogen.⁷⁷ Das Problem ist, dass die «living machine» nicht als Reflexionsbegriff, sondern als Konstitutionsbegriff fungiert.

Das ethisch Bedeutsame aber ist, dass diese Redeweise impliziert oder implizieren kann, dass diese Lebewesen zu benutzen sind wie Maschinen. Beim jetzigen Stand der Synthetischen Biologie mag «living machine» einfach ein eindringlicher, bildhafter und forschungspolitisch wirksamer Ausdruck sein, doch zeichnet sich bereits heute ein ontologischer Bruch ab, der möglicherweise weitreichende Konsequenzen hat. Denn es könnte sein, dass in Zukunft ein Teil des organischen Lebens technologischen Entitäten zugeschlagen werden muss. Auch wenn die aristotelische Unterscheidung zwischen Natur und Technik bereits mit den traditionellen Biotechnologien an ihre Grenze gekommen ist, wäre die Klassifizierung von phänomenal-qualitativ natürlichen Entitäten als «Maschinen» oder als «Maschinenteile» – die man auch entsprechend als solche verwendet – ein ontologisches Novum. Daher ist dies einer der Aspekte, auf den man möglichst genau schauen sollte. Es könnte sein, dass die scheinbar harmlose Metapher von der «living machine» durch die Suggestion der Schaffung eines neuen Gegenstandsbereich den Umgang mit bestimmten Entitäten verändern könnte.

⁷⁵ Siehe Karafyllis 2006.

⁷⁶ Boldt/Müller 2008.

⁷⁷ Canguilhem 1985.

b) Beispiel «Information»

Mit Blick auf die Wissenschaftsgeschichte kann man am Beispiel der Informationsmetapher im Kontext der Forschung an der DNA sehen, dass solche semantischen Übertragungen in vielerlei Hinsicht problematisch sind.⁷⁸ Die DNA ist in der wissenschaftspolitischen und öffentlichen Auseinandersetzung nämlich nicht einfach nur eine biochemische Entität. Durch semantische Verknüpfung mit der Metapher der Information bekam die DNA einen ontologischen Mehrwert. Durch die Anschaulichkeit der Metaphoriken der Information, der Schrift, des Textes wurde die molekularbiologische Forschung geradezu beflügelt – doch musste sie eine semantischen Last aufnehmen, denn die «Information» musste in diesem Zusammenhang ein Signifikant ohne Signifikat bleiben. Erst durch derartige kulturelle Kontaminierungen werden spezifische Sinnerwartungen geweckt, deren Erfüllung fraglich ist. Solche Ontologisierungen von biochemischen Entitäten können schließlich dazu führen, dass sich auch die Verfügung über diese Entitäten ändert: Erst wenn die DNA als programmierbarer Wissensspeicher gesehen wird, wird mit ihr auch entsprechend umgegangen.

Diese semantisch-ontologischen Probleme finden sich nun auch im Kontext der Synthetischen Biologie wieder. So wie «Information» in der molekularbiologischen Forschung eigentlich nur eine Metapher ist, aber zu einem (scheinbar klaren) Begriff mit bestimmten Implikationen und Forschungsinteressen wird, so ist zu vermuten, dass mit der Rede von den «artificial cells», dem «chassis», der «living machines» den betreffenden Entitäten eine bestimmte Realität verliehen wird, die sie eigentlich gar nicht besitzen. Die Rede von der «living machine» verdinglicht eine Zelle oder einen Mikro-Organismus in eine ganz bestimmte Richtung: Sie trägt zur Artifizialisierung des Natürlichen bei. Da die Sprache die Gegenstandswelt konstituiert, besteht eine echte Gefahr, dass durch solche ungenauen Begriffs- und Metaphernverwendungen schon rein wissenschaftstheoretisch (also noch gar nicht ethisch) eine problematische Ontologisierung vorgenommen wird.

c) Ontologische Probleme

Einige der zentralen ethischen Probleme hängen eng an jenen fragwürdigen Ontologisierungen. Denn zu den wichtigen normativen Problemen der Synthetischen Biologie gehört eben, dass sich mit der Konstitution solcher neuartigen Entitäten, die zwischen Organismus und Maschine anzusiedeln sind, auch der ethischen Status dieser Entitäten ändern könnte. Denn impliziert nicht die Rede von der «living machine», dass hier eine anders geartete Entität thematisiert wird? Dass hier der natürliche Mikro-Organismus von einer lebenden Maschine unterschieden wird?

So ist es durchaus möglich, dass man den «Wert» einer «artificial cell» anders einschätzen wird oder einschätzen könnte als den einer «natural cell». Auf lange Sicht hin ist es denkbar, dass sich eine Art «Zwei-Klassen-Biologie» etabliert, die zwischen «natürlichen» Organismen und «living machines» unterscheidet und entsprechend die Regeln für den Umgang mit diesen Entitäten ändert. Eine «living machine» ist schon dem Wortlaut nach etwas, das man für bestimmte Zwecke einsetzt – und vielleicht sogar einsetzen sollte. Das mag auf zellulärer Ebene ethisch noch nicht relevant erscheinen – doch philosophisch gesehen ist es eben doch erheblich, wenn eine ethisch-ontologische Differenz zwischen zwei phänomenal-qualitativ gleichen Zellen möglich sein soll.

Dieses potentielle ontologische Schisma ist auch in anthropologischer Hinsicht relevant: Denn wenn ein Teil der Natur eher als Maschinen denn als lebende Organismen gesehen wird, kann sich auch das Verhältnis des Menschen zum Lebendigen prinzipiell ändern.

6.4 Das menschliche Selbstverständnis und die Synthetische Biologie

Wenn durch die Synthetische Biologie – im Gegensatz zu traditionellen biotechnologischen Manipulationen von Organismen – tatsächlich ein neuer Objektbereich von Entitäten entstehen sollte, dann hat dies in verschiedener Weise Auswirkungen auf das Selbstverständnis des Menschen als demjenigen, der diese Entitäten herstellt. Denn der Mensch versteht sich selbst zu großen Teilen über

⁷⁸ Janich 2006; Kay 2000; Küppers 1986.

seine Produktionsprozesse und über das, was er herzustellen in der Lage ist, weil er so seine Welt und damit sich konstituiert. Die anthropologische Perspektive ist hier nicht im Sinne einer kompensationsanthropologischen Technikphilosophie verstanden, sondern im Sinne einer kritischen Reflexion über die Grundlagen des menschlichen Seins. Und dazu gehört wesentlich die Verständigung über die leitenden Menschenbilder und damit einhergehend die Frage, inwieweit das durch die wissenschaftlich-technischen Entwicklungen veränderte Bild von uns selbst Auswirkungen haben kann auf unser Verhältnis zur Wirklichkeit.

Mit Blick auf die Synthetische Biologie scheinen folgende anthropologische Rückfragen von zentraler Bedeutung zu sei: Könnte es sein, dass sich mit der Synthetischen Biologie das Bild des Menschen als des «homo faber» ändern muss – und zwar in Richtung der Vorstellung des Menschen als ein «homo creator»? Müssen wir nicht einen fundamentalen Unterschied sehen zwischen dem bloßen Herstellen und einem «Schaffen»? Muss sich das Verhältnis des Menschen zu seinen Produkten ändern, wenn man sagt, dass diese von ihm «geschaffene» Organismen sind?

«Homo faber» ist der von Henri Bergson und Max Scheler geprägte und prominenteste Reflexionsbegriff, mit dem Verständigungsprozesse über den Menschen und die von ihm verantwortete moderne wissenschaftlich-technische Welt geführt wurden und werden. Den Menschen als Homo faber zu denken, heißt, dass man ihn als jemanden sieht, der mit bestimmten wissenschaftlich-technischen Mitteln die Welt nach seinen Ideen verändert, kontrollierbar, nutzbar macht. Leitend ist dabei, aristotelisch ausgedrückt, das Paradigma des «Herstellens» im Gegensatz zum «Handeln». Herstellen ist eine bestimmte Weise des Weltbezugs, die unser Selbstverständnis zwar fundamental bestimmt, die aber doch auch die Möglichkeiten des Seins begrenzt: Grundlage der Homo-faber-Welt ist die Etablierung von technizistischen bzw. technomorphen Strukturen, die die Realität des Menschen in seinem Sein, seinen Entscheidungen, seinem Handeln (im Sinne einer verantwortungsbewussten, kommunikationsorientierten Praxis) etc. bestimmen.

Mit der Synthetischen Biologie könnte sich das Profil des Homo faber grundlegend ändern. Denn wenn die traditionelle Biotechnologie noch dem Paradigma des Herstellens verpflichtet ist, wenn in gezielten genetischen Manipulationen des bereits Vorhandenen

auf die Natur eingewirkt wird (in Fortsetzung der langen Tradition der Züchtungen), so ist dies bei der Synthetischen Biologie nicht mehr eindeutig der Fall. Denn wenn es richtig ist, dass es mit der Synthetischen Biologie möglich ist, völlig neuartige Lebensformen zu produzieren, die nicht mehr allein vor dem Hintergrund einer biotechnologischen Manipulation zu beschreiben sind, sondern als Formen von Neuschöpfungen zu begreifen sind, dann stellt sich die Frage, ob man diese Form menschlicher Tätigkeit noch als bloßes Herstellen beschreiben kann.

Denn es könnte sich anbieten, hier eine begriffliche Differenzierung einzuführen, mit der man das Herstellen vom Schaffen/Kreieren/Schöpfen unterscheiden kann; dazu müsste man Kriterien finden, die diese Unterscheidung tragen können. Dabei bietet sich prima vista der Aspekt der Neuheit an, den man aus den Bereich der Erfindungen und der Kunst kennt, der aber im Bereich der Natur eine andere Dimension hat.

Vor diesem Hintergrund ist es möglich, dass sich durch die Synthetische Biologie die traditionelle Vorstellung des technischen Herstellens (auch wenn das immer schon mit Kreativität zu tun gehabt haben mag) fundamental verändert und ein Handlungsraum eröffnet wird, der berechtigt, vom Menschen als einem «homo creator» zu sprechen, bzw. das Herstellen als eine Form der creatio oder des Schöpfens zu beschreiben, so dass der Begriff des Herstellens mit der Synthetischen Biologie an eine veritable semantische Grenze kommt.⁷⁹ Günther Anders hatte vor fast drei Jahrzehnten schon eine derartige Neudeutung des Homo faber vorgeschlagen,⁸⁰ doch erst mit der Synthetischen Biologie scheint sich dieser Paradigmenwechsel erst tatsächlich zu vollziehen. Mit einer solchen Erweiterung des Funktionskreises des homo faber, mit einer fundamentalen Erweiterung des Begriffs des Herstellens, würde sich auch das menschliche Selbstverständnis fundamental verändern. Denn er müsste einen weiterreichenden Begriff des «Schöpfers» in sein Selbstbild integrieren.

Im Zusammenhang mit dem unklaren ontologischen Status der Produkte oder Kreationen des Menschen hat das veränderte Selbstbild auch Konsequenzen für den konkreten Umgang mit

⁷⁹ Boldt/Müller 2008.

⁸⁰ Anders 1980:21f.

diesen Produkten. Neben dem möglichen Geltendmachen von Urheber- oder patentrechtlichen Ansprüchen ist es von Bedeutung, dass der Mensch die Organismen nach den gleichen Kriterien beurteilen könnte wie technologische Entitäten. Von den möglichen weiterreichenden Folgen abgesehen, dass sich der grundlegende Respekt gegenüber dem Lebendigen aufzuweichen beginnt – was bei höheren Organismen zu einem ernsthaften ethischen Problem führen kann –, hat dies auch Konsequenzen für die konkreten Fragen nach Biosecurity und Biosafety. Denn in diesen Formen der Technikfolgenabschätzung geht es darum, den Umgang des Menschen mit den Entitäten der Synthetischen Biologie zu regulieren. Und jede technische Analyse ist von Vorannahmen über den Charakter des Lebendigen geleitet.

Risiken und Missbrauchsgefahren der Synthetischen Biologie stehen dabei auf unterschiedliche Weise in Zusammenhang mit dem Begriff des Lebens und den charakteristischen, neuen Eigenschaften dieses Forschungsfeldes. Während bei Missbrauchsgefahren, wie im Folgenden zu sehen sein wird, vor allem die Charakteristika der Modularisierung und Standardisierung im Vordergrund stehen, sind es im Bereich der Risiken das Charakteristikum der Neuheit des synthetischen Lebens und Fragen der Veränderbarkeit und Kontrollierbarkeit von Lebendigem.

7. Abschätzung von Risiken und Missbrauchsgefahren

In der Literatur zu den sozialen und ethischen Implikationen der Synthetischen Biologie stehen die Themen der Risikoabschätzung und der Abschätzung der Gefahren durch missbräuchliche Verwendungen eindeutig im Vordergrund. Auffällig ist, dass diese Themen nicht nur von außen an die Forschungsgemeinde herangetragen werden, sondern auch von den Forschern selbst verfolgt und vertieft werden. Es gibt offensichtlich ein Interesse daran, ein Umfeld für die Forschungen zu schaffen, das die Anwendung der Forschungsergebnisse möglichst sicher macht und auf das bei entsprechenden kritischen Nachfragen verwiesen werden kann. Die in einigen Ländern sehr heftigen öffentlichen Reaktion auf die Gentechnik und die Freisetzung gentechnisch veränderter Organismen mögen ein Grund dafür sein.

Es mag darüber hinaus auch noch einen weiteren Grund für die Konzentration auf diese Themen geben. Im Unterschied zu den Fragen nach dem Gehalt des Lebensbegriffs und dem Selbstverständnis des Leben manipulierenden und kreierenden Menschen betreffen diese Fragen nicht die wissenschaftlichen Aktivitäten selbst. Risiken und Missbrauchsgefahren gehen nicht direkt mit den Forschungen einher, sondern treten erst im Zusammenhang mit Anwendungen der Forschungsergebnisse auf. Die Fokussierung auf diese beiden Themen spiegelt deshalb die verbreitete Überzeugung wider, Forschung an sich sei wertneutral und was an ethisch bedenklichen Konsequenzen folge, liege außerhalb des eigentlich wissenschaftlichen Verantwortungsbereiches. Die Beschäftigung mit Fragen der Risiken entlastet deshalb auch von Verantwortung für technisch-wissenschaftliches Handeln.

Diese Vorbemerkung soll aber nicht davon ablenken, dass sich in Bezug auf die Synthetische Biologie in der Tat gewichtige Fragen im Hinblick auf Risiken und möglichen Missbrauch stellen. Die Unterscheidung von Risiken, das heißt nicht intendierten «Ne-

benwirkungen» des Einsatzes synthetischer biologischer Systeme, und von Missbrauch, also dem intendierten Einsatz dieser Systeme zu schädlichen Zwecken, wird im Englischen wiedergegeben als Unterscheidung von «biosafety» und «biosecurity». Mit dieser Begriffsbildung wird auf eine in der Debatte um die Sicherheit von IT-Systemen geläufige Unterscheidung von «safety» und «security» zurückgegriffen: Während «safety» die einem IT-System inhärente Zuverlässigkeit und Stabilität in einem normalen Arbeitsumfeld beschreibt, bezieht man sich mit dem Begriff der «security» auf die Sicherheit eines Systems gegenüber gezielten Angriffen.

Der Anschluss an diese Unterscheidung ist allerdings nicht direkt analog zu verstehen. Streng genommen müsste man, wenn man dem IT-Vorbild folgt, dann von «biosecurity» sprechen, wenn es um die Frage geht, ob biotechnologisch geschaffene, neue Lebensformen anfällig sind für böswillige Angriffe und Veränderungen von außen auf diese neuen Objekte. Im Vordergrund der Debatte um «biosecurity» steht jedoch eher die Frage, ob die von der Synthetischen Biologie bereitgestellten Mittel zur Modellierung und Entwicklung neuer Organismen dazu missbraucht werden können, Mikroorganismen zu schaffen, die zu Angriffen auf die menschliche Gesundheit fähig sind.

Unter «biosafety» lassen sich dann diejenigen Maßnahmen verstehen, die ein planbares und kontrollierbares, nicht-schädliches Verhalten eines synthetischen biologischen Systems in einer Umgebung ermöglichen und sicherstellen. «Biosecurity» demgegenüber beschreibt diejenigen Maßnahmen, die eine missbräuchliche, schädliche Verwendung von synthetischen biologischen Systemen erschweren oder unmöglich machen.

7.1 Biosecurity: Bewusster Missbrauch der neuen Techniken

Unter der Überschrift «Ethik der Synthetischen Biologie» findet sich das Problem der Biosecurity immer wieder an prominenter Stelle, manchmal auch als «dual-use»- Problematik bezeichnet oder unter dem Begriff «Bioterrorism» zusammengefasst.⁸¹ Besonders in den USA erhält dieses Thema im Rahmen der generellen

Tendenz, Terrorismusgefahren zu identifizieren und zu bannen, verstärkt Aufmerksamkeit.

a) Das Missbrauchspotential

Man wird zwar kaum behaupten können, dass der potentielle Missbrauch einer Technik als Problem im Fall der Synthetischen Biologie zum ersten Mal in Erscheinung träte. Dennoch gehen mit den spezifischen Gegebenheiten der Synthetischen Biologie im Hinblick auf ihren Missbrauch einige bedenkenswerte und neue Gefahren einher.

Befürchtet wird vor allem, dass es mit den Mitteln der Synthetischen Biologie möglich wird, hoch pathogene Viren oder Bakterien zu schaffen, die sich in einer ungeschützten Bevölkerung epidemieartig ausbreiten könnten. Zwei Versuche haben die Möglichkeiten eines solchen Missbrauchs durch die Techniken der Synthetischen Biologie verdeutlicht.⁸² Im Jahr 2002 ist es Wissenschaftlern gelungen, den Poliovirus nachzubilden, indem sie von kommerziell tätigen Unternehmen, die DNA synthetisieren, die benötigten Stränge bestellt und im Labor zu einem funktionsfähigen Virus zusammengesetzt haben.⁸³ Noch spektakulärer mutet an, was Wissenschaftler 2005 veröffentlichten: Ein Team aus den USA hatte erfolgreich versucht, die Erbinformation des Grippevirus zu rekonstruieren, das für die ungewöhnlich ansteckende Spanische Grippe in den Jahren 1918–20 mit mehreren Millionen Toten verantwortlich war. Das Virus war ausgestorben, seine RNA konnte jedoch aus dem Gewebe Verstorbener isoliert, sequenziert und schließlich zum ursprünglichen Virus synthetisiert werden. Das Grippevirus wurde, mit anderen Worten, buchstäblich wieder zum Leben erweckt (soweit man bei Viren von Leben sprechen kann).⁸⁴

Diese Versuche und die Freizügigkeit, mit der die Ergebnisse, das Vorgehen und die Resultate (inklusive des genetischen Bauplans des Grippevirus) veröffentlicht wurden, sind vielfach kritisiert worden. Dies vor allem deshalb, weil hier öffentlich nachvollziehbar demonstriert wird, dass es mit den Mitteln der heutigen

⁸² ETC Group 2007:23f; Tucker/Zilinskas 2006:37.

⁸³ Cello/Paul/Wimmer 2002.

⁸⁴ Tumpey et al. 2005.

⁸¹ Selgelid 2007:35; Tucker/Zilinskas 2006:37-42; De Vriend 2006:50–57.

Gentechnik relativ einfach möglich ist, pathogene Organismen zu erzeugen. Denkt man diesen Weg vor dem Hintergrund der Forschungsziele der Synthetischen Biologie weiter, dann erscheint es nicht unwahrscheinlich, dass Ähnliches in einigen Jahren nicht mehr nur für den Nachbau und die Wiederbelebung bekannter pathogener Viren gilt. Es wird nicht nur der Nachbau von Viren, sondern auch der von Bakterien möglich werden, darüber hinaus wird neben dem Nachbau auch der zielgerichtete Neuentwurf von pathogener viraler und bakterieller DNA bzw. RNA denkbar.

Relativierend muss jedoch auch hinzugefügt werden, dass synthetische Viren bisher dazu tendieren, Mutationen anzusammeln und so ihre ursprünglichen Eigenschaften schnell zu verlieren. Zumindest aktuell ist der einfachere Weg zu einem hoch pathogenen Virus nicht die Synthese im Labor, sondern die Gewinnung aus der Natur.

Abgesehen davon zeigen beide Experimente aber vor allem, mit welchen – im Fall des Poliovirus auch verhältnismäßig einfachen – Mitteln es der Synthetischen Biologie möglich ist, für den menschlichen Körper hochaggressive Organismen im Labor herzustellen: Informationen über die RNA bzw. DNA pathogener Organismen können aus verschiedenen Datenbanken und wissenschaftlichen Veröffentlichungen frei bezogen werden. Synthetisierte Sequenzen von RNA und DNA können bei entsprechend spezialisierten Unternehmen für erschwingliche Preise in Auftrag gegeben werden. Schließlich lassen sich solche Sequenzen mit labortechnisch überschaubarem Aufwand zu hochwirksamen Krankheitserregern zusammenfügen. Anders als bei anderen potentiell gefährlichen Technologien sind daher im Fall der Synthetischen Biologie der technische und finanzielle Aufwand keine Hürden, die nur für Staaten und nicht auch für kleinere Gruppen zu überwinden wären.

Hinzu kommt, dass die Entwicklung der Technik erwarten lässt, dass die Hürden noch niedriger werden. Mit der Vision des «Labors auf dem Chip» erscheint es denkbar, dass DNA in Zukunft noch sehr viel schneller und einfacher sequenziert werden kann als zur Zeit. So wird unter Umständen der Zugriff auf veröffentlichte Daten zu DNA-Strukturen ganz überflüssig, weil man den genetischen Bauplan eines Organismus an Ort und Stelle analysieren kann. Mit den Plänen zur Erstellung einer Datenbank von «BioBricks» wird parallel denkbar, dass man sich am Computer

auf für sich genommen benignen Teilen seinen malignen Wunschorganismus selbst zusammenstellt. Diese sequenzierten oder aus BioBrick-Datenbanken zusammengestellten Informationen können dann mit den Mitteln der modernen Informationstechnologie sehr einfach weitergegeben werden, so dass keine Notwendigkeit besteht, pathogene Organismen «leibhaftig» an sich zu bringen und zu schmuggeln. Da die Preise für die Synthese von DNA-Sequenzen fallen und die Länge noch am Stück zu synthetisierender Sequenzen stetig steigt, wird auch dieser Schritt der Erzeugung pathogener Organismen zunehmend einfacher.

Dieses Szenario verdeutlicht, wie schwierig es im Fall der Synthetischen Biologie ist, wirksame Barrieren für den bewussten Missbrauch zu errichten, weil gerade diejenigen Eigenschaften der neuen Wissenschaft, die sie charakterisieren und vorantreiben, auch die Eigenschaften sind, die den Missbrauch vereinfachen. Dies betrifft die Einbindung der Informationstechnologie ebenso wie die der Ingenieurwissenschaft mit der ihr inhärenten Tendenz zur Modularisierung und Standardisierung, und es betrifft auch den generellen Fortschritt der technischen Möglichkeiten zur Sequenzierung und Synthetisierung der Erbinformation.

b) Bestehende Regularien

Es gibt auf nationaler und internationaler Ebene bereits eine Reihe von Verordnungen, die den Missbrauch von Technologie verhindern sollen und die sich auch explizit oder implizit auf die Produkte der Synthetischen Biologie beziehen.⁸⁵ Auf internationaler Ebene findet sich beispielsweise die «Biological and Toxin Weapons Convention» (BTWC), ein Instrument, das dem Wortlaut nach auch auf die Erzeugnisse der Synthetischen Biologie angewendet werden kann. Im Artikel 1 der Konvention heißt es:

«Each State Party to this Convention undertakes never in any circumstances to develop, produce, stockpile or otherwise acquire or retain: (1) Microbial or other biological agents, or toxins whatever their origin or method of production, of types and in quantities that have no justification for prophylactic, protective or other

⁸⁵ Kelle 2007:6–8.

peaceful purposes; (2) Weapons, equipment or means of delivery designed to use such agents or toxins for hostile purposes or in armed conflict.»⁸⁶

Auch eine Verpflichtung, Aktivitäten kleinerer, nicht-staatlicher Gruppierungen zu kontrollieren, nicht zu dulden und ihnen aktiv vorzubeugen, existiert bereits im Artikel IV der Konvention:

«Each State Party to this Convention shall, in accordance with its constitutional processes, take any necessary measures to prohibit and prevent the development, production, stockpiling, acquisition, or retention of the agents, toxins, weapons, equipment and means of delivery specified in article I of the Convention, within the territory of such State, under its jurisdiction or under its control anywhere.»⁸⁷

Weitere internationale Regelungen zur Kontrolle eines möglichen Missbrauchs von biologischen Produkten finden sich in den Richtlinien der «Australia Group» eines Zusammenschlusses von inzwischen über 30 Staaten mit dem Ziel, missbrauchsgefährdete Güter zu identifizieren und ihren Export zu kontrollieren.⁸⁸ Unter diese Güter fallen auch «genetic elements» und «genetically modified organisms», deren DNA-Sequenzen denen pathogener Organismen entsprechen oder deren DNA-Sequenzen für die Herstellung von Toxinen genutzt werden können.

Im Sinne einer solchen Kontrolle legen weitere nationale und internationale Regelungen fest, welche potentiell gefährlichen Güter an wen ausgeliefert werden dürfen. In der Schweiz regelt dies zum Beispiel das «Bundesgesetz über die Kontrolle zivil und militärisch verwendbarer Güter sowie besonderer militärischer Güter», das seit dem 1. Oktober 1997 in Kraft ist und früher bestehende Regelungen der Exportkontrolle zusammenfasst und vereinheitlicht.⁸⁹ In Deutschland setzt das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle entsprechende Regelungen der EU

und der Bundesrepublik um – zu nennen sind hier vor allem die EG-Dual-Use-VO 1334/2000, die Außenwirtschaftsverordnung und Embargo-Listen.

c) Bedarf an erweiterten Regelungen

Ob diese Regelungen ausreichen, um die missbräuchliche Verwendung synthetischer Organismen auszuschließen, ist jedoch sehr umstritten. Zum einen wird darauf verwiesen, dass Konventionen wie die BTWC keinerlei Regularien für die Kontrolle der Einhaltung der vorgeschriebenen Maßnahmen vorsehen und daher unter Umständen nur sehr inkonsequent umgesetzt werden. Zum anderen kann bezweifelt werden, ob solche internationalen und nationalen Regularien überhaupt spezifisch genug sein können, um effektiv Missbrauch zu verhindern. Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieser Regularien ist, dass festgestellt werden kann, welche Genomsequenzen, die zur Synthetisierung bestellt werden, als missbrauchsgefährdet gelten müssen. In Anbetracht der vielfältigen Verwendbarkeit einzelner genetischer Abschnitte wird eine abschließende Einstufung bestimmter Sequenzen als missbrauchsgefährdet aber immer vorläufig sein und der kontinuierlichen Weiterentwicklung bestehender Einstufungslisten bedürfen.

Es werden deshalb eine Reihe weitergehender Vorschläge diskutiert, wie den Gefahren des Missbrauchs begegnet werden kann. Dazu lassen sich zunächst verschiedene Ansatzpunkte unterscheiden: Man könnte Regularien für Unternehmen, die Gene und Genome synthetisieren, einführen und man könnte Abgabe und Besitz der technischen Ausrüstung und der Reagenzien für die Gensynthese kontrollieren.⁹⁰

Viele der Unternehmen, die Gensequenzen synthetisieren, haben sich zum Screening eingehender Aufträge verpflichtet und Organisationen gegründet, die dazu und allgemein zu Aspekten der Sicherheit Richtlinien entwickeln sollen.⁹¹ Beim Screening von Synthetisierungsaufträgen werden die eingehenden Bestellungen von einer darauf spezialisierten Software untersucht und mit einer Liste von Gensequenzen bekannter Pathogene abgeglichen. Die

⁸⁶ BTWC 1972.

⁸⁷ Ibid.

⁸⁸ Bitbol/Luisi 2004.

⁸⁹ Güterkontrollgesetz 1996.

⁹⁰ Garfinkel et al. 2007:20–38.

⁹¹ Chopra/Kamma 2006; Church 2005.

Erstellung und Aktualisierung dieser Software liegt dabei bisher in der Regie jedes einzelnen Unternehmens. Um diese Initiativen zu stärken und das Screening zu verbessern, könnte es sinnvoll sein, Unternehmen dazu zu verpflichten, für die Kontrolle der eingehenden Aufträge eine zertifizierte und zentral weiter entwickelte Software zu verwenden.

Da Pathogene mit legitimem Interesse auch zu Forschungszwecken synthetisiert werden und entsprechende Anfragen deshalb nicht in jedem Fall abgelehnt werden können, wird zusätzlich diskutiert, ob sich Personen, die mit diesen Gensequenzen arbeiten wollen, von einer unabhängigen Stelle registrieren lassen sollten. Registrierte Nutzer könnten dann als unbedenklich gelten und Pathogene synthetisieren lassen, während die Bestellungen nicht registrierter Auftraggeber nicht ausgeführt würden. Um wirksam sein zu können, müssten alle diese Bestimmungen über das Screening von Aufträgen und die Registrierung von Nutzern international durchgesetzt werden.

Die technische Umsetzung des Entwerfens und Herstellens synthetischer Organismen erfordert keine extrem teure, große und schwer zu beschaffende Ausrüstung. DNA-Sequenziermaschinen sind kleinere Tisch- oder Standgeräte, die als ältere Gebrauchtgeräte nicht mehr als einige Tausend Euro kosten müssen. Die Gefahr, dass kleinere Gruppen in der Lage sein könnten, sich diese Geräte, die auch auf Internetmärkten gehandelt werden, zu beschaffen, um benötigte DNA selbst zu synthetisieren, erscheint daher nicht völlig unreal. Um dieser Gefahr zu begegnen, wird erwogen, den Bestand von DNA-Sequenziermaschinen zu erfassen und so zu kontrollieren. Das könnte auf dem Weg der Registrierung von getätigten Verkäufen stattfinden oder auf dem Weg der Lizenzierung von potentiellen Käufern. Neben DNA-Synthetisiermaschinen könnte man diese Maßnahmen auch auf die für die Synthetisierung benötigten Ausgangsstoffe oder auf besonders zentrale Teile der Sequenziermaschinen ausdehnen.

Es wird über solche Kontrollmaßnahmen auf der Seite der Technik hinaus inzwischen auch darüber debattiert, ob die übliche Praxis der Forschung, Ergebnisse für die Öffentlichkeit frei zugänglich zu publizieren, in jedem Fall gerechtfertigt ist und erlaubt sein soll. Mit Verweis auf den eingangs erwähnten Nachbau des Poliovirus und die Wiederbelebung des Grippevirus, das für die spanische

Grippe verantwortlich ist, wird argumentiert, dass der Verzicht auf die Publikation nahe gelegen hätte. Wissenschaftliche Autoren oder Herausgeber wissenschaftlicher Zeitschriften sollten, so die Forderung, diesen Schritt in solchen Fällen ernsthaft in Erwägung ziehen. Bezweifelt man, dass Wissenschaftler und Herausgeber geeignet sind, über Fragen potentiellen Missbrauchs zu befinden, dann liegt auch der Gedanke nicht mehr fern, ein Zensurgremium über die Veröffentlichung entscheiden zu lassen.⁹² Dass es bei einem solchen drastischen Schritt mehr als unklar wäre, in wessen Händen das potentiell gefährliche Wissen als sicher gelten könnte, liegt allerdings auf der Hand.

Es wird zweifellos wichtig sein, den Weg der Kontrolle der Verbreitung potentiell gefährlicher synthetisch-biologischer Erzeugnisse weiter zu verfolgen und Regelungen konsequent anzuwenden. Die Miniaturisierung und Effizienzsteigerung von Sequenzier- und Synthetisiermethoden und die Modularisierung und Standardisierung biologisch-genetischer Bausteine lässt jedoch erwarten, dass diese Instrumente keine endgültige Lösung der dual-use-Problematik bieten können. Angesichts der Entwicklungen der Synthetischen Biologie weg von der eher handwerklich zu nennenden Manipulation von Organismen hin zu einer computergestützten Entwurfstätigkeit mit einfacher und an vielen Orten möglicher Umsetzung lässt vermuten, dass alle diese Maßnahmen kaum mehr sein können als vorläufige Eindämmungen einer nicht endgültig zu beseitigenden Gefahr. Man sollte sich dessen bewusst sein, und zwar auch, um den möglichen Gewinn solcher extremer Maßnahmen wie der Einführung der Zensur nicht zu überschätzen.

7.2 Biosafety: Risiken unkontrollierter Verbreitung

Wie die enge Verwandtschaft von Synthetischer Biologie und Gentechnik nicht anders erwarten lässt, spielt das Thema der unkontrollierten Verbreitung und Veränderung synthetischer Organismen in der Diskussion um ethische Implikationen der neuen Techniken eine wichtige Rolle.⁹³

⁹² Selgelid 2007:41f.

⁹³ ETC Group 2007:36–44; De Vriend 2006:50–54; Tucker/Zilinskas 2006:32–37.

a) Das Risikopotential

Hier handelt es sich um Fragen der «Biosafety», die sich im Hinblick auf zwei Aspekte strukturieren lassen: Zum einen stellen sich Biosafety-Probleme im Rahmen des jeweiligen Kontextes, in dem mit den synthetischen Organismen hantiert wird. Dabei lassen sich vor allem der Forschungs-, Herstellungs- und der spätere Anwendungskontext unterscheiden. Zum anderen kann man unterscheiden, für welchen Objektbereich die synthetischen Organismen möglicherweise eine Gefahr darstellen. Dabei geht es vor allem um die Unterscheidung von Gefahren für Natur und Umwelt einerseits und für den Menschen und die menschliche Gesundheit andererseits.

	Natur und Umwelt	Mensch
Forschung und Produktion	Sicherheit vor ungewollter Freisetzung aus dem Labor	Arbeitssicherheit im Labor
Anwendung	Sicherheit vor unkontrollierter Verbreitung bei Freilandanwendungen	Gesundheitsgefahren v.a. bei medizinisch-therapeutischen Anwendungen

Im Rahmen von Forschung und Herstellung synthetischer Organismen bestehen Biosafety-Probleme vor allem in Form von Fragen der Laborsicherheit. So könnten Personen, die im Labor mit synthetischen Organismen arbeiten, ungewollt infiziert werden, wenn es sich um pathogene Mikroorganismen handelt. Darüber hinaus könnten synthetische Organismen aus dem Labor entweichen und dann eine Gefahr für die Umwelt darstellen. Zu denken ist hier an die Möglichkeit, dass natürliche Arten von dem entwichenen Organismus verdrängt werden oder dass das natürliche Gleichgewicht eines Ökosystems nachhaltig gestört wird, wenn der synthetische Organismus an einer unkontrollierten und ungehemmten Ausbreitung nicht gehindert werden kann.

Ganz ähnlich gelagert sind die Gefahren im Bereich der Anwendung synthetisch biologischer Produkte. Werden zum Beispiel synthetische Organismen zur Bekämpfung von Schadstoffen frei in der Umwelt eingesetzt, muss dem Risiko Rechnung getragen werden, dass diese Organismen das biologische Gleichgewicht im Einsatzgebiet und möglicherweise auch darüber hinaus gefährden. Weiterhin bestehen bei Anwendungen in der freien Natur immer auch Gefahren für den Menschen, wenn nicht ausgeschlossen werden kann, dass der eingesetzte Organismus pathogen ist und über die Nahrung oder andere Übertragungswege mit dem Menschen in Berührung kommt. Gefahren für die menschliche Gesundheit bestehen aber vor allem bei denjenigen Anwendungen, die direkt auf den Menschen bezogen sind, das heißt bei medizinisch-therapeutischen Einsätzen synthetischer Viren oder Bakterien mit möglichen unerwarteten Nebenwirkungen.

b) Bestehende Regularien

Alle diese Gefahren sind prinzipiell aus der Gentechnik bekannt, weshalb bereits eine Vielzahl von diesbezüglichen Regelungen zu finden ist. So werden zum Beispiel in den Richtlinien der Weltgesundheitsorganisation zur biologischen Sicherheit in Laboren («Laboratory Biosafety Manual») Empfehlungen für den Umgang mit gentechnisch veränderten Organismen gegeben und es werden die unterschiedlichen Klassen von Sicherheitslaboren aufgeführt und beschrieben.⁹⁴ Die Risikobewertung des gentechnisch veränderten Organismus richtet sich diesen Richtlinien gemäß nach bekannten pathogenen Eigenschaften von Spender- und Empfängerorganismus und nach der Toxizität der Produkte der überführten DNA-Sequenz.

Die «Biodiversity Convention», der sich fast 200 Staaten angeschlossen haben, ist eine Selbstverpflichtung zur Erhaltung der biologischen Vielfalt.⁹⁵ Auch die Risiken der Freisetzung von synthetischen Organismen für die Umwelt werden von dieser Konvention abgedeckt: Es wird zur Bewertung des zu erwartenden Einflusses von solchen Projekten auf die Umwelt und zur Minimierung

⁹⁴ World Health Organisation 2003.

⁹⁵ Convention on Biological Diversity 1992.

zung unerwünschter Folgewirkungen angehalten. Genaueres dazu findet sich unter anderem in den «Technical Guidelines for Safety in Biotechnology» des UN Environment Programme (UNEP).⁹⁶ Der Schwerpunkt dieser Richtlinien liegt neben der Sicherheit im Laborumfeld vor allem auf der Sicherheit bei der Freisetzung synthetischer Organismen. Im Anhang 3 der Richtlinien wird dargestellt, wie eine Risikobewertung zur Verminderung unerwünschter Konsequenzen bei Freisetzungen aussehen kann. Dazu wird das «familiarity principle» eingeführt, dessen Kern darin besteht, von den vertrauten Eigenschaften des Spende- und des Empfängerorganismus aus auf die möglicherweise gefährlichen Eigenschaften des neuen Organismus zu schließen.

Auf EU-Ebene existiert die Richtlinie 2001/18/EG zur Regelung der Freisetzung von gentechnisch veränderten Organismen. Sie wird in Deutschland durch das Gentechnikgesetz national umgesetzt. Die Schweiz regelt die Freisetzung von gentechnisch veränderten Organismen mit dem Bundesgesetz über die Gentechnik im Ausserhumanbereich (Gentechnikgesetz, GTG).⁹⁷

Neben Freisetzungen betreffen diese Gesetze auch den Bereich der Forschung mit und Herstellung von synthetischen Organismen. Darüber hinaus regeln sie auch das Inverkehrbringen gentechnisch veränderter Organismen und ihrer Stoffwechselprodukte mit dem Ziel, eine Gefährdung der menschlichen Gesundheit durch die Verbreitung dieser Organismen vor allem als Bestandteil von Lebensmitteln auszuschließen.

Gefährdungen der menschlichen Gesundheit, die im Bereich der medizinisch-therapeutischen Anwendungen auftreten könnten, werden ebenfalls von internationalen und nationalen Richtlinien und Gesetzen detailliert geregelt. So legt das Bundesgesetz über Arzneimittel und Medizinprodukte der Schweiz ebenso wie das deutsche Arzneimittelgesetz fest, wie und wann Arzneimittel zu klinischen Studien und zum Markt zugelassen werden. Davon betroffen sind auch Arzneimittel von und mit gentechnisch veränderten Organismen.

c) Bedarf an weiteren Regelungen

Angesichts dieser engmaschigen und erprobten Regularien, die alle Bereiche der Gefährdung von Mensch und Umwelt durch gentechnisch veränderte Organismen abdecken, kann man durchaus zu der Überzeugung kommen, dass auch die Risiken der Produkte der Synthetischen Biologie mit Hilfe dieser Werkzeuge handhabbar sein werden. Zu einer besonderen Herausforderung wird die Synthetische Biologie für diese erprobten und weithin akzeptierten Regelungen zur Risikominimierung allerdings dann, wenn sie das Programm der Zusammenführung von Systembiologie, Informations- und Ingenieurwissenschaft und Gentechnik wie von den wissenschaftlichen Protagonisten erwartet umsetzen kann. Da dieses Programm die Herstellung von Organismen mit sich bringt, die als neue Lebensformen gelten können, wird das bekannte Vorgehen der Risikoanalyse an seine Grenze geführt.

Wie gesehen, orientiert sich die Risikobeurteilung von gentechnisch veränderten Organismen an einer Analyse des Verhaltens von Spender- und Empfängerorganismus. Wenn es nun möglich wird, Organismen herzustellen, die sich nicht nur in einzelnen Gensequenzen von diesen Ausgangsorganismen unterscheiden, sondern deren spezifische Eigenschaften alle neu angelegt sind, dann fehlt die Ausgangsbasis für diese Form klassischer Risikobewertung. Das «familiarity principle» kann nicht mehr oder zumindest nicht mehr so einfach angewendet werden, weil es keinen bekannten Organismus gibt, dessen Verhalten als Grundlage für die Bewertung dienen könnte.

Es gibt verschiedene Vorhaben, die diese Unwägbarkeit des Verhaltens synthetischer Organismen verringern sollen. So wird erwogen, dass diesen Organismen ein Gen zur automatischen Selbstzerstörung eingebaut werden könnte, das bei unkontrollierter Vermehrung von selbst aktiviert wird. Mit ähnlicher Stoßrichtung wird angeführt, dass synthetische Organismen, deren genetischer Bauplan auf nicht-natürlich vorkommenden Substanzen basiert, entsprechend konstruiert, keine Verbindungen mit natürlichen Organismen eingehen könnten.⁹⁸ Möglicherweise also lassen sich die Risiken unkontrollierter Verbreitung und Vermehrung der syn-

⁹⁶ International Technical Guidelines for Safety in Biotechnology, <http://www.biosafetyprotocol.be/UNEPGuid/Contents.html>.

⁹⁷ Gentechnikgesetz 2003.

⁹⁸ Benner/Sismour 2005:541.

thetischen Organismen mit den Mitteln der Synthetischen Biologie selbst verringern.⁹⁹ Es ist aber durchaus auch denkbar, dass sie mit den Mitteln der Synthetischen Biologie erhöht werden: so könnte ein Organismus, der einerseits natürliche Substanzen verwerten kann, andererseits aber aufgrund seiner künstlichen Basis für natürliche Organismen nicht angreifbar ist, gerade aufgrund seiner orthogonalen Eigenschaften ein besonders hohes Gefährdungspotential haben.

Um ein solches Gefährdungspotential früh erkennen zu können, wird verschiedentlich auch erwogen, es zur Auflage für die Freisetzung synthetischer Organismen zu machen, die Unbedenklichkeit dieser Organismen nachzuweisen, wozu beispielsweise künstliche Ökosysteme genutzt werden könnten.¹⁰⁰ Es erscheint in jedem Fall unumgänglich, für die Risikobewertung neuer, synthetischer Lebensformen weitergehende Testverfahren vorzusehen als bisher üblich. Man wird kaum umhin kommen, solche Organismen als potentiell gefährlich einzustufen, bis auf nachvollziehbare Weise ihre Unbedenklichkeit demonstriert worden ist. Hier erscheint ein Wechsel vom Prinzip der Vertrautheit zum Prinzip der Vorsicht («precautionary principle») sinnvoll.¹⁰¹

Wie die Problematik der Einschätzung von Risiken neuer synthetischer Lebensformen zeigt, treibt die Synthetische Biologie einen Zwiespalt auf die Spitze, der innerhalb eines jeden technisch-ingenieurwissenschaftlichen Zugriffs auf den Bereich des Lebendigen besteht: Leben zu erzeugen, heißt bis zu einem bestimmten Grad auch immer, etwas zu erschaffen, das aufgrund seiner Fähigkeit zur Fortpflanzung und Mutation Eigenständigkeit gewinnt und sich der Kontrolle entzieht.¹⁰² Je weiter man sich von natürlichen Vorlagen des Lebens entfernt, umso unvorhersehbarer werden die Effekte sein können, die sich aus diesen Eigenschaften ergeben.¹⁰³ Die häufig anzutreffenden ingenieur- und informationswissenschaftlich inspirierten Metaphern für synthetische Organismen wie «hardware» und «software» der Zelle, «chassis»

oder «living machine» können den Eindruck erwecken, man habe es bei synthetischen Organismen nicht mit fortpflanzungsfähigem und veränderbarem Leben, sondern mit in allen Teilen und in allen Situationen im Verhalten vollständig bestimmbar Artefakten zu tun. Diesem Eindruck sollte man nicht zu schnell Glauben schenken, wenn man Risiken realistisch beurteilen will.

⁹⁹ Breithaupt 2006:24; De Vriend 2006:53.

¹⁰⁰ Tucker/Zilinskas 2006:36.

¹⁰¹ Ibid.:34.

¹⁰² Drubin/Way/Silver 2007:245.

¹⁰³ ETC Group 2007:42.

8. Schlussbetrachtung

Unter dem Titel «Synthetische Biologie» etabliert sich derzeit ein Forschungsfeld, in dem systembiologische Ansätze in neuartiger Form mit einem ingenieurwissenschaftlichen Paradigma verbunden werden. Das Verstehen biologischer Prozesse wird programmatisch an deren Herstellbarkeit geknüpft. Damit verspricht die Synthetische Biologie unsere Alltagswelt auf ähnliche Weise zu verändern wie die synthetische Chemie am Anfang des 20. Jahrhunderts.

Abgesehen von den wissenschaftspolitischen Interessen, die die konzertierte Bündelung verschiedener molekularbiologischer Forschungsrichtungen und biotechnologischer Verfahren (inklusive entsprechender Verwertungsoptionen) nützlich erscheinen lassen, kann man doch in verschiedener Hinsicht sagen, dass die Synthetische Biologie einen neuartigen Charakter hat, gerade im Vergleich zur bisherigen Gentechnik.

- Die Synthetische Biologie versucht durch die biotechnologischen Herstellungsprozesse zu verstehen, was Leben ist, ist also Teil der Grundlagenforschung und unterscheidet sich in den Forschungszielen von der Biotechnologie.
- Mit der Synthetischen Biologie wird eine neue Dimension der Systematisierung mikrobiologischer «Bausteine» möglich.
- Dadurch wird eine Produktion von Organismen möglich, die eine qualitative Neuheit – im Sinne des Fehlens eines «natürlichen Vorbildes» – besitzen, die bloß manipulierte Organismen nicht haben.
- Durch die Synthetische Biologie verschiebt sich der menschliche Umgang mit der Natur vom Paradigma der Manipulation zu dem der Kreation. Auch wenn die Grenze zwischen bloßen Manipulationen und einem echten Kreieren schwierig zu ziehen bleibt, weil der Umschlagspunkt von quantitativen zu qualitati-

ven Veränderungen nie ganz eindeutig zu bestimmen sein wird, kann man doch mit guten Gründen an dieser Unterscheidung festhalten.

Wegen dieser Charakteristika ist die Synthetische Biologie zurecht Gegenstand ethischer Reflexionen. Solche ethischen Reflexionen haben mehrere Aufgaben und Ziele. Zunächst muss es darum gehen, zu klären, ob es manifeste Risiken oder Missbrauchsgefahren gibt, die mit den Forschungszielen der Synthetischen Biologie und den angestrebten Anwendungen einhergehen können und die mit ethischen Normen konfliktieren könnten. Hinsichtlich dieser Frage unterscheidet sich die Synthetische Biologie grundsätzlich nicht von anderen Wissenschaften und deren Anwendungen oder Anwendungspotentialen. Hehre Erkenntnisziele («die Natur besser verstehen») und moralisch begründbare Anliegen («wirksamere Medikamente entwickeln») stehen auch in diesem Feld Missbrauchsszenarien aller Art ebenso gegenüber wie die kommerzielle Indienstnahme der Forschung. Auch die Synthetische Biologie kennt das dual-use-Problem, das jede Technologie kennzeichnet. Es wird im Fall der Synthetischen Biologie jedoch insbesondere dadurch virulent, dass Bereiche des Lebendigen einem ingenieur- und informationswissenschaftlichem Zugriff ausgesetzt sind und standardisiert und modularisiert werden, was die Möglichkeiten missbräuchlicher Verwendungen steigert. Ebenso sind auch die Risiken der Synthetischen Biologie dadurch auf besondere Weise gekennzeichnet, dass bei technisch neu erschaffenen Organismen ein anderes Maß an Unkontrollierbarkeit vorliegt als bei bloßen Artefakten oder bekannten Organismen.

Die manifesten Risiken und Missbrauchsgefahren der Synthetischen Biologie, die durch den umfassenden technischen Zugriff auf Leben auf charakteristische Weise konturiert werden, müssen in einer ethischen Reflexion darüber hinaus ergänzt werden durch die schwerer konkret zu fassenden Implikationen, die der biotechnologische Zugang zum Lebendigen mit sich bringt. Denn auch diese weniger konkret zu beschreibenden Veränderungen von Einstellungen und Überzeugungen können ethisch relevante Veränderungen des Umgangs mit diesen Entitäten zur Folge haben.

Auch wenn mit der Synthetischen Biologie «Leben» selbst nicht aus dem Nichts geschaffen werden kann, so haben doch die neuen

Lebensformen, die sie produzieren kann, möglicherweise große Auswirkungen auf unser Bild des Lebendigen und auf den Wert, den wir ihm zusprechen. Gerade da es ein erklärtes «ontologisches Ziel» der Synthetischen Biologie ist, nicht nur Organismen zu manipulieren, sondern völlig neuartige Formen zu erfinden, muss dieses Ziel auf seine ethischen Implikationen kritisch untersucht werden. – Folgende Aspekte sind dabei von besonderem Interesse:

- Der für die Versuchsanordnung methodisch reduzierte Lebensbegriff, den die Synthetische Biologie verwendet, kann dazu führen, «Leben» zu unterschätzen und suggeriert daher möglicherweise eine Kontrollierbarkeit von Lebensprozessen, die so nicht gegeben ist.
- Zentrale Begriffe und Metaphern der Synthetischen Biologie – «living machine», «artificial cell» – sind rein semantisch höchst problematisch und implizieren ontologisch ein Bild des Lebendigen als Artefakt. Dieses Verwischen der Grenze zwischen Lebendigem und Technischem kann weitreichende Folgen haben für Einschätzung und Umgang mit Lebendigem.
- Dies wiederum kann zu einer Änderung des menschlichen Selbstverständnisses führen. Die Vorstellung des Menschen als eines Technikers, als homo faber, scheint durch die Synthetische Biologie erweitert zu werden; der Mensch scheint hier zum homo creator zu werden, scheint also nicht nur ein Produzent von Artefakten oder ein Manipulator natürlicher Prozesse, sondern ein veritabler «Schöpfer» von Leben zu sein.

9. Literatur

Amyris Biotechnologies: Biofuels Project,

http://www.amyrisbiotech.com/projects_biofuels.html.

Anders, G. (1980), Die Antiquiertheit des Menschen. Über die Zerstörung des Lebens im Zeitalter der dritten industriellen Revolution, München.

Andrianantoandro, E., S. Basu, D.K. Karig, R. Weiss (2006), «Synthetic biology: new engineering rules for an emerging discipline», *Mol Syst Biol* 2, article number 28.

Ball, P. (2004), «Synthetic biology: starting from scratch», *Nature* 431(7009), 624–626.

Ball, P. (2007), «Synthetic biology: designs for life», *Nature* 448(7149), 32–33.

Benner, S.A. (2003), «Synthetic biology: Act natural», *Nature* 421(6919), 118.

Benner, S.A., A.M. Sismour (2005), «Synthetic biology», *Nat Rev Genet* 6(7), 533–43.

Beyer, P., S. Al-Babili, X. Ye, P. Lucca, P. Schaub, R. Welsch, I. Potrykus (2002), «Golden Rice: introducing the beta-carotene biosynthesis pathway into rice endosperm by genetic engineering to defeat vitamin A deficiency», *J Nutr* 132(3), 506–510.

Bhutkar, A. (2005), «Synthetic biology: navigating the challenges ahead», *J Biolaw Bus* 8(2), 19–29.

BioBricks Foundation, <http://biobricks.org>.

Birnbacher, D. (2006), *Natürlichkeit*, Berlin.

- Bitbol, M., P.L. Luisi (2004), «Autopoiesis with or without cognition: defining life at its edge», *J R Soc Interface* 1(1), 99–107.
- Boldt, J., O. Müller (2008), «Newtons of the leaves of grass», *Nat Biotechnol* 26(4), 387–389.
- Breithaupt, H. (2006), «The engineer's approach to biology», *EMBO Rep* 7(1), 21–24.
- Brenner, A. (2007), *Leben – Eine philosophische Untersuchung*, Bern.
- BTWC (1972), <http://www.opbw.org/convention/documents/btwctext.pdf>.
- Burke, J.B. (1906), *The origin of life. Its physical basis and definition*, London.
- Canguilhem, G. (1985), *La connaissance de la vie*, Paris.
- Carlson, R. (2003), «The Pace and Proliferation of Biological Technologies», *Biosecurity and Bioterrorism: Biodefense Strategy, Practice, and Science* 1(3), 203–214.
- Carlson, R. (2007), «Laying the foundations for a bio-economy», *Systems and Synthetic Biology* 1(3), 109–117.
- Cello, J., A.V. Paul, E. Wimmer (2002), «Chemical synthesis of poliovirus cDNA: generation of infectious virus in the absence of natural template», *Science* 297(5583), 1016–1018.
- Chopra, P., A. Kamma (2006), «Engineering life through Synthetic Biology», *In Silico Biol* 6(5), 401–410.
- Church, G.M. (2005), «From systems biology to synthetic biology», *Mol Syst Biol* 1, article number 32.
- Convention on Biological Diversity (1992), <http://www.cbd.int/doc/legal/cbd-un-en.pdf>.
- De Vriend, H. (2006), «Constructing Life. Early social reflections on the emerging field of synthetic biology», Rathenau Institute, www.rathenau.nl/downloadfile.asp?ID=1331.
- Drubin, D.A., J.C. Way, P.A. Silver (2007), «Designing biological systems», *Genes Dev* 21(3), 242–254.
- European Commission (2003), Reference Document on Synthetic Biology, ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nest/docs/synthetic_biology.pdf.
- European Commission (2005), Synthetic Biology. Applying engineering to biology. Report of a NEST high-level expert group, ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nest/docs/syntheticbiology_b5_eur21796_en.pdf.
- European Commission (2006), Synbiology. An Analysis of Synthetic Biology Research in Europe and North America, <http://www2.spi.pt/synbiology/documents/news/D11%20-%20Final%20Report.pdf>.
- European Commission (2007), Synthetic biology: A NEST pathfinder initiative, <ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nest/docs/5-nest-synthetic-080507.pdf>.
- European Commission (2008), Background paper on Synbiosafe e-conference, www.synbiosafe.eu/forum/viewforum.php?f=2&sid=100ebd612941131c9ca2e7e0c571563.
- ETC Group (2007), Extreme Genetic Engineering. An Introduction to Synthetic Biology, http://www.etcgroup.org/en/materials/publications.html?pub_id=602.
- Ferber, D. (2004), «Synthetic biology. Microbes made to order», *Science* 303(5655), 158–161.
- Forster, A.C., G.M. Church (2006), «Towards synthesis of a minimal cell», *Mol Syst Biol* 2, article number 45.
- Forster, A.C., G.M. Church (2007), «Synthetic biology projects in vitro», *Genome Res* 17(1), 1–6.

- Fu, P. (2006), «A perspective of synthetic biology: assembling building blocks for novel functions», *Biotechnol J* 1(6), 690–699.
- Garfinkel, M.S., D. Endy, G.L. Epstein, R.M. Friedman (2007), *Synthetic Genomics. Options for Governance*, Cambridge.
- Gentechnikgesetz (2003), <http://www.admin.ch/ch/d/sr/8/814.91.de.pdf>.
- Gibson, D.G., G.A. Benders, C. Adrews-Pfannkoch, E.A. Denisora, H. Baden-Tillson, J. Zaveri, T.B. Stockwell, A. Brownley, D.W. Thomas, M.A. Algire, C. Merryman, L. Young, V.N. Noskor, J.I. Glass, J.C. Venter, C.A. Hutchinson, A. Clyde, H.O. Smith (2008), «Complete chemical synthesis, assembly, and cloning of a *Mycoplasma genitalium* genome», *Science* 319(5867), 1215–1220.
- Golden Rice Project, <http://www.goldenrice.org>.
- Güterkontrollgesetz (1996), <http://www.admin.ch/ch/d/sr/9/946.202.de.pdf>.
- iGEM Wettbewerb, <http://www.igem.org>.
- International Technical Guidelines for Safety in Biotechnology, <http://www.biosafetyprotocol.be/UNEPGuid/Contents.html>.
- Isaacs, F.J., D.J. Dwyer, J.J. Collins (2006), «RNA synthetic biology», *Nat Biotech* 24(5), 545–554.
- Itaya, M., K. Fujita, A. Kuroki, K. Tsuge (2008), «Bottom-up genome assembly using the *Bacillus subtilis* genome vector», *Nat Methods* 5(1), 41–43.
- Itaya, M., K. Tsuge, M. Koizumi, K. Fujita (2005), «Combining two genomes in one cell: stable cloning of the *Synechocystis* PCC6803 genome in the *Bacillus subtilis* 168 genome», *Proc Natl Acad Sci U S A* 102(44), 15971–15976.
- Jakovovits, A., R.G. Amado, X. Yang, L. Roskos, G. Schwab (2007), «From Xenomouse technology to panitumumab, the first fully human antibody product from transgenic mice», *Nat Biotechnol* 25(10), 1134–1143.
- Jakovovits, A., L.L. Green, M.C. Hardy, C.E. Maynard-Currie, H. Tsuda, D.M. Louie, M.J. Mendez, H. Abderrahim, M. Noguchi, D.H. Smith, et al. (1995), «Production of antigen-specific human antibodies from mice engineered with human heavy and light chain YACs», *Ann N Y Acad Sci* 764(1), 525–535.
- Janich, P. (2006), *Was ist Information? Kritik einer Legende*, Frankfurt am Main.
- Karafyllis, N.C. (2006), «Biofakte – Grundlagen, Probleme, Perspektiven», *Erwägen, Wissen, Ethik* 17(4), 547–558.
- Kay, L.E. (2000), *Who wrote the book of life? A history of the genetic code*, Stanford.
- Kelle, A. (2007), *Synthetic Biology & Biosecurity Awareness in Europe*, http://www.synbiosafe.eu/uploads///pdf/Synbiosafe-Security_awareness_in_Europe_Kelle.pdf.
- Keller, E.F. (2002), *Making sense of life. Explaining biological development with models, metaphors, and machines*, Cambridge.
- Krohs, U., G. Toepfer (2005), *Philosophie der Biologie: Eine Einführung*, Frankfurt am Main.
- Küppers, B.-O. (1986), *Der Ursprung biologischer Information. Zur Naturphilosophie der Lebensentstehung*, München.
- Leduc, S. (1912), *La Biologie Synthétique*, Paris.
- Levskaya, A., A.A. Chevalier, J.J. Tabor, Z.B. Simpson, L.A. Lavery, M. Levy, E.A. Davidson, A. Scouras, A.D. Ellington, E.M. Marcotte, C.A. Voigt (2005), «Synthetic biology: Engineering *Escherichia coli* to see light», *Nature* 438(7067), 441–442.
- Loeb, J. (1906), *The Dynamics of Living Matter*, New York.
- Loeb, J. (1911), *Das Leben. Vortrag gehalten auf dem ersten Monisten-Kongresse zu Hamburg am 10. September 1911*, Leipzig.

- Luisi, P.L. (2002), «Toward the engineering of minimal living cells», *Anat Rec* 268(3), 208–214.
- Luisi, P.L. (2007), «Chemical aspects of synthetic biology», *Chem Biodivers* 4(4), 603–621.
- Luisi, P.L., F. Ferri, P. Stano (2006), «Approaches to semi-synthetic minimal cells: a review», *Naturwissenschaften* 93(1), 1–13.
- Mayr, E. (1997), *This is biology. The science of the living world*, Cambridge.
- Monnard, P.A., D.W. Deamer (2002), «Membrane self-assembly processes: steps toward the first cellular life», *Anat Rec* 268(3), 196–207.
- Pauly, P.J. (1987), *Controlling Life. Jacques Loeb and the engineering ideal in Biology*, New York.
- Pohorille, A., D. Deamer (2002), «Artificial cells: prospects for biotechnology», *Trends in Biotechnology* 20(3), 123–128.
- Registry of Standard Biological Parts, letzter Zugriff am 28.08.2008, <http://partsregistry.org>.
- Rheinberger, H.-J. (2006), *Experimentalsysteme und epistemische Dinge: Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas*, Frankfurt am Main.
- Ro, D.-K., E.M. Paradise, M. Ouellet, K.J. Fisher, K.L. Newman, J.M. Ndungu, K.A. Ho, R.A. Eachus, T.S. Ham, J. Kirby, M.C.Y. Chang, S.T. Withers, Y. Shiba, R. Sarpong, J.B. Keasling (2006), «Production of the antimalarial drug precursor artemisinic acid in engineered yeast», *Nature* 440(7086), 940–943.
- Rutz, B. (2007), «Synthetic biology through the prism of scenarios», *Biotechnol J* 2(9), 1072–1075.
- Schark, M. (2005), *Lebewesen versus Dinge. Eine metaphysische Studie*, Berlin.
- Selgelid, M.J. (2007), «A Tale of Two Studies. Ethics, Bioterrorism, and the Censorship of Science», *Hastings Center Report* 37(3), 35–43.
- Serrano, L. (2007), «Synthetic biology: promises and challenges», *Mol Syst Biol* 3, article number 158.
- Shreeve, J. (2006), «Redesigning Life to Make Ethanol», *Technology Review* 109(3), 66–68.
- Spaemann, R., R. Löw (2005), *Natürliche Ziele: Geschichte und Wiederentdeckung teleologischer Denksysteme*, Stuttgart.
- Synbiology Project: Datenbank Synthetic Biology, <http://www.synthetic-biology.info>.
- Synbiosafe Project: Safety and Ethical Aspects of Synthetic Biology, <http://www.synbiosafe.eu>.
- Synthetic Genomics, <http://www.syntheticgenomics.com/index.htm>.
- Szostak, J.W., D.P. Bartel, P.L. Luisi (2001), «Synthesizing life», *Nature* 409(6818), 387–390.
- Szybalski, W. (1974), «In vivo and in vitro initiation of transcription», *Adv Exp Med Biol* 44(1), 23–24.
- Szybalski, W., A. Skalka (1978), «Nobel prizes and restriction enzymes», *Gene* 4(3), 181–182.
- TESSY (2008), Information leaflet: Synthetic Biology in Europe, http://www.tessy-europe.eu/public_docs/SyntheticBiology_TESSY-Information-Letter.pdf.
- TESSY (Towards a European Strategy for Synthetic Biology), <http://www.tessy-europe.eu/>.
- The New Atlantis, Editorial (2004), *Life from Scratch – Promises, Perils, and Pathogens: Breakthroughs in Synthetic Biology*. *The New Atlantis* 5, 101–103.
- Toepfer, G. (2005), *Der Begriff des Lebens*, in: Krohs, U., G. Toepfer (Hg.), *Philosophie der Biologie: Eine Einführung*, Frankfurt am Main.

Tucker, J.B., R.A. Zilinskas (2006), The promise and perils of synthetic biology, in: *The New Atlantis* 12, 25–45.

Tumpey, T.M., C.F. Basler, R.V. Aguilar, H. Zeug, A. Solórzano, D.E. Swayne, N.J. Cox, J.M. Katz, K.J. Taubenberger, P. Palese, A. García-Sastre (2005), «Characterization of the reconstructed 1918 Spanish influenza pandemic virus», *Science* 310(5745), 77–80.

U.S. Patent and Trademark Office: Patent application 20070122826, <http://patft.uspto.gov>.

Voigt, C.A., J.D. Keasling (2005), «Programming cellular function», *Nat Chem Biol* 1(6), 304–307.

Winnacker, E.-L. (1990), Synthetische Biologie, in: Herbig, J., R. Hohlfeld (Hg.), *Die zweite Schöpfung. Geist und Ungeist in der Biologie des 20. Jahrhunderts*, München, 369–385.

World Health Organisation (2003), *Laboratory Biosafety Manual*, <http://www.who.int/csr/resources/publications/biosafety/Labbiosafety.pdf>.

Yeh, B.J., W.A. Lim (2007), «Synthetic biology: lessons from the history of synthetic organic chemistry», *Nat Chem Biol* 3(9), 521–525.

10. Kommentiertes Quellenverzeichnis

Etwa seit der Jahrtausendwende beginnt sich der Disziplintitel «Synthetische Biologie» in der Fachliteratur herauszukristallisieren. Seitdem steigt die Zahl der Publikationen unter diesem Titel stetig an. Gleichzeitig beginnt eine gesellschaftliche Diskussion der Synthetischen Biologie und es etablieren sich einige Foren, die sich der Profilierung dieser Disziplin verschrieben haben. Um sich gut ein Bild von dem zu machen, was unter dem Titel «Synthetische Biologie» erforscht wird und wie der Stand der Reflexion der ethischen und sozialen Aspekte dieser Subdisziplin ist, findet sich im Folgenden die relevante Literatur zur Synthetischen Biologie nach Genres und Themen strukturiert. Dabei wurden Fachpublikationen ebenso berücksichtigt wie «graue Literatur» in Form von Gutachten, Stellungnahmen und Internetveröffentlichungen. Aufgenommen wurden auch repräsentative Artikel aus der internationalen Presse. Um die Literaturübersicht knapp zu halten, wurden nur Texte ausgewählt, die sich direkt mit der Synthetischen Biologie beschäftigen und also dazu beitragen, dieses Feld zu umreißen und zu kartieren. Weiterführende Literatur – etwa zum Lebensbegriff – wurde bewusst nicht aufgenommen. Denn um den vielfältigen ontologischen und ethischen Anschlussfragen gerecht zu werden, müsste man philosophisch und geistesgeschichtlich weiter ausholen; dafür ist hier nicht der Ort.

10.1 Fachaufsätze und Kapitel aus Monographien

Fachpublikationen gibt vor allem zu den naturwissenschaftlichen Problemstellungen, doch zeichnet sich auch bereits eine internationale ethische Debatte in Fachzeitschriften ab. Da sich auch bereits eine Reihe von Übersichtsartikeln finden, in denen das Feld allgemeiner vorgestellt wird, sei es mit einem programmatischen Anliegen, sei es in einem eher ethischen Interesse, wurde die Fachliteratur in drei Kategorien eingeteilt, in Übersichtsartikel, wissenschaftliche Fachpublikationen und ethische Artikel in Fachjournalen. Eine hundertprozentig genaue Trennschärfe zwischen Übersichtsartikeln und den beiden anderen Kategorien ist weder möglich noch angestrebt.

a) Übersichtsartikel, Reviews

Die Texte dieser Kategorie versammeln annähernd vollständig die breiter angelegten Artikel, die es zur Synthetischen Biologie gibt; sie vermitteln ein umfassendes Bild von dem Forschungsfeld, den Forschungszielen, den möglichen Anwendungen der Synthetischen Biologie und, zum Teil, in Grundzügen auch mögliche ethische oder soziale Probleme.

Aderem, A. (2005), «Systems biology: its practice and challenges», *Cell* 121(4), 511–513.

Andrianantoandro, E., S. Basu, D.K. Karig, R. Weiss (2006), «Synthetic biology: new engineering rules for an emerging discipline», *Mol Syst Biol* 2, article number 28.

Arkin, A. (2008), «Setting the standard in synthetic biology», *Nat Biotechnol* 26(7), 771–774.

Ball, P. (2004), «Synthetic biology: starting from scratch», *Nature* 431(7009), 624–626.

Ball, P. (2007), «Synthetic biology: designs for life», *Nature* 448(7149), 32–33.

Benner, S.A. (2003), «Synthetic biology: Act natural», *Nature* 421(6919), 118.

Benner, S.A., A.M. Sismour (2005), «Synthetic biology», *Nat Rev Genet* 6(7), 533–543.

Boeing, N. (2007), «Der Billionen-Dollar-Organismus», *Technology Review*, www.heise.de/tr/Der-Billionen-Dollar-Organismus-/artikel/90984.

Breithaupt, H. (2006), «The engineer's approach to biology», *EMBO Rep* 7(1), 21–24.

Chopra, P., A. Kamma (2006), «Engineering life through Synthetic Biology», *In Silico Biol* 6(5), 401–410.

Church, G.M. (2005), «From systems biology to synthetic biology», *Mol Syst Biol* 1, article number 25.

Drubin, D.A., J.C. Way, P.A. Silver (2007), «Designing biological systems», *Genes Dev* 21(3), 242–254.

Heinemann, M., S. Panke (2006), «Synthetic biology – putting engineering into biology», *Bioinformatics* 22(22), 2790–2799.

Hobom, B. (1980), «Genchirurgie: an der Schwelle zur synthetischen Biologie», *Med Klin* 75(24), 834–841.

Isaacs, F.J., D.J. Dwyer, J.J. Collins (2006), «RNA synthetic biology», *Nat Biotech* 24(5), 545–554.

Kaznessis, Y.N. (2007), «Models for synthetic biology», *BMC Syst Biol* 1(47).

Knight, T.F. (2005), «Engineering novel life», *Mol Syst Biol* 20, article number 20.

Liu, E.T. (2005), «Systems biology, integrative biology, predictive biology», *Cell* 121(4), 505–506.

Lorenzo, V.D., A. Danchin (2008), «Synthetic biology: discovering new worlds and new words. The new and not so new aspects of this emerging research field», *EMBO Rep* 9(9), 822–827.

Lorenzo, V.D., L. Serrano, A. Valencia (2006), «Synthetic Biology: challenges ahead», *Bioinformatics* 22(2), 127–128.

Pennisi, E. (2005), «Synthetic biology. Synthetic biology remakes small genomes», *Science* 310(5749), 769–770.

Peretó, J., J. Català (2007), «The Renaissance of Synthetic Biology», *Biological Theory* 2(2), 128–130.

Pleiss, J. (2006), «The promise of synthetic biology», *Applied Microbiology and Biotechnology* 73(4), 735–739.

Serrano, L. (2007), «Synthetic biology: promises and challenges», *Mol Syst Biol* 3, article number 158.

Sismour, A.M., S.A. Benner (2005), «Synthetic biology», *Expert Opin Biol Ther* 5(11), 1409–1414.

Szostak, J.W., D.P. Bartel, P.L. Luisi (2001), «Synthesizing life», *Nature* 409(6818), 387–390.

Szybalski, W., A. Skalka (1978), «Nobel prizes and restriction enzymes», *Gene* 4(3), 181–182.

Woese, C.R. (2004), «A New Biology for a New Century», *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 68(2), 173–186.

Yeh, B.J., W.A. Lim (2007), «Synthetic biology: lessons from the history of synthetic organic chemistry», *Nat Chem Biol* 3(9), 521–525.

b) Forschungsfeld und Forschungsergebnisse

Was die naturwissenschaftlichen Fachpublikationen angeht, musste am deutlichsten eine Auswahl getroffen werden, denn in der internationalen Forschungsliteratur findet sich nicht nur eine schnell wachsende Zahl an Arbeiten speziell zur Synthetischen Biologie, sondern auch Arbeiten, die sich mit ähnlichen Fragen – etwa dem Ursprung des Lebens – oder Arbeiten, die in angrenzenden oder eng verwandten Gebieten, wie es etwa bei der Systembiologie der Fall ist, entstehen. Daher wurden hier die einschlägigen Artikel ausgewählt, die die aktuelle Forschung – und entsprechend ihre Protagonisten – am signifikantesten repräsentieren.

Beyer, P., S. Al-Babili, X. Ye, P. Lucca, P. Schaub, R. Welsch, I. Potrykus (2002), «Golden Rice: introducing the beta-carotene biosynthesis pathway into rice endosperm by genetic engineering to defeat vitamin A deficiency», *J Nutr* 132(3), 506–510.

Bitbol, M., P.L. Luisi (2004), «Autopoiesis with or without cognition: defining life at its edge», *J R Soc Interface* 1(1), 99–107.

Brenner, K., L. You, F. Arnold (2008), «Engineering microbial consortia: a new frontier in synthetic biology», *Trends in Biotechnology* 26(9), 483–489.

Bucci, M. (2007), «Berkeley Centre for Synthetic Biology», *Nature Chemical Biology* 3(9), 527.

Canton, B., A. Labno, D. Endy (2008), «Refinement and standardization of synthetic biological parts and devices», *Nat Biotechnol* 26(7), 787–793.

Cello, J., A.V. Paul, E. Wimmer (2002), «Chemical synthesis of poliovirus cDNA: generation of infectious virus in the absence of natural template», *Science* 297(5583), 1016–1018.

Channon, K., E.H. Bromley, D.N. Woolfson (2008), «Synthetic biology through biomolecular design and engineering», *Curr Opin Struct Biol* 18(4), 491–498.

Deamer, D.W. (1997), «The first living systems: a bioenergetic perspective», *Microbiol Mol Biol Rev* 61(2), 239–261.

Endy, D. (2008), «Reconstruction of the Genomes», *Science* 319(5867), 1196–1197.

Endy, D., R. Brent (2001), «Modelling cellular behaviour», *Nature* 409(6818), 391–395.

Feist, A.M., B.O. Palsson (2008), «The growing scope of applications of genome-scale metabolic reconstructions using *Escherichia coli*», *Nat Biotechnol* 26(6), 659–667.

Ferber, D. (2004), «Synthetic biology. Microbes made to order», *Science* 303(5655), 158–161.

Filipovska, A., O. Rackham (2008), «Building a Parallel Metabolism within the Cell», *ACS Chem Biol* 3(1), 51–63.

Forster, A.C., G.M. Church (2006), «Towards synthesis of a minimal cell», *Mol Syst Biol* 2, article number 45.

Forster, A.C., G.M. Church (2007), «Synthetic biology projects in vitro», *Genome Res* 17(1), 1–6.

Fu, P. (2006), «A perspective of synthetic biology: assembling building blocks for novel functions», *Biotechnol J* 1(6), 690–699.

Gibson, D.G., G.A. Benders, C. Adreus-Pfannkoch, E.A. Denisora, H. Baden-Tillson, J. Zaveri, T.B. Stockwell, A. Brownley, D.W. Thomas, M.A. Algire, C. Merryman, L. Young, V.N. Noskor, J.I. Glass, J.C. Venter, C.A. Hutchinson, A. Clyde, H.O. Smith (2008), «Complete chemical synthesis, assembly, and cloning of a *Mycoplasma genitalium* genome», *Science* 319(5867), 1215–1220.

Glass, J.I., N. Assad-Garcia, N. Alperovich, S. Yooseph, M.R. Lewis, M. Maruf, C.A. Hutchinson, H.O. Smith, J.C. Venter (2006), «Essential genes of a minimal bacterium», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103(2), 425–430.

Greber, D., M. Fussenegger (2007), «Mammalian synthetic biology: engineering of sophisticated gene networks», *J Biotechnol* 130(4), 329–345.

Itaya, M., K. Fujita, A. Kuroki, K. Tsuge (2008), «Bottom-up genome assembly using the *Bacillus subtilis* genome vector», *Nat Methods* 5(1), 41–43.

Itaya, M., K. Tsuge, M. Koizumi, K. Fujita (2005), «Combining two genomes in one cell: stable cloning of the *Synechocystis* PCC6803 genome in the *Bacillus subtilis* 168 genome», *Proc Natl Acad Sci U S A* 102(44), 15971–15976.

Jakovovits, A., R.G. Amado, X. Yang, L. Roskos, G. Schwab (2007), «From XenoMouse technology to panitumumab, the first fully human antibody product from transgenic mice», *Nat Biotechnol* 25(10), 1134–1143.

Jakovovits, A., L.L. Green, M.C. Hardy, C.E. Maynard-Currie, H. Tsuda, D.M. Louie, M.J. Mendez, H. Abderrahim, M. Noguchi, D.H. Smith, et al. (1995), «Production of antigen-specific human antibodies from mice engineered with human heavy and light chain YACs», *Ann N Y Acad Sci* 764(1), 525–535.

Keasling, J.D. (2008), «Synthetic biology for synthetic chemistry», *ACS Chem Biol* 3(1), 64–76.

Kool, E.T. (2000), «Synthetically modified DNAs as substrates for polymerases», *Curr Opin Chem Biol* 4(6), 602–608.

Levsikaya, A., A.A. Chevalier, J.J. Tabor, Z.B. Simpson, L.A. Lavery, M. Levy, E.A. Davidson, A. Scouras, A.D. Ellington, E.M. Marcotte, C.A. Voigt (2005), «Synthetic biology: Engineering *Escherichia coli* to see light», *Nature* 438(7067), 441–442.

Luisi, P.L. (2002), «Toward the engineering of minimal living cells», *Anat Rec* 268(3), 208–214.

Luisi, P.L. (2003), «Autopoiesis: a review and a reappraisal», *Naturwissenschaften* 90(2), 49–59.

Luisi, P.L. (2007), «Chemical aspects of synthetic biology», *Chem Biodivers* 4(4), 603–621.

Luisi, P.L., F. Ferri, P. Stano (2006), «Approaches to semi-synthetic minimal cells: a review», *Naturwissenschaften* 93(1), 1–13.

Monnard, P.A., D.W. Deamer (2002), «Membrane self-assembly processes: steps toward the first cellular life», *Anat Rec* 268(3), 196–207.

Park, J.H., S.Y. Lee (2008), «Towards systems metabolic engineering of microorganisms for amino acid production», *Curr Opin Biotechnol* 19 (in Print).

Pohorille, A., D. Deamer (2002), «Artificial cells: prospects for biotechnology», *Trends in Biotechnology* 20(3), 123–128.

Prather, K.L., C.H. Martin (2008), «De novo biosynthetic pathways: rational design of microbial chemical factories», *Curr Opin Biotechnol* 19 (in Print).

Ro, D.-K., E.M. Paradise, M. Ouellet, K.J. Fisher, K.L. Newman, J.M. Ndungu, K.A. Ho, R.A. Eachus, T.S. Ham, J. Kirby, M.C.Y. Chang, S.T. Withers, Y. Shiba, R. Sarpong, J.B. Keasling (2006), «Production of the antimalarial drug precursor artemisinic acid in engineered yeast», *Nature* 440(7086), 940–943.

Shetty, R.P., D. Endy, T.F. Knight, Jr. (2008), «Engineering BioBrick vectors from BioBrick parts», *J Biol Eng* 2(1), 5.

Shreeve, J. (2006), «Redesigning Life to Make Ethanol», *Technology Review* 109(3), 66–68.

Sia, S.K., B.M. Gillette, G.J. Yang (2007), «Synthetic tissue biology: tissue engineering meets synthetic biology», *Birth Defects Res C Embryo Today* 81(4), 354–361.

Smith, H.O., C.A. Hutchison, C. Pfannkoch, J.C. Venter (2003), «Generating a synthetic genome by whole genome assembly: phiX174 bacteriophage from synthetic oligonucleotides», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100(26), 15440–15445.

Szybalski, W. (1974), «In vivo and in vitro initiation of transcription», *Adv Exp Med Biol* 44(1), 23–24.

Tumpey, T.M., C.F. Basler, R.V. Aguilar, H. Zeug, A. Solórzano, D.E. Swayne, N.J. Cox, J.M. Katz, K.J. Taubenberger, P. Palese, A. García-Sastre (2005), «Characterization of the reconstructed 1918 Spanish influenza pandemic virus», *Science* 310(5745), 77–80.

Voigt, C.A., J.D. Keasling (2005), «Programming cellular function», *Nat Chem Biol* 1(6), 304–307.

c) Ethische und soziale Implikationen

Die wichtigen Fachpublikationen zu ethischen Implikationen im weitesten Sinne finden sich unter dieser Rubrik vollständig versammelt. Darunter fällt eine große Bandbreite an Themen, von generellen gesellschaftspolitischen Überlegungen, über Versuche, die Synthetische Biologie vor dem Hintergrund der Biosecurity und der Biosafety, der Wissenschaftsfreiheit bis hin zu ersten patentrechtlichen Überlegungen. Gebündelt finden sich die verschiedenen ethischen Aspekte der Synthetischen Biologie zur Zeit noch eher in den bislang veröffentlichten Gutachten und Stellungnahmen.

Bhutkar, A. (2005), «Synthetic biology: navigating the challenges ahead», *J Biolaw Bus* 8(2), 19–29.

Boldt, J., O. Müller (2008), «Newtons of the leaves of grass», *Nat Biotechnol* 26(4), 387–389.

Boldt, J., O. Müller, K.M. Arndt, K.M. Müller (2008), «Von der Manipulation zur Kreation. Ethische und ontologische Aspekte der synthetischen Biologie», *Jahrbuch für Wissenschaft und Ethik* 13, 153–180.

Brenner, A. (2007), *Natürliche Artefakte der synthetischen Biologie*, in: Brenner, Andreas, *Leben – eine philosophische Untersuchung*, Bern, 155–166.

Bügl, H. (2007), «DNA synthesis and biological security», *Nature Biotechnology* 25(6), 627–629.

Carlson, R. (2003), «The Pace and Proliferation of Biological Technologies», *Biosecurity and Bioterrorism: Biodefense Strategy, Practice, and Science* 1(3), 203–214.

Carlson, R. (2007), «Laying the foundations for a bio-economy», *Systems and Synthetic Biology* 1(3), 109–117.

Check, E. (2006), «Synthetic biologists try to calm fears», *Nature* 441(7092), 388–389.

Church, G. (2005), «Let us go forth and safely multiply», *Nature* 438(7067), 423.

Greener, M. (2008), «Is the grass greener on the other side? Encouraging the development of synthetic biology in Europe», *EMBO Rep* 9(9), 835–837.

Henkel, J., S.M. Maurer (2007), «The economics of synthetic biology», *Mol Syst Biol* 3, article number 117.

Keller, E.F. (2002), *Synthetic biology and the origin of living form*, in: Keller, Evelyn Fox, *Making sense of life. Explaining biological development with models, metaphors, and machines*, Cambridge, 15–49.

O'Malley, M., A. Powell, J.F. Davies, J. Calvert (2007), «Knowledge-making distinctions in synthetic biology», *BioEssays* 30(1), 57–65.

Powell, A., M.A. O'Malley, S. Müller-Wille, J. Calvert, J. Dupré (2007), «Disciplinary Baptisms: A Comparison of the Naming Stories of Genetics, Molecular Biology, Genomics, and Systems Biology», *Hist Philo Life Sci* 29(1), 5–32.

Rai, A., J. Boyle (2007), «Synthetic biology: caught between property rights, the public domain, and the commons», *PLoS Biol* 5(3), 58.

Rutz, B. (2007), «Synthetic biology through the prism of scenarios», *Biotechnol J* 2(9), 1072–1075.

Schmidt, M. (2006), «Public will fear biological accidents, not just attacks», *Nature* 441(7097), 1048.

Schmidt, M. (2008), «Diffusion of synthetic biology: a challenge to biosafety», *Systems and Synthetic Biology* 1 (in Print).

Selgelid, M.J. (2007), «A Tale of Two Studies. Ethics, Bioterrorism, and the Censorship of Science», *Hastings Center Report* 37(3), 35–43.

Balmer, A., P. Martin, «Synthetic Biology – Social and Ethical Challenges», Institute for Science and Society, University of Nottingham, http://www.bbsrc.ac.uk/organisation/policies/reviews/scientific_areas/0806_synthetic_biology.pdf.

Craig Venter Institute (2007), *Synthetic Genomics Report*, <http://www.jcvi.org/cms/fileadmin/site/research/projects/synthetic-genomics-report/synthetic-genomics-report.pdf>.

De Vriend, H. (2006), «Constructing Life. Early social reflections on the emerging field of synthetic biology», Rathenau Institute, www.rathenau.nl/downloadfile.asp?ID=1331.

European Commission (2003), *Reference Document on Synthetic Biology*, ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nest/docs/synthetic_biology.pdf.

European Commission (2005), *Synthetic Biology. Applying engineering to biology. Report of a NEST high-level expert group*, ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nest/docs/syntheticbiology_b5_eur21796_en.pdf.

European Commission (2006), *Synbiology. An Analysis of Synthetic Biology Research in Europe and North America*, <http://www2.spi.pt/synbiology/documents/news/D11%20-%20Final%20Report.pdf>.

European Commission (2007), *Synthetic biology: A NEST pathfinder initiative*, <ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nest/docs/5-nest-synthetic-080507.pdf>.

ETC Group (2006), *Backgrounder on Synthetic Biology Open Letter*, www.etcgroup.org/en/materials/publications.html?id=11.

ETC Group (2006), *Open Letter: Global Coalitions Sounds the Alarm on Synthetic Biology*, www.etcgroup.org/en/materials/publications.html?pub_id=8.

ETC Group (2007), *Backgrounder: J. Craig Venter Institute's patent application on World's First Human-Made Species*, www.etcgroup.org/upload/publication/pdf_file2/631.

10.2 Stellungnahmen und Gutachten

Es ist auffällig, dass die wissenschaftliche Etablierung des Forschungsfeldes «Synthetische Biologie» von Anfang an begleitet war von einer breiteren gesellschaftlich-politischen Reflexion. Dies zeigt sich zum einen an einschlägigen Publikationen in Fachzeitschriften, es zeigt sich zum anderen aber auch in einer Reihe von umfassenderen Stellungnahmen und Gutachten. Die Spannweite der Institutionen, die diese Stellungnahmen veröffentlicht haben, spiegelt die Breite der Interessenlagen, mit denen sich die Synthetische Biologie konfrontiert sieht: Staatliche und überstaatliche Institutionen wie die EU-Kommission, das Parliamentary Office Großbritanniens und auch Wissenschaftsakademien wie die Akademie der Wissenschaften der Schweiz bemühen sich um Forschungsförderung, Sicherung von Akzeptanz und gesellschaftliche Vermittlung von Chancen und Risiken des Forschungsfeldes. Unabhängige Politikberatungsinstitute liefern Gesamtdarstellungen von Forschungsfeld und Implikationen der Forschung, und schließlich setzen Nichtregierungsorganisationen ihre kritische Begleitung von gentechnischer Forschung und Anwendung besonders im Hinblick auf Fragen der internationalen ökonomischen Gerechtigkeit und des Umweltschutzes fort.

ETC Group (2007), Extreme Genetic Engineering. An Introduction to Synthetic Biology, http://www.etcgroup.org/en/materials/publications.html?pub_id=602.

International Risks Governance Council (2008), Synthethic Biology – Risks and opportunities of an emerging field, www.irgc.org/IMG/pdf/IRGC_ConceptNote_SynthethicBiology_Final_30April.pdf.

Kelle, A. (2007), Synthetic Biology & Biosecurity Awareness in Europe, http://www.synbiosafe.eu/uploads///pdf/Synbiosafe-Security_awareness_in_Europe_Kelle.pdf.

Maurer, S.M., K.V. Lucas, S. Terrell (2006), «From Understanding to Action: Community-Based Options for Improving Safety and Security in Synthetic Biology», Goldan School of Public Policy, <http://gspp.berkeley.edu/iths/UC%20White%20Paper.pdf>.

Parliamentary Office of Science and Technology of the UK (2008), Synthetic biology, www.parliament.uk/documents/upload/postpn298.pdf.

Secretary-General of the UN (2006), To Expand the Benefits of Biotechnology, Migitate Risks, www.un.org/News/Press/docs/2006/sgsm10747.doc.htm.

Swiss Academy of Science, Forum Genforschung (2006), Synthethic Biology, www.geneticresearch.ch/downloads/FactSheet_def_d.pdf.

TESSY (Towards a European Strategy for Synthetic Biology), <http://www.tessy-europe.eu/>.

US National Research Committee (2006), Globalization, Biosecurity, and the Future of the Life Sciences, www.nap.edu/catalog.php?record_id=11567.

Van Est, R., H. De Vriend, B. Walhout (2007), «Constructing life: the world of synthetic biology», Rathenau Institut, www.rathenau.nl/downloadfile.asp?ID=1331.

10.3 Konferenzen

Die wichtigsten Konferenzen auf dem Gebiet der Synthetischen Biologie sind die «Synthetic Biology» – Konferenzen, die zum ersten Mal 2004 in den USA stattgefunden haben und die 2008 als «Synthetic Biology 4.0» in Hongkong fortgesetzt werden. Daneben gibt es einige kleinere Konferenzen, die im Folgenden ohne Anspruch auf Vollständigkeit ebenfalls aufgeführt sind. Hilfreich zur weiteren Orientierung ist insbesondere der Veranstaltungskalender unter www.syntheticbiology.org (s.u.).

Advances in Synthetic Biology Conference, Cambridge University, www.selectbiosciences.com/conferences/ASB2008.

Background paper on Synbiosafe e-conference (2008), European Comission: Synbiosafe, www.synbiosafe.eu/forum/viewforum.php?f=2&sid=100ebd612941131c9ca2e7e0c571563.

IDEA League Summerschool (2007), Synthetics: the ethics of Synthetic Biology, www.ethicsandtechnology.eu/images/uploads/Ethics_of_synthetic_biology.pdf.

Symposium on Synthetic Biology, Nov. 2008, IMP Vienna, www.vbc-phd-symposium.at/.

Synthetic Biology 1.0 Conference, Juni 2004, MIT Cambridge, http://syntheticbiology.org/Synthetic_Biology_1.0.html.

Synthetic Biology 2.0 Conference, Mai 2006, UC Berkeley, <http://pbd.lbl.gov/sbconf/>.

Synthetic Biology 3.0 Conference, Juni 2007, ETH Zürich, www.syntheticbiology3.ethz.ch.

Synthetic Biology 4.0 Conference, Okt. 2008, Hong Kong University, <http://sb4.biobricks.org>.

Veranstaltungskalender der Synthetic Biology Community, alle Konferenzen seit 2004, <http://syntheticbiology.org/Conferences.html>.

10.4 Berichte in internationalen Zeitungen und Magazinen

Die Forschungen und Forschungsimplicationen der Synthetischen Biologie haben ihren Weg in die internationale Presse gefunden. In den Medien präsent sind einerseits spektakuläre Ergebnisse der Forschung, andererseits aber auch ethische und soziale Beurteilungen. Auffällig ist, dass dabei mehr als bei Fachpublikationen das Thema der Erschaffung von künstlichem Leben im Mittelpunkt des Interesses steht.

Ahuja, A. (2007), Life is just a bowl of Petri, in: The Times, 02.07.2007.

Alberganti, M. (2008), La vie inventée de toutes pièces, in: Le Monde, 24.01.2008.

Angier, N. (2008), Pursuing Synthetic Life, Dazzled by Reality, in: New York Times, 05.02.2008.

Asendorpf, D. (2006), Nano in Gottes Namen in: Die Zeit, 28.09.2006

Blech, J. (2006), Die Neuerfindung des Lebens, in: Der Spiegel, 14.08.2006.

Boeing, N. (2006), Projekt Genesis, in: Die Zeit, 16.02.2006

Breuer, H. (2005), Gott spielen – Das Rennen um die erste künstliche Zelle, in: Zeit Wissen.

Charisius, H. (2007), Synthetisches Bakterium – Die Milliarden-Dollar-Mikrobe, in: Süddeutsche Zeitung Online, 14.06.2007.

Charisius, H. (2008), Schritt zum künstlichen Leben, in: Süddeutsche Zeitung Online, 24.01.2008.

Dyson, F.J. (2007), Unsere strahlende biotechnologische Zukunft – Grüne Träume, schwarze Pflanzen und die Überwindung der Armut, in: Neue Züricher Zeitung, 13.10.2007.

Henderson, M. (2007), Time to convince the public – Junk medicine: synthetic biology, in: The Times, 27.10.2007.

Herden, B. (2006), Synthetische Biologie – Forscher wollen neuartige Organismen erschaffen, in: Spiegel Online, 19.07.2006.

Hicklin, M. (2005), Auf dem Baumarkt des Lebens – Synthetische Biologie konstruiert Maschinen mit Bio-Bausteinen, in: Basler Zeitung, 02.12.2005

Hicklin, M. (2008), Im Dreisprung gegen Tuberkulose – Das Basler ETH-Department BSSE zeigt, was synthetische Biologie erreichen kann, in: Basler Zeitung, 11.07.2008.

Jung, J.M. (2008), Leben aus der Biokiste, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 25.01.2008.

Kastilan, S. (2008), Lebewesen oder Maschine? – Realisiert: Mikrobe aus dem Baukasten, in: Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, 28.01.2008.

Martin, H. (2007), J. Craig Venter überrascht mit Designer-Mikrobe – Der berühmt gewordene Biochemiker will das erste synthetische Lebewesen patentieren, in: Basler Zeitung, 22.06.2007.

Martin, H. (2007), Künstlich leben?, in: Basler Zeitung 29.06.2007.

Martin, H. (2007), Venters zweiter Streich, in: Basler Zeitung 29.06.2007.

Morin, H. (2007), Les biologistes cherchent à créer des formes synthétiques de vie, in: Le Monde, 30.06.2007.

Morin, H. (2007), Un projet de bactérie synthétique fait l'objet de demandes de brevet, in: Le Monde, 13.06.2007.

Morton, O. (2005), Life, Reinvented, in: Wired online.

Morton, O. (2007), Biology's New Forbidden Fruit, in: New York Times, 11.02.2005.

N.N. (2005), Bakterien bilden lebende Photos, in: Spiegel Online, 24.11.2005.

N.N. (2007), Biokünste, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 21.11.2007.

N.N. (2007), La vie synthétique dans les éprouvettes des biologistes, in: Le Monde, 30.06.2007.

N.N. (2007), Mad scientist who wants to put a microbe in your tank – Profile of Craig Venter, in: Times Online, 01.06.2007.

N.N. (2007), Wissenschaft und Phantasie, in: Neue Züricher Zeitung, 13.10.2007.

Pollack, A. (2005), Live From the Lab, a Culture Worth a Thousand Words, in: New York Times, 24.11.2005.

Pollack, A. (2006), Custom-Made Microbes, at Your Service, in: New York Times, 17.01.2006.

Pollack, A. (2007), How Do You Like Your Genes? Biofabs Take Orders, in: New York Times, 12.09.2007.

Pollack, A. (2008), Researchers Announce a Step Toward Synthetic Life, in: New York Times, 25.01.2008.

Pontin, J. (2007), First, Cure Malaria. Next, Global Warming, in: New York Times, 03.06.2007.

Rheinberger, H.-J. (2001), Lesen, Schreiben, Redigieren. Das Jahrhundert des Gens – eine Epoche mit ungewisser Zukunft, in: Neue Züricher Zeitung, 21.07.2001.

Rötzer, F. (2007), Leben 2.0, in: Gen-ethischer Informationsdienst, 01.08.2007.

Tucker, J.B., R.A. Zilinskas (2006), The promise and perils of synthetic biology, in: The New Atlantis – A journal of technology and society.

Wade, N. (2007), Genetic Engineers Who Don't Just Tinker, in: New York Times, 08.07.2007.

Wade, N. (2007), Scientists Transplant Genome of Bacteria, in: New York Times, 29.06.2007.

Wehner-V.Segesser, S. (2006), Organismen vom Reissbrett – In der synthetischen Biologie wollen Ingenieure lebende Systeme optimieren, in: Neue Züricher Zeitung 23.08.2006.

10.5 Internetquellen

Die Mehrzahl der in dieser Quellensammlung verzeichneten Texte ist online verfügbar. Es gibt jedoch einige Internetportale und Internetquellen, die die Aktivitäten im Bereich der Synthetischen Biologie besonders gut präsentieren oder auf besonders augenfällige Weise typifizieren. Die folgende Auswahl ist ein Versuch, solche besonders aussagekräftigen Internetseiten zusammenzustellen.

BioBricks Foundation, <http://biobricks.org>.

ETC Group: Synthetic Biology, www.etcgroup.org/en/issues/synthetic_biology.html.

European Commission: NEST Synbiology, www.spi.pt/synbiology.

iGEM Wettbewerb, <http://www.igem.org>.

Registry of Standard Biological Parts, <http://partsregistry.org>.

The Royal Society: How we are involved?, <http://royalsociety.org/page.asp?id=1233>.

Swiss Academy of Sciences – Forum Genforschung: Synthetic Biology, http://www.geneticresearch.ch/d/themen/Synthetic_Biology/.

Synbiology Project: Datenbank Synthetic Biology, <http://www.synthetic-biology.info>.

Synbiosafe Project: Safety and Ethical Aspects of Synthetic Biology, <http://www.synbiosafe.eu>.

Synthetic Biology Engineering Research Center Berkeley/US, <http://synberc.org>.

Synthetic Biology Community, <http://syntheticbiology.org>.

Die Buchreihe

Die Bücher der Reihe «Beiträge zur Ethik und Biotechnologie» können über das Bundesamt für Bauten und Logistik BBL, Verkauf Bundespublikationen, CH-3003 Bern, www.bundespublikationen.admin.ch (Artikel-Nummer angeben) oder über den Buchhandel bezogen werden. Als PDF können sie von der Website der Eidgenössischen Ethikkommission für die Biotechnologie im Ausserhumanbereich EKAH www.ekah.ch heruntergeladen werden.

In der Buchreihe

«Beiträge zur Ethik und Biotechnologie»

bisher erschienen:



Andreas Bachmann
Nanobiotechnologie
Eine ethische Auslegung
2006

126 Seiten
BBL-Artikelnummer: 810.001
ISBN: 978-3-905782-00-4

Die Nanobiotechnologie verfügt über ein enormes Potenzial. Dies lässt sich anhand von breiten (möglichen) Anwendungen in der Biomimetik, Medizin, Landwirtschaft und Ernährung («Nano-Food») verdeutlichen. Das Buch legt die in der Literatur diskutierten ethischen Aspekte der Nanobiotechnologie dar. Es handelt sich hierbei um die Aspekte Risiken für Mensch und Umwelt, Gerechtigkeit («Nano-Divide»), militärische Anwendungen, Datenschutz, Nanomedizin und Enhancement. Es liefert keine Antworten, sondern soll helfen, die Diskussion über den ethisch angemessenen Umgang mit der Nanobiotechnologie besser zu strukturieren.



Jürg Stöcklin
Die Pflanze
Moderne Konzepte der Biologie
2007

77 Seiten
BBL-Artikelnummer: 810.002
ISBN: 978-3-905782-01-1

Die Schweizerische Gesetzgebung verlangt, dass nicht nur bei Tieren, sondern auch bei Pflanzen die Würde der Kreatur geachtet wird. Bei Tieren gibt es gewisse Anhaltspunkte, worin ihre Würde besteht. Bei Pflanzen stellt sich die Frage, welche ihrer Eigenschaften Würde begründen könnten. Das Buch befasst sich aus der Sicht der modernen Biologie mit Pflanzen und deren Unterscheidung von Tieren. Auch wenn sie sich in ihrer Organisation grundsätzlich unterscheiden, so sind sie sich hinsichtlich ihrer zellulären Strukturen und dem Grad ihrer Komplexität doch sehr ähnlich. Das Buch beschreibt die Fähigkeiten von Pflanzen, Informationen aus ihrer Umgebung aufzunehmen, zu speichern und darauf zu reagieren. Vor diesem Hintergrund wird argumentiert, dass die Unterschiede zwischen Pflanzen und Tieren lediglich gradueller Natur sind. Aus biologischer Sicht kann keine Höherentwicklung von Tieren im Vergleich zu Pflanzen postuliert werden.



Andreas Brenner
Leben
Eine philosophische
Untersuchung
2007

192 Seiten
BBL-Artikelnummer: 810.003
ISBN: 978-3-905782-02-8

«Was ist Leben?» Zunächst wird gezeigt, warum diese Frage so schwierig zu beantworten ist und warum auch die Biowissenschaft wenig zur Aufklärung dieser Frage beiträgt. Im Unterschied dazu beschäftigt sich die Philosophie seit ihren Anfängen intensiv mit der Frage nach dem Leben. Biophilosophische Theorien des 20. Jahrhunderts greifen auf diese Positionen zurück und machen von unterschiedlichsten Ansätzen ausgehend die Selbstbezüglichkeit von Leben deutlich. Der so gewonnene Lebens-Begriff wird an Entwürfen «Künstlichen Lebens» getestet, z.B. an Projekten der Synthetischen Biologie. Dabei wird untersucht, ob und inwiefern der Lebens-Begriff hier anwendbar ist. Zum Abschluss der Untersuchung wird die Selbstbezüglichkeit von Lebendigem noch einmal aufgegriffen. Jüngste naturwissenschaftliche Beobachtungen lassen sich dahingehend deuten, dass Leben sich in der Stiftung von Sinn und Bedeutung artikuliert.



Benjamin Rath
Ethik des Risikos
Begriffe, Situationen, Entscheidungstheorien und Aspekte
2008

203 Seiten
BBL-Artikelnummer: 810.005.d
ISBN: 978-3-905782-03-5

Welchen Risiken darf eine Person sich selbst und andere aussetzen? «Ethik des Risikos» befasst sich mit der ethischen Bewertung von Handlungsentscheidungen, deren Umsetzung mit Unsicherheit verbunden ist. Im ersten Teil werden die wesentlichen risikoethischen Begriffe definiert und verschiedene Risikosituationen voneinander abgegrenzt. Im zweiten Teil werden drei unterschiedliche Entscheidungstheorien der Risikoethik (Bayesianische Entscheidungstheorie, Maximin-Prinzip, Precautionary Principle) diskutiert. Diese umfassen Positionen, die von einem durch Rationalität geprägten Ansatz reichen bis hin zu einem, der die Vermeidung des worst case anstrebt. Im dritten Teil werden weitere für die risikoethische Debatte bedeutende Aspekte ansatzweise ausgeführt, z.B. die Funktion der Zustimmung und der Kompensation, Individualrechte sowie die Eigentumsrechte an Risiken und deren Verteilung.