

Synthetische Biologie

Entwicklung einer neuen Ingenieurbiologie?

Interdisziplinäre Arbeitsgruppen
Forschungsberichte

Herausgegeben von der
Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften

Band 30

Mitglieder der interdisziplinären Arbeitsgruppe „Gentechnologiebericht“

Bernd Müller-Röber (Sprecher), Ferdinand Hucho (stellv. Sprecher), Nediljko Budisa, Boris Fehse,
Jürgen Hampel, Kristian Köchy, Jens Reich, Hans-Jörg Rheinberger, Hans-Hilger Ropers,
Jochen Taupitz, Jörn Walter

Synthetische Biologie

Entwicklung einer neuen Ingenieurbiologie?

Themenband der interdisziplinären Arbeitsgruppe Gentechnologiebericht

Kristian Köchy, Anja Hümpel (Hrsg.)



Diese Publikation erscheint mit Unterstützung der Senatsverwaltung für Wirtschaft Technologie und Forschung des Landes Berlin und des Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Brandenburg.

Der Verlag sowie die Autorinnen und Autoren haben alle Sorgfalt walten lassen, um vollständige und akkurate Informationen in diesem Buch zu publizieren. Der Verlag übernimmt weder Garantie noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für die Nutzung dieser Informationen, für deren Wirtschaftlichkeit oder fehlerfreie Funktion für einen bestimmten Zweck. Ferner kann der Verlag für Schäden, die auf einer Fehlfunktion von Programmen oder Ähnliches zurückzuführen sind, nicht haftbar gemacht werden. Auch nicht für die Verletzung von Patent- und anderen Rechten Dritter, die daraus resultieren. Eine telefonische oder schriftliche Beratung durch den Verlag über den Einsatz der Programme ist nicht möglich. Der Verlag übernimmt keine Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren, Programme usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenzeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen. Der Verlag hat sich bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber dennoch der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das einfache branchenübliche Honorar gezahlt.

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Alle Rechte vorbehalten

1. Auflage 2012

Herausgeberin der Reihe: Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften (BBAW)

Verlegerische Betreuung: Forum W – Wissenschaftlicher Verlag, Dornburg

Satz: Petra Florath, Berlin

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Printed in Germany

ISBN 978-3-940647-07-8

Vorwort

Die Synthetische Biologie – schenkt man der Medienberichterstattung und einigen ihrer prominenten Protagonisten Gehör – ist *die* neue Forschungsdisziplin der Lebenswissenschaften im 21. Jahrhundert: eine Ingenieurbiologie, die die Natur als Baukasten versteht und Leben aus seinen einzelnen Bausteinen beliebig neu zusammensetzt. Es geht um Erkenntnisgewinn über Lebensvorgänge, aber vor allem um innovative, ökonomische Anwendungen für die Biomedizin und Biotechnologie. Dabei sollen beispielsweise Mikroorganismen maßgeschneidert konstruiert werden, um neuartige Medikamente oder biologische Werkstoffe zu produzieren. Moderatere Stimmen hingegen sehen den Begriff „Synthetische Biologie“ aktuell geradezu inflationär gebraucht und in der gegenwärtigen Forschung eher eine konsequente Weiterentwicklung der modernen Gentechnologie. Das Ringen um die Deutungshoheit, ob nun neu oder nur neu etikettiert, ist ein bezeichnendes Element der fachinternen Debatte um die Synthetische Biologie. In der deutschen Öffentlichkeit ist die Synthetische Biologie ungeachtet ihrer rasanten Entwicklung im letzten Jahrzehnt noch weitgehend unbekannt. Jedoch werden bereits Befürchtungen von Verbraucherschutzorganisationen geäußert, dass hier eine neue, besorgniserregende Technik ohne eine hinreichende gesellschaftliche Diskussion entwickelt wird, die leichtfertig mit Leben und möglichen Risiken umgeht.

In diesem Spannungsfeld aus divergierenden Meinungen und damit verbundenen unklaren Chancen und Risiken will die interdisziplinäre Arbeitsgruppe „Gentechnologiebericht“ der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften (BBAW) zu mehr Transparenz im öffentlichen Diskurs beitragen. Initiiert von Ferdinand Hucho observiert die Arbeitsgruppe seit 2002 die Entwicklungen der Gentechnologie in Deutschland. Ihr Anliegen ist ein langfristiges und unabhängiges Monitoring der Hochtechnologie. Mit dem Erscheinen des ersten Gentechnologieberichts im Jahr 2005 wurde ein datengestütztes, indikatorenbasiertes Verfahren entwickelt, das die Problemfelder der Gentechnologie für den öffentlichen Diskurs greifbar macht. Neben der fortlaufenden Berichtsreihe sind in den letzten Jahren zusätzliche Themenbände er-

schiene, die einzelne Bereiche der Gentechnologie – wie hier erstmalig die Synthetische Biologie – detailliert in den Fokus nehmen.

Die offene Frage nach der Beziehung zwischen Gentechnologie und Synthetischer Biologie stellt dabei den Leitfaden für die einzelnen Beiträge dar. Entstanden ist ein umfassender Themenband, der die heterogenen Perspektiven auf das Forschungsfeld erfasst und diese als besonderen Charakter der Synthetischen Biologie anerkennt. In breiter Aufstellung werden dabei nicht nur wissenschaftlicher Sachstand und beispielhaft Anwendungen vorgestellt, sondern auch ethische Überlegungen, Blickwinkel der öffentlichen Wahrnehmung und die philosophischen Rahmenannahmen einer solchen Ingenieurbiologie diskutiert. Erstmals wurden in dieser Publikationsreihe Essays aufgenommen, die als „Spotlights“ einen persönlicheren Blick auf besondere Facetten der Synthetischen Biologie geben. Relevante Indikatoren sind in gewohnter Weise recherchiert worden und mit dem Stand Oktober 2012 wiedergegeben. Wie für alle Themen im Fokus der Arbeitsgruppe ist eine Fortschreibung vorgesehen, um die Entwicklung, die die Synthetische Biologie in Zukunft nehmen wird, verfolgen zu können.

Namentlich gekennzeichnete Beiträge geben nicht unbedingt die Meinung der Herausgeber oder der Arbeitsgruppe wieder. Die Arbeitsgruppe „Gentechnologiebericht“ verantwortet gemeinsam die Kernaussagen und Handlungsempfehlungen. Sie stellen die Meinung der Arbeitsgruppe dar, die nicht notwendigerweise von allen Mitgliedern der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften vertreten werden; die Akademie steht jedoch hinter der Qualität der geleisteten Arbeit.

Herzlich gedankt sei Silke Domasch für die vielfältige Unterstützung bei Konzeption und Management des Buchprojektes sowie Lilian Marx-Stölting und Martin Schmidt für die sorgfältige Durchsicht des finalen Manuskripts; an Petra Florath geht wieder ein großer Dank für die ausgezeichnete Zusammenarbeit beim Setzen des Themenbandes.

Bernd Müller-Röber

Sprecher der interdisziplinären Arbeitsgruppe „Gentechnologiebericht“ der BBAW

Berlin, im Oktober 2012

Inhalt

Zusammenfassung 11

Interdisziplinäre Arbeitsgruppe „Gentechnologiebericht“

Kernaussagen und Handlungsempfehlungen 29

Kristian Köchy

1. Was ist Synthetische Biologie? 33

- 1.1 Klassifikation nach Verfahrenstyp 42
- 1.2 Klassifikation nach Anwendungsfeldern oder Produktionsbereichen 43
- 1.3 Klassifikation nach (biologischen) Forschungsobjekten 44
- 1.4 Klassifikation nach dem veranschlagten Technologieideal 46
- 1.5 Klassifikation nach den Paradigmen und Leitbildern 47
- 1.6 Literatur 47

Julia Diekämper, Anja Hümpel

2. Synthetische Biologie in Deutschland. Eine methodische Einführung 51

- 2.1 Indikatorenzentrierte Problemfeldanalyse 51
- 2.2 Aktuelle Problemfelder der Synthetischen Biologie in Deutschland und Indikatoren für ihre Beschreibung 52
- 2.3 Literatur 60

Heiner Fangerau

3. Zur Geschichte der Synthetischen Biologie 61

- 3.1 Synthetische Biologie 63
- 3.2 Techniqueuphorie 64
- 3.3 Legitimation und Kritik 73
- 3.4 Schlussfolgerungen 75
- 3.5 Literatur 80

Nediljko Budisa

4. Chemisch-Synthetische Biologie	85
4.1 Terminologie	85
4.2 Synthese von „Leben“ in der Synthetischen Biologie	87
4.3 Synthese von „Leben“ in der Chemie	89
4.4 Top-down-Ansätze in der Synthetischen Biologie	91
4.5 Bottom-up-Ansätze in der Synthetischen Biologie	94
4.6 Systems Engineering und Synthetische Biologie	97
4.7 Definition des Lebens – das Chemoton-Konzept	99
4.8 Definieren eines minimalen Bakteriengenoms	103
4.9 Xenobiologie	108
4.10 Literatur	112

Natascha Hotz, Wilfried Weber

5. Therapeutische Perspektiven der Synthetischen Biologie	117
5.1 Synthetische genetische Schalter und Netzwerke	117
5.2 Prävention von Krankheiten	119
5.3 Entdeckung von neuen Medikamenten dank genetischer Schalter	120
5.4 Integration synthetischer genetischer Schalter in den Wirtsorganismus	125
5.5 Transfer von biologischen Schaltern aus der Synthetischen Biologie in die Materialwissenschaften zur Synthese intelligenter Materialien	129
5.6 Zusammenfassung und Ausblick	131
5.7 Literatur	132

Hanna Wagner, Volker Morath

Spotlight I: iGEM – Eine studentische Ideenwerkstätte der Synthetischen Biologie	134
---	-----

Kristian Köchy

6. Philosophische Implikationen der Synthetischen Biologie	137
6.1 Synthetische Biologie als Forschungsprogramm	137
6.2 Der philosophische Rahmen der Synthetischen Biologie	139
6.3 Der Denkstil des Ingenieurs	140

6.4	Menschenbilder und Handlungskonzepte: Vom Homo faber zum Homo creator	143
6.5	Von der Biologie zur Ingenieurbiologie	145
6.6	Biotechnik als Sonderform der Technik?	147
6.7	Organismen als Maschinen?	150
6.8	Maschine und „automaton“	151
6.9	Plastische Maschinen: Von klassischen Energiewandlern zur Kybernetik	153
6.10	Selbstreplizierende Maschinen: Nanomaschinen und Assembler	155
6.11	Literatur	158
Hans-Jörg Rheinberger, Horst Bredekamp		
	Spotlight II: Die neue Dimension des Unheimlichen	162
Johannes Achatz, Martin O'Malley, Peter Kunzmann		
7.	Der Stand der ethischen Diskussionen um Synthetische Biologie	165
7.1	Ethik und Synthetische Biologie	165
7.2	Zum Aufbau: Konzeptuelle Fragen und reale ethische Probleme	167
7.3	Konzeptuelle Fragen	168
7.4	Ethische Probleme	174
7.5	Fazit	185
7.6	Literatur	186
Susanne Nessler		
	Spotlight III: Biohacker – Über Laienforscher und die Synthetische Biologie	192
Hille Haker		
8.	Eine Verhältnisbestimmung von Theologie und Synthetischer Biologie aus ethischer Sicht	195
8.1	Theologie und Wissenschaft	196
8.2	Die theologischen Grundsätze der christlichen Sozialethik – die Position der Kirche zur Biotechnologie	201
8.3	Perspektiven für die zukünftige theologisch-ethische Forschung zur Synthetischen Biologie	205
8.4	Vorläufiges Fazit	211
8.5	Literatur	212

Julia Diekämper

9. Die Synthetische Biologie in den Medien	215
9.1 Das Auftauchen der Synthetischen Biologie	218
9.2 Unter Hybrisverdacht: Wissenschaft als Eingriff in die Schöpfung	222
9.3 Wissenschaft als Spiel	226
9.4 Fazit	229
9.5 Literatur	231

Mila Burghardt

Spotlight IV: Its hot, its new, its alive – Super Cell, der Supermarkt des Lebens	234
--	-----

Jürgen Hampel

10. Synthetische Biologie – eine unbekannte Technologie	237
10.1 Bekanntheit	239
10.2 Informationssuche	241
10.3 Governance-Präferenzen	243
10.4 Bewertung der Synthetischen Biologie	248
10.5 Diskussion	253
10.6 Literatur	254

Anja Hümpel, Julia Diekämper

11. Daten zu ausgewählten Indikatoren	257
11.1 Einführung und Übersicht	257
11.2 Daten zu Forschungsstandort Deutschland, Realisierung wissenschaftlicher Ziele, öffentliche Wahrnehmung und Bewertung, gesetzlicher Rahmen, ethischer Umgang mit Leben, Lebensbegriff, Abgrenzung von Natur und Technik/Kultur und Dialogverpflichtung	261
11.3 Zusammenfassung	284
12. Anhang	286
12.1 Autorinnen und Autoren	286
12.2 Abbildungen und Tabellen	287

Zusammenfassung

Mit ihrem neuen Themenband wendet sich die interdisziplinäre Arbeitsgruppe „Gentechnologiebericht“ der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften erstmalig der in der Öffentlichkeit noch weitgehend unbekanntem Synthetischen Biologie zu. Von besonderer Faszination ist dabei die noch im Fluss befindliche Auseinandersetzung, was denn nun eigentlich die Synthetische Biologie ist und welche Forschungsansätze ihr konkret zuzuordnen sind. Entsteht hier wirklich eine neue Ingenieurbiologie? Nach einer inhaltlichen (Kapitel 1) und methodischen (Kapitel 2) Einführung beginnt die thematische Auseinandersetzung mit einer wissenschaftshistorischen Perspektive auf synthetisch-technische Traditionen in der Biologie (Kapitel 3). Anschließend wird der aktuelle naturwissenschaftliche Sachstand präsentiert mit einem Fokus auf chemisch-synthetische Forschungsansätze (Kapitel 4) und neue Anwendungen in der Biomedizin (Kapitel 5). Überdies werden in interdisziplinärer Ausrichtung der Arbeitsgruppe auch neue philosophische (Kapitel 6) und ethische (Kapitel 7 und 8) Implikationen der Synthetischen Biologie diskutiert. Als letzter Themenbereich wird die aktuelle gesellschaftliche Wahrnehmung der Disziplin besprochen: sowohl die gegenwärtige Berichterstattung zum Thema (Kapitel 9) als auch die öffentliche Meinung in Deutschland und Europa (Kapitel 10). Die inhaltlichen Ausführungen werden in gewohnter Weise durch quantitative Daten in Form von Indikatoren unterstützt (Kapitel 11). Ergänzt werden die Beiträge durch die gemeinsamen Kernaussagen und Handlungsempfehlungen der Mitglieder der Arbeitsgruppe für die Synthetische Biologie.

Kapitel 1: Was ist Synthetische Biologie? (Kristian Köchy)

Mit ihrem neuen Themenband wendet die Arbeitsgruppe „Gentechnologiebericht“ der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften ihre Aufmerksamkeit auf das aktuelle Forschungsgebiet der Synthetischen Biologie. Dabei stellt sich die Frage, ob diese Disziplin noch in den Bereich der Gentechnologie und damit in den Forschungsfokus eines „Gentechnologieberichts“ fällt. In medialer Aufarbeitung und Selbstdarstellung einiger Forschender aus dem Feld

scheint die neue Qualität der Synthetischen Biologie unstrittig. Die involvierten Fachwissenschaften und geisteswissenschaftlichen Reflexionen zum Fachgebiet hingegen bleiben in ihrer Beurteilung dieser Frage bezeichnenderweise weitgehend offen. Je nachdem jedoch, ob man die Synthetische Biologie als bloße Fortentwicklung der Gentechnologie oder als eigene neue Forschungsrichtung versteht, stellen sich andere Fragen zur Qualität der Forschungsprojekte der Synthetischen Biologie und ihrer Bedeutung im gesellschaftlichen Kontext. Die Arbeitsgruppe „Gentechnologiebericht“ hat deshalb die offene Frage nach der Beziehung zwischen Gentechnologie und Synthetischer Biologie zu einem Leitfaden ihres Monitorings gewählt. Die Einzelbeiträge mit ihren je heterogenen Perspektiven auf die Entwicklungen der Synthetischen Biologie folgen dieser Leitlinie.

Das selbsterklärte Ziel der Synthetischen Biologie ist, komplexe Biosysteme herzustellen und zu untersuchen, die strukturell und funktionell so in der Natur nicht existieren. Dabei werden in interdisziplinärer Ausrichtung biologische Ansätze mit Verfahren und Konzepten aus anderen Wissenschafts- und Technologiefeldern kombiniert. Als wichtigster Punkt kann dabei die Vernetzung mit Ingenieurwissenschaften angeführt werden. Als technische Ingenieurbiologie sollen durch rationale, datenbasierte Planung ganze Zellen oder Mikroorganismen von Grund auf im Labor neu konstruiert oder komplett umgestaltet werden. Oft wird diese „Konstruktion am Reißbrett“ im Gegensatz zu den „Ad-hoc-Verfahren“ der Gentechnologie gesehen, aber auch in der Synthetischen Biologie gibt es neben dem Denkstil des rationalen Designs das genau entgegengesetzte Ideal des pragmatischen, kreativen Ausprobierens und Bastelns. Des Weiteren wird die Synthetische Biologie häufig in Gegensatz zu auf Grundlagenforschung ausgerichteten Fachrichtungen gesetzt, aber eine scharfe Trennung von Grundlagenforschung und Anwendung wird den Bedingungen heutiger Forschung nicht gerecht. Nachbau, Manipulation und Neukonstruktion können in ein und demselben Forschungsansatz fließend ineinander übergehen. Zudem fallen große Teile der Synthetischen Biologie heute selbst noch in den Bereich der Grundlagenforschung.

Die Eingriffstiefe – von der Manipulation einzelner Gene bis hin zur Neukonstruktion von ganzen Biosystemen – und die Entfernung vom natürlichen Vorbild können zur Klassifizierung der einzelnen Ansätze herangezogen werden und zeigen auch die über die „klassische“ Gentechnologie hinausreichende Potenz der Synthetischen Biologie. Allerdings ist eine solche Abgrenzung nur relativ angesichts der jüngsten Entwicklungen innerhalb der Gentechnologie in Richtung auf immer umfassendere „Omics“-Methoden, die die Analyse ganzer Molekülklassen (wie

z. B. DNA-Moleküle, Proteine oder auch andere Stoffwechselprodukte) in einem Experiment ermöglichen.

Die konstruierende, systemische Ausrichtung der Synthetischen Biologie setzt sie insbesondere in engen Bezug zur Systembiologie, die die komplexen Vorgänge in Organismen in ihrer Ganzheit untersucht und modelliert. Unter Rückgriff auf klassische Methodenideale der Chemie, bei der man eine Analytische und eine Synthetische Chemie unterscheidet, gelten die Daten aus der Systembiologie als Basis für die Ansätze der Synthetischen Biologie, auch wenn hier die Grenzen wie schon angemerkt fließend sein können.

In Anbetracht der Vielzahl unterschiedlicher Kennzeichnungen der Synthetischen Biologie, könnte man den Schluss ziehen, weiterer Streit um die adäquate Bestimmung der Synthetischen Biologie sei zu theoretisch und für die eigentliche Forschungsarbeit wenig zielführend. Synthetische Biologie wäre in diesem Sinne nicht mehr als ein erfolgversprechendes neues Verfahren, das verschiedene Methoden in sich vereint. Allerdings wird diese Ansicht Behauptungen an anderen Stellen nicht gerecht, dass die Synthetische Biologie die neue und innovative Forschungsprogrammatik sei, die unser bisheriges Verständnis biologischer Forschung umwälze. Angemessener wäre es deshalb, die Heterogenität der Disziplin zunächst als solche anzuerkennen und sie in die Sondierung des Feldes einfließen zu lassen. Hierzu galt es nicht den kleinsten gemeinsamen Nenner zu definieren, sondern eine vollumfängliche Beschreibung der Vielfalt der Programme, Verfahren und Zielsetzungen der Synthetischen Biologie zu suchen (Tabelle 1). In diesem Sinne spiegelt der vorliegende Themenband die verschiedenen Perspektiven auf aktuelle Forschung in Deutschland wider und will sie ergänzend zueinander stellen.

Tabelle 1: Klassifikationsmöglichkeiten für die Forschungsansätze der Synthetischen Biologie

Klassifikation nach Verfahrenstyp:
Bottom-up-Ansatz – Top-down-Ansatz – Chassis-Ansatz – Orthogonaler Ansatz
Klassifikation nach Anwendungsbezug:
Grundlagenforschung – angewandte Forschung
Klassifikation nach den üblichen Anwendungsbereichen der Biotechnologie:
rote – grüne – weiße – graue – blaue Synthetische Biologie
Klassifikation nach konkreten Forschungszeigen:
DNA-Synthese, Synthetische Genome – genetische Schaltkreise, synthetische Oszillatoren, Signaltransduktionsysteme, Zell-Zell-Systeme – „metabolic pathway engineering“ – Herstellung von Biosensoren durch Protein-Engineering – Protozellen – Minimalgenome – Xenobiologie
Klassifikation nach der Komplexitätsebene der Forschungsobjekte:
biomolekulare Grundbausteine – einfache Zusammenlagerungen von Grundbausteinen – funktionelle Einheiten auf makromolekularem Niveau – „self-assembling units“ – „self-replicating biological systems“
Klassifikation nach der biologischen Komplexität:
Prokaryonten / Eukaryonten – Einzeller / Mehrzeller
Klassifikation nach Naturferne („divergence from nature“):
Natürliche Systeme – Künstliche Systeme – Hybride
Klassifikation nach technischer Zielsetzung:
Mimetische Ansätze – Konstruktiv-modifizierende Ansätze – Optimierende Ansätze
Klassifikation nach dem ingenieurwissenschaftlichen Konzept:
„blueprinting“ (rationale Planung) – „bricolage“ / „tinkering“ (Basteln)
Klassifikation nach den Paradigmen und Leitbildern:
Metaanalysen, die den Theorierahmen einer rein naturwissenschaftlichen Konzeption verlassen

Kapitel 2: Synthetische Biologie in Deutschland. Eine methodische Einführung (Julia Diekämper, Anja Hümpel)

Die Gentechnologie stellt in ihrer fachlichen Breite und rasanten Entwicklung ein nur schwer zu überblickendes Element der modernen Biowissenschaften dar. Während einige ihrer Anwendungen, zum Beispiel in der Biomedizin, weithin Akzeptanz in Deutschland finden, sind andere ihrer Forschungsansätze heftig umstritten. Kritiker und Befürworter debattieren unvereinbar über deren wissenschaftliche Risiken, über die „Unantastbarkeit“ von Leben, über wirtschaftliche Vorteile und gesellschaftliche Nachteile. Hier sieht der „Gentechnologiebericht“ seinen Arbeitsauftrag: Er berichtet unabhängig und unvoreingenommen über die aktuellen Entwicklungen der Gentechnologie und methodisch verknüpfter Nachbardisziplinen in Deutschland. Ziel ist eine Basis für einen ergebnisoffenen Diskurs anzubieten. Ein wesentlicher Aspekt seiner Arbeitsweise ist ein sozialwissenschaftlich motiviertes Langzeit-Monitoring.

Als Grundlage des Monitorings dienen sogenannte Problemfelder, über die sich die vielschichtigen Konflikt- und Anwendungsbereiche für die einzelnen Themen des „Gentechnologieberichts“ strukturiert aufschlüsseln lassen. Hinter den Problemfeldern stehen Themenkomplexe, die für einen Teilbereich der Gentechnologie öffentlich in Deutschland diskutiert werden. Bezeichnenderweise sind für die Synthetische Biologie – als junge und noch nicht klar abgesteckte Disziplin – die Identität der Forschungsrichtung sowie ihre zukünftigen Anwendungspotenziale die beiden prominentesten Problemfelder. Als drittes wichtiges Problemfeld zeigte sich die Problematik um den Lebensbegriff.

Da die ermittelten Problemfelder vielschichtige Sachverhalte benennen, werden sie in einem zweiten Schritt mit geeigneten Indikatoren gefüllt. Indikatoren werden dabei als empirisch direkt ermittelbare Größen verstanden, die inhaltlich mit einem Problemfeld verknüpft sind und zu seiner objektiven Beschreibung herangezogen werden können. Verschiedene Aspekte eines Problemfelds werden so mit messbaren Daten belegt und langfristig dokumentiert. Das indikatorenbasierte Verfahren ermöglicht so eine objektive und kontinuierliche Beobachtung der Entwicklungen der Gentechnologie in Deutschland.

Allerdings lassen sich nicht allen Problemfeldern in gleichem Ausmaß geeignete Indikatoren zuordnen oder es fehlen zugängliche Messdaten. Für die Synthetische Biologie im Besonderen erweist sich die relative „Neuheit“ des Fachgebietes, das erst seit einigen Jahren verstärkt in den Fokus der öffentlichen Wahrnehmung gerückt ist, und die ausgewiesene Debatte um das, was Synthetische Biologie nun eigentlich ist, als nachteilig. Die aktuelle Datenlage ist im Vergleich

mit anderen Bereichen der Gentechnologie noch unterentwickelt. Diese Diskrepanz wird durch die qualitativen Beschreibungen im vorliegenden Themenband aufgefangen.

Kapitel 3: Zur Geschichte der Synthetischen Biologie (Heiner Fangerau)

Aus einer wissenschaftshistorischen Perspektive, die ein Zeitfenster von 150 Jahren betrachtet, zeigt Heiner Fangerau deutliche Parallelen hinsichtlich einer „synthetischen“ Biologie zwischen den Zeiträumen 1880 bis 1920 und 1970 bis 2010 auf. Es handelt sich dabei um mehr als nur begriffliche Ähnlichkeiten zwischen dem damaligen und heutigen Verständnis des Forschungsfeldes. Vielmehr bestehen erhebliche konzeptionelle Übereinstimmungen. Diese zeigen sich am deutlichsten in der Gegenüberstellung des „engineering ideals“ eines Jacques Loeb und der heutigen Synthetischen Biologie mit ihrem an Design und am Ingenieurwesen orientierten technischen Ideal. Insgesamt finden sich zusätzlich auch in den begleitenden öffentlichen medialen Debatten beachtenswerte Parallelitäten zwischen den Stellungnahmen um 1900, den 1970er Jahren und heute. Zuletzt ist die heute oftmals postulierte andere Qualität der Synthetischen Biologie im Vergleich zur Gentechnologie ebenfalls zu hinterfragen, da gerade diese für die Synthetische Biologie zumindest eine wichtige Traditionslinie darstellt.

Die epistemologische Orientierung der heutigen Synthetischen Biologie scheint sich von dem um 1900 für die Biologie formulierten und 1970 wiederholten synthetischen Erkenntnisinteresse nicht entfernt, sondern vielmehr verlagert zu haben. Während Biologen um 1900 das synthetische Wissen als Königsweg des „way of knowing“ für sich entdeckt zu haben glaubten und in den 1970er und 1980er Jahren genau dieser Weg der Wissensgenerierung wieder bemüht wurde, hat sich das Erkenntnisinteresse der aktuellen Synthetischen Biologie in vielen Stellungnahmen anscheinend auf den „way of working“ reduziert: Das gelungene und funktionierende Konstruieren von Biosystemen steht über der Frage nach den Grundlagen und Bedingungen des Lebendigen. Geblieben ist dabei das Ideal der Kontrolle von Lebensprozessen, das um 1900 aus der Techniqueuphorie der sogenannten Moderne erwuchs und das heutige und damalige Forschende zu einen scheint.

Die heutige Synthetische Biologie bringt damit nicht den häufig bemühten „Paradigmenwechsel“ innerhalb der Biologie im engeren Sinne Thomas Kuhns mit sich. Im Gegenteil folgt sie dem konzeptionellen und methodischen „Paradigma“, das schon gegen Ende des 19. Jahrhunderts in den Lebenswissenschaften um sich griff und erfolgreich Fuß gefasst hat. Die Synthetische Biologie des frühen 21. Jahrhunderts folgt in dieser Sichtweise den Ansprüchen, die an

eine etablierte Normalwissenschaft in der Tradition der „Technischen Biologie“ des 19. und der Biotechnik des 20. Jahrhunderts gestellt werden.

Gleiches gilt für die gesellschaftliche Kritik an der Synthetischen Biologie, die sich um 2000 nur unwesentlich von der um 1900 geübten unterscheidet. Kritische Stimmen, die Natur, eine natürliche Ordnung oder die Grundfesten dessen, was als Leben gilt, durch eine Synthetische Biologie gefährdet sehen, gab es um 1900 ebenso wie heute. Neu hinzugetreten sind Sorgen, die eine Kommerzialisierung und konkrete Gefahren wie den Bioterrorismus durch synthetische Bakterien oder Viren aus dem Labor in den Blick nehmen. Allerdings sind deren oft formulierte „postmoderne“ Qualitäten angesichts des hier gegebenen Überblicks über die Synthetische Biologie zumindest ebenso zu hinterfragen wie der postulierte Paradigmenwechsel.

Die Traditionslinien der heutigen Synthetischen Biologie, ihre Postulate, ihre Begriffe, ihre Legitimation und Kritik lassen sich bis mindestens ins 19. Jahrhundert zurückverfolgen. Die Unterschiede scheinen allein im Bereich des technischen Könnens, nicht im technischen Denken an sich zu liegen.

Kapitel 4: Chemisch-Synthetische Biologie (Nediljko Budisa)

Nediljko Budisa beschreibt die Synthetische Biologie aus dem Blickwinkel der Chemie, die neuartige biologische Systeme unter Verwendung von unnatürlichen (nicht-kanonischen) chemischen Verbindungen zu entwickeln sucht. Der deutsche Chemiker Emil Fischer sprach in diesem Sinne bereits Anfang des 20. Jahrhunderts von einer zukünftigen „chemisch-synthetischen Biologie“, die den Metabolismus lebender Zellen verändern werde, um organische Verbindungen mit gänzlich neuen Eigenschaften zu gewinnen.

Die hohe natürliche Komplexität der Vorgänge in lebenden Zellen ist dabei eine Herausforderung für die rationale Konstruktion von biologischen Systemen, wie sie die Synthetische Biologie generell anstrebt. Sogenannte Top-down-Verfahren zielen darauf ab, diese Komplexität und damit einhergehende unerwünschte Interferenzen für experimentelle Anwendungen zu verringern. Prominent ist hier die Reduzierung von Genomgrößen hin zu einem Minimalgenom. Minimalgenome – und entsprechend Minimalzellen – würden nur noch über die kleinstmögliche Ausstattung an Genen verfügen, die zur Erhaltung von grundsätzlichen Systemfunktionen notwendig ist. Ein Beispiel für ein solches Minimalsystem ist das Chemoton-Modell, das auf einer chemischen Denkweise basiert und ein stabiles, sich selbst erhaltendes (autopoietisches) System beschreibt. Es wird einem definierten Set an Kriterien des „Lebendi-

gen“ gerecht und kann als Modellsystem für jede Art von biologischem System – wenn auch auf einer sehr grundsätzlichen Ebene – herangezogen werden. Das Modell hat dabei nicht den Anspruch das Phänomen „Leben“ in seiner Gänze zu erklären, aber gibt einen klar definierten experimentellen Rahmen für die Chemisch-Synthetische Biologie.

Die Komplexität von natürlichen Organismen erlaubt ihnen die Anpassung an eine Vielzahl von Umweltbedingungen. Diese sogenannte Robustheit kann für chemisch-synthetische Ansätze ausgenutzt werden: Zellen können vollkommen neue Eigenschaften entwickeln, wenn sie naturfremde chemische Verbindungen in ihren Metabolismus integrieren müssen. Die für die biologische „Verarbeitung“ solcher Verbindungen notwendige Umwidmung von nativen Enzymen und anderen Proteinen schlägt sich auf der sie kodierenden DNA-Ebene in Form von stabilen Mutationen nieder. In einem experimentellen Ansatz wurde zum Beispiel durch künstliche Selektion im Bakterium *Escherichia coli* erfolgreich die DNA-Base Thymin durch die Chlorverbindung 5-Chloruracil ersetzt.

Die vier Basen Adenin (A), Thymin (T), Cytosin (C) und Guanin (G) sind die universellen Bausteine jeder natürlichen DNA. Ihre Abfolge im DNA-Strang kodiert die spezifischen Proteine und damit die spezifischen Charakteristika eines jeden Organismus. Der Codierungsmechanismus – der genetische Code – ist dabei universell für (fast) alle bekannten Organismen. Es kann von einem „Standardrepertoire“ von nur 20 kanonischen Aminosäuren gesprochen werden, aus denen sich die natürlich vorkommenden Proteine über alle Arten hinweg zusammensetzen.

Modifizierende Eingriffe in diese grundsätzliche Chemie des Lebens sind ein diffiziles Unterfangen. Im oben angesprochenen Beispiel behielten die Bakterien die Fähigkeit bei, neben dem 5-Chloruracil auch weiterhin Thymin in ihre DNA einzubauen. Das letztendliche Ziel der Chemisch-Synthetischen Biologie ist die Entwicklung von Systemen, die auf die substituierten natürlichen Komponenten gerade nicht mehr zurückgreifen können und stabil getrennt vom natürlichen Kontext existieren. Solche Systeme könnten zukünftig zu einem zusätzlichen Sicherheitselement biologischer Forschung werden, da ihnen die universellen Informationsstrukturen fehlen, die alle natürlichen Organismen miteinander teilen. Der Austausch von genetischer Information zwischen natürlichen und gentechnisch veränderten Zellen wird damit durch eine Art „genetischer Firewall“ unterbunden. Damit kann die Synthetische Biologie nicht nur zu einem besseren Verständnis von Lebensprozessen in Zellen beitragen, sondern auf längere Sicht auch eine gezielte Entwicklung von neuen, sicheren biotechnischen Applikationen ermöglichen.

Kapitel 5: Therapeutische Perspektiven der Synthetischen Biologie (Natascha Hotz, Wilfried Weber)

Bereits heute sind eine große Anzahl an unterschiedlichsten biologischen Komponenten in Zellen in ihrer Struktur und Funktion charakterisiert. Diese können als „biologische Bausteine“ im synthetischen Ansatz zu neuen Biosystemen mit bestimmten Zieleigenschaften kombiniert werden. Hotz und Weber stellen in ihrem Beitrag eine wichtige Gruppe dieser biologischen Bauteile vor: Sogenannte molekulare Schalter erlauben die Aktivität von Genen in Zellen künstlich zu steuern. Molekulare Schalter nutzen (Repressor-)Proteine, die gezielt an Gene binden und damit deren Expression künstlich beeinflussen. Gene werden – je nach Art des verwendeten Schalters – blockiert oder auch umgekehrt gerade aktiviert. Durch Zugabe spezifischer Signalmoleküle können die Proteine wieder von der DNA abgelöst und die Genaktivität normalisiert werden. Solche synthetischen Schalter bilden die molekulare Basis für die im Beitrag präsentierten Fallbeispiele für zukünftige medizinische Anwendungen.

Ein wichtiges Anwendungsgebiet ist die Entwicklung von effizienten Testsystemen (sogenannte Screening-Verfahren) für die Identifizierung von neuartigen pharmakologischen Wirkstoffen. Ziel ist es, Substanzbibliotheken auf bestimmte – zum Beispiel antibiotische – Eigenschaften hin mit wenig Aufwand und Zeit zu durchsuchen. So wurde ein molekularer Schalter entwickelt, der sensitiv auf Streptogramin-Antibiotika reagiert – in Anwesenheit von Substanzen mit Streptogramin-Aktivität wird ein ausgesuchtes Zielgen über den Schalter aktiviert („angeschaltet“). Gekoppelt an ein Zielgen, dessen Aktivität sich im Labor leicht (z. B. über eine Farbreaktion) nachweisen lässt, erlaubt es die Suche nach neuen Streptograminen im Hochdurchsatzverfahren. Außerdem erlaubt das auf menschlichen Zelllinien basierte Testsystem erste Aussagen zur Toxizität und Zellgängigkeit der identifizierten Wirkstoffe.

Molekulare Schalter werden aber nicht nur zur Identifizierung neuer Wirkstoffe eingesetzt, sondern können auch Resistenzen gegen bewährte Arzneimittel bekämpfen, die zunehmend die Behandlung von bakteriellen Infekten im Gesundheitswesen erschweren. Ein wichtiges Beispiel ist die Tuberkulose, die weltweit jedes Jahr fast zwei Millionen Todesopfer fordert. Ein für die Tuberkulosebehandlung unentbehrliches Medikament ist Ethionamid. Hier wurde ein molekularer Schalter entwickelt, der auf einem bekannten Resistenzmechanismus des Tuberkulose-Erregers *Mycobacterium tuberculosis* gegen Ethionamid aufbaut und für die Entdeckung von Substanzen genutzt wurde, die in der Lage sind, genau diesen Resistenzmechanismus zu unterdrücken. Ein einfacher Lebensmittelaromastoff, 2-Phenylethylbutyrat, wurde dabei identifiziert, der die Resistenz gegen Ethionamid im Tuberkuloseerreger erfolgreich abzuschalten ver-

mochte und die Wirksamkeit des Medikaments erhielt. Vergleichbare Schalter sind denkbar, die für andere Antibiotika eingesetzt werden können, um hier langfristig Resistenzen zu überwinden.

Neben der Wirkstoffforschung sind auch synthetische Schalter für die Behandlung von Krankheiten denkbar. Ein bereits im Mausmodell mit Erfolg getesteter molekularer Schalter könnte zum Beispiel zukünftig die Behandlung von Gicht verbessern. Die krankhaft erhöhte Harnsäurekonzentration der Mäuse konnte erfolgreich über einen synthetischen Regelkreis auf einen niedrigen, physiologisch notwendigen Wert verlässlich eingestellt werden. Das Potenzial der synthetischen Schalter reicht aber über den biologischen Rahmen hinaus. Aktuell werden synthetische Ansätze auf die Materialwissenschaften angewendet, um „intelligente Materialien“ mit extern steuerbaren Eigenschaften zu entwickeln, die zum Beispiel im biomedizinischen Bereich als Medikamentendepots eingesetzt werden können und die dosierte, passgenaue Abgabe von Medikamenten ermöglichen.

Die hier vorgestellten Studien zeigen aktuelle Entwicklungen der Synthetischen Biologie für die biomedizinische Anwendung. Einige dieser Ansätze haben bereits Eingang in die kommerzielle Nutzung gefunden, andere befinden sich noch in der experimentellen Erforschung, aber gemessen an den rasanten Fortschritten der Synthetischen Biologie im letzten Jahrzehnt ist zu erwarten, dass in nicht allzu ferner Zukunft innovative Lösungsansätze aus der Synthetischen Biologie für die Prävention und Therapie von Krankheiten zur Verfügung stehen werden.

Kapitel 6: Philosophische Implikationen der Synthetischen Biologie (Kristian Köchy)

Für eine philosophische Betrachtung des „Forschungsprogramms“ der Synthetischen Biologie spielen eine Reihe von Aspekten eine Rolle: von konkreten methodischen Fragen, vom Ethos der mitwirkenden Wissenschaftsgemeinde bis hin zu denjenigen philosophischen Konzepten, an denen sich die Disziplin orientiert. Ein wichtiger Punkt ist dabei der wissenschaftliche „Denkstil“, der die Ideale und das Selbstverständnis der Forschungsrichtung beschreibt. Die Synthetische Biologie wird hier stark vom Ideal des technischen Konstruierens beherrscht. Es kann eine Verschiebung von einem biologischen hin zu einem ingenieurwissenschaftlichen Denkstil beobachtet werden, der einen Wandel im Verständnis des wissenschaftlichen Arbeitens und Strebens in der Biologie mit sich zieht. Entsprechend wird die Synthetische Biologie oft als neue Ingenieurbiologie umschrieben.

Typisch ist dabei die pragmatische Eingrenzung von Forschungsfragen auf das technisch Lösbare. Mit diesem Pragmatismus wird nicht mehr vollständiges Wissen über Lebensprozesse vorausgesetzt, um sie nachbauen zu können. In zweiter Spielrichtung bringt der ingenieurwissenschaftliche Denkstil auch eine rationale Planung von Leben „am Reißbrett“ mit, die eine gesteigerte Effizienz gegenüber der klassischen Gentechnologie verspricht. Dieses Forschungsverständnis weist viele Elemente des anthropologischen Konzepts des Homo faber auf, das den Menschen als Hersteller und in Bemächtigung über die Natur sieht. Die angestrebte Gestaltung von neuartigen biologischen Systemen bringt aber nicht nur den neuen technischen Aspekt der Synthetischen Biologie deutlicher zur Geltung, sondern wird auch als Beleg für die Richtigkeit der zugrunde liegenden Modelle herangezogen, und es wird ein erhöhter Anspruch auf die Gestaltungskraft über die Natur formuliert. Dieser neue ingenieurwissenschaftliche Denkstil ändert dabei nicht nur das Verständnis von den zu erfüllenden Forschungsaufgaben, sondern sukzessive auch das Verständnis der ganzen Disziplin, möglicherweise sogar der Biologie insgesamt.

Trotz der Bedeutung des Technischen für die Synthetische Biologie und ihres technischen Verständnisses des Lebendigen sind die Forschungsziele und Forschungsobjekte hier an ihren biologischen Rahmen gebunden. Es werden zwar Analogien zu technischen Artefakten und Maschinen bemüht, aber dennoch müssen sich die Forschungsansätze an ihren biologischen Modellen orientieren sowie Designprinzipien und Eigenschaften von explizit biologischen Materialien berücksichtigt werden.

Die philosophische Diskussion um Organismus-Maschinen-Vergleiche ist nicht neu und hat von jeher die Grenzen der Biologie überschritten. Für den in der Synthetischen Biologie oft gezogenen Vergleich von Organismus und Maschine ist dabei festzuhalten, dass sich hier gerade durch den Wandel der philosophischen Maschinenkonzepte in den letzten Jahrzehnten eine Besonderheit der Synthetischen Biologie ausdrückt. Maschinen können allgemein als künstliche, durch den Menschen entworfene Gebilde gesehen werden, die zu einem definierten Zweck konzipiert wurden. Dabei haben sich die Vorstellungen, was eine Maschine ist, über die Zeit gewandelt: von antiken klassischen Energiewandlern hin zu den heutigen kybernetischen Maschinen. Während klassische Maschinen die Energieleistung von Organismen nachahmen und verstärken, stehen bei kybernetischen Maschinen Informationen im Vordergrund. Sie können Leistungen vollbringen, die gegenüber klassischen Maschinen qualitativ anders gelagert sind und eine andere philosophische Auseinandersetzung erfordern – gerade im Hinblick auf

die Synthetische Biologie. Es werden nicht mehr simple Maschinen zur Deutung von Organismen herangezogen, sondern gerade umgekehrt organismische Abläufe zum Vorbild für ein neues Verständnis von komplexen Maschinen.

Kapitel 7: Der Stand der ethischen Diskussionen um Synthetische Biologie (Johannes Achatz, Martin O'Malley, Peter Kunzmann)

Im Beitrag von Johannes Achatz, Martin O'Malley und Peter Kunzmann werden die aktuellen Konfliktfelder der Synthetischen Biologie aufgezeigt, die einer konkreten ethischen Aufmerksamkeit bedürfen. Was also ist neu an ethischen Herausforderungen durch die Synthetische Biologie? Erstens ist das Erkenntnisinteresse an der Funktion und Standardisierung biologischer Teile und Systeme, verbunden mit dem Ziel der Nach- und Umgestaltung ein Schritt, der Synthetische Biologie weiter in Richtung Ingenieurwissenschaften trägt und eine Integration anderer Hilfswissenschaften, von der Informatik bis zur Medizin, zur Folge hat. Daraus folgt die noch bevorstehende Entwicklung neuer Formen des Lebens und neuer Anwendungen, die, sollte sich der Erfolg einstellen, bekannten Regelungen für die Gentechnologie entzweigen könnten. Ein erwartungsvolles „wait and see“ wird daher staatlicherseits eingenommen, verbunden mit einem Monitoring der Entwicklungen im Bereich der Synthetischen Biologie, wie es in Deutschland etwa die Zentrale Kommission für die Biologische Sicherheit am Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit zur Aufgabe hat.

Zweitens kann der offene Charakter der Synthetischen Biologie und das Forschungsinteresse von Laien, die ihre Freizeit am privaten Labortisch verbringen, als relevante Neuerung gefasst werden. Beides sind Chancen für eine freie und transparente Wissenschaft, bergen aber zugleich auch die Gefahr des Missbrauchs. In Form von Biosafety, Biosecurity und gerechten Zugangsmöglichkeiten zu neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen und wirtschaftlichem Nutzen neuer Techniken drücken sich diese neuen Chancen und Risiken aus.

Drittens können zwei Intuitionen, „Biokonservatismus“ und „Bioliberalismus“, als äußere Pole ausgezeichnet werden, die diesen Wandel der Biowissenschaften zu einer Synthetischen Biologie entweder rundherum ablehnen oder ihn vollumfänglich gutheißen und zwischen denen sich die Haltungen verschiedener Interessengruppen einordnen lassen. Beide Positionen sind unvereinbar. Sie sind jedoch Kernelemente für die Beurteilung von Fragen nach der Philosophie des Lebens, nach gerechter Verteilung der Vor- und Nachteile Synthetischer Biologie und sie bezeichnen die Eckpunkte von Diskussionen, etwa um die Patentierbarkeit von Formen des Lebens.

Viertens sind Beschreibung und Bewertung Synthetischer Biologie noch in einem Stadium des „Framings“, in dem verschiedene Akteure bemüht sind, eine Deutungshoheit über das neue Forschungsfeld zu erlangen. Gerade die in „Drittens“ genannten Punkte sind Gegenstand dieses notwendigen gesellschaftlichen Prozesses der begrifflichen Fassung des neuen Forschungs- und Anwendungsbereichs der Synthetischen Biologie.

Um gegenüber diesen ethischen Herausforderungen schon im frühen Stadium der Synthetischen Biologie gewappnet zu sein, empfiehlt es sich, die verschiedenen Interessengruppen zu berücksichtigen und ein Mindestmaß an Transparenz zu etablieren, das Gegnern wie Befürwortern erlaubt, sich ein Bild über den Stand der Forschung zu machen. Ebenfalls empfiehlt es sich, etwa über geeignete Diskursmaßnahmen einen Überblick über Positionen betroffener Interessengruppen einzuholen, bevor einschneidende Regelungen für den Umgang mit Synthetischer Biologie getroffen werden. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass die vielversprechenden Aussichten der Synthetischen Biologie auch gefahrlose Anwendung finden können und ihre Vor- wie Nachteile gesamtgesellschaftlichen Nutzen erbringen.

Kapitel 8: Eine Verhältnisbestimmung von Theologie und Synthetischer Biologie aus ethischer Sicht (Hille Haker)

Die öffentliche Berichterstattung über die Synthetische Biologie setzt oft und unkritisch auf christlich-religiöse Bilder – wie der des Gott spielenden Wissenschaftlers, welcher leichtfertig mit der Schöpfung im Labor experimentiert. Der wissenschaftlich-theologischen Perspektive auf die aktuelle biotechnologische Forschung werden diese Metaphern aber kaum gerecht. Hille Haker stellt den ethischen Rahmen der kirchlichen Soziallehre für die Bewertungen der modernen Biotechnologie vor und weitet ihn prospektiv auf die Synthetische Biologie aus.

Die Theologische Ethik versteht sich gerade nicht als pauschal wissenschaftsabwehrend, sondern beruft sich auf eine biblisch fundierte, positive Interpretation von Wissenschaft, die einen verantwortlichen und lebensdienlichen Umgang mit Mensch und Natur pflegt. Moderne Technologien werden von der Kirche begrüßt, insofern sie im Einklang mit den Grundsätzen der kirchlichen Soziallehre stehen und Werten wie der Würde des Menschen und dem globalen gesellschaftlichen Gemeinwohl gerecht werden. Auch wissenschaftlich-technische Eingriffe an lebenden Organismen, wie sie im Kontext der Biomedizin oder Biotechnologie oder eben auch der Synthetischen Biologie erfolgen (können), unterliegen diesen Prüfungskriterien. Dabei ist eine umfassende Analyse von wissenschafts- und sozialetischen Aspekten, die auch mögliche

Gefahren und Alternativen sowie Gerechtigkeitsfragen berührt, unerlässlich, um die Verantwortbarkeit einer Technologie aus theologischer Sicht zu argumentieren.

Eine offizielle Stellungnahme der katholischen Kirche zur Synthetischen Biologie steht noch aus, aber es kann von einer grundsätzlich positiven Beurteilung ausgegangen werden. Es gibt keine kategorischen theologischen Argumente gegen die Synthetische Biologie. Sie hat einen selbstverständlichen Platz, wo sie – aus der Perspektive der Katholischen Soziallehre – verantwortliche Forschung betreibt. Allerdings sollte explizit nicht von *der* Synthetischen Biologie ausgegangen werden, da die Disziplin eine Vielzahl unterschiedlichster Forschungsansätze unter einem Dach vereint. Die zukünftigen Entwicklungen dieser noch jungen Disziplin müssen individuell in ihren komplexen globalen Zusammenhängen bewertet werden.

Exemplarisch zeigt sich das am synthetisch hergestellten Anti-Malariamittel Artemisinin. Nicht bestritten werden kann die hohe gesellschaftliche Relevanz von kostengünstigen Medikamenten, vor allem für schwere Infektionskrankheiten wie Malaria. Allerdings kann es nicht bei dieser einseitigen Begründung dieses Forschungsprojekts bleiben, denn die synthetische Herstellung des Medikaments ist weder medizinisch noch ökonomisch eine Notwendigkeit. In einem größeren gesellschaftlichen Kontext betrachtet stellt sich die Frage, ob das synthetische Artemisinin den Landwirten, die sich auf den Anbau von Beifußpflanzen zur natürlichen Artemisiningewinnung spezialisiert haben, nicht die Existenzgrundlage rauben wird. Zudem werden zunehmende Artemisinin-resistente Malariastämme beobachtet, die die Wirksamkeit des Medikaments für die Malariatherapie reduzieren. Nur eine umfassende Analyse von wissenschaftlichen und sozialemischen Aspekten kann für den Einzelfall das Verhältnis von Theologie und Synthetischer Biologie bestimmen.

Kapitel 9: Die Synthetische Biologie in den Medien (Julia Diekämper)

Julia Diekämper diskutiert die Darstellung der Synthetischen Biologie in den deutschen Medien anhand ausgewählter Zeitungs- und Zeitschriftenartikel, die in den letzten 15 Jahren zum Thema erschienen sind. Die Presse hat das Thema erst in den letzten Jahren verstärkt aufgegriffen. Ein beständiges Element der öffentlichen Berichterstattung ist dabei – ähnlich wie in der innerwissenschaftlichen Debatte – die fachliche Verankerung der Disziplin innerhalb der Biowissenschaften, wobei sich die Anfänge sowie das konkrete Forschungsanliegen der Synthetischen Biologie in den ausgewählten Artikeln sehr heterogen präsentieren. Insgesamt muss für die Leserschaft unscharf bleiben, was die Synthetische Biologie denn nun genau ist und will.

Es treten allein die Konturen einer „jungen Disziplin“, die mit „Gentechnik“ und dem „synthetischen Machen“ von Leben im Labor zu tun hat, übergreifend hervor.

Auffällig ist auch die Betonung eines aus den Ingenieurwissenschaften entlehnten methodischen Zugriffs. Biologische Fragen scheinen zu technischen Fragen reduziert, bei der Leben als die Summe seiner einzelnen Bauteile verstanden wird, die beliebig ausgetauscht und kombiniert werden können für zukunftsweisende Anwendungen in Medizin, Umweltschutz oder Landwirtschaft. Da konkrete Produkte aktuell noch ausstehen, wird das Potenzial der Synthetischen Biologie in der Mehrheit der Artikel genauso weitläufig wie vage umschrieben. Dennoch ist gerade die Beschreibung der Möglichkeiten der Disziplin ein eindrückliches Motiv der öffentlichen Berichterstattung.

Die Artikel spielen auch mehrheitlich mit Verweisen auf christliche Motive. Vor allem die Schöpfungsgeschichte wird bemüht und die porträtierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler werden wahlweise anmaßend oder naiv-leichtfertig im Umgang mit einer göttlichen Schöpfung dargestellt: Die Genesis wird zum Projekt erklärt, neue Lebewesen am Reißbrett geplant, mit Genen wie mit Bauklötzchen im Kinderzimmer gespielt. Diese verwendeten Sprachbilder stellen dabei keine ethische oder theologische Auseinandersetzung mit der Synthetischen Biologie dar, es sind Schlagzeilen. Diese religiösen Motive sind aber gleichzeitig tradierte Vorstellungen, die der Leserschaft vertraut und mit moralischen Vorstellungen verknüpft sind, auch wenn diese im weitestgehend säkularisierten 21. Jahrhundert an Eindeutigkeit verloren. Angewandt auf die Synthetische Biologie wirken sie als „verkürzte Argumente“, die neue Sinnzusammenhänge schaffen und die öffentliche Wahrnehmung und Bewertung der Disziplin mitprägen. Religions-kulturelle Assoziationen werden generiert, die Wertevorstellung über das Verhältnis von Mensch und Natur betreffen. Gepaart mit der unklaren medialen Darstellung bieten diese Raum für Ängste und Misstrauen in die Forschung im Bereich der Synthetischen Biologie, die Leben mit Hybris oder spielerischer Naivität zu begegnen scheint. Es wird klar, dass die Medien in ihrer Präsentation der Synthetischen Biologie neue Bedeutungszusammenhänge transportieren und die öffentliche Meinung zur Disziplin in Deutschland mitprägen.

Kapitel 10: Synthetische Biologie – eine unbekannte Technologie (Jürgen Hampel)

Jürgen Hampel beschreibt die aktuelle öffentliche Wahrnehmung der Synthetischen Biologie in Europa mit einem besonderen Augenmerk auf Deutschland. Die präsentierten Daten beruhen auf der Meinungsumfrage „Europeans and Biotechnology in 2010“ der Europäischen Kommis-

sion und belegen, dass die Synthetische Biologie noch nicht im Bewusstsein der europäischen Bevölkerung angekommen ist. Im Durchschnitt hatten vier von fünf Befragten noch nie von dem Forschungsfeld gehört. Für die wenigen, die mit dem Begriff etwas anfangen konnten, war sie weder Thema in der Alltagskommunikation noch stieß sie auf besonderes Interesse. Gefragt nach einer möglichen Befürwortung der Disziplin ergab sich ein leicht positives Meinungsbild in Europa. Die unregulierte Zulassung war eine Minderheitenposition, aber jeder Zweite konnte sich eine streng regulierte Synthetische Biologie oder zumindest die Zulassung von begründeten Ausnahmen vorstellen. In Deutschland wurde die Synthetische Biologie jedoch insgesamt weniger positiv gesehen. Kein anderes Land im europäischen Vergleich bewertete die Disziplin ablehnender.

Des Weiteren wurde der Informationsbedarf der Öffentlichkeit für Entscheidungen zur Synthetischen Biologie ermittelt. Es zeigte sich, dass für die Befragten hier europaweit Aspekte zu den möglichen Vorteilen und Risiken im Vordergrund standen. Von untergeordneter Bedeutung waren Finanzierung oder Regulierung sowie ethische oder soziale Fragen. Wenig Informationsbedarf bestand ebenfalls zu den wissenschaftlichen Techniken der Synthetischen Biologie – ganz im Gegensatz zur klassischen These, dass Informationen über eine Technologie ihre öffentliche Akzeptanz fördern. Die Analyse legte auch nahe, dass für die Synthetische Biologie ein ausgeprägter Wunsch nach gesetzlicher Regulierung in der Bevölkerung besteht: Acht von zehn Europäerinnen und Europäern sahen hier den Staat in der Verantwortung, nicht den Markt. Im europäischen Durchschnitt zeigte sich dabei eine klare Präferenz für eine an technisch-wissenschaftlichen Kriterien orientierte Regulierung. Anders in Deutschland: Hier waren neben diesen Kriterien auch ethisch-moralische Aspekte als Entscheidungsgrundlage wichtig. Ebenfalls im Gegensatz zum europäischen Trend wurde in Deutschland die Einbeziehung der Mehrheitsmeinung der Bevölkerung gegenüber dem Rat von ausgewiesenen Sachverständigen bei Entscheidungsprozessen zur Synthetischen Biologie bevorzugt.

Die zukünftige Entwicklung der gesellschaftlichen Wahrnehmung der Synthetischen Biologie ist zurzeit noch offen, aber die präsentierten Daten geben Hinweise auf einige Rahmenbedingungen. Offensichtlich ist, dass die Disziplin in Deutschland – wie auch Europa – eine noch unbekanntere Technologie ist, die nicht vorbehaltlos unterstützt wird. Wenn die Synthetische Biologie eine breite gesellschaftliche Bekanntheit und Akzeptanz erreichen will, wird sie sich gesellschaftlich legitimieren müssen. Im Dialog mit der Öffentlichkeit kann es aber dabei nicht nur um die Vermittlung der wissenschaftlichen Fakten der Synthetischen Biologie gehen. Die

Wissenschaftskommunikation befindet sich hier im Wandel: Technologiepolitische Entscheidungsprozesse können nicht mehr nur auf technisch-wissenschaftlichen Kriterien begründet werden – es gilt die Öffentlichkeit miteinzubeziehen und ethische Gesichtspunkte zu berücksichtigen.

Kapitel 11: Daten zu ausgewählten Indikatoren (Anja Hümpel, Julia Diekämper)

Die besondere Aufgabe des „Gentechnologieberichts“ und seiner Themenbände besteht darin, das komplexe Feld der Gentechnologie in Deutschland in einer messbaren und repräsentativen Form für fachlich Interessierte aufzuschließen. Qualitative Beschreibungen von einschlägigen Sachverständigen werden deshalb in der Publikationsreihe des „Gentechnologieberichts“ mit einem sozialwissenschaftlich motivierten Langzeit-Monitoring verknüpft. Aktuelle Problemfelder der Synthetischen Biologie wurden ermittelt und mithilfe relevanter Indikatoren quantitativ beschrieben. Allerdings lassen sich generell nicht allen Problemfeldern in gleichem Ausmaß geeignete Indikatoren zuordnen, oder es fehlen verlässliche empirische Daten. Für die Synthetische Biologie im Besonderen erweist sich die relative „Neuheit“ des Fachgebietes und die noch nicht beendete Debatte um dessen eigentlichen Charakter als problematisch. Verfügbare empirische Daten werden (noch) nicht dezidiert dem Themenbereich der Synthetischen Biologie zugeordnet. Hier wird nur ein langfristiges Monitoring die Entwicklungen der Disziplin abbilden können. Gegenwärtig verfügbares Datenmaterial für die Synthetische Biologie in Deutschland wird in standardisierten Datenblättern präsentiert und zeigt, dass die Synthetische Biologie erst in den letzten Jahren verstärkt Forschungsaktivitäten und öffentliche Aufmerksamkeit in Deutschland erfahren hat:

- ▶ Einschlägige Publikationen aus Deutschland lassen sich in der internationalen Fachpresse erst ab 2005 verfolgen, aber steigen seitdem kontinuierlich an.
- ▶ Im renommierten jährlichen internationalen Studentenwettbewerb der Synthetischen Biologie „iGEM“ sind Teams aus Deutschland seit 2006 vertreten. Der Wettbewerb verzeichnet seit seinem Entstehen 2004 kontinuierlich eine jährlich steigende Beteiligung an Teams aus der ganzen Welt. Die Anzahl der deutschen Teams stieg bis 2010 ebenfalls an, um dann 2011 wieder abzufallen.
- ▶ Das Thema ist in der öffentlichen Berichterstattung generell unterrepräsentiert. Einschlägige Presseartikel lassen sich erst seit 2004 finden. Ihre Anzahl ist in den letzten Jahren gestiegen mit einem ausgewiesenen Höhepunkt in 2010 – dem Jahr, in dem der US-Ame-

rikaner J. Craig Venter seine Ergebnisse zu einem künstlich synthetisierten bakteriellen Genom publikumswirksam veröffentlichte.

- ▶ Analog lassen sich einschlägige Buchpublikationen erst ab 2009 und nur in geringer Anzahl finden.
- ▶ Es werden aktuell vom BMBF keine dezidierten Forschungsprojekte zum Thema Synthetische Biologie gefördert. Es wird nur im geringen Umfang begleitende Forschung zu gesellschaftlichen und ethischen Aspekten gefördert.

Kernaussagen und Handlungsempfehlungen

Fachliche Verortung

Der Sammelbegriff „Synthetische Biologie“ bezeichnet gegenwärtig eine Vielzahl heterogener Forschungsprojekte und Forschungsansätze, deren gemeinsames Ziel es ist, biologische oder artifizielle Systeme auf biologischer Basis im Labor zu entwerfen, nachzubauen oder zu modifizieren. Diese technische Gestaltung soll auf verschiedenen Ebenen erfolgen – von einzelnen Molekülen bis hin zu kompletten Biosystemen.

Auch in den Reihen der involvierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler existiert derzeit kein Konsens über die Definition der Synthetischen Biologie, über ihre Abgrenzungen und Bezugnahmen zu verwandten Disziplinen und insbesondere zur Gentechnologie, aber auch zur Systembiologie, Nanobiotechnologie, Materialwissenschaft oder fachübergreifenden „converging technologies“. Ähnliches gilt für die Bestimmungen aus der Metaperspektive von Wissenschaftsorganisationen oder Interessenverbänden. Um die aktuellen Debatten möglichst umfassend abzubilden, hat die Arbeitsgruppe „Gentechnologiebericht“ daher den Rahmen für ihr Monitoring der Synthetischen Biologie weit aufgestellt.

In der Summe ist die Anwendung ingenieurwissenschaftlicher Konstruktionsprinzipien und eines entsprechenden „Denkstils“ für die Disziplin kennzeichnend („Ingenieurbiologie“). Das Forschungsanliegen ist somit nicht nur ein besseres Verständnis von biologischen Prozessen oder eine Legitimation (system-)biologischer Modelle durch Nachbau, sondern auch die Entwicklung neuartiger biotechnischer Anwendungen.

Die Synthetische Biologie befördert Konzepte der Standardisierung und Automation biotechnischer Fertigungsprozesse im Sinne rationaler Planbarkeit von Produktionszielen. Daneben drückt sich im leitenden Ideal jedoch auch das Paradigma einer pragmatisch ausgerichteten – gewissermaßen „bastelnden“ – Ingenieurbiologie aus, das die innovativen Momente des Ansatzes unterstreicht, sowie in der Tendenz eine Aktivität von biologischen Laien begünstigt.

Zukunftsperspektiven

Die Synthetische Biologie definiert sich momentan vor allem über ihre zukünftigen Potenziale in den Bereichen Umweltschutz, Energieversorgung, chemisch-technische Produktion oder Medizin. Bereits heute sind biomedizinische Anwendungen absehbar, die neue Wege in der Prävention und der Therapie von Krankheiten eröffnen, wie zum Beispiel für Malaria oder Gicht.

Öffentliches Bild

Die Synthetische Biologie ist in der öffentlichen Berichterstattung gegenwärtig nur ein randständiges Thema und ihre Darstellung ist von vagen und teilweise gegensätzlichen Aussagen geprägt, was die Abgrenzung zur Gentechnologie, das Forschungsanliegen und mögliche ökologische sowie moralische Risiken betrifft.

Entsprechend ist die Synthetische Biologie in der deutschen Bevölkerung noch weitgehend unbekannt. Die Meinungen zu diesem Forschungszweig basieren mehrheitlich nicht auf konkreten Vorstellungen über die hier stattfindende Forschung, sondern vielmehr auf allgemeinen Erwartungen und Wertvorstellungen. Bedeutsam ist hierbei – wie in verwandten Entwicklungen auch (etwa im Kontext der Nanotechnologie) – die fließende Grenze zwischen den Bereichen „science“ und „fiction“ mit einer sich eröffnenden Schere zwischen positiven und negativen Zukunftsszenarien.

Die Synthetische Biologie wird gegenwärtig in Deutschland nicht mehrheitlich akzeptiert. Die Entwicklung einer breiteren öffentlichen Akzeptanz wird davon abhängig sein, ob es gelingt, im öffentlichen Diskurs nicht nur die wissenschaftlichen Grundlagen der eingesetzten Verfahren zu erklären, sondern auch deren möglichen Nutzen, wobei ethische Bedenken angemessen zu berücksichtigen sind.

Philosophische und ethische Implikationen

Die ethische Relevanz der Synthetischen Biologie ist wegen der derzeit noch unklar strukturierten Forschungslage offen. Neben wichtigen grundsätzlichen Fragen, die alle biotechnologischen Innovationen betreffen (etwa allgemeine Risikofragen von „biosafety“ und „biosecurity“ oder Fragen zur Verteilungsgerechtigkeit), sind konkretere, über den Bereich der ethischen Debatten zur Gentechnologie hinausgehende Problemfelder derzeit nicht zu erkennen. Mit der Erweiterung über gentechnologische Verfahren hinaus können sich jedoch neue ethische Problemfelder

ergeben. Diese können künftig eine eigenständige ethische Debatte zur Synthetischen Biologie erforderlich machen.

Neben konkreten Forschungen hat insbesondere das allgemeine Postulat einer Erzeugung von Leben im Labor auch ethisch begründete Einwände gegen die Synthetische Biologie generiert. Angesichts der derzeitigen Techniken sind solche Postulate einer Neukonstruktion von Leben zwar faktisch wenig überzeugend, die bekundete Absicht besitzt nichtsdestotrotz ethische Relevanz. Zudem ergeben sich weniger aus den existierenden Verfahren, mehr jedoch aus den sie begleitenden Behauptungen grundsätzliche Fragen nach dem durch die Synthetische Biologie getragenen Lebensbegriff. Wo Befürworter große Gewinne für das wissenschaftliche Verständnis vorhersehen, befürchten Gegner einen molekularbiologisch verengten Lebensbegriff oder eine auf technische Gestaltung und Nutzbarkeit eingeschränkte Perspektive.

Die durch die Synthetische Biologie beförderte technomorphe Deutung von Lebensprozessen erlaubt modelltheoretisch betrachtet bedeutsame Erklärungsleistungen für Lebensprozesse. Als simple Gleichsetzung von Organismus und Maschine liefert sie jedoch nur eine kurzschlüssige Konzeptualisierung, die insbesondere den Rückgriff auf die Selbstorganisationsleistungen lebender Systeme in der Synthetischen Biologie ausblendet. Mit der zunehmenden Ausrichtung am Ingenieurideal kündigt sich ein Wandel im Verständnis der Funktion von Biologie an – als eines Werkzeugs für ingenieurtechnische Fragen –, was neben einer wissenschaftsphilosophischen oder -politischen Bedeutung auch (als Wandel gängiger Normen des Forschungsethos) mögliche ethische Relevanz besitzt.

Wissenschaftspolitischer Regelungsbedarf

Die gegenwärtige Forschung im Bereich der Synthetischen Biologie fällt in den rechtlichen Rahmen für gentechnologische Forschung. Darüber hinaus reichende technische Entwicklungen werden gegenwärtig durch die Zentrale Kommission für Biologische Sicherheit (ZKBS) beobachtet, um den gesetzlichen Regelungsbedarf festzustellen.

Wissenschaftspolitische Regelungen für Forschung, Patente und Applikationen der Synthetischen Biologie sollten über einen offenen und transparenten gesellschaftlichen Diskurs begleitet werden. Insbesondere die Frage der Patentierung von biologischen Systemen ist mit erhöhter Sensibilität von der Forschungsgemeinde zu verhandeln. Hier spielen die weitgehende Ablehnung der Patentierung von Lebewesen sowie auch Fragen der Verteilungsgerechtigkeit eine Rolle.

Die durch die Synthetische Biologie tendenziell beförderte Laienforschung eröffnet neue Möglichkeiten der Partizipation und Transparenz. Sollte sich diese Entwicklung bestätigen, dann erfordert sie jedoch durch ihre Ablösung von den üblichen Fachorganisationen und deren Standesethos in politischer, rechtlicher und ethischer Hinsicht auch besondere Aufmerksamkeit.

Bernd Müller-Röber, Ferdinand Hucho, Nediljko Budisa, Boris Fehse, Jürgen Hampel,
Kristian Köchy, Jens Reich, Hans-Jörg Rheinberger, Hans-Hilger Ropers, Jochen Taupitz,
Jörn Walter

Kristian Köchy

1. Was ist Synthetische Biologie?

Mit dem Versuch, ihre Monitoring-Funktion auf die Entwicklungen der Synthetischen Biologie anzuwenden, richtet die Arbeitsgruppe „Gentechnologiebericht“ der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften ihre Aufmerksamkeit auf einen Aktivitätsbereich der aktuellen Ingenieurbiologie, bei dem – wie bei den Feldern Stammzellforschung¹ oder Klonierung auch – zunächst die Frage aufgeworfen werden könnte, ob diese Entwicklungen im engeren Sinne überhaupt noch in den Bereich der Gentechnologie und damit zu Recht in den Forschungsfokus eines „Gentechnologieberichts“ fallen. Während im Fall von Stammzellforschung oder Klonierung die Sphäre gentechnologischer Verfahren und Modelle in Richtung auf die innerbiologischen Nachbardisziplinen der Zell- und Gewebeforschung überschritten wird, bestehen im Fall der Synthetischen Biologie enge Kontakte zu diversen benachbarten Technologien wie etwa Nanobiotechnologie, Materialforschung oder Informationstechnologie, aber auch zu klassischen chemischen Ansätzen (European Commission, 2005:10; Rathenau Instituut, 2007:4). Die Zugehörigkeit zu den sogenannten Converging Technologies oder NBIC²-Technologien (Roco/Bainbridge, 2003; Coenen, 2008) wird gar vielerorts als wesentliches Merkmal der Synthetischen Biologie verstanden. So schlussfolgert die Studie des Niederländischen Health Council:

„Clearly, synthetic biology is more than just genetic modification, systems biology, nanotechnology or systems chemistry. In many ways synthetic biology is a converging technology which brings together a variety of scientific disciplines and technologies.“ (Health Council of Netherlands, 2007:19)

1 Wobus, A. et al. (2006).

2 Konvergenz von Nano-, Bio-, Informations- und Kognitions- bzw. Neurotechnologien in Ableitung von den englischen Ausdrücken abgekürzt als NBIC; www.geisteswissenschaften.fu-berlin.de/v/embodiedinformation [04.10.2012].

Stimmt diese Einschätzung, dann geht die Synthetische Biologie weit über den engeren Bereich der Gentechnologie hinaus.

Das Nachdenken über das Verhältnis von Gentechnologie und Synthetischer Biologie ist allerdings deutlich mehr als eine bloße Reaktion auf das Selbstverständnis oder gar die institutionalisierte Aufgabenstellung des „Gentechnologieberichts“. Die Bezugnahme oder Abgrenzung zur Gentechnologie prägt vielmehr nachdrücklich die öffentliche Wahrnehmung und bestimmt die daraus resultierende gesellschaftliche Resonanz auf die Postulate und Forschungserfolge der Synthetischen Biologie. Sie bestimmt auch die ethische Beurteilung ihrer Handlungsoptionen und Forschungsziele. Während in der öffentlichen Wahrnehmung – befördert durch mediale Aufarbeitung oder die Selbstdarstellung einiger Forscher aus dem Feld – die neue Qualität der Synthetischen Biologie scheinbar unstrittig ist, bleibt in ersten vorsichtigen Annäherungen der Metareflexion in Soziologie, Philosophie und Technikfolgenabschätzung vor allem jedoch der Ethik die Relation Gentechnologie – Synthetische Biologie bezeichnenderweise weitgehend offen (EKAH, 2010:5ff.). Je nachdem jedoch, ob man die Synthetische Biologie als bloße Fortentwicklung gentechnologischer Ansätze (DFG, 2009:7) versteht, die deren Prinzipien und Verfahren bis auf ein Optimum hin entwickelt („extreme Gentechnik“)³ oder ob man der Auffassung ist, die Synthetische Biologie bewege sich mit einem neuen und eigenständigen Ansatz in Richtung auf eine Bioforschung ganz eigener Qualität („absolute Synthetische Biologie“ nennt es die European Commission, 2005:8), werden sich allerdings die Vorzeichen für eine ethische Bewertung deutlich unterscheiden. Auch von Seiten der involvierten Fachwissenschaften aus betrachtet, ist die Situation keinesfalls eindeutig. So wird die Synthetische Biologie einerseits als „logische Fortentwicklung der molekularen Lebenswissenschaften“ bezeichnet, nur um im gleichen Atemzug zu betonen, dass die Synthetische Biologie „ein komplett neues Forschungs- und Entwicklungsgebiet“ darstellt und das „Zeitalter der biologischen Technikwissenschaften“ einläutet (beides Pühler, 2011:13). Den zweiten Punkt hebt auch ein Sachverständigenrat im Rah-

3 Wird diese Formulierung im Folgenden verwendet, so ist sie neutral genommen und bringt eine quantitative Weiterentwicklung der gentechnologischen Forschungsansätze in der Synthetischen Biologie zum Ausdruck im Gegensatz zu der Behauptung eines grundsätzlichen, qualitativen Unterschiedes. Negative Begriffsverwendungen gehen auf kritische Einwände von Nichtregierungsorganisationen zurück (z. B. der US-amerikanischen ETC Group) und kommen etwa in der Überschrift „Craig Venter. Der Extrem-Genetiker“ (Sueddeutsche.de, 2010) zum Tragen. Vgl. auch www.testbiotech.de/node/389 [08.08.2012] und www.dtoday.de/regionen/lokal-nachrichten_artikel,-Zwischen-Errungenschaft-und-Widerstand-Gentechnik-fuer-Europa-Europaeer-fuer-die-Gentechnik-_arid,152115.html [08.08.2012].

men der NEST (New and Emerging Science and Technology) Initiatives 2005/2006 der Europäischen Kommission hervor:

„While several of fundamental scientific issues [...] overlap with those in other, more mature fields, especially biotechnology and systems biology [...], synthetic biology should be properly seen as a completely new discipline, which brings a systematic, application-driven engineering perspective to biology.“ (European Commission, 2005:10)

Der Klärungsbedarf zum Verhältnis von Gentechnologie und Synthetischer Biologie ist somit offensichtlich.⁴ Die Arbeitsgruppe „Gentechnologiebericht“ hat aus dieser Tatsache den Schluss gezogen, die offene Frage nach der Beziehung zwischen Gentechnologie und Synthetischer Biologie weder einfach zu ignorieren noch sie ad hoc zu entscheiden, sondern sie vielmehr als offene Fragestellung zu einem Leitfaden des Monitorings selbst zu wählen. Auch die Einzelbeiträge dieses Bandes mit ihren je heterogenen Perspektiven auf die Entwicklungen der Synthetischen Biologie wurden durch diese – im Vorfeld den Autorinnen und Autoren zugeleitete – Leitlinie einander angenähert. Die Tatsache allerdings, dass trotz solcher vereinheitlichender Vorgaben nicht nur mit Blick auf die Beziehung zwischen Synthetischer Biologie und Gentechnologie weiter sehr uneinheitliche Stellungnahmen des Beobachterfeldes und der Protagonisten in der Forschung bestehen bleiben, muss als ein wichtiger Hinweis auf den besonderen Charakter der Synthetischen Biologie verstanden werden. In ähnlicher Weise heterogen war das Resultat einer diesbezüglichen Umfrage der Zeitschrift „Nature Biotechnology“ zur Definition der Synthetischen Biologie aus der Perspektive der im Feld arbeitenden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler: „The diversity of responses indicates that consensus as to the meaning of synthetic biology still lies some way off“ (What’s in a name?, 2009:1071).

Dieses Faktum bringt nicht nur die erst kurze Geschichte der Disziplin respektive des Forschungsstranges zum Ausdruck oder ihre starke Entwicklungsdynamik, sondern eben vor allem auch die besondere Querschnitts-, Vernetzungs- oder Brückenfunktion der Ansätze, Techniken und Modelle der Synthetischen Biologie. In diesem Fall wird die Berücksichtigung der inneren Vielfalt von Programmen, Verfahren und Zielsetzungen für die adäquate Beschreibung des Feldes zur Pflicht, ohne das damit jedoch der Bedarf an möglichst eindeutiger Bestimmung,

4 Vgl. auch Rathenau Instituut, 2006; Engelhard, 2011; Eichinger, 2011.

Klassifikation und Systematisierung geschmälert würde. Angesichts dieser durchaus ambivalenten Vorgabe, die Vielfalt der Einzelansätze zu berücksichtigen und diese dennoch insgesamt als Ausdrucksformen eines übergeordneten Technikclusters mit Namen „Synthetische Biologie“ zu würdigen, könnte es sich mit Blick auf die verschiedenen Untersuchungsdimensionen des „Gentechnologieberichts“ durchaus als sinnvoll erweisen, mehrere unterschiedliche Systematisierungsansätze ergänzend zueinander einzusetzen – möglicherweise sind für die einzelnen Fragestellungen eines übergreifenden Monitorings sich ergänzende Klassifikationen und Typisierungen der Synthetischen Biologie sogar aussagekräftiger als ein einziger vereinheitlichender Ansatz. Auf diesen Punkt sei am Ende dieser Ausführungen kursorisch zurückgekommen.

Berücksichtigt man jedoch zunächst die vorliegenden Bestimmungsversuche der Synthetischen Biologie,⁵ dann ist die Bezugnahme auf und die Abgrenzung von der Gentechnologie eines der immer wiederkehrenden Klassifikationskriterien und Darstellungsmuster. Eine erste Orientierung zur Kennzeichnung des Ansatzes kann die mittlerweile weit anerkannte Definition einer NEST High-Level Expert Group der Europäischen Kommission liefern.⁶ Demnach gilt:

„Synthetic biology is the engineering of biology: the synthesis of complex, biologically based (or inspired) systems, which display functions that do not exist in nature. This engineering perspective may be applied at all levels of the hierarchy of biological structures – from individual molecules to whole cells, tissues and organisms. In essence, synthetic biology will enable the design of ‘biological systems’ in a rational and systematic way.“ (European Commission, 2005:5)

Bei explizit interdisziplinärer Ausrichtung der Synthetischen Biologie bestehen nach dieser Bestimmung wichtige strukturelle und inhaltliche Bezüge zu anderen Wissenschafts- und Technologiefeldern. Ein erster wichtiger Punkt ist dabei die genannte *ingenieurtechnische Ausrichtung* der Synthetischen Biologie (European Commission, 2005:10; Breithaupt, 2006; Ball, 2007; Drubin et. al., 2007:242; Serrano, 2007:1). So lauten die diesbezüglichen Voten der oben erwähnten Umfrage „What’s in a name?“ von „Nature Biotechnology“ (2009) etwa:

5 Vgl. auch International Risk Governance Council, 2008:6ff.; What’s in a name?, 2009.

6 Vgl. auch Serrano, 2007:1; Health Council Netherlands, 2008:17.

- ▶ „Synthetic biology is an interdisciplinary approach that *applies engineering principles to biology* [meine Hervorhebung, KK]“ (Jim Greenwood)
- ▶ „Synthetic biology is the *application of engineering principles* [meine Hervorhebung, KK] towards the construction of novel biological systems“ (Wendell Lim)
- ▶ „Synthetic biology involves the *development and application of engineering principles* [meine Hervorhebung, KK] to make the design and construction of complex biological systems easier and more reliable“ (Christiana Schmolke)
- ▶ „Synthetic biology is the *engineering discipline* [meine Hervorhebung, KK] for building novel and sophisticated living systems“ (Ron Weiss)

Hier wird das bereits früher formulierte Ingenieurideal der Biologie – so etwa bei Jacques Loeb (Pauly, 1987; vgl. dazu auch Kapitel 3 in diesem Band) – mit neuen biotechnischen Mitteln umgesetzt. Gerade dieser ingenieurtechnische Denkstil unterstreicht zunächst die Verbindung zu anderen technisch-praktischen Ansätzen und Forschungsfeldern in den Lifesciences wie Biotechnologie, Gentechnologie oder Nanobiotechnologie. In der genannten Umfrage betont deshalb etwa David Berry: „The term synthetic biology should really be synthetic biotechnology“ (What’s in a name?, 2009:1071). Er markiert zugleich einen Unterschied zu den eher auf Grundlagenkenntnis ausgerichteten Forschungsansätzen (etwa bestimmten Bereichen der Systembiologie). Solche Differenzierungen müssen allerdings schematisch und karikaturhaft bleiben, denn weder die Trennung von technischer Praxis und wissenschaftlicher Theorie noch die Gegenüberstellung von Grundlagenforschung und Anwendung wird den Bedingungen heutiger Forschung vollkommen gerecht. Zudem fallen große Teile der Synthetischen Biologie selbst in den Bereich der Grundlagenforschung, sodass Luis Serrano innerhalb der Synthetischen Biologie noch einmal zwischen einer Grundlagen- und einer Anwendungsrichtung („fundamental“ und „applied“) unterscheidet und betont, die praktische Anwendbarkeit sei bisher eher marginal (Serrano, 2007:3).

Dennoch kann die gemachte Unterscheidung Hilfestellung geben, um die Synthetische Biologie weiter zu konturieren und ihr Verhältnis zur Gentechnologie zu klären. Die Synthetische Biologie repräsentiert dann eine ingenieurwissenschaftliche Ausrichtung und Sichtweise auf die Lifesciences. Ziel des technischen Ansatzes ist es, komplexe biologiebasierte oder -inspirierte Systeme herzustellen, die strukturell und funktionell so in der Natur nicht existierten. Nicht nur diesen ingenieurwissenschaftlichen Denkstil teilt die Synthetische Biologie mit der

Gentechnologie, sondern vor allem auch viele der eingesetzten konkreten Verfahren und Instrumente wie zum Beispiel DNA-Sequenzierungsverfahren oder rekombinantes Klonen (vgl. Carlson, 2003; Knight, 2005). Durch die enorme Leistungssteigerung der eingesetzten Sequenzier-technologien ist allerdings der Umfang der Syntheseleistungen deutlich gesteigert (Eichinger, 2011:79). Trotz dieses Quantitätssprunges verbleiben bestimmte Techniken – nach Eichinger insbesondere die Top-down-Verfahren – in dem Bereich, den man im obigen Sinne als „extreme Gentechnik“ bezeichnen könnte (ebd.: 81). Allerdings werden diese klassischen Ansätze in einigen Forschungsfeldern mit zusätzlichen Verfahren und Konzepten aus dem weiten Feld der Converging Technologies kombiniert. Insofern kann man eben die interdisziplinäre Ausrichtung des Ansatzes als ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal der Synthetischen Biologie gegenüber der Gentechnologie nennen (Engelhard, 2011:50). Ein eingängiges Beispiel dafür sind die Disziplingenese wesentlich mitbestimmenden Ansätze von Ehud Shapiro, dessen Arbeitsgruppe mittels molekularer biologischer Bausteine und Prozessabläufe künstliche Systeme und logische Kreisläufe nach Analogie von Computern erzeugt (Benenson et al., 2001; Benenson et al., 2004).

Als ein Hauptunterschied zwischen Gentechnik und Synthetischer Biologie wird immer wieder angeführt, erstere versuche, individuelle Gene von einer Art zur anderen zu transferieren, während letztere zum Ziel habe, ganze neue Genome von Mikroorganismen aus einem Set von mehr oder weniger standardisierten Bausteinen herzustellen (Breithaupt, 2006:22; Tucker/Zilinskas, 2006:26). Allerdings scheint diese Unterscheidung eines eher elementaristischen Vorgehens der klassischen Gentechnologie und eines eher systemisch-holistischen Ansatzes der Synthetischen Biologie angesichts der jüngsten Entwicklungen innerhalb der Gentechnologie in Richtung auf immer umfassendere Systemkonzepte („Omics“-Technologien) wenig überzeugend. Deshalb nennt George Church in der bereits zitierten Umfrage von „Nature Biotechnology“ (2009:1071) „genetic engineering“, „metabolic engineering“ und „genome engineering“ als Stufen eines ansteigenden Herstellungsansatzes und betont zugleich, dass Synthetische Biologie mit dem Versuch, standardisierte Module zu konzipieren, die darauf angelegt sind, bei Zusammenfügung interagierende und funktionierende Systeme zu bilden, den bisherigen Formen des Engineering gegenüber den Status eines Meta-Ansatzes habe.

Als weiterer Unterschied wird zudem immer wieder angeführt, klassische Biotechniken seien vor allem auf die Manipulation bestehender Biomoleküle, Zellen oder Organismen ausgerichtet, während die Synthetische Biologie sich erstmals gezielt dem Design und Redesign von neuen Biosystemen zuwende (European Commission, 2005:11). Insofern kennzeichne die Syn-

thetische Biologie der Übergang von der Manipulation zur Kreation (Boldt et al., 2008). Dieser Schritt in Richtung auf Neukonstruktion ist vor allem bei den Bottom-up-Ansätzen offensichtlich, die den Anspruch erheben, komplexe Biosysteme von deren einzelnen Bausteinen an erstellen zu können (Eichinger, 2011:81f.). Leitlinie des Ansatzes ist: „to put together an organism from small molecules alone“ (Forster/Church, 2006:1). Bei aller Stimmigkeit dieses Aspekts ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Unterscheidung von Rekonstruktion und Neukonstruktion ebenso wie die Unterscheidung zwischen der Abänderung (Manipulation) bestehender natürlicher Systeme und der Neubildung artifizierlicher Systeme nicht absolut gesetzt werden kann. Mit Blick auf die konkret vorliegenden Verfahren sowohl in der Gentechnologie als auch in der Synthetischen Biologie ist vielmehr zu betonen, dass es sich hier um eine relative Abgrenzung handelt. Nachahmung, Manipulation und Neukonstruktion können in ein und demselben Forschungsansatz fließend ineinander übergehen. Die Fähigkeit zur Nachbildung bestehender biologischer Systeme oder Systemteile kann zudem die notwendige Voraussetzung für die Neubildung artifizierlicher Systeme darstellen.

Trotz der genannten Einwände liefert jedoch die Berücksichtigung des Organisationsniveaus der jeweils zum Gegenstand des technischen Ansatzes erkorenen Objekte (Moleküle, Gene, Genome, Zellen, Zellsysteme etc.) zusammen mit dem Grad der technischen Indienstnahme oder Veränderungsspotenz – ausgedrückt etwa durch die jeweiligen „Naturferne“ („divergence from nature“) des Ansatzes und der Produkte – einen möglichen Weg, um die Entwicklungen und Produkte der Synthetischen Biologie zu klassifizieren und systematisieren und die über klassische Gentechnologie hinaus reichende Potenz des Ansatzes zu unterstreichen. Einschlägig für diesen Systematisierungsansatz ist die Studie des niederländischen Gesundheitsministeriums (Health Council Netherlands, 2008:29): Bei Nukleotiden oder Aminosäuren beginnend, über künstliche Membranen oder molekulare Motoren, nicht in der Natur auftretende Proteine, alternative genetische Alphabete bis hin zu Hybridmaterialien oder Protozellen verlief dieser Trend weg von der natürlichen Vorgabe.

Auch diese Abstufung zeigt, dass bei gemeinsamem Fokus auf die technische Praxis einer Ingenieurbiologie der wesentliche Unterschied zwischen Synthetischer Biologie und Gentechnologie – trotz der oben erwähnten Annäherungen diesbezüglich – in der für den Ansatz strukturbildenden *systemischen Ausrichtung* der Synthetischen Biologie besteht (Royal Academy of Engineering, 2009:14). Deren Designansatz ist eben nicht auf die genetische Ebene beschränkt, sondern soll auf allen Niveaus der Hierarchie von Biosystemen greifen. Hinsichtlich dieser bio-

systemischen Ausrichtung werden die wesentlichen Bezüge zur Systembiologie deutlich. Unter Rückgriff auf klassische Methodenideale der Chemie, bei der man nach der Maxime „solve et coagula“ analytische und synthetische Arbeitsschritte unterschied, gilt der Ansatz der Systembiologie häufig als analytische Stufe des Verfahrens, die Synthetische Biologie als die ergänzende synthetische Stufe (Benner, 2003:118). In diesem Fall wäre entsprechend der Darstellung der NEST-Group die analytische Phase als „discovery-based science“ eher der Aufklärung der Eigenschaften natürlicher Entitäten gewidmet, während die erste Aufgabe der synthetischen Phase darin bestünde, die so deduzierten molekularen Strukturen zu bestätigen und neues Material für weitere Studien herzustellen (European Commission, 2005:11).

Ein zusätzliches Moment der auf Reproduktion von natürlichen Vorgaben gerichteten Arbeit ist im obigen Sinne allerdings die mit ihr wachsende Kapazität, modifizierte neue Produkte zu erzeugen, die so in der Natur nicht zu finden sind, die aber natürliche Eigenschaften und Funktionen nachahmen („mimic“) oder möglicherweise verbessern („improve“). Die beiden Momente der Reproduktion und der Konstruktion zusammenfassend, definieren deshalb auch Drubin et al. (2007:242): „The design of artificial biological systems *and* [meine Hervorhebung, KK] the understanding of their natural counterparts are key objectives of the emerging discipline of synthetic biology.“ Mit den Möglichkeiten der Datensammlung, Formalisierung und Simulation, die die Systembiologie für diesen Konstruktionsansatz bereitstellt, ergeben sich die immer wieder geäußerten Hoffnungen auf eine Rationalisierung des Produktionsprozesses in der Synthetischen Biologie. Auch diese Kennzeichnung bringt einen bestimmten Aspekt der Abgrenzung zwischen Synthetischer Biologie und bisheriger Gentechnologie (oder Biotechnologie im Allgemeinen) zum Ausdruck: die Ablösung bisheriger gentechnologischer „Ad-hoc-Verfahren“ durch eine nunmehr methodische Vorgehensweise inklusive rationaler, datenbasierter Planung des Prozesses: „Traditional biotechnology tries to tackle a technological challenge by manipulating existing biomolecules [...] [and] has tended to proceed in an ad hoc or empirical manner“ (European Commission, 2005:11). Nach dieser Auffassung sind die Datensätze und Simulationstechniken der Systembiologie entscheidend für den erhofften Rationalisierungsschub in Richtung auf eine quasi am Reißbrett entworfene Konstruktion. In dieser Hinsicht erlangt die Abgrenzung zur Gentechnologie vielfach eine durchaus rhetorische, zumindest jedoch eine auf das Versprechen neuer Produkte ausgerichtete Note. So heißt es in der obigen Quelle weiter: „synthetic biology permits rational design and redesign of living systems at a deeper and more complex level. It will provide a ‘biotechnology that really works’“ (ebd., 2005:11).

Bezeichnend für die heterogene Wahrnehmung des Feldes – möglicherweise jedoch auch Ausdruck für die unterschiedlichen Zielsetzungen und Erfahrungsweisen von wissenschafts-politischen Programmwürfen einerseits und den Bedingungen des Forschungsalltags im Labor andererseits – ist es, dass sich neben solchen Postulaten rationaler Planung auch das genau entgegen gesetzte Ideal des Ausprobierens findet (vgl. dazu auch meine Überlegungen zu den philosophischen Rahmenannahmen in Kapitel 6 in diesem Band). Synthetische Biologie gilt dann als exponierte Konzeption eines nach dem Vorbild des Bastelns – der „bricolage“ (Rheinberger, 2001:22ff.) oder dem „tinkering“ (Knorr-Cetina, 2002:64ff.) – operierenden technischen Ansatzes. Dieses handwerkliche „trial-and-error“-Verfahren ist positiv formuliert dadurch gekennzeichnet, dass es in großem Umfang Erkenntnislücken toleriert, solange es nur irgendwie gelingt, die praktischen Ziele der technischen Fertigung zu erreichen. Vielen ist genau diese Pragmatik Grund für die bisherigen Erfolge und die weiteren Hoffnungen auf die Entwicklungspotenz der Synthetischen Biologie. So gilt nach Holger Breithaupt (2006:22): „In fact, ignoring the unknown is a main idea behind synthetic biology“.

Die bisherigen Ausführungen haben deutlich gemacht, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Bestimmungen und Kennzeichnungen der Synthetischen Biologie existiert. Man kann aus diesem Faktum – durchaus im Sinne der oben genannten Pragmatik einer Ausrichtung auf konkrete Forschungsziele – den Schluss ziehen, weiterer Streit um die adäquate Bestimmung der Synthetischen Biologie und ihre Abgrenzung zu anderen Disziplinen sei als zu theoretisch und nicht weiter zielführend zu dispensieren und es sei eine Rückkehr zur konkreten Forschungsarbeit sinnvoll. Synthetische Biologie könnte in diesem Sinne als nicht mehr aber auch nicht weniger denn ein erfolversprechendes Verfahren erscheinen, eine neue Methode oder Technik, die je nach Bedarf in Kombination mit anderen (klassischen) Verfahren zur Erreichung konkreter Ziele einsetzbar ist. Insofern wäre Synthetische Biologie eine Sammelbezeichnung für ein Methodengefüge, das in molekularbiologischen, zellbiologischen, evolutionsbiologischen und ähnlich gelagerten Forschungsprogrammen zum Einsatz kommen könne. Über die Feststellung dieses Faktums hinausgehende Fragen nach dem Status einer neuen Disziplin oder eines neuen Technologiestranges wären nach dieser Ansicht sinnlos. Mit dieser Antwort auf die Frage nach der Synthetischen Biologie wäre auch ihr Querschnittscharakter unterstrichen. Weiterhin wäre den grassierenden Befürchtungen gegenüber der neuen Qualität biologischer Manipulation oder Konstruktion von Leben die Spitze gebrochen und diese Antwort aus der Perspektive des Labors könnte insofern zur Beruhigung einer zum Teil übererregten öffentlichen Debatte

beitragen. Andererseits jedoch wird diese Antwort auf die Bestimmungsfrage der immer wieder – auch von Seiten der Laborforschung, vor allem jedoch von Wissenschaftsorganisationen, Wissenschaftspolitik und -förderung oder Technikanalyse und Technikfolgenabschätzung – unterstrichenen Behauptung, die Synthetische Biologie sei *die* neue und innovative Forschungsprogramm, die nicht nur neue Produkte oder Erkenntnisse liefere, sondern die auch unser bisheriges Verständnis biologischer Forschung grundsätzlich umwälze, nicht gerecht. Zumindest entscheidet sie eine derzeit noch offene Situation durch Verzicht auf weitere Sondierung. Angemessener wäre es deshalb, die interne und externe Vielfalt von Darstellungen und Deutungen zunächst als solche anzuerkennen und sie in die Art der Sondierung des Feldes (Monitoring) einfließen zu lassen, ohne damit zugleich auf den Versuch einer Systematisierung zu verzichten.

Ein Vorschlag zur Umsetzung eines solchermaßen kombinierenden Vorgehens bestünde darin, unterschiedliche Systematisierungskriterien parallel zu verwenden und die resultierende Klassifikationsmatrix für Ansätze, Techniken und Programme kombiniert und abgestimmt auf die jeweilige Fragestellung einzusetzen. Ein solches Vorgehen würde auch der Tatsache gerecht, dass sich bestimmte Klassifikationen für einige Querschnittsdimensionen der Synthetischen Biologie besser eignen als andere. Zudem wird der Einsatz einer solchermaßen pluralen Klassifikationsmatrix ein vollständigeres Bild dieser erst jungen Strömung befördern als die Verwendung nur eines einzigen Klassifikationsschemas, das Gefahr läuft zu einem Prokrustesbett zu werden. Folgende Klassifikationsangebote ließen sich kombinieren:

1.1 Klassifikation nach Verfahrenstyp

Nach einem gängigen Klassifikationsschema (Boldt et al., 2009:21ff.) können hinsichtlich des Verfahrenstyps mindestens vier verschiedene Konstruktionsansätze in der Synthetischen Biologie unterschieden werden (vgl. zu den hier vorgestellten Konstruktionsansätzen auch ausführlich Kapitel 4 in diesem Band). Eine Kombination der einzelnen Ansätze ist jederzeit denkbar:

- ▶ *Bottom-up-Ansatz*: (auch „Lego-Ansatz“ (EKAH, 2010:8) oder „construction approach“ (Rathenau Institut, 2007:5)) Ausgehend von einfachsten biologischen oder chemischen Bausteinen sollen komplexe Biosysteme von Grund auf neu erstellt werden. Paradigmatisch für dieses Verfahren sind Versuche der De-novo-Herstellung von Protozellen (Forster/Church, 2006).

- ▶ *Top-down-Ansatz*: Im komplementären Top-down-Ansatz (auch „deconstruction approach“ (Rathenau Instituut, 2007:5)) geht es umgekehrt darum, komplexe Biosysteme sukzessive in bestimmten Bestandteilen (etwa dem Genom) abzurüsten, zu minimalisieren („Minimalisierungsstrategie“), bis nur noch eine Grundausrüstung zur Erhaltung biologischer Funktionen übrig bleibt. Paradigmatisch für dieses Verfahren sind Ansätze zur Erzeugung eines Minimalgenoms.
- ▶ *Chassis-Ansatz*: Der Chassis-Ansatz (Royal Academy of Engineering, 2009:27ff.) – eine Begriffsanleihe bei der Fahrzeugtechnik – setzt bei dem Resultat einer Minimalisierungsstrategie an und soll durch gezielten Wiederaufbau mit definierten Gensequenzen neue Genome mit definierten Funktionen erzeugen.
- ▶ *Orthogonaler Ansatz*: Der orthogonale Ansatz setzt auf gezielten Ersatz von Systemkomponenten durch fremde, definierte Bauteile. Er wird als Weg zur Überwindung biosystemarer Komplexität durch Modularisierung verstanden und dient beispielweise der Erzeugung von Systemen, deren Mechanismen zur Umsetzung von Lebensfunktionen von den natürlichen Vorgaben bewusst abweichen. Paradigmatisch für dieses Verfahren ist etwa die Erzeugung von DNA mit alternativen Nukleobasen (Billerbeck/Panke, 2012:23ff.).

1.2 Klassifikation nach Anwendungsfeldern oder Produktionsbereichen

Neben der Klassifikation nach Verfahrenstypen kann als alternatives Klassifikationsschema die Unterscheidung hinsichtlich der Anwendungsfelder oder Produktionsbereiche dienen:

- ▶ *Grundlagenforschung – Technik* („*fundamental*“ – „*applied*“): Eine Grobunterteilung nach Anwendungsfeldern wäre die klassische Einteilung nach der Ausrichtung des Ansatzes auf Grundlagenforschung („*fundamental*“) oder technische Umsetzung im Sinne der Anwendungsforschung („*applied*“). Mit dieser Unterscheidung einher ginge eine Funktionszuschreibung der Synthetischen Biologie, die entweder primär als „proof of principle“ oder primär als „enabling technology“ verstanden wird. Im ersteren Fall soll die Synthese von Produkten dazu dienen, bestimmte Modelle oder Theorien über den Aufbau und die Funktion von Biosystemen zu bestätigen – eine primär theoriebezogene Funktion. Im zweiten Fall wird das Verfahren als Ermöglichungsgrund für die Entwicklung weiterer Techniken oder neuer Produkte verstanden – eine primär praxisbezogene Funktion. Zu berücksich-

tigen ist, dass die beiden Zielsetzungen ineinander überleiten und aufeinander bezogen sind.

- ▶ *Allgemeine Anwendungsbereiche (rote – grüne – weiße – graue – blaue)*: Konkreter wäre die Einteilung nach erhofften Anwendungsbereichen in Anlehnung an die übliche Klassifikation der Biotechnologie. Hier wäre etwa zwischen roter (medizinischer), grüner (landwirtschaftlicher) oder weißer (industrieller) Synthetischer Biologie zu unterscheiden; alternativ auch: graue (umweltbiotechnische) sowie blaue (marine) Synthetische Biologie.⁷ Anwendungen im Bereich medizinisch-therapeutischer Zwecke, im Bereich des Umweltschutzes (zur Herstellung von Treibstoffen oder zur Behandlung von Umweltschäden) oder in der Pharmaindustrie („drug delivery“-Systeme) könnten so voneinander getrennt behandelt werden (vgl. dazu auch die Fallbeispiele in Kapitel 5 in diesem Band).
- ▶ *Konkrete Forschungszeige*: Eine noch einmal größere Konkretion der Einteilung könnte die spezifischen Forschungszeige innerhalb der Synthetischen Biologie nach den jeweils paradigmatischen Forschungsfragen vornehmen. Zu unterscheiden wären etwa die Forschungszeige: (a) DNA-Synthese, Genomsynthese, (b) genetische Schaltkreise, synthetische Oszillatoren, Signaltransduktionssysteme, künstliche Zell-Zell-Systeme, (c) Engineering von Stoffwechselwegen („metabolic pathway engineering“), (d) Herstellung von Biosensoren durch Protein-Engineering, (e) Minimalzellforschung (Protozellen), (f) Minimalgenomforschung, (g) Xenobiologie (vgl. dazu Drubin et al., 2007; vgl. auch Arbeitskreis Systembiologie und Synthetische Biologie, 2011).

1.3 Klassifikation nach (biologischen) Forschungsobjekten

Wie in den klassischen Systematiken der Biologie üblich, wäre eine Einteilung der Ansätze und Forschungszeige der Synthetischen Biologie nach den jeweils paradigmatischen Forschungsobjekten (deren Komplexitätsgrad, deren biologisch-systematischer Stellung etc.) denkbar. Zu berücksichtigen ist dabei, dass ein enger Bezug zwischen derart „ontologischen“ und „methodischen“ Klassifikationen besteht, weil sich bestimmte Verfahren und Methoden primär auf bestimmte Modellsysteme beziehen.

7 Vgl. etwa die Einteilungen auf den Webseiten www.biotechnologie.de/ [08.08.2012] oder www.umwelt.nrw.de/umwelt/bio_gentechnik/index.php [08.08.2012] sowie Biospektrum, 2009.

- ▶ *Hierarchieebenen/Komplexität von Biosystemen:*⁸ Angesichts der immer wieder genannten Bestimmung der Synthetischen Biologie als technischer Konstruktion, die unterschiedliche Hierarchieebenen von Biosystemen betrifft (von Einzelmolekülen bis zu ganzen Zellsystemen), wäre eine Klassifikation nach dem Komplexitätsgrad der Forschungsobjekte oder Produkte denkbar, wie sie das Health Council der Niederlande (2008:28f.) vorschlägt. Demnach sind mindestens fünf Komplexitätsstufen zu unterscheiden: (a) die Ebene fundamentaler biomolekularer „building blocks“ (z. B. Nukleotide), (b) die Ebene der „assemblages“ solcher Grundeinheiten (z. B. DNA), (c) die Ebene höherer funktioneller Einheiten auf makromolekularem Niveau (zum Beispiel BioBricks in Form von „genetic circuits“), (d) die Ebene von „self-assembling units“ (z. B. das System aus kodierenden Einheiten und zellulären Komponenten der Proteinbiosynthese), (e) die Ebene von „self-replicating biological systems“ (z. B. Systeme wie Zellen oder mehrzellige Strukturen).
- ▶ *Eukaryonten/Prokaryonten; Einzeller/Mehrzeller:* Ergänzend zu der ersten Unterscheidung nach Komplexitätsstufe von Biosystemen wäre hinsichtlich der von der Konstruktion betroffenen Zellsysteme zu differenzieren zwischen Forschungen, die an Zellen mit oder ohne echtem Zellkern durchgeführt werden (vgl. Drubin et al., 2007:245) oder Ansätzen, die an Einzellern oder Mehrzellern umgesetzt werden sollen. Weitere biosystematische Unterscheidungen sind denkbar, wobei dann beispielsweise die Unterscheidung von Forschungsvollzügen an Tieren und an Pflanzen mit dem Unterscheidungskriterium zwischen roter und grüner Synthetischer Biologie zusammenfiele.
- ▶ *Natürliche/künstliche Systeme:* Gerade die klassische ontologische Dichotomie zwischen natürlichen Biosystemen und künstlichen technischen Systemen wird in der Synthetischen Biologie unterlaufen, dennoch verweist auch die Rücksichtnahme auf die jeweilige „divergence from nature“ (Health Council, 2008:29) (siehe dazu auch unten) auf ein Klassifikationsraster zur Einordnung der Forschungen in der Synthetischen Biologie, bei dem die Trennung von natürlichen und künstlichen Produkten nach wie vor relevant bleibt. Denkbar wäre etwa auch eine Orientierung an verschiedenen Klassifikationsstufen hybrider Bildungen.

8 In der Gentechnik ist diese Idee einer Klassifikation in verwandter Weise bei den Überlegungen zum sogenannten „Eskalationmodell“ für gentechnische Interventionen am Menschen relevant. Hier wird nach „Eingriffstiefe“ unterschieden; vgl. etwa Hacker et al., 2009.

1.4 Klassifikation nach dem veranschlagten Technologieideal

Hinsichtlich der sich im Verfahren äußernden technischen Gestaltungspotenz und den veranschlagten Technologieidealen wäre zu unterscheiden nach:

- ▶ „*Divergence from nature*“: Hinsichtlich der sich im Produkt äußernden „divergence from nature“ (siehe oben) sind neben dem jeweiligen ontologischen Status der Untersuchungsobjekte (Natur/Kunst/Hybride) zusätzlich auch der jeweilige Charakter der Technik und deren Zielsetzung im Allgemeinen zu berücksichtigen. Diesbezüglich könnten (a) mimetische, (b) konstruktiv-modifizierende und (c) optimierende Ansätze oder Projektentwicklungen unterschieden werden. Ähnlich wie in der Debatte um das Enhancement wäre es vermutlich schwer, optimierende von korrigierenden Eingriffen bei der bloßen Berücksichtigung der jeweiligen Produkte zu unterscheiden. Der Vergleich zwischen biologischen Vorgaben und dem Resultat des jeweiligen Herstellungsverfahrens aus der Synthetischen Biologie könnte dennoch ergiebig sein. Es könnte sich auch erweisen, dass Teile oder Arbeitsschritte eines komplexeren technischen oder experimentellen Verfahrens nach dieser Gliederung voneinander zu sondern wären. Der Nachbau eines Bakteriengenoms entsprechend der mittels Sequenzierung gewonnenen Informationen fiel dann in die erste Kategorie des Nachbaus (*mimesis*). Deren Modifikation zur Kennzeichnung des Konstruktionsvorgangs mittels einer in die DNA eingefügten Wasserzeichen-Sequenz („watermark sequence“) wäre eine schwache Form der Veränderung (vgl. Gibson et al., 2010:52). Der Einbau neuer oder die Entfernung alter Sequenzen zu Erlangung bestimmter Funktionen würde sich noch im Modifikationsbereich der klassischen Gentechnik bewegen, wobei ergänzend natürlich auftretende Funktionen von artifiziellen Funktionen unterschieden werden könnten. Die Herstellung von orthogonalen DNA-Systemen mit alternativen Nukleobasen würde dann das andere Extrem eines Spektrums an Modifikation natürlicher Vorgaben darstellen.
- ▶ *Engineering-Konzept (Bricolage/Planung)*: Ergänzend dazu wäre nach dem veranschlagten Engineering-Konzept der unterschiedlichen Ansätze zu differenzieren zwischen Programmen die (a) explizit dem Ansatz des Bastelns folgen („bricolage“, „tinkering“) – hierzu zählen etwa die auf Innovation und Ausprobieren setzenden Wettbewerbe junger Forscher wie der iGEM-Wettbewerb (vgl. dazu in diesem Band auch Spotlight I und IV sowie Kapitel 11, Indikator 4.) – sowie (b) solchen Ansätzen, die explizit auf den Ansatz der rationalen Pla-

nung, des „blueprinting“, der Simulationstechniken setzen. In diesem Fall sind jedoch nicht nur qualitative Größen, wie die Selbstdeutung des Vollzugs durch die Community oder die externe Deutung durch Wissenschafts- und Technologieforschung bedeutsam, sondern hier kommt auch das Moment der „epistemischen Tugenden“ sowie der „Denkstile“ ins Spiel (vgl. dazu auch dazu meine Überlegungen zum philosophischen Rahmen der Synthetischen Biologie in Kapitel 6 in diesem Band).

1.5 Klassifikation nach den Paradigmen und Leitbildern

Wie bereits im letzten Unterpunkt der vorhergehenden Klassifikation nach Technologien und Technologieidealen lassen sich schließlich neben fachwissenschaftsimmanenten und technikbezogenen Kriterien für eine Metaanalyse im Zuge eines Monitorings auch die *metatheoretischen Rahmenannahmen* der jeweiligen Ansätze als Systematisierungskriterium verwenden. Auch wenn diese häufig nicht explizit gemacht werden, so lassen sich doch aus den öffentlichen und internen Darstellungen der verschiedenen Ansätze der Synthetischen Biologie immer auch Aussagen und Daten extrahieren, die auf methodologische Elemente, Theorieanteile oder wissenschaftliche Selbstverständnisse verweisen, die den Theorierahmen einer rein naturwissenschaftlichen Konzeption verlassen. Anleihen bei der Selbstorganisations- oder Autopoieseforschung oder bei Modellen der chemischen Evolution liefern Leitbilder, die auch zu einer Klassifikation der Forschungsrichtungen beitragen können (vgl. Witt, 2012).

1.6 Literatur

Arbeitskreis Systembiologie und Synthetische Biologie (2011): Thesenpapier zum Status der Synthetischen Biologie in Deutschland. Unter: http://biotech.dechema.de/biotech_media/Downloads/Synth_Bio_2011_NEU_3.pdf [08.08.2012].

Ball, P. (2007): Designs for life. In: Nature 448(7149):32–33.

Benenson, Y. et al. (2001): Programmable and autonomous computing machine made of biomolecules. In: Nature 414(6862):430–434.

Benenson, Y. et al. (2004): An autonomous molecular computer for logical control of gene expression. In: Nature 429(6990):423–429.

Benner, S. A. (2003): Act natural. In: Nature 421(6919):118.

Billerbeck S./Panke, S. (2012): Synthetische Biologie – Biotechnologie als Ingenieurwissenschaft. In: Boldt, J. et al., (Hrsg.): *Leben schaffen? Philosophische und ethische Reflexionen zur Synthetischen Biologie*, Paderborn:19–41.

Biospektrum (2009): Blaue Biotechnologie. Das Meer als Quelle bioaktiver Wirkstoffe und Materialien. 15(2):202–203.

Boldt, J. et al. (2008): Von der Manipulation zur Kreation. Ethische und ontologische Aspekte der synthetischen Biologie. In: *Jahrbuch für Wissenschaft und Ethik* 13:153–180.

Boldt, J. et al. (2009): *Synthetische Biologie. Eine ethisch-philosophische Analyse*. Bern.

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

Carlson, R. (2003): The pace and proliferation of biological technologies. In: *Biosecurity, Bioterrorism* 1:203–214.

Coenen, C. (2008): Konvergierende Technologien und Wissenschaften. Der Stand der Debatte und politische Aktivitäten zu ‚Converging Technologies‘. Berlin.

DFG et al. (2009): *Synthetische Biologie. Stellungnahme*. Weinheim.

Drubin, D. A. et al. (2007): Designing biological systems. In: *Genes Dev* 21(3):242–254.

Eichinger, T. (2011): Bidesign. Zu den möglichen Abgrenzungskriterien der synthetischen Biologie von klassischer Gentechnik. In: Dabrock, P. et al. (Hrsg.): *Was ist Leben – im Zeitalter seiner technischen Machbarkeit? Beiträge zur Ethik der Synthetischen Biologie*. Freiburg/München:75–94.

EKAH (Hrsg.) (2010) = Eidgenössische Ethikkommission für die Biotechnologie im Ausserhumanbereich: *Synthetische Biologie – Ethische Überlegungen*. Bern.

Engelhard, M. (2011): Die synthetische Biologie geht über die klassische Gentechnik hinaus. In: Dabrock, P. et al. (Hrsg.): *Was ist Leben – im Zeitalter seiner technischen Machbarkeit? Beiträge zur Ethik der Synthetischen Biologie*. Freiburg/München:43–59.

ETC Group (2007) = Extreme genetic engineering Group: An introduction to synthetic biology. Unter: www.etcgroup.org/sites/www.etcgroup.org/files/publication/602/01/synbioreportweb.pdf [01.08.2012].

European Commission (2005): *Synthetic Biology. Applying Engineering to Biology. Report of a NEST High-Level Expert Group*. Luxembourg.

Forster, A. C./Church, G. M. (2006): Towards synthesis of a minimal cell. In: *Mol Syst Biol*, Online-Publikation 22.08.2006. DOI: 10.1038/msb4100090.

Gibson, D. G. et al. (2010): Creation of a Bacterial Cell Controlled by a Chemically Synthesized Genome. In: *Science* 329(5987):52–56.

Hacker, J. et al. (2009): Biomedizinische Eingriffe am Menschen. Ein Stufenmodell zur ethischen Bewertung von Gen- und Zelltherapie. Berlin/New York.

Health Council of Netherlands (2008): Synthetic biology: creating opportunities. The Hague.

International Risk Governance Council (2008): Synthetic Biology. Risks and opportunities of an emerging field. Geneva.

Knight, T. F. (2005): Engineering novel life. In: *Mol Syst Biol*, Online-Publikation 13.09.2005. DOI: 10.1038/msb4100028.

Knorr-Cetina, K. (2002): Die Fabrikation von Erkenntnis. Zur Anthropologie der Naturwissenschaft. Frankfurt a. M.

Pauly, P. J. (1987): Controlling life. Jacques Loeb and the engineering ideal in biology. New York [u. a.].

Pühler, A. (2011): Einblicke in die Synthetische Biologie. In: Pühler, A. et al. (Hrsg.): *Synthetische Biologie. Geburt einer neuen Technikwissenschaft*. Heidelberg:11–18.

Rathenau Instituut (2006): Constructing Life. Early social reflections on the emerging field of synthetic biology. The Hague.

Rathenau Instituut (2007): Constructing Life. The World of Synthetic Biology. The Hague.

Rheinberger, H. J. (2001): Experimentalsysteme und epistemische Dinge. Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas. Göttingen.

Roco, M. C./Bainbridge, W. S. (eds.) (2003): *Converging Technologies for improving Human Performance*. Nanotechnology, Biotechnology, Informative Technology and Cognitive Science. Dordrecht [u. a.].

Royal Academy of Engineering (2009): Synthetic Biology: scope, applications and implications. London.

Serrano, L. (2007): Synthetic biology. Promises and challenges. In: *Mol Syst Biol* 3(158):1–5.

Sueddeutsche.de: Der Extrem-Genetiker. 21.05.2010. Unter: www.sueddeutsche.de/wissen/craig-venter-der-extrem-genetiker-1.945655 [01.08.2012].

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

What's in a name? (2009): What's in a name? In: *Nat Biotechnol* 27(12):1071–1073.

Witt, E. (2012): Konzepte und Konstruktionen des Lebenden. Philosophische und biologische Aspekte einer künstlichen Herstellung von Mikroorganismen. Freiburg/München.

Wobus, A. et al. (2006): Stammzellforschung und Zelltherapie. Stand des Wissens und der Rahmenbedingungen in Deutschland. Supplement zum Gentechnologiebericht. München.

Julia Diekämper, Anja Hümpel

2. Synthetische Biologie in Deutschland. Eine methodische Einführung

2.1 Indikatorenzentrierte Problemfeldanalyse

Die Gentechnologien stellen in ihrer fachlichen Breite und rasanten Entwicklung ein nur schwer zu überblickendes Element der modernen Biowissenschaften dar. Sie berühren die unterschiedlichsten Lebensbereiche; mit ihnen kann unmittelbar in die Erbsubstanz eingegriffen werden – in die der Natur und in unsere eigene. Während einige ihrer Anwendungen, zum Beispiel in der Biomedizin, weithin Akzeptanz in Deutschland finden, sind andere Forschungsansätze, wie gentechnisch verändertes Saatgut oder Gentests, teilweise heftig umstritten. Kritische und befürwortende Stimmen debattieren hier über Fortschritt und wissenschaftliche Risiken, über die „Unantastbarkeit“ von Leben, über wirtschaftliche Vorteile und gesellschaftliche Nachteile. Hier sieht die interdisziplinäre Arbeitsgruppe „Gentechnologiebericht“ ihren Arbeitsauftrag: Sie berichtet unabhängig und unvoreingenommen über die aktuellen Entwicklungen der Gentechnologie und methodisch verknüpfter Nachbardisziplinen in Deutschland. Ziel ist der interessierten Öffentlichkeit mit einem sozialwissenschaftlich motivierten Langzeit-Monitoring Orientierung für einen ergebnisoffenen Diskurs anzubieten. Für das Thema der Synthetischen Biologie wird dies in diesem Band erstmalig getan.

Als Grundlage eines solchen Verfahrens dienen sogenannte Problemfelder, mittels derer die schwer zu fassenden Themen- und Anwendungsfelder der Gentechnologien strukturiert aufgeschlüsselt und so Aussagen über ihre Bedeutung in Deutschland pointiert werden können. Bei Problemfeldern handelt es sich genauer um jene thematisch zugespitzten Teilbereiche der Gentechnologie – hier die der Synthetischen Biologie – die öffentlich virulent diskutiert und breitenwirksam wahrgenommen werden. Für die Synthetische Biologie stellt ein solches beispielsweise der *ethische Umgang mit dem Leben* dar oder *Identität und Ethos der Forschung*. Es geht also in dem gewählten Verfahren darum, diejenigen Themen zu destillieren, die öffentlich breitenwirksam diskutiert werden. In einem schwachen Sinn lässt sich konstatieren, dass sich

die ausgewählten Problemfelder auf Grundlage der öffentlichen Wahrnehmung ergeben. Schwach deshalb, weil natürlich nicht alle möglichen Quellen Eingang finden können. Stattdessen bilden repräsentative Quellen den Fundus, mithilfe dessen die gegenwärtige öffentliche Abbildung und Diskussion der Synthetischen Biologie in Deutschland erfasst wird.

2.2 Aktuelle Problemfelder der Synthetischen Biologie in Deutschland und Indikatoren für ihre Beschreibung

Der zugrunde gelegte Korpus zur Abbildung der öffentlichen Diskussion besteht aus drei unterschiedlichen Quellen: aus printmedialen Beiträgen (Tabelle 1), aus einer thematisch zentrierten Internetrecherche (Tabelle 2) und aus einschlägigen Stellungnahmen zum Thema Synthetische Biologie (Tabelle 3). Während printmediale Beiträge in Tabelle 1 eine „allgemein interessierte“ Öffentlichkeit erreichen, repräsentieren die Materialien aus Tabelle 2 diejenigen, die ein spezielleres Interesse an dem spezifischen Thema haben und im Internet gezielt Informationen suchen. In Tabelle 3 schließlich sind die Texte aufgeführt, die einer spezifischen Suche nach Synthetischer Biologie in ihrer Verbindung zu öffentlich agierenden Einrichtungen entspringen und einen programmatischen Charakter haben. Die Heterogenität zwischen den unterschiedlichen Quellen ermöglicht ein detailliertes Bild derjenigen Themen, die anlässlich der Synthetischen Biologie diskutiert werden. In einem inhaltsanalytischen Verfahren werden in den untersuchten Texten verhandelte Aspekte in die erwähnten Problemfelder überführt. Mit dem Begriff Problemfeld sind in diesem Verfahren damit also jene Motive gemeint, die in den Beiträgen (in unterschiedlicher Intensität und Quantität) sichtbar werden.

Tabelle 1: Printmediale Recherche zum Stichwort „Synthetische Biologie“ (Korpus A)

Quelle	Datum	Artikel
SZ	10.03.2010	Nachhilfe fürs Grünzeug
F.A.Z.	12.03.2010	Lebensfrage
Die Zeit	31.03.2010	„Eine fremde Intelligenz“
F.A.Z.	01.04.2010	Akademieumzug
SZ	01.04.2010	Halle statt London

Quelle	Datum	Artikel
SZ	29.04.2010	Henning Kagermann Ex-Vorstandschef von SAP und Mann fürs Elektroauto
SZ	08.05.2010	Gene vom Fließband
SZ	17.05.2010	Einmal nach Maß, bitte
F.A.Z.	21.05.2010	Die Angst vor dem Amoklauf der Mikroben
F.A.Z.	21.05.2010	Vier Flaschen für ein Heureka
SZ	21.05.2010	Träume vom Reißbrett
SZ	21.05.2010	Ein Hai brachte die Wende
SZ	21.05.2010	Wenn ein Schöpfer experimentiert
F.A.Z.	22.05.2010	Ist das künstliches Leben?
F.A.Z.	23.05.2010	Biologie ist keine Hexerei
F.A.Z.	25.05.2010	Wir wollen die Grippe beherrschen
Die Zeit	26.05.2010	Zu welchem Zweck?
F.A.Z.	26.05.2010	Wenn es kein Leben ist, was ist es dann?
Die Zeit	27.05.2010	Ein Schöpfungsakt
Die Zeit	29.05.2010	Die Bio-Elite spielt mit Lego
Die Zeit	29.05.2010	Erbgut auf Bestellung
Die Zeit	05.06.2010	Leben 2.0
Die Zeit	08.09.2010	Und bald ist einfach alles bio
SZ	20.09.2010	Das 1000-Dollar-Genom
F.A.Z.	29.09.2010	Leben vom Reißbrett: Mit Rhythmus, Licht und Medikamentenspender
F.A.Z.	29.09.2010	Barbara-Hobom-Preis für schwedische Biologin
Die Zeit	05.11.2010	Leben vom Reißbrett
SZ	17.11.2010	Baumeister-Bakterie
F.A.Z.	23.11.2010	Ohne Bewusstsein geht es eigentlich auch ganz gut
SZ	11.12.2010	Kontrollierte Entschleunigung
F.A.Z.	15.12.2010	Ich lehre euch das Übertier
SZ	18.12.2010	Bastelt weiter
F.A.Z.	26.12.2010	Kraken vor dem Flachbildschirm

Quelle	Datum	Artikel
F.A.Z.	05.01.2011	Auch kein Hort des Widerstands
SZ	16.01.2011	Zur Beratung verpflichtet
SZ	22.01.2011	Mehr als harte Fakten

Quelle: Recherche für Zeitraum 01.03.2010 – 28.02.2011 zum Suchbegriff „Synthetische Biologie“ in den Online-Archiven von „F.A.Z.“ unter www.faz.net/archiv [01.03.2011], „SZ“ unter www.sueddeutsche.de [01.03.2011], „Die Zeit“ unter www.zeit.de [01.03.2011] und „Der Spiegel“ unter www.spiegel.de [01.03.2011], 36 Artikel.

Tabelle 2: Internetrecherche zum Stichwort „Synthetische Biologie“ (Korpus B)

Webseite	Jahr	Suchergebnis
Wikipedia	2011	Artikel: Synthetische Biologie
Spiegel Online	2010	Artikel: Leben aus dem Lego-Baukasten
DFG, acatech, Leopoldina	2009	Publikation: Synthetische Biologie. Stellungnahme
Deutscher Bundestag. Wissenschaftliche Dienste	k. A.	Artikel: Synthetische Biologie
Der Tagesspiegel	2011	Artikel: Spiel mit Genen und Genesis
F.A.Z.	2010	Artikel: Die Angst vor dem Amok der Mikroben
Spiegel Online	2008	Artikel: Frankensteins Zeit ist gekommen
www.biologie-lk.de (Schüler-Internetforum für das Fach Biologie)	2010	Forumsbeitrag: Informationssuche zum Studium der Synthetischen Biologie in Deutschland
www.bioss-uni-freiburg.de (Zentrum für biologische Signalstudien BIOSS der Universität Freiburg)	k. A.	Artikel: Synthetische Biologie
Deutscher Ethikrat	2009	Artikel: Perspektivenpapier Synthetische Biologie

Quelle: Recherche unter www.google.de [01.03.2011], erste zehn Suchergebnisse.

Tabelle 3: Recherche von programmatischen Texten zum Stichwort „Synthetische Biologie“ (Korpus C)

Quelle	Jahr	Dokument
Eidgenössische Ethikkommission für die Biotechnologie im Ausserhumanbereich	2008	Synthetische Biologie. Organisation und Ziele. Schlussbericht.
Deutscher Ethikrat	2009	Perspektivenpapier Synthetische Biologie
Deutscher Bundestag	2009	Unterrichtung durch den Parlamentarischen Beirat zu Fragen der Ethik insbesondere in den Lebenswissenschaften (Ethikbeirat) BT-Drucksache 16/13780
DFG, acatech, Leopoldina	2009	Synthetische Biologie. Stellungnahme
Eidgenössische Ethikkommission für die Biotechnologie im Ausserhumanbereich	2010	Synthetische Biologie. Ethische Überlegungen
Testbiotech e. V. – Institut für unabhängige Folgenabschätzung in der Biotechnologie	2010	Synthetische Biologie und künstliches Leben. Eine kritische Analyse (Teil 1)

Quelle: Recherche unter www.google.de [01.03.2011], sechs relevante Suchergebnisse.

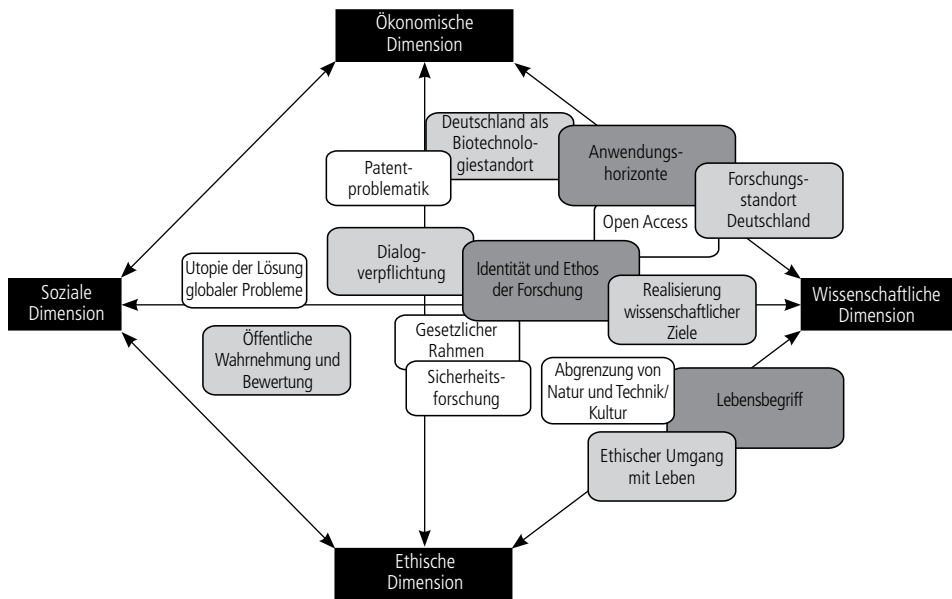
Um die so eruierten Problemfelder näher zu verorten, werden diese für eine Visualisierung in Bezug zu vier sogenannten Leitdimensionen gesetzt, die vergleichbar einem Koordinatensystem einen Orientierungsrahmen schaffen. Diese Leitdimensionen sind: Wissenschaft, Ökonomie, Ethik und Soziales. Sie verdeutlichen, dass technische Neuerungen stets in vielseitigen Wechselwirkungen stehen. Wesentlicher Motor für technische Entwicklungen ist wissenschaftliches Erkenntnisstreben; die Wissenschaft ist hierbei jedoch eben nicht nur Triebkraft technischer Innovationen, sondern auch immer der Anstoß von sozialen oder ökonomischen Aushandlungsprozessen. Als vierte Leitdimension gilt Ethik, um zu unterstreichen, dass jede Art von Bewertung auf divergierenden Grundüberzeugungen und Wertorientierungen fußt, entsprechend derer einzelne Aspekte als folgenschwer oder unproblematisch erscheinen.

Die Anordnung der Problemfelder in diesem System verdeutlicht, zu welcher der unterschiedlichen Dimensionen sie primär gehören. Dass eine solche Zuordnung nicht immer eindeutig sein kann, ergibt sich aus der Multiperspektivität der Themen. Diese wird auch in den Überschneidungen der unten stehenden Grafik (Abbildung 1) sichtbar. Zudem macht die Visualisierung transparent, dass die einzelnen Problemfelder sowohl inhaltliche Verbindungen zu übergeordneten Sachgebieten haben, als auch untereinander Querbezüge und Schnittmengen aufweisen. Zweitens ermöglicht dieser Schritt, die zunächst aus der allgemeinen öffentlichen

Diskussion abgeleiteten Problemfelder auf Vollständigkeit zu überprüfen und so eine übergeordnete, gesamtgesellschaftliche Sicht auf die Entwicklungen innerhalb der jeweiligen Themengebiete zu erfassen. Insofern korreliert die Positionierung der Problemfelder innerhalb der Leitdimensionen nicht zwangsweise mit jeweils fachwissenschaftlichen Perspektiven.

Nicht alle Problemfelder tauchen in den ausgewählten Materialien mit gleicher Intensität auf. Um eine graduelle Unterscheidung anzudeuten, zeigt die nachstehende Grafik (Abbildung 1) Problemfelder in drei unterschiedlichen Größen. Mit diesen soll ein erster Eindruck gegeben werden, wie intensiv bestimmte Themen in der öffentlichen Wahrnehmung verhandelt werden.

Abbildung 1: Aktuelle Problemfelder der Synthetischen Biologie in Deutschland



Quelle: eigene Darstellung.

Die graphische Darstellung für die gegenwärtige öffentliche Wahrnehmung der Synthetischen Biologie in Deutschland zeigt eine Häufung von Problemfeldern im Schnittbereich von ökonomischer und wissenschaftlicher Dimension sowie im Schnittbereich von sozialer und wissenschaftlicher Dimension.

Eine solche Konzentration lässt sich in zwei Richtungen lesen: Sie kann zum einem als Ergebnis des methodischen Vorgehens gesehen werden, denn hier werden vorrangig diejenigen Themen verhandelt, die öffentlich und breitenwirksam relevant erscheinen – etwa, was es bedeutet, wenn „Leben“ aus dem Nichts geschaffen wird. Zum anderen lässt sich die Darstellung auch vor dem spezifischen Hintergrund der Synthetischen Biologie interpretieren. Insbesondere weil dem vergleichsweise jungen Forschungsfeld ein hohes wissenschaftliches wie ökonomisches Potenzial zugeschrieben wird, sich dieses aber bislang auch der öffentlichen Wahrnehmung zufolge eher im spekulativen Raum bewegt, ist eine solche Ballung von Problemfeldern in den jeweiligen Quadranten deutbar.

Die hier verwandten Problemfelder müssen in einem nächsten Schritt operationalisiert werden. Schließlich geht es darum, messbare und vergleichbare Aussagen über die Synthetische Biologie zu gewinnen. Dies geschieht, indem für die Problemfelder adäquate Indikatoren angegeben werden (vgl. hierzu Häder, 2010:52). Indikatoren sind „statistische Maßzahlen, die eine quantitative Abbildung gesellschaftlich bzw. gesellschaftspolitisch relevanter Sachverhalte darstellen“ (Schäfers, 2001:133); sie beschreiben zudem einen „direkt beobachtbaren Sachverhalt, der durch Korrespondenzregeln mit dem nicht direkt beobachtbaren Sachverhalt verknüpft wird“ (Kromrey, 2002:170). Für unseren Zusammenhang heißt das, dass den Problemfeldern jeweils Indikatoren zugeordnet werden. Durch diese werden die Problemfelder konkret beschreibbar. Für die Synthetische Biologie bedeutet dies beispielsweise: Aufgrund des beschriebenen Materials, ergibt sich das Problemfeld *Forschungsstandort Deutschland*. Eine solche Kategorie lässt sich beispielsweise partiell beschreiben über die aktuelle Forschungsförderung für diese Disziplin in Deutschland. Hier können diejenigen Projekte, die das Bundesministerium für Bildung und Forschung finanziert, als auch diejenigen durch die Europäischen Rahmenprogramme finanzierten Forschungen mit deutscher Beteiligung herangezogen werden. Bei dieser Art der Operationalisierung werden also zunächst komplexe Sachverhalte zerlegt und damit überhaupt erst messbar gemacht. Das heißt, das breit ausgestellte Problemfeld wird in diesem Schritt untergliedert und präzisiert. Das Ergebnis ist – im Idealfall – eine Mehrzahl an belastbaren Indikatoren, die ein Problemfeld quantitativ von mehreren Seiten ausleuchten und

über die Jahre fortschreibbar sind, um langfristige Entwicklungen abzubilden. Die Entscheidung für die spezifischen Indikatoren fällt jeweils auf Basis von Verlässlichkeit, Vergleichbarkeit und Beschaffenheit (ebd.; vgl. auch Hucho et al., 2005:19f.).

Nicht jedem Problemfeld lassen sich aber automatisch auch Indikatoren zuordnen. Im Kontext der Synthetischen Biologie wird beispielsweise innerhalb des Korpus immer wieder über den *ethischen Umgang mit dem Leben* verhandelt. Doch eine vergleichbare Art ihn darzustellen, wie etwa beim *Forschungsstandort Deutschland* gibt es hier nicht. Die so entstehende Diskrepanz zwischen den Problemfeldern fangen wir durch entsprechende qualitative Beschreibungen im Themenband auf.

Für die qualitative Erschließung der Synthetischen Biologie wurden schwerpunktmäßig die folgenden Problemfelder aufgegriffen und in den aufgeführten Textbeiträgen behandelt:

- ▶ Identität und Ethos der Forschung (siehe Beitrag von Köchy, Kapitel 1 sowie von Fangerau, Kapitel 3)
- ▶ Anwendungshorizonte (siehe Beitrag von Budisa, Kapitel 4 sowie von Hotz/Weber, Kapitel 5)
- ▶ Abgrenzung von Natur und Technik/Kultur (siehe Beitrag von Köchy, Kapitel 6)
- ▶ Lebensbegriff/ethischer Umgang mit Leben sowie Gesetzlicher Rahmen/Sicherheitsforschung (siehe Beitrag von Achatz et al., Kapitel 7 sowie von Haker, Kapitel 8)
- ▶ öffentliche Wahrnehmung und Bewertung (siehe Beitrag von Diekämper, Kapitel 9 und von Hampel, Kapitel 10)

Die textlichen Ausführungen werden mit quantitativen Aussagen ergänzt. Relevante Daten zum Stand der Forschung im Bereich der Synthetischen Biologie werden in oben beschriebener Form verwertet und in Form von Indikatoren zur konkreten Ausleuchtung einzelner Problemfelder herangezogen. Die aufbereiteten Indikatoren sind standardisierten Datenblättern vorgestellt (siehe Beitrag von Hümpel/Diekämper, Kapitel 11):

- ▶ Forschungsstandort Deutschland
- ▶ Realisierung wissenschaftlicher Ziele
- ▶ öffentliche Wahrnehmung und Bewertung
- ▶ gesetzlicher Rahmen
- ▶ ethischer Umgang mit Leben

- ▶ Lebensbegriff
- ▶ Abgrenzung von Natur und Technik/Kultur
- ▶ Dialogverpflichtung

Allgemein ist bei der Arbeit mit Indikatoren zu bedenken, dass sie das Risiko bergen, dass „bei Veränderung ihrer Auswahl oder ihrer Gewichtung innerhalb einer ganzen Sammlung an verschiedenen Einzel-Indikatoren eine empirische Merkmalsausprägung für ein Beobachtungselement attestiert werden kann oder nicht“ (ebd.:309). Indikatoren sind also nicht per se in der Lage, ein theoretisches Konzept vollständig abzubilden oder erschöpfend zu erklären. Dies jedoch ist auch nicht Ziel des vorgestellten Verfahrens: Anstatt aus den unterschiedlichen Elementen ein Konzept zu entwickeln, geht es vielmehr darum, die Vielschichtigkeit des Themas Synthetische Biologie darzustellen.

Das für die Indikatoren zugrunde gelegte Zahlenmaterial beziehen wir mehrheitlich aus allgemein zugänglichen Datenbanken, wie sie auch der Öffentlichkeit für die Informationssuche zur Verfügung stehen. Das stellt methodisch deshalb eine Einschränkung dar, weil die dort zugänglichen Messungen unter Umständen nicht den von uns fokussierten Zeitraum abbilden oder sich nicht ausschließlich auf Deutschland beziehen. Methodisch verlangt dies, ein solches Vorgehen auszuweisen und die unterschiedlichen Zeiträume in einen Zusammenhang zu stellen. Da also primär auf extern erhobene und aufbereitete Daten zurückgegriffen wird, kann entsprechend kein Einfluss auf deren Kategorisierung oder auf Modus und Intervall ihrer Erhebung genommen werden.

Die Problemfelder und die ihnen zugeordneten Indikatoren ermöglichen nichtsdestotrotz durch ihren vielschichtigen Ansatzpunkt und ihre stetige Reflexion grundsätzlich eine systematische Aufschlüsselung der komplexen Aspekte der Synthetischen Biologie in Deutschland. Dies geschieht mit dem Ziel, systematisch „zu den Entwicklungen in der Gentechnologie und zu deren Implikationen in wissenschaftlicher, ökonomischer, ökologischer, ethischer, politischer und gesellschaftlicher Hinsicht Stellung zu nehmen“ (Hucho et al., 2005:17). Ein indikatorenbasiertes Verfahren, wie es hier vorgestellt wurde, ermöglicht eine Früherkennung ebenso wie eine kontinuierliche Beobachtung zeitlicher Entwicklungen. Die Erarbeitung, Verortung und Bewertung von Indikatoren unterliegt dabei stets einer Interpretationsleistung, das heißt Indikatoren sind als solche ihrerseits theoretische Konstrukte, mit denen versucht wird, komplexe Phänomene objektivierbar zu machen. Sie können dennoch als Grundlage für die Bewertung

der verhandelten Phänomene angesehen werden, da sie mehr als eine subjektive (individuelle) Wahrnehmung sind (Meyer, 2004:2).

2.3 Literatur

Häder, M. (2010): Empirische Sozialforschung. Eine Einführung. 2., rev. Aufl. Wiesbaden.

Hucho, F. et. al (2005): Gentechnologiebericht. Analyse einer Hochtechnologie. München.

Kromrey, H. (2002): Strategien der Operationalisierung und Indikatorenauswahl. In: ders.: Empirische Sozialforschung. 11. Aufl. Stuttgart:175ff.

Meyer, W. (2004): Indikatorenentwicklung. Eine praxisorientierte Einführung. Saarbrücken.

Schäfers, B. (Hrsg.) (2001): Grundbegriffe der Soziologie. Opladen.

Heiner Fangerau

3. Zur Geschichte der Synthetischen Biologie

Als Craig Venter im Jahr 2010 verkündete, er habe ein synthetisches Genom in eine DNA-freie bakterielle Hülle transferiert, um so ein zur Replikation fähiges Bakterium zu erstellen, entzündete sich in der Tagespresse eine Debatte darum, ob es Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern nun endgültig gelungen sei, Leben im Labor artifiziell zu erzeugen oder ob es sich bei Venters Versuchen eventuell gar nicht um eine wirkliche Schöpfung im Sinne eines künstlich hergestellten Lebewesens handle (z. B. F.A.Z., 2010; FR 2010; SZ, 2010). Auch in der Fachwelt wurde diese Frage diskutiert (vgl. hierzu auch Kapitel 4 in diesem Band) und Venters synthetische Leistung mit der grundsätzlichen Frage verknüpft, was „Leben“ denn überhaupt sei. Unter der Titelzeile „Life after the synthetic cell“ fragte beispielsweise die Zeitschrift „Nature“ acht Sachverständige im Feld der Synthetischen Biologie aus verschiedenen Disziplinen nach den wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Implikationen von Venters Experiment. Die meisten der Befragten waren sich einig, dass die synthetische Zelle aus Venters Labor kein „neues Leben“ darstelle, sondern dass es sich vielmehr um ein „semi-synthetisches“ Bakterium handle und somit keineswegs eine physiko-chemische Urzeugung und Ergründung des Lebendigen gelungen sei. So empfahl der Professor für Biomedical Engineering Jim Collins beschwichtigend denjenigen, die um eine Erschütterung ihres Verständnisses der Schöpfung fürchteten, sie sollten sich entspannen, „scientists do not know enough about biology to create life“. Gleichwohl sei Venters Forschung wegweisend, weil sie den Tag näher bringe, an dem Lebensformen nur aus Materie geschaffen werden könnten und somit William Harveys (1578–1657) dictum „omne vivum ex ovo“ vielleicht nicht mehr gelte. Venters Versuch bahne auf der einen Seite den Weg zu nützlichen Biotechniken, die auf der anderen Seite mit der Gefahr ihres Missbrauchs zu bioterroristischen Zwecken einhergingen. Allein der Bioethiker Arthur Caplan ging über diese vorsichtige Sichtweise hinaus und stellte fest, dass Venters Forschung zu den „wichtigsten wissenschaftlichen Errungenschaften in der Geschichte der Menschheit“ gehöre, weil sie „jeder Form von Vitalismus“ eine Absage erteile (Bedau et al., 2010).

Das hier eröffnete Panorama fasst die Eckpfeiler dessen, was gemeinhin unter Synthetischer Biologie verstanden wird, in wunderbarer Weise zusammen, breitet es doch das ganze Feld zwischen der Frage nach dem Leben, der Urzeugung, den Möglichkeiten des technischen Einsatzes der Biologie und den damit verbundenen Sorgen vor einer neuen, unbeherrschbaren Technik mit ihren Chancen und Risiken aus. Gleichzeitig stellt sich mit den in diesen Stellungnahmen eingebrachten Bezügen auf die Wissenschaftsgeschichte allgemein oder William Harvey im Besonderen die Frage nach den Vorläufern und Traditionen dieser Synthetischen Biologie sowie den Kontinuitäten und Neuerungen in ihrem Denken und im gesellschaftlichen Umgang mit ihren Zielen. Während beispielsweise „Synthetische Biologinnen und Biologen“ oder ihnen nahe stehende Forschende auch im Sinne einer Selbstkonstitution ihrer Disziplin ihre Ansätze mit denen von Friedrich Wöhler (1800–1882) und seiner Synthetischen Chemie analogisieren und sie als wissenschaftliche Revolution im Umgang mit dem Lebendigen beschreiben (Yeh/Lim, 2007:504),¹ betrachten Andere eher die Entwicklung der Synthetischen Biologie aus der Molekularbiologie und Gentechnologie heraus (Morange, 2009)² oder sie stellen sie in den größeren Zusammenhang der langen Tradition menschlicher Versuche, Leben im Labor zu erschaffen vom Golem über Paracelsus' Homunculus bis hin zu den Urzeugungsversuchen des frühen 20. Jahrhunderts (Ball, 2011; Schummer, 2009).

An die Frage, ob es sich bei der heutigen Forschung also tatsächlich um einen Bruch mit Bestehendem, etwa einen wissenschaftlichen Paradigmenwechsel, handelt (vgl. hierzu u. a. Potthast, 2009)³ oder ob sich die Synthetische Biologie in eine nicht erst seit dem 19. Jahrhundert prominente Traditionslinie stellen lässt, schließt sich aus historischer Perspektive zusätzlich die hiermit verbundene Problemstellung an, welchen Zweck synthetische Ansätze in der Biologie in den letzten hundert Jahren in Bezug auf experimentelle Ergebnisse und erkenntnistheoretische Zielsetzungen verfolgten. Wandelte sich das Feld zum Beispiel von einem epistemischen

1 Dem Chemiker Friedrich Wöhler war es 1828 gelungen, Harnstoff synthetisch herzustellen. Harnstoff war vorher nur als Produkt lebendiger Organismen bekannt gewesen und insbesondere nach seinem Tod avancierte diese Syntheseleistung zu einem Gründungsmythos der organischen Chemie als Disziplin (Keen, 1976). Vgl. zum synthetischen Ideal der organischen Chemie auch Kapitel 3 und 4 in diesem Band.

2 So schreibt Michael Morange: „By contrast, it is probably more appropriate to consider the rise of systems and synthetic biology as the last step in the project of early molecular biologists to ‘naturalize’ the organic world“ (ebd.:S51).

3 Potthast steht dem Gebrauch des Begriffs Paradigmenwechsel im Zusammenhang mit der Synthetischen Biologie äußerst kritisch gegenüber.

Zugang zur Frage nach der Natur des Lebens zu einem technischen Verfahren zur Gestaltung von Laborlebewesen?

In der aktuellen aufgeregten Diskussion und der zutage tretenden Ratlosigkeit angesichts dessen, worum es bei der Synthetischen Biologie eigentlich geht und welche Möglichkeiten der Nutzbarmachung sich vielleicht einmal aus ihren erhofften Erkenntnissen ergeben, scheint gelegentlich übersehen zu werden, dass die hier ausgetragene inner- und außerwissenschaftliche Diskussion alles andere als neu ist. So tobte um 1900 eine ähnliche Debatte unter den Biologinnen und Biologen um die Möglichkeit der Urzeugung wie 2010, die wie die heutige Synthetische Biologie auch wiederum die breitere Öffentlichkeit oder Literaten inspirierte. Diese Parallele scheint einen diachronen Vergleich zur Beantwortung der aufgeworfenen Fragen zu erlauben und gleichzeitig bisherige historiografische Ansätze, die Synthetische Biologie zu bestimmen, zu ergänzen.⁴ In diesem Beitrag soll folglich zunächst in aller Kürze das Feld der Synthetischen Biologie, wie sie sich heute darstellt, abgesteckt werden, um danach den Vorläufer des heutigen Spektrums, die Synthetische Biologie um 1900 zu beschreiben und zuletzt ihre Rekonfiguration und ihr Wiederaufleben seit den 1970er Jahren in den Blick zu nehmen. Dabei soll das Forschungsfeld der Synthetischen Biologie zum einen in seinen Ursprüngen ideengeschichtlich vertortet und zum anderen in seiner historischen Interpretation und Wirkung für die Epoche um 1900 als Vergleichspunkt für ihre Ausprägung heute dargestellt werden.

3.1 Synthetische Biologie

Schon der Versuch, das Forschungs- und Anwendungsgebiet der Biotechnologie präzise zu definieren, gestaltet sich schwierig, reicht es doch vom technischen Eingriff und der Modifikation der Natur bis hin zur Nutzbarmachung natürlicher Entitäten für technische Zwecke, zum Beispiel im Sinne der Herstellung von Medikamenten mit Hilfe von Mikroorganismen (Bud, 1993). Als Natur wird dabei zumeist alles verstanden, was nicht artifiziell von menschlicher

4 Auch wenn das Buch von Robert Bud „The uses of Life. A History of Biotechnology“ aus dem Jahr 1993 vor der neuen Ära der Synthetischen Biologie erschien, so bietet es eine überzeugende, in die heutige Debatte hineinreichende Einführung in biotechnische Ideen, ihre industrielle Nutzbarmachung und ihre öffentliche Rezeption (Bud, 1993). Historische Überblicke dezidiert zur „Synthetischen Biologie“ finden sich u. a. von Campos (2009) oder im Hinblick auf die Utopie der Erschaffung künstlichen menschlichen Lebens von Schummer (2009) oder Heil (2011). Auf die Parallele der heutigen Synthetischen Biologie mit Versuchen um 1900 haben schon 2007 in einem kurzen Beitrag Peretó und Català (2007) hingewiesen.

Hand in die Welt gestellt wurde. Umso schwerer fällt es, die Disziplin der Synthetischen Biologie zu umreißen, von der nicht einmal klar ist, ob sie klassifikatorisch als Teil der Biotechnologie zu begreifen ist oder eine dieser über- oder nebengeordnete Kategorie darstellt (vgl. auch die einleitenden Ausführungen in Kapitel 1 in diesem Band). Das derzeit gängigste breite Verständnis der Synthetischen Biologie geht davon aus, dass diese einen Sonderbereich an Biotechniken umfasst, die programmatisch darauf abzielen, lebendige biologische Systeme de novo zu erzeugen oder bereits existierende Entitäten technisch zu modifizieren. Es lassen sich im Wesentlichen drei Zugänge zu dieser Zielsetzung differenzieren: 1. die DNA-basierte Herstellung von (Zell- oder Gen-) Bausteinen, 2. das Genom orientierte „cell engineering“ und 3. die Schaffung von Protozellen (O'Malley et al., 2008).

Der Versuch, Leben planvoll zu konstruieren, stellt das übergeordnete Prinzip aller synthetisch-biologischen Vorhaben dar. Dabei versuchen die Synthetischen Biologinnen und Biologen ihre Arbeit von gentechnischen Verfahren abzugrenzen, indem sie zum einen auf methodischer Ebene betonen, dass ihr Zugang einem den Ingenieurwissenschaften nachempfundenen formalisierten Design-Prozess folge, und zum anderen darauf hinweisen, dass ihr Zielpunkt nicht in einzelnen Genveränderungen liege, sondern vielmehr in der planvollen Gestaltung ganzer Lebenssysteme und -einheiten. Beobachter der Szene sprechen in diesem Zusammenhang vom „engineer's approach to biology“ (Breithaupt, 2006), eine Interpretation, die unmittelbar den Blick in die Geschichte der Synthetischen Biologie eröffnet, denn Ingenieurkunst und Technik bildeten zusammen mit der Fokussierung auf die Naturwissenschaften schon einmal gegen Ende des 19. Jahrhunderts das Zentrum medizinischer und biologischer Überlegungen.

3.2 Technikeuphorie

Um 1900 bestimmten in den Gesellschaften Europas und der USA Fortschrittsgläubigkeit und Technikeuphorie die Debatten um die Gestaltung der (Um-)Welt. So stand die Pariser Weltausstellung von 1900, die eine Bilanz dessen bieten sollte, was die „menschliche Kultur“ im abgelaufenen Jahrhundert „ersonnen und geschaffen“ hatte, ganz unter dem Eindruck der Technik (Haek, 1900:26). Die Besucherinnen und Besucher sollten hier schon in der architektonischen

Gestaltung der Ausstellung „lebendige Zeichen der weltumspannenden Ingenieurkunst und Technik“ erleben (Jaffé, 1900:66), man wollte „absolut modern sein“ (Neyer, 1986). Dieser Geist, der alle Bereiche der Gesellschaft betraf (vgl. Radkau, 1994),⁵ führte zu einer wachsenden „Selbststilisierung des Technikers als Mann der Praxis, als umfassender Gestalter und Schöpfer der Technik, des Fortschritts und damit der Kultur“ (Dienel, 1998:12).

Auch die Medizin und die Biologie wurden von diesem Bann der Technik ergriffen und ihre Vertreter hatten sich dem Technikideal zugewandt. Bernd Weiler zitiert in seiner Analyse des Aufstiegs und Falls der Fortschrittsidee aus einem „Glaubensbekenntniß eines modernen Naturforschers“ aus dem Jahre 1872 (verfasst von Friedrich von Hellwald):

„Die Naturforschung in Verbindung mit ihren zwei Sprößlingen Technik und Medicin schreitet unaufhaltsam vorwärts. Sie hat schon jetzt alle besseren Köpfe in Besitz genommen und hat nur Träumer oder Schurken gegen sich. Sie ist in alle Gebiete eingedrungen; sie gestaltet alle andern Wissenschaften um, sie beherrscht unser ganzes Familien- und Staatsleben.“ (Weiler, 2006:26)

Werner von Siemens (1816–1892) hatte 1886 beispielsweise als erster Ingenieur vor der „Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte“ sprechen dürfen. Er nutzte diese Gelegenheit, um die besondere Bedeutung der Ingenieure und Techniker gerade auch für den medizinischen Fortschritt zu betonen (vom Bruch, 2005:14). Parallel dazu konnte der Biologe Wilhelm Roux (1850–1924) auf dem 50-jährigen Stiftungsfest des Thüringer Bezirksvereins des Vereins Deutscher Ingenieure 1911 auf die Gemeinsamkeiten von physiologischen und biologischen Organbeschreibungen mit technischen Erfindungen hinweisen, wie sie sich zum Beispiel in der Analogisierung vom Gefäßsystem und Rohrleitungen oder dem Herz und Pumpen finden ließen. So wie die Biologen viele Erkenntnisse auf Basis und durch das Studium technischer Entwicklungen errungen hätten, so empfahl er den Ingenieuren das Studium der organischen Selbstregulation, um wiederum für die Ingenieurwissenschaften nützliche Kenntnisse zu gewinnen. Genau an dieser Schnittstelle der Verbindung von Technik und Biologie, dem technischen Eingriff ins Organische und der Gestaltung des Technischen am Beispiel des Organischen setzten

5 Zu kritischen Positionen vgl. Rohkrämer, 1999.

auch erste Versuche des späten 19. Jahrhunderts ein, zu einer synthetischen oder technischen Biologie zu gelangen.

3.2.1 Technische Kontrolle des Lebendigen

In Anlehnung an die frühen entwicklungsmechanischen Versuche von Wilhelm Roux war es vor allem der Deutsch-Amerikanische Physiologe Jacques Loeb (1859–1924), der sich darum bemühte, über eine Technik des Lebendigen Kontrolle über physiologische Prozesse zu gewinnen (vgl. Pauly, 1987; Fangerau, 2010). Er hoffte, über die technische Kontrolle von Lebensprozessen grundsätzliche Kenntnisse über die Physiologie zu erlangen. Ganz in Übereinstimmung mit der Technikeuphorie vieler seiner Zeitgenossen schrieb er 1890 von einem Forschungsaufenthalt an der Meeresbiologischen Forschungsstation in Neapel an den von ihm bewunderten Physiker und Philosophen Ernst Mach (1838–1916) über seine Forschungsziele und erkenntnistheoretischen Ideale: „Der Gedanke der mir vorschwebt ist der, dass der Mensch selbst als Schöpfer auch in die belebte Natur eingreifen kann, um sie eventuell nach seinem Willen zu formen. Man würde so wenigstens zu einer Technik der lebenden Wesen gelangen können.“⁶ Kritikern, die solche Eingriffe aufgrund romantischer naturphilosophischer Überlegungen zum Status der Natürlichkeit als normbildende Kraft ablehnten, hielt er im selben Schreiben entgegen: „Die Biologen bezeichnen das als Erzeugung von Monstrositäten; Eisenbahnen + Telegraph + die übrigen Errungenschaften der Technik der unbelebten Natur sind dann auch Monstrositäten, jedenfalls sind sie von der Natur nicht geschaffen, der Mensch hat sie nicht vorgefunden.“ Zu dieser Zeit forschte Loeb zu Regenerationsvorgängen an Polypen, die er willentlich und gezielt zu beeinflussen versuchte. So gelang es ihm etwa, Köpfe an der Stelle von Stämmen und Stämme an der Stelle von Köpfen entstehen zu lassen – Arbeiten, die er kurze Zeit später unter der Bezeichnung „Heteromorphose“ publizierte (Loeb, 1891).

Nach ersten Untersuchungen zur Sinnesphysiologie hatte Loeb sich bis dahin dem Studium der reizbedingten Orientierung niederer Tiere, den sogenannten Tropismen zugewandt, die er rein chemisch verstanden wissen wollte. Im Jahr 1891 emigrierte er in die USA. Hier forschte und lehrte er zunächst in Chicago und konnte seine schon in Neapel begonnenen Experimente zu Zellteilung, Wachstum und Regeneration fortsetzen, wobei er versuchte, ein Forschungsfeld zu definieren, das er als „Physiologische Morphologie“ bezeichnete. Die Aufgabe dieser For-

6 Brief von Jacques Loeb an Ernst Mach vom 26.02.1890, Deutsches Museum Archiv München.

sung sah er darin, die Naturgesetze der organischen Selbstorganisation aus der chemischen Aktivität der Zelle abzuleiten (Loeb, 1894; auch 1912). Zum Beispiel versuchte er, die Verbindung von chemischen Prozessen und Organbildung mit Hilfe der Analyse osmotischer Druckveränderungen nachzuweisen. In der Zieldefinition der „Physiologischen Morphologie“ aber ging Loeb in Übereinstimmung mit seinem technischen Ideal noch weiter, indem er ihren Aufgabenbereich über den Status des rein Analytischen herauszuheben versuchte und ihr eine technisch-planvolle, synthetisch-konstruktive Stoßrichtung gab. Hierzu bemerkte er in einem seiner ersten Vorträge vor amerikanischen Biologen und Physiologen in den Meeresbiologischen Laboratorien von Woods Hole:

„But the aim of Physiological Morphology is not solely analytical. It has another and higher aim, which is synthetical or constructive, that is, to form new combinations from the elements of living nature, just as the physicist and chemist form new combinations from the elements of non-living nature.“ (Loeb, 1894:61)

Kurz danach schrieb er 1894 einen weiteren Brief an Ernst Mach, in dem er dieses Ziel in plastischer Weise radikalisierte und die Schaffung von Leben als ultimatives Erkenntnisideal und synthetisches Ideal gleichermaßen formulierte. Als Antwort auf einen ihm zugesandten Vortrag Machs, in dem dieser die vergleichende Methode in der Zoologie und Physiologie gelobt und als Vorbild für „das Prinzip der Vergleichung in der Physik“ herangezogen hatte (Mach, 1903), schrieb Loeb:

„In Bezug auf die vergleichende Morphologie scheint es mir dass Sie eine ideale Wissenschaft derer Art vor Augen haben von der aber die halbe thatsächlich existirende Disziplin dieses Namens durch eine hohe Mauer von Aberglauben und Unwissenheit getrennt ist. Die Biologie wird überhaupt erst nach dem Gelingen der Urzeugung anfangen eine Wissenschaft zu werden. Ein Stadium der synthetischen Morphologie ähnlich der synthetischen Chemie wird der wirklich wissenschaftlichen Morphologie vorausgehen müssen.“ (Brief Jacques Loeb an Ernst Mach vom 02.11.1894, Deutsches Museum Archiv München)

An die Stelle der Evolutionstheorie und der Phylogenie hoffte Loeb eine „synthetische Physiologie“ setzen zu können.⁷ Die hier von ihm bemühte Bezugnahme auf die Synthetische Chemie sollte in den nächsten 120 Jahren zum Leitmotiv synthetischer biologischer Ansätze werden (vgl. für aktuelle chemische Ansätze in der Synthetischen Biologie auch Kapitel 4 in diesem Band).

Etwa zwölf Jahre nach diesem Briefwechsel währte der Biologe Stephane Leduc (1853–1939) die Biologie schon ein gutes Stück weiter auf diesem Weg zu einer synthetischen Disziplin. Auch er bemühte sich – heutigen Autorinnen und Autoren nicht unähnlich – seine Arbeit in eine Tradition der Versuche, organische Materie zu synthetisieren, zu stellen, und zitierte den Holländer Pieter Harting (1812–1885), der bereits 1872 eine Experimentalreihe zur Synthetischen Morphologie über die künstliche Erzeugung organischer Kalkformationen mit einem Verweis auf Wöhlers Harnstoffsynthese aus dem Jahr 1828 eingeleitet hatte (Harting, 1872). Mit seinem Vorwort hatte Harting der Hoffnung Ausdruck verliehen, dass die in den Kinderschuhen steckende Synthetische Morphologie sich in den zukünftigen Jahren so entwickeln werde, wie die Synthetische Chemie in den letzten 44 Jahren. Wieder 44 Jahre später will Leduc mit diesem Verweis rhetorisch einen Referenzpunkt für sein Buch „*Les bases physiques de la vie et la biogenèse*“ schaffen, um so die Fortschrittlichkeit der eigenen Ansätze, synthetisch Leben zu erzeugen, darzustellen.

3.2.2 Urzeugung

In seinem Buch von 1906 wie auch in einem Aufsatz in einem Festband der Biochemischen Zeitschrift für den Physiologen Hartog Jakob Hamburger (1859–1924) von 1908 beschrieb Leduc in einem Kapitel mit dem Titel „*biologie synthétique*“ die Evolution der Biologie als Weg von einer deskriptiven über eine analytische hin zu einer synthetischen Wissenschaft (Leduc, 1906 und 1908). Ähnlich wie Jacques Loeb war auch Stephane Leduc der Meinung, dass Morphogenie (die Synthese lebender Formen und Strukturen) und Physiogenie (die Synthese von Lebensfunktionen) im Gegensatz zur synthetischen organischen Chemie noch nicht weit fort-

7 Nachdem ihm vier Jahre später die künstliche Entwicklungsanregung von Seeigeleiern ohne Spermien gelungen war, ein Vorgehen, das er als künstliche Parthenogenese bezeichnete, schrieb er an seinen Zielen festhaltend euphorisch an Mach: „Es ist am Ende doch noch möglich dass ich meinen Traum eine konstruktive oder technische Biologie an der Stelle einer bloss analytischen zu sehen, noch verwirklicht finde“ (Brief Jacques Loeb an Ernst Mach vom 28.12.1899, Deutsches Museum Archiv München).

geschritten seien. Anders aber als der in diesem Punkt zur Vorsicht neigende Loeb meinte Leduc durch Kristallisationsversuche mit Kalziumchlorid in Lösungen einfachen Lebensformen vergleichbare osmotische Gewächse hervorgebracht zu haben (Keller, 2002:15–49). Loeb, der im selben Band für Hamburger über seine Experimente zur künstlichen Jungferzeugung an Seeigeln berichtete, stand Versuchen zur Urzeugung wie denen Leducs skeptisch gegenüber, sah er doch, dass diesen Imitationen des Lebendigen innere, charakteristische, synthetisch-chemische Prozesse fehlten (Loeb, 1916:39). Gleichwohl blieb auch er dabei, dass die Erzeugung „lebendiger aus toter Materie“ grundsätzlich möglich sein müsste (Loeb, 1916:39) und er lobte den Ansatz „jüngerer Biologen“ gerade hierin „das ideale Problem der Biologie“ zu sehen – wobei der sechs Jahre ältere Leduc hier sicherlich nicht gemeint war (Loeb, 1906:311).

Um das Jahr 1906 herum beschäftigte sich in der Tat noch eine Reihe anderer Forscher mit der Synthetischen Biologie in diesem Sinne. Es erschienen zahlreiche Aufsätze, in denen von der planvollen experimentellen Erzeugung künstlichen Lebens berichtet wurde. Neben Leduc bemühte sich zum Beispiel der Franzose Raphael Dubois (1849–1929) darum, lebende Zellstrukturen zu erzeugen, einen Vorgang, den er „cytogénèse minérale“ nannte (Dubois, 1904:805). Der Ire John Butler-Burke (1871–1946) ging noch konsequenter die Frage der Urzeugung an, indem er 1905 in „Nature“ über die durch Radiumsalz erfolgte Erzeugung von wachsenden, sich teilenden Kulturen in Gelatine berichtet hatte, die er als Radioben bezeichnete (Butler-Burke, 1905). Der Petersburger Martin Kuckuck schließlich veröffentlichte 1907 eine Schrift zur „Lösung des Problems der Urzeugung“, in der er meinte, experimentell bewiesen zu haben, dass Salze radioaktiver Substanzen in der Lage seien, „anorganisch-organische Substanzgemische zu ionisieren, also sie in organisierte Substanz („lebendige“ Eiweißkörper, Protoplasma) überzuführen“ (Kuckuck, 1907:71).

Doch nicht nur Wissenschaftler beschäftigten sich mit dem Problem der synthetischen Urzeugung. Die Debatte um die Urzeugung und auch ihre Verbindung zur Technik reichte bis in die populären Medien und die Literatur. Thomas Mann (1875–1955) beispielsweise widmete ihr zum einen im 1913 begonnenen „Zauberberg“ in den Kontemplationen des Schiffbauingenieurs (!) Hans Castorp mehrere Seiten, zum anderen lässt er im 1910 begonnenen „Felix Krull“ bezeichnenderweise einen Professor Kuckuck während einer Eisenbahnfahrt, dem Inbegriff erfolgreichen Technikeinsatzes, über die Urzeugung räsonieren oder im „Dr. Faustus“ den Vater Adrian Leverkühns chemische Gärten mit unheimlichen künstlichen Pflanzen erzeugen (vgl. hierzu Koopmann, 2003). Wilhelm Roux beklagte im Zusammenhang mit den

genannten Versuchen vor allem die Übertreibungen durch politische und populärwissenschaftliche Zeitschriften. Er konstatierte mehrfach, dass Meldungen über die künstliche Erschaffung von Leben im Labor zwar Erstaunen erregten, aber zumeist auf Überinterpretationen durch die Berichterstatter beruhten. Die Forscher selbst, so Roux, hätten sich vorsichtiger ausgedrückt und die inkorrekten Interpretationen seien die Folge einer Unkenntnis der vollständigen Definition von Leben. Kriterien wie Selbsterhaltungsmechanismen, Selbstteilung, Selbstbewegung und Selbstregulation seien eben bisher nicht vollständig in den Experimenten erreicht worden, auch wenn es nicht prinzipiell unmöglich sei, irgendwann einmal nach methodischen Reihenversuchen Lebewesen künstlich zu erzeugen (Roux, 1906 und 1907).

Nach dem Ersten Weltkrieg lebte die Suche nach der Schaffung von Leben im Labor oder zumindest der technischen Gestaltung von Organismen fort, doch wurden Versuche wie die von Leduc, Kuckuck oder Butler-Burke zur Urzeugung durch Forschungsvorhaben in den Hintergrund gedrängt, die eher auf dem Niveau der Vererbung Lebenserscheinungen technisch kontrollieren und gestalten wollten. Quer gelagert zu den Feldern der traditionellen Tierzucht, den Versuchen zur Pflanzenmanipulation und -modifikation sowie dem weiten Gebiet der Eugenik als einer hybriden genetischen Soziotechnik (vgl. hierzu Fangerau, 2012) sind hier vor allem Mutationsexperimente als Vorläufer gezielter genetischer Veränderungen und Synthesen zu nennen. Hugo de Vries' (1848–1935) Experimente an Nachtkerzen und deren gezielte Veränderung durch Züchtungstechnik, Thomas Hunt Morgans (1866–1945) Mutationsstudien an *Drosophila* oder Herman J. Mullers (1890–1967) künstlich erzielte Mutationen an *Drosophila* durch den Einsatz von Radioaktivität ragen hier heraus. Morgan beispielsweise nahm direkt Bezug auf Loeb's „engineering ideal“ (Pauly, 1987), wenn er versuchte, ihn zur Teilnahme an einer Konferenz – vermutlich der Jahrestagung der National Academy of Sciences – zu bewegen. Er lockte Loeb damit, dass er dort einen Vortrag über „The Disintegration of a Species and Its Reconstruction by artificial Combinations“ eingereicht habe und fragte direkt: „Doesn't that make you want to go?“ (Reingold/Reingold, 1981:159).⁸

8 Loeb arbeitete zu dieser Zeit selbst an Mutationsversuchen mit *Drosophila* (vgl. Loeb/Bancroft, 1911). Ob Morgan den Vortrag letztendlich gehalten hat, ist leider nicht nachgewiesen. In den Programmen der National Academy of Sciences erscheint er zumindest nicht.

3.2.3 Gentechnik und der Schatten der Eugenik

In diesen Pfaden der sich vor allem nach 1914 immer stärker etablierenden Genetik gehörte der Botaniker Albert F. Blakeslee (1874–1954) zu denjenigen, die das synthetische oder ingenieurähnliche Ideal weiterhin propagierten und erfolgreich vorantrieben. Er führte mehrere Versuche zur Veränderung der Chromosomenzusammensetzung von Pflanzen durch und sprach bei seinem geplanten, Chromosomen und chromosomale Ungleichgewichte wie Bauelemente ausnutzenden Vorgehen selbst von „artificial or synthesized ‘new species’“, die im Unterschied zu natürlichen Spezies aus planvoller, gezielter Chromosomenmodifikation und -modulation hervorgegangen seien (Blakeslee, 1934:107). Eine Reihe ähnlicher, schon als „genetic engineering“ bezeichneter Versuche folgte, doch einen wirklichen neuen Schub für synthetische Ansätze brachte nach der Beschreibung der DNA-Doppelhelix und dem Aufstreben der Molekulargenetik als disziplinärer Ansatz vor allem die rekombinante DNA-Technologie mit sich. Mit dieser Technik wurde es möglich, künstliche DNA-Moleküle herzustellen.⁹

Kurz vor und auch nach der ersten öffentlichen Präsentation dieser Technologie im Jahr 1973 stand die Idee des „biological“ oder „genetic engineering“ noch ganz unter dem Einfluss eugenischer soziotechnologischer Erwägungen und dem Eindruck, den diese in der Folge der Aufarbeitung der Verbrechen des Nationalsozialismus im Sinne einer „schiefen Ebene“ hinterlassen hatten. Der Einwurf des Rechtsphilosophen Martin Golding aus dem Jahr 1968 verdeutlicht, dass „biological engineering“ im Schatten der Eugenik nach dem Zweiten Weltkrieg nicht mehr wie um 1900 die Schaffung künstlichen Lebens konnotierte, sondern die gezielte Veränderung des menschlichen „Genpools“ (Golding, 1968:451). Für Golding bedeutete „biological engineering“ die Kombination aus „knowing that“ und „knowing how“, wobei die Ergebnisse der biologischen Wissenschaften die theoretische Komponente bildeten, die den Gebrauch von praktischen Techniken zur Erzeugung genetischer oder phänotypischer Veränderungen bedingten. Die Rassenhygiene diente Golding bei seinen bioethischen Erwägungen dabei als Menetekel für das soziale Programm des „biological engineering“ (Golding, 1968:448), woraus er folgte, dass eine soziale und rechtliche „Kontrolle der Kontrolle“ von Eigenschaften unter

9 Zur Geschichte der Genetik siehe u. a. Kay, 1996; Morange, 2000.

der medizinischen Prämisse des „first do no harm“ notwendig sei (Golding, 1968:477ff.).¹⁰ Gerade aus der eugenischen Erfahrung heraus konstatierte er zudem eine Vertrauenskrise der Bevölkerung bezüglich der Ziele des Programms des „bioengineering“, eine Feststellung, die kurze Zeit später in der Zeitschrift „Science“ vom Physiker und Wissenschaftsjournalisten Philip H. Abelson (1913–2004) – heutigen Beschwichtigungen von Bedenkenträgern nicht unähnlich – mit den Worten gekontert wurde:

„During the last several years, the public has repeatedly been warned that science is creating additional problems through raising the possibility of test tube babies and ‚genetic engineering‘. The response of the public has been negative, with some calling for a halt to research in molecular biology. In truth, the dire predictions of the potentialities of new science have outrun the accomplishments, and the predictors have assumed that society will exercise negatively the options that are provided [...]. Talk of the dire social implications of laboratory-related genetic engineering is premature and unrealistic. It disturbs the public unnecessarily and could lead to harmful restrictions on all scientific research.“ (Abelson, 1971:285)

Hier deutet sich bereits eine (rhetorische) Abwendung der Gentechnologie und des „genetic engineering“ von ihrem bisherigen diskursiven Umfeld an, die letztendlich wohl mit der Beschreibung der rekombinanten DNA-Technologie im Jahr 1973 vollzogen wurde (Cohen et al., 1973; vgl. auch Campos, 2009). Neben dem Umstand, dass Sorgen vor eugenischen Anwendungen nun in den 1970ern von Beobachtern der Szene wie dem Informationswissenschaftler Eugene Garfield (*1925) in den Bereich eher ridiküler öffentlicher Befürchtungen gerückt wurden (Garfield, 1975),¹¹ bemühten Wissenschaftler in Bezug auf die rekombinante DNA-Technologie wie schon um 1900 den evolutionären Dreischritt der Biologie von einer beobachtenden über eine analytische hin zu einer synthetischen Phase, um auf diese Weise anzudeuten, dass

10 Aktuelle juristische Überlegungen im Zusammenhang mit Synthetischer Biologie, die von Fragen der Patentierung und des Eigentumsrechts bis hin zu Selbstverpflichtungen im Hinblick auf die Begrenzung gefährlicher Potenziale der neuen Technik reichen, finden sich bei Andrew W. Torrance, 2010.

11 Hier heißt es zu den Ideen, auf die Menschen bei der Berichterstattung über „genetic engineering“ kommen könnten, erst an achter und letzter Position „In fact, I would not be surprised if some people began believing that the scientists involved in genetic engineering research [...] are egomaniacs aiming to create a race of (a) zombies, (b) slaves, (c) supermen, (d) beautiful young women, or (e) duplicates of themselves“ (ebd.:335).

jetzt aber wirklich die Biologie in die synthetische Phase eingetreten sei. In nahezu frappierender Parallele zu Harting etwa 100 Jahre zuvor und fast mit der gleichen Wortwahl schrieb James Danielli in einem Vorwort zu einer Übersicht über den „Progress in research related to genetic engineering and life synthesis“ von Roy Widdus und Charles Ault, in der er ebenfalls den Begriff der Synthetischen Biologie verwandte, dass sich das Zeitalter der Synthese zwar noch im Kindheitsstadium befinde, aber schon klar erkennbar sei (Danielli, 1974). Auch das bekannte Ingenieurideal, das Ziel Synthetischer Biologie, willentlich Leben im Sinne der Abiogenesis aus einzelnen Bausteinen zu erzeugen, wird erneut klar formuliert (Widdus/Ault, 1974:8).¹² Die eingangs erwähnte, heute vielfach postulierte und mit den weiter gehenden Zielen der Synthetischen Biologie begründete Grenzziehung zwischen Synthetischer Biologie und Gentechnologie (vgl. u. a. Engelhard, 2011) findet in diesem Zeitraum ebenfalls ihren Ursprung, wenn auch Danielli beide Ansätze noch als Einheit betrachtet.

3.3 Legitimation und Kritik

Hatte schon Jacques Loeb im Jahr 1904 die Technische Biologie („technical biology“) durch die Möglichkeiten ihrer Anwendung zum Wohl der Menschheit legitimieren wollen, so griffen Forschende wie Danielli diese Legitimationsstrategie zu Beginn der 1970er ebenso wieder auf wie heutige Biologinnen und Biologen. Beispielsweise hatte Loeb in der Medizin, der industriellen Landwirtschaft und der Energieversorgung Entwicklungschancen durch Biotechnologien gesehen, die in letzter Konsequenz das friedliche Zusammenleben der Menschheit bedeuten sollten (Loeb, 1904a; Loeb, 1904b). Ähnlich argumentierten nun Autorinnen und Autoren in den 1970er und 1980er Jahren für die Gentechnologie und die Synthetische Biologie, indem sie ihre Einsatzmöglichkeiten in der Medizin (z. B. in Gentherapien bei genetischen oder genetisch verändernden Viruserkrankungen oder in der Produktion von Hormonen und Antikörpern unter Zuhilfenahme von Bakterien) in der Landwirtschaft (z. B. in der bakteriellen Produktion von Nitrogendünger oder in der Pflanzenzucht) und in der Industrie (z. B. in der biologischen Schadstoffentsorgung oder im Ersatz einer umweltverschmutzenden chemischen durch eine biologische Industrie) priesen (Danielli, 1974:3–4; Widdus/Ault, 1974:54–56). Risiken seien be-

12 Klaus Mainzer (2010:85) und andere verweisen hier auch auf den Genetiker Waclaw Szybalski, der in gleicher Weise das synthetische Ideal 1974 hervorhob.

herrschar, wie der ehemalige Präsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) Ernst-Ludwig Winnacker in einem Beitrag zur Synthetischen Biologie feststellte, in dem auch er im etablierten Muster auf die Synthetische Chemie, die wirtschaftlichen Potenziale und die Idee der Schaffung neuer Eigenschaften rekurrierte. Die Forschenden selbst redeten, so Winnacker, nicht „einem hemmungslosen Einsatz dieser Techniken das Wort“ (Winnacker, 1990:380), sondern sie hätten im Bereich der Gentechnologie verantwortungsvoll Selbstkontrolle geübt (ebd.:384).

In direkter Parallelität widmete im September 2011 ein Sonderheft der Zeitschrift „Science“ zur Synthetischen Biologie ebenfalls den Anwendungsbereichen der Medizin, der Energieversorgung (algenbasierte „biofuels“) und der Industrie besondere Aufmerksamkeit (Vinson, 2011).¹³ Dabei stellen einige der heutigen Autorinnen und Autoren bewusste Bezüge zu den Anfängen der Gentechnologie in den 1970er Jahren her, ohne jedoch ebenfalls auf den doppelten Hinweis zu verzichten, dass die heutige Synthetische Biologie in der Tradition der bisher sicher und ohne Gefahren genutzten Gentechnologie stehe, über diese aber konzeptuell hinausginge. Sie betonen: „In our view, synthetic biology is an extension of the continuum of genetic science that has been used safely for more than 40 years by the biotechnology industry in development of commercial products“ (Erickson et al., 2011:254).

In gleicher Weise wie sich in den betrachteten Zeiträumen die Legitimationsstrategien und Visionen der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ähneln, weisen auch die Kritiken eine beachtenswerte Konkordanz auf. So erfuhren Loeb und seine Zeitgenossen um 1900 eine Kritik, die sich vornehmlich an ihren synthetischen, kreativen Zielen in der Gestaltung der Natur orientierte. In populären Medien wurden nicht nur die publizierten Forschungsergebnisse in ihrer Reichweite, wie Roux festgestellt hatte, flächendeckend überzogen dargestellt, sondern es wurden auch Sorgen vor den Gefahren einer wachsenden Macht der experimentellen Biologie beschworen, die sich, wie Jon Turney (1995) herausgearbeitet hat, vornehmlich auf zwei Argumentationslinien stützten. Zum einen wurde kritisch auf Basis eines generellen Antimechanismus argumentiert, der sich aus Quellen religiöser oder spiritueller Intuitionen speiste und die Hybris des Vorhabens, Leben schaffen zu wollen, anprangerte. Zum anderen wurden Ängste bezüglich der Folgen einer Forschung wie zum Beispiel Loeb sie betrieb, artikuliert. Vor allem

13 Das Titelbild dieser „Science“-Ausgabe wird von aus Legosteinen gebauten künstlichen Bakterien geziert, die die Gestaltung genetischer Module symbolisieren sollen, mit denen neue Funktionen in Organismen eingeführt werden können (Science 333(6047):1193).

wurden Befürchtungen hinsichtlich der Unterminierung traditioneller gesellschaftlicher Wertvorstellungen und der Entstehung völlig neuer moralischer Herausforderungen zum Beispiel durch die Veränderung menschlicher Eigenschaften, einen Transhumanismus oder die Erzeugung neuartiger Kreaturen artikuliert (vgl. auch Fangerau, 2007).

Ähnlich positionierte sich auch die Kritik in den 1970er und 1980er Jahren, wobei diese zusätzlich auf die Erfahrungen der Rassenhygiene und Eugenik zurückgriff. Neben der allgemeinen Sorge, die Wissenschaft könnte mit Hilfe der rekombinanten DNA-Technik bald Monstrositäten ebenso erschaffen wie im Spiegel der Eugenikdebatte besonders begabte oder besonders minderbegabte Menschentypen, rückten sehr konkrete Missbrauchsmöglichkeiten in den Mittelpunkt. Diese reichten von der kommerziellen und militärischen Anwendung der Synthetischen Biologie über „biohazards“ (z. B. Gefahren durch künstliche Viren) bis hin zum möglichen Bioterrorismus oder einem gefährlichen, unkontrollierten Verkauf ihrer Produkte in die sogenannte „Dritte Welt“ (Howard/Rifkin, 1977; Krimsky, 1982).

Heute, wieder 30 Jahre später, scheint sich zumindest die deutschsprachige Debatte, wie aktuelle Medienanalysen nahelegen, etwas von der Sorge vor eugenischen Anwendungen entfernt zu haben (Cserer/Seiringer, 2009). Auch wenn konstatiert wird, dass sich relativ wenig Beiträge zur Synthetischen Biologie mit möglichen Risiken auseinandersetzen, so wird deutlich, dass (wohl anderen gesellschaftlichen Debatten des beginnenden 21. Jahrhunderts geschuldet) vornehmlich die Gefahr eines Bioterrorismus mit Hilfe synthetisch hergestellter Krankheitserreger diskutiert wird (vgl. dazu auch Kapitel 7 in diesem Band). Daneben kommen vornehmlich wieder grundsätzlichere Fragen zur Sprache, die sich (und hier schließt sich der Kreis) wie schon um 1900 dem Problem der Hybris und der Sorge vor dem Eingriff in die Natur zuwenden (vgl. dazu auch Kapitel 9 in diesem Band).

3.4 Schlussfolgerungen

Aus einer historischen Perspektive, die (zugegebener Maßen unter einem zugespitzten und Detailanalysen für einen großen Zeitraum vernachlässigendem Blick) ein Fenster von 150 Jahren betrachtet, zeigen sich deutliche Parallelen hinsichtlich einer Synthetischen Biologie mit ihren Bezugspunkten und anwendungsbetonten Zielsetzungen zwischen den Zeiträumen 1880 bis 1920 und 1970 bis 2010. Anders als gelegentlich geurteilt (z. B. Engelhard, 2011:46), handelt es sich jedoch nicht nur um begriffliche Ähnlichkeiten zwischen dem damaligen und heutigen

Verständnis einer „Synthetischen Biologie“. Vielmehr bestehen auch erhebliche konzeptionelle Übereinstimmungen zwischen den einzelnen Ansätzen. Diese zeigen sich am deutlichsten in der Gegenüberstellung des „engineering ideals“ eines Jacques Loeb und der heutigen Synthetischen Biologie mit ihrem an Design und am Ingenieurwesen orientierten technischen Ideal. Insgesamt finden sich zusätzlich auch in den begleitenden öffentlichen medialen Debatten beachtenswerte Parallelitäten zwischen den Stellungnahmen um 1900, den 1970er Jahren und heute. Zuletzt ist die heute oftmals postulierte andere Qualität der Synthetischen Biologie im Vergleich zum „genetic engineering“ ebenfalls zu hinterfragen, da das „genetic engineering“ für die Synthetische Biologie zumindest eine wichtige Traditionslinie darstellt.

Allein die epistemologische Orientierung oder genauer die Verortung dieser Orientierung durch die Forschenden scheint sich heute von dem um 1900 für die Biologie formulierten und 1970 wiederholten synthetischen Erkenntnisinteresse nicht etwa entfernt, sondern vielmehr lediglich etwas verlagert zu haben. Die Sozialwissenschaftlerin Jane Calvert beispielsweise konnte überzeugend argumentieren, dass in der heutigen Synthetischen Biologie erkenntnisleitende Ideale wie die Suche nach den (molekularen) Bausteinen des Lebens den Effekt mit sich bringen, dass im Labor eine künstliche Natur geschaffen wird, die dem epistemischen Ideal gehorcht und sich das Erkenntnisinteresse nicht etwa mehr auf die Ergründung des außerlaboratorischen Lebens konzentriert (Calvert, 2010). John Pickstones Ansatz, „ways of knowing“ und „ways of working“ zu unterscheiden, eignet sich als heuristische Richtschnur, um diese Beobachtung im Sinne einer These zu stützen (Pickstone, 2000; Pickstone, 2010). Während Biologen um 1900 das synthetische Wissen als Königsweg des „way of knowing“ auch für sich entdeckt zu haben glaubten und in den 1970er und 1980er Jahren genau dieser Weg der Wissensgenerierung wieder bemüht wurde, hat sich das heutige Erkenntnisinteresse in vielen Stellungnahmen anscheinend auf das technische Können und Konstruieren reduziert. Dabei wird weniger darüber reflektiert, dass synthetisierende molekulargenetische Ansätze zu einem großen Teil auch komparatistisch (deskriptiv und analytisch) und nicht allein synthetisch agieren (Strasser/de Chadarevian, 2011). Vielmehr scheint die funktionierende, geplante Gestaltung von Lebensprozessen eine zentralere Triebfeder zu sein als die Suche nach den grundlegenden Lebensprozessen selbst. Der „way of working“ vor dem Hintergrund synthetischen Wissens hat sich verschoben und etwas in den Vordergrund gedrängt: Das gelungene und funktionierende Design steht für eine Reihe der sich als Synthetische Biologinnen und Biologen begreifenden Forschenden über der Frage nach den Grundlagen und Bedingungen des Lebendigen und ihrem

Verständnis. Darüber hinaus wird die Synthetische Biologie in Experteninterviews oft gerade der Natur, die es im alten Modell zu erforschen galt, entgegengestellt (Cserer/Seiringer, 2009:30–31).

Nichtsdestotrotz ist diese in mehreren Analysen vorgebrachte Perspektive unvollständig. Auch heute noch finden sich entgegen diesem Trend an prominenter Stelle Aussagen wie die, dass eine gelungene biosynthetische Leistung in der Folge das Verstehen von „biological design principles“ impliziere (Nandagopal/Elowitz, 2011; vgl. hierzu auch Kapitel 6 in diesem Band). Nach Aussage der Biophysikerin Petra Schulle bemühen gerade Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Physik und Chemie, die sich mit Synthetischer Biologie beschäftigen, den besonderen Status eines synthetischen Wissens. Sie schreibt hierzu beispielsweise im schon zitierten Sonderheft der Zeitschrift „Science“:

„Perhaps a more daring view comes from chemists and physicists who take the words literally and focus on the construction of biological systems from the bottom up. They suggest that synthetic biology could follow the tracks of synthetic organic chemistry and open up a new understanding of biology.“ (Schulle, 2011:1252)

Ebenfalls geblieben ist auch das Ideal der Kontrolle von Lebensprozessen, das um 1900 aus der Technikeuphorie der sogenannten Moderne erwuchs und das heutige und damalige Forschende zu einen scheint (Nandagopal/Elowitz, 2011:1248).

Gibt es also zuletzt auch im Erkenntnisideal Übereinstimmungen zwischen den hier betrachteten Konjunkturen der Synthetischen Biologie, so wirkt es aus historischer Perspektive so, als hätten sich zumindest die Schubkräfte für die Umsetzung des Programms der Synthetischen Biologie etwas verschoben. Überwogen um 1900 zumindest in den Aussagen eines Wissenschaftlers wie Jacques Loeb noch die erkenntnisleitenden Fragen die Probleme möglicher Anwendungsfelder seiner Forschung – auch Loeb hat diese benannt und für sich argumentativ in Anspruch genommen (s.o.) – so scheint sich mit den Ansätzen des „genetic engineering“ wenigstens in diesem Bereich eine Trendverschiebung angebahnt zu haben. Jane Calverts hat als Trends in der aktuellen Synthetischen Biologie die Schubkräfte des technisch Gestaltbaren, des Kommodifizierbaren und des Standardisierbaren ausgemacht, die dann auch zu ethischen Diskussionen um durch wirtschaftliche Interessen geleitete Schöpfungsansätze führen (Calvert, 2010). Zumindest im Vergleich zwischen 1900 und 1970 erscheint diese Analyse in ihrer Stoß-

richtung zutreffend zu sein. Der Biochemiker Rollin Hotchkiss (1911–2004) hatte 1965 den Trend zur Kommodifizierung erkannt und im „Journal of Heredity“ vor diesem gewarnt, weil die Ökonomisierung und Industrialisierung mit der Gefahr einhergingen, dass den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern die Kontrolle über von ihnen entwickelte Verfahren entzogen würde:

„The eligible preparations of DNA or modified DNA will be prepared by our aggressive industry and available for any medical man who has a heroic or ambitious stripe. Can we doubt that a society, which is even now conditioning men to use perfumes and (in Europe I am told) beginning to sell handbags to men, will be laggard in providing such essential?“ (Hotchkiss, 1965:202)

Hotchkiss' Stellungnahme, die pointiert eine Kommerzialisierung und damit einhergehende Missbrauchspotenziale der genetischen Technologie in den Blick nahm, spricht trotz der schon 1900 gegebenen Anwendungsorientierung für eine sich in dieser Epoche ab den 1960ern neu entwickelnde Qualität der Diskussion um die industriell nutzbare, standardisierte „Ware“ DNA.

Dieser Trend ändert jedoch nichts an der Einschätzung, dass die heutige Synthetische Biologie nicht den häufig bemühten „Paradigmenwechsel“ innerhalb der Biologie im engeren Sinne Thomas Kuhns mit sich bringt (Potthast, 2009). Im Gegenteil folgt sie genau dem Weg und dem konzeptionellen und methodischen „Paradigma“, das gegen Ende des 19. Jahrhunderts in den Lebenswissenschaften um sich griff und erfolgreich Fuß gefasst hat. Die Synthetische Biologie des frühen 21. Jahrhunderts folgt in dieser Sichtweise den Ansprüchen, die an eine etablierte Normalwissenschaft in der Tradition der „Technischen Biologie“ des 19. und der Biotechnik des 20. Jahrhunderts gestellt werden. Gleiches gilt für die gesellschaftliche Kritik an der Synthetischen Biologie, die sich um 2000 nur unwesentlich von der um 1900 geübten unterscheidet. Kritik an der Synthetischen Biologie, die aus einer Identitätsorientierung heraus eine Natürlichkeit oder die Natur, eine natürliche Ordnung oder die Grundfesten dessen, was als Leben gilt, gefährdet sieht, gab es um 1900 ebenso wie heute. Neu hinzugetreten sind nun Sorgen, die eine Kommerzialisierung oder konkrete Gefahren wie den Bioterrorismus in den Blick nehmen und die heute gerne als postmodern bezeichnet werden. Eine solche Kritik könnte, folgt man vielen Soziologen wie Ulrich Beck oder Anthony Giddens als eine (reflexive) Re-

aktion auf die Folgen der Versprechungen der Moderne gesehen werden (Beck et al. 1996). Angesichts des hier gegebenen Überblicks über die Synthetische Biologie mit all den Parallelitäten in Zielsetzung, Stoßrichtung und Kritik synthetischer, kontrollierender, ingenieurorientierter Ansätze in der Biologie aber ist eine solche Deutung zumindest ebenso zu hinterfragen wie der postulierte Paradigmenwechsel in der biologischen Wissenschaft.

Die Traditionslinien der heutigen Synthetischen Biologie, ihre Postulate, ihre Begriffe, ihre Legitimation und Kritik lassen sich bis mindestens ins 19. Jahrhundert zurückverfolgen. Unterschiede scheinen sich allein im Bereich des technischen Könnens nicht im technischen Denken an sich ausmachen. „Wir sind nie modern gewesen“ lautet eine These Bruno Latours, mit der er die Grundannahmen einer „Moderne“ in Frage stellt (Latour, 1995). Diese These impliziert eine Kritik an postmodernen Deutungen von Entwicklungen der Moderne. Wenn die Synthetische Biologie des 19. Jahrhunderts mit ihrer technischen Orientierung heute als Inbegriff der Moderne begriffen wird, die es laut Latour nie wirklich gab, so gilt im Hinblick auf den Novitätsgehalt der heutigen Synthetischen Biologie im Vergleich zu der vor 100 Jahren folglich im doppelten Sinne, dass diese sich auch nicht in einer als postmodern zu klassifizierenden Phase befindet. Sie hat weder in der Binnen- noch in der Außenperspektive einen Paradigmenwechsel erfahren, sondern lässt sich in ihrer Innenansicht und ihrer Außenansicht nahtlos in klassische Ingenieurideale der Technischen Biologie einordnen.

Ich danke Michael Martin für seine Ideen, kompetenten Hinweise und Kommentare für den Abschnitt 3.2. An dieser Stelle sei auch Gisela Badura-Lotter für ihre Kommentare zu diesem Beitrag gedankt.

3.5 Literatur

- Abelson, P. H. (1971): Anxiety about Genetic Engineering. In: *Science* 173:285.
- Ball, P. (2011): *Unnatural. The heretical idea of making people*. London.
- Beck, U. et al. (1996): *Reflexive Modernisierung: Eine Kontroverse*. Frankfurt a.M.
- Bedau, M. et al. (2010): Life after the synthetic cell. In: *Nature* 465(7297):422–424.
- Blakeslee, A. (1934): New Jimson Weeds from old chromosomes. In: *J Hered* 25:80–108.
- Breithaupt, H. (2006): The engineer's approach to biology. In: *EMBO Rep* 7(1):21–23.
- Bud, R. (1993): *The use of life. A history of biotechnology*. Cambridge.
- Butler-Burke, J. (1905): On the Spontaneous Action of Radio-active Bodies on Gelatin Media. In: *Nature* 72(1878):78–79.
- Calvert, J. (2010): Synthetic biology: constructing nature? In: *Sociological Review* 58(s1):95–112.
- Campos, L. (2009): That was the Synthetic Biology that was. In: Schmidt, M. et al. (eds.): *Synthetic Biology. The technoscience and its societal consequences*. Dordrecht [u. a.]:5–23.
- Cohen, S. N. et al. (1973): Construction of biologically functional bacterial plasmids in vitro. In: *Proc Natl Acad Sci USA* 70(11):3240–3244.
- Cserer, A./Seiringer, A. (2009): Pictures of Synthetic Biology. A reflective discussion of the representation of Synthetic Biology (SB) in the German-language media and by SB experts. In: *Syst Synth Biol* 3(1–4):27–35.
- Danielli, J. (1974): Genetic engineering and life synthesis. An introduction to the review by R. Widdus and C. Ault. In: *International Review of Cytology* 38:1–5.
- Dienel, H.-L. (1998): Zweckoptimismus und -pessimismus der Ingenieure um 1900. In: ders.: *Der Optimismus der Ingenieure. Triumph der Technik in der Krise der Moderne um 1900*. Stuttgart:9–24.
- Dubois, R. (1904): Sur la cytogénèse minerale. In: *Comptes rendus des séances de la Société de biologie* 56(1):805.
- Engelhard, M. (2011): Die synthetische Biologie geht über die klassische Gentechnik hinaus. In: Dabrock, P. et al. (Hrsg.): *Was ist Leben – im Zeitalter seiner technischen Machbarkeit? Beiträge zur Ethik der Synthetischen Biologie*. Freiburg/München:43–59.
- Erickson, B. et al. (2011): Synthetic Biology. Regulating Industry Uses of New Biotechnologies. In: *Science* 333(6047):1254–1256.
- Fangerau, H (2007): Künstliche Jungferzeugung. Akzeptanz und Ablehnung einer Biotechnologie. In: *Verhandlungen zur Geschichte und Theorie der Biologie* 13:299–309.

- Fangerau, H. (2010): Spinning the scientific web. Jacques Loeb (1859–1924) und sein Programm einer internationalen biomedizinischen Grundlagenforschung. Berlin.
- Fangerau, H. (2012): Monism, Racial Hygiene, and National Socialism. In: Weir, T. (ed.): Monism. Science, Philosophy, Religion, and the History of a Worldview. New York:223–247.
- F.A.Z. (2010) = Frankfurter Allgemeine Zeitung: Vier Flaschen für ein Heureka. 21.05.2010.
- FR (2010) = Frankfurter Rundschau: Künstliches Leben. Craig Venter spielt Schöpfer. 21.05.2010.
- Garfield, E. (1975): Current Comments: Genetic Engineering – Too Dangerous to Continue or Too Important to Discontinue? In: Current Contents 35:335–341.
- Golding, M. P. (1968): Ethical issues in biological engineering. In: UCLA Law Review 15(2):443–479.
- Haek, D. (1900): Die Kraft- und Beleuchtungsanlagen. In: Malkowsky, G. (Red.): Die Pariser Weltausstellung in Wort und Bild. Berlin:26–27.
- Harting, P. (1872): Recherches de Morphologie synthétique sur la production artificielle de quelques formations calcaires organiques. In: Nieuwe verhandelingen I klasse Koninklijk Nederlands Instituut van Wetenschappen, Letteren en Kunsten, XIV.
- Heil, R. (2011): Von künstlichen Lebewesen und künstlichem Leben. In: Dabrock, P. et al. (Hrsg.): Was ist Leben – im Zeitalter seiner technischen Machbarkeit? Beiträge zur Ethik der Synthetischen Biologie. Freiburg/München:147–172.
- Hotchkiss, R. (1965): Portents for a genetic engineering. In: J Hered 56(5):197–202.
- Howard, T./Rifkin, J. (1977): Who Should Play God? The Artificial Creation of Life and What it Means for the Future of the Human Race. New York.
- Jaffé, F. (1900): Die französische Architektur der Weltausstellung. In: Malkowsky, G. (Red.): Die Pariser Weltausstellung in Wort und Bild. Berlin:65–67.
- Kay, L. E. (1996): The Molecular Vision of Life. Caltech, the Rockefeller Foundation, and the Rise of the New Biology. Oxford/New York.
- Keen, R. (1976): Wöhler, Friedrich. In: Gillispie, C. C.: Dictionary of Scientific Biography. New York:474–479.
- Keller, E. F. (2002): Making Sense of Life. Explaining Biological Development with Models, Metaphors and Machines. Cambridge/London.
- Koopmann, H. (2003): Naturphilosophie im Zauberberg. In: von Engelhardt, D./Wißkirchen, H. (Hrsg.): „Der Zauberberg“ – die Welt der Wissenschaften in Thomas Manns Roman: mit einer Bibliographie der Forschungsliteratur. Stuttgart:124–136.
- Krimsky, S. (1982): Social responsibility in an age of synthetic biology. In: Environment 24(6):2–11.
- Kuckuck, M. (1907): Die Lösung des Problems der Urzeugung (Archigonia, Generatio spontanea). Leipzig.

- Latour, B. (1995):** Wir sind nie modern gewesen. Versuch einer symmetrischen Anthropologie. Berlin.
- Leduc, S. (1906):** Les bases physiques de la vie et la biogenèse. Paris.
- Leduc, S. (1908):** Essais de biologie synthétique. In: Buchner-Berlin, E. et al. (Hrsg.): Festband der Biochemischen Zeitschrift, H. J. Hamburger gewidmet zur Feier seiner vor fünfundzwanzig Jahren erfolgten Doktorpromotion von seinen Freunden und Verehrern. Berlin:280–286.
- Loeb, J. (1891):** Untersuchungen zur physiologischen Morphologie der Tiere. I. Über Heteromorphose. Würzburg.
- Loeb, J. (1894):** On some facts and principles of physiological morphology. In: Biological lectures delivered at the Marine Biological Laboratories of Wood's Holl in the summer session of 1893. Boston:37–61.
- Loeb, J. (1904a):** The Recent development of biology. Address delivered at the Congress of Arts and Sciences, St. Louis. In: Science 20(519):777–786.
- Loeb, J. (1904b):** Zur neueren Entwicklung der Biologie. In: Annalen der Naturphilosophie 4:188–203.
- Loeb, J. (1906):** Vorlesungen über die Dynamik der Lebenserscheinungen. Leipzig.
- Loeb, J. (1912):** On some facts and principles of physiological morphology. In: ders.: The Mechanistic Conception of Life. Biological Essays. Chicago:85–109.
- Loeb, J. (1916):** The Organism as a Whole from a Physicochemical Standpoint. New York.
- Loeb, J./Bancroft, F. W. (1911):** Some Experiments on the Production of Mutants in Drosophila. In: Science 33(855):781–783.
- Mach, E. (1903):** Über das Prinzip der Vergleichung in der Physik. Vortrag gehalten auf der Naturforscherversammlung in Wien 1894. In: ders.: Populär-Wissenschaftliche Vorlesungen. Leipzig:263–286.
- Mainzer, K. (2010):** Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und Künstlichen Intelligenz. Paderborn.
- Morange, M. (2000):** A History of Molecular Biology. Cambridge.
- Morange, M. (2009):** A new revolution? The place of systems biology and synthetic biology in the history of biology. In: EMBO Rep 10(S1):S50–S53.
- Nandagopal, N./Elowitz, M. B. (2011):** Synthetic Biology: Integrated Gene Circuits. In: Science 333(6047):1244–1248.
- Neyer, H. J. (Red.) (1986):** Absolut modern sein – zwischen Fahrrad und Fließband; culture technique in Frankreich 1889–1937; eine Ausstellung der Neuen Gesellschaft für Bildende Kunst in den Räumen der Staatlichen Kunsthalle Berlin; vom 20.3. bis 8.5.1986, Berlin.
- O'Malley, M. A. et al. (2008):** Knowledge-making distinctions in synthetic biology. In: Bioessays 30(1):57–65.

- Pauly, P. J. (1987): *Controlling life. Jacques Loeb and the engineering ideal in biology*. New York [u. a.].
- Peretó, J./Català, J. (2007): The Renaissance of Synthetic Biology. In: *Biological Theory* 2(2):128–130.
- Pickstone, J. V. (2000): *Ways of knowing. A new history of science, technology and medicine*. Manchester.
- Pickstone, J. V. (2011): A brief introduction to ways of knowing and ways of working. In: *History of Science* 49(164):235–245.
- Potthast, T. (2009): Paradigm shifts versus fashion shifts? Systems and synthetic biology as new epistemic entities in understanding and making 'life'. In: *EMBO Rep* 10(S1):S42–S45.
- Radkau, J. (1994): Technik im Temporausch der Jahrhundertwende. In: Salewski, M./Stölken-Fitzschen, I. (Hrsg.): *Moderne Zeiten. Technik und Zeitgeist im 19. und 20. Jahrhundert*. Stuttgart:17–24.
- Reingold, N./Reingold I. H. (1981): *Science in America: a documentary history, 1900–1939*. Chicago.
- Rohkrämer, T. (1999): *Eine andere Moderne? Zivilisationskritik, Natur und Technik in Deutschland 1880–1933*. Paderborn.
- Roux, W. (1906): Die angebliche künstliche Erzeugung von Lebewesen. In: *Die Umschau* 10(8):141–145.
- Roux, W. (1907): Bemerkung zu Max Mündens Autoreferat über seinen Chthonoblast und über die angeblich gelungene Hervorbringung künstlicher Lebewesen. In: *Archiv für Entwicklungsmechanik* 24(4):684–685.
- Schummer, J. (2009): The creation of life in cultural context: From spontaneous generation to synthetic biology. In: Bedau, M. A./Parke, E. C. (eds.): *The ethics of protocells. Moral and social implications of creating life in the laboratory*. Cambridge:125–142.
- Schwille, P. (2011): Bottom-Up Synthetic Biology: Engineering in a Tinkerer's World. In: *Science* 333(6047):1252–1254.
- Strasser, B. J./de Chadarevian, S. (2011): The comparative and the exemplary: revisiting the early history of molecular biology. In: *History of Science* 49(164):317–336.
- SZ (2010) = *Süddeutsche Zeitung*: Craig Venter spielt Gott. 21.05.2010.
- Torrance, A. W. (2010): Synthesizing Law for Synthetic Biology. In: *Minn J L Sci & Tech* 11(2):629–665.
- Turney, J. (1995): Life in the laboratory: public responses to experimental biology. In: *Public Underst Sci* 4(2):153–176.
- Vinson, V./Pennisi, E. (2011): Introduction. The Allure of Synthetic Biology. In: *Science* 333(6047):1235.
- vom Bruch, R. (2005): Der wissenschaftsgläubige Mensch. In: vom Bruch, R./Liess, H. C. (Hrsg.): *Bürgerlichkeit, Staat und Kultur im Deutschen Kaiserreich*. Stuttgart:11–24.
- Weiler, B. (2006): *Die Ordnung des Fortschritts. Zum Aufstieg und Fall der Fortschrittsidee in der „jungen“ Anthropologie*. Bielefeld.

Widdus, R./Ault, C. (1974): Progress in research related to genetic engineering and life synthesis. In: *Int Rev Cytol* 38:7–66.

Winnacker, E.-L. (1990): Synthetische Biologie. Nach einem Vortrag gehalten im Juni 1986 zur Eröffnung der Analytika 1986. In: Herbig, J./Hohlfeld, R. (Hrsg.): *Die zweite Schöpfung. Geist und Ungeist der Biologie des 20. Jahrhunderts.* München:369–385.

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

Nediljko Budisa

4. Chemisch-synthetische Biologie

4.1 Terminologie

Die Bedeutung des Begriffs „Synthetische Biologie“ ist unter jenen, die auf diesem Gebiet arbeiten oder dessen Entwicklung beobachten, sehr umstritten. Während einige Forschende der Meinung sind, dass es sich bei der Synthetischen Biologie um eine neue Disziplin handle, verstehen andere darunter lediglich eine Erweiterung von etablierten Bereichen klassischer Forschungsgebiete wie Molekularbiologie, Biochemie, Bioinformatik und Biotechnologie. Selbst wenn es schwierig ist, zum jetzigen Zeitpunkt eine endgültige Definition zu formulieren, wird die Synthetische Biologie mittlerweile im Allgemeinen als ein Forschungsgebiet mit großem Potenzial für die akademische und anwendungsbezogene Forschung betrachtet.

Wie ließe sich „Synthetische Biologie“ am einfachsten definieren? Wessen Arbeiten würde man diesem Fachgebiet zuordnen? Die beste Erklärung liefert vielleicht Cricks Zitat aus dem Jahre 1965, mit dem er sich als Molekularbiologe bekennt:

„I myself was forced to call myself a molecular biologist because when inquiring clergymen asked me what I did, I got tired of explaining that I was a mixture of crystallographer, biophysicist, biochemist, and geneticist, an explanation which in any case they found too hard to grasp.“ (Crick, 1965)

Die heutige Situation der Synthetischen Biologie ist ähnlich – was nicht überrascht, angesichts der Bandbreite der Fragen, die synthetisch-biologische Forschung zu einem fachübergreifenden Unterfangen machen, das Beiträge aus mehreren Disziplinen vereint, darunter insbesondere Molekular-, Zell- und Mikrobiologie, Systembiologie, Synthetische Chemie, Biophysik, Materialwissenschaften, Systemtechnik, Systemtheorie und Computerwissenschaften. Die Synthetische Biologie umfasst verschiedene Kompetenzen und Ansätze, so zum Beispiel die Erzeugung

von gentechnisch veränderten Organismen, künstlichen Protozellen und synthetischen Genomen, das Erarbeiten von Modellen regulatorischer Signal- und Stoffwechselwege und schließlich deren Umsetzung in technische Konzepte bis hin zur Herstellung von Kompatibilität mit Prozessen der Verfahrenstechnik.

Nach der Entdeckung von Restriktionsenzymen in den 1970er Jahren waren Begriffe wie „genetic engineering“ und „bioengineering“ in der internationalen biologischen Forschung zunächst populärer als „synthetic biology“. In den 1990er Jahren dagegen war insbesondere in den USA vor allem von „synthetic genes“ die Rede. In den 1970er Jahren wurde mit dem Begriff „synthetic biology“ gelegentlich die klassische Gentechnologie bezeichnet, die zur Herstellung von rekombinanten Proteinen oder der Erzeugung transgener Organismen eingesetzt wurde. Seit Anfang des neuen Jahrtausends wird der Begriff „synthetic biology“ von einer Forschungsgemeinschaft, die der Biologie, der Informatik und den Ingenieurwissenschaften entstammt, verwendet. Das Forschungsziel besteht darin, biologische „Bauteile“ oder biologische Systeme zu konstruieren. Als wissenschaftliche Disziplin wurde die Synthetische Biologie erst im Jahre 2004 auf dem ersten internationalen Kongress zu diesem Thema etabliert.¹

Aus chemischer Sicht bedeutet Synthetische Biologie in der Regel *die Verwendung nicht natürlicher (nicht-kanonischer) Moleküle oder Molekülteile*, um natürliche biologische Systeme zu beeinflussen oder umzugestalten, mit dem Ziel, ihre Funktionsweise besser zu verstehen oder – längerfristig – neue Produktionsstämme zu entwickeln. Mit anderen Worten, die Idee besteht darin, biologisches Verhalten zu erzeugen, ohne eine exakte Kopie des natürlichen Systems herzustellen. Für die weltweit meisten Arbeitsgruppen auf dem Gebiet der Synthetischen Biologie bedeutet Synthetische Biologie dagegen *die Verwendung natürlicher Teile biologischer Systeme* (BioBricks, DNA-Fragmente, Proteine usw.), mit dem Ziel, Systeme zu konstruieren, die nicht im Zuge der natürlichen Evolution entstanden sind. Aufgrund dieser unterschiedlichen Ansätze werden in der gegenwärtigen Forschung Begriffe wie „synthetisch“, „künstlich“, „orthogonal“, „unnatürlich“, „nicht natürlich“, „nicht kanonisch“, „Surrogat“ und dergleichen ohne Einheitlichkeit bezüglich ihrer Bedeutung verwendet.

1 Synthetic Biology 1.0 (10.–12.06.2004) am Massachusetts Institute of Technology (USA). Siehe Auflistung einschlägiger Konferenzen online unter: <http://syntheticbiology.org/Conferences.html> [28.08.2012].

Die Übertragung von Ideen aus der Forschung zur künstlichen Intelligenz auf die Biologie führte zu Studien zu „künstlichem Leben“ („artificial life“). Biologische Systeme werden in Computermodellen simuliert (und auch umgekehrt fließen biologische Konzepte wie das der Evolution in die Softwareentwicklung ein). Dieser Ansatz basiert auf der Annahme von Modularität als Grundprinzip für das Funktionieren lebender Systeme. Das Ziel besteht letztendlich in der Erschaffung neuer Organismen durch die rationale Verknüpfung standardisierter biologischer Teile, die aus ihrem natürlichen Zusammenhang genommen wurden. Auf diese Weise sollen lebende Systeme in eine Liste von Bestandteilen zerlegt werden, die zu einem bestimmten Zweck neu verbunden werden können. Interessanterweise lässt sich eine Zelle mithilfe von Begriffen aus der Informationstheorie und Kybernetik als eine Maschine betrachten, die Informationen verarbeitet, die von einem genetischen Programm vorgegeben werden.

4.2 Synthese von „Leben“ in der Synthetischen Biologie

Mit der Synthetischen Biologie beschäftigt sich mittlerweile eine schnell wachsende wissenschaftliche Gemeinschaft, die einen breiten Bereich von Forschungsgebieten abdeckt. Das Fachgebiet wird von wenigen Forschungsbereichen dominiert, darunter genombasiertes Engineering von Zellen, Protozellenforschung, Engineering von Stoffwechselwegen und „DNA device design“, basierend auf dem Modularitätsprinzip, einer Standardisierung und präzisen Vorhersagemodellen unter Ausnutzung von aus der Informatik entlehnten Konzepten (Budisa, 2012). Alle drei Bereiche versuchen, sich von dem jeweiligen Forschungsgebiet, dem sie entstammen, (z. B. Gentechnologie und chemische Forschung über den Ursprung des Lebens) abzugrenzen, indem sie die „Synthese von Leben“ als ein Hauptziel der Forschung angeben. Man nimmt nämlich an, dass die Vereinfachung biologischer Systeme zu modularen und abstrakten Netzwerken es möglich macht, lebende Systeme von Grund auf nachzubauen und sogar die „Synthese von Leben“ in den Bereich des Machbaren rückt. Dabei wird die Erschaffung eines „Minimalorganismus“ als höchstes Ziel all dieser Bemühungen definiert. Dahinter steckt die Idee, dass Bakterien mit etablierten Minimalgenomen mit jeder gewünschten Funktion oder jedem gewünschten Prozess ausgestattet werden können. Tatsächlich beruht die gesamte Methodik in gewisser Weise auf einem klassischen, gentechnischen Ansatz, der auf Knock-out-Mutagenese basiert. Dadurch wird die Synthese von Leben lediglich zu einem Abgrenzungskriterium der Synthetischen Biologie gegenüber der rekombinanten DNA-Technologie stilisiert (Schummer, 2011).

Die Technologie der Oligonukleotidsynthese hat in der Gentechnik und der Molekularbiologie eine Vielzahl von neuen experimentellen Ansätzen ermöglicht. Die Oligonukleotidsynthese beispielsweise hat seit den 1960er Jahren eine wesentliche Rolle in der biologischen Forschung gespielt (Nirenberg, 2004). Ein Jahrzehnt später meldete die Presse „Leben im Reagenzglas“, nachdem Sol Spiegelman Viruspartikel mit synthetischer RNA erzeugt hatte (Spiegelman et al., 1970). Im Verlauf der folgenden Jahrzehnte wurde die oligonukleotidbasierte Technologie weiterentwickelt, bis Eckard Wimmer im Jahre 2002 schließlich die Synthese des vollständigen Genoms des Poliovirus gelang (Cello et al., 2002). Hierbei ist allerdings zu bedenken, dass die erfolgreiche Synthese immer längerer Oligonukleotide zwar ein technischer, aber kein konzeptioneller Fortschritt ist. Im Jahre 2010 verkündete das US-amerikanische J. Craig Venter Institute die Herstellung der „ersten sich selbst replizierenden synthetischen Bakterienzelle“ auf ihrer Webseite,² ein Erfolg, der ebenfalls auf komplexer oligonukleotidbasierter, klassischer Gentechnologie beruht. Um jedoch wirklich „synthetisches Leben“ zu erschaffen, muss man notwendigerweise eine Vorstellung davon haben, wie man die Konstruktion eines Organismus von Grund auf angeht, wie man die vier Nucleobasen Adenin, Cytosin, Guanin und Thymin in einer bestimmten Abfolge zu Genen anordnet, sodass ein neues, aber dennoch gänzlich vorherbestimmtes Ergebnis entsteht. Derzeit ist man jedoch lediglich in der Lage, die genetischen Blaupausen von Organismen zu kopieren, wie es Venter, Wimmer, Spiegelmann und viele andere bereits unzählige Male getan haben.

Daher kann man, ohne den wissenschaftlichen Wert und das herausragende technische Niveau dieser Arbeiten in Frage zu stellen, sagen, dass zum Beispiel Venters Experiment streng im Rahmen der klassischen Gentechnologie durchgeführt wurde – mit dem Ergebnis eines geringfügig genetisch modifizierten Bakteriums. Die oben angesprochene Herstellung einer ersten sich selbst replizierenden synthetischen Bakterienzelle durch das J. Craig Venter Institute beinhaltet, dass DNA aus einer Zelle mit dem Zytoplasma einer anderen kombiniert wurde. Dieses Vorgehen ähnelt ein wenig den Verfahren zur somatischen Protoplastenfusion, die bereits in den 1970er Jahren bei Pflanzen etabliert wurden (Gamborg, 1975), obwohl die Komponente des „whole-genome engineering“ bei diesen früheren Bestrebungen sicher fehlte. Zwei-

2 Online unter www.jcvi.org/cms/research/projects/first-self-replicating-synthetic-bacterial-cell/overview [11.07.2012].

ellos ist Venters Arbeit noch immer weit davon entfernt, die Konstruktion synthetischer Lebensformen tatsächlich zu beherrschen, aber es ist der erste Schritt auf dem Weg zur technischen Realisierung dieses interessanten Ziels. Kurz, man kann weder von der „Erschaffung“ einer Bakterienzelle sprechen, noch davon, die Konstruktion synthetischer Lebensformen zu beherrschen, wohl aber von einem signifikanten technischen Fortschritt, der die Grenzen des Machbaren auf dem Gebiet der DNA-Synthese beachtlich verschiebt.

4.3 Synthese von „Leben“ in der Chemie

In den Frühstadien der modernen Chemie zu Beginn des 19. Jahrhunderts erwies sich die Synthese komplexer, aus Pflanzen oder Tieren isolierter Substanzen als schwierig oder nahezu unmöglich, und viele physiologische Phänomene waren einer experimentellen Analyse nicht zugänglich. Dies ließ Raum für die Überzeugung, dass die Bildung organischer Verbindungen von einer bestimmten „Lebenskraft“ (*vis vitalis*) gesteuert wird, die nur in lebenden Organismen wirkt (Hein, 1961). Lebewesen wurden in diesem Sinne von unbelebten Dingen als inhärent verschieden angesehen (Fontecave, 2010). Diesem metaphysischen Konzept widersprechen die Möglichkeiten der synthetischen Chemie. Das berühmteste Beispiel ist die Synthese von Harnstoff vor mehr als 150 Jahren. Wöhler und Liebig zeigten damit, dass natürliche organische Verbindungen grundsätzlich chemisch synthetisiert werden können (Multhaus, 1966). Das Konzept der synthetischen organischen Chemie kann folgendermaßen zusammengefasst werden: Komplexe Verbindungen werden schrittweise und in kontrollierter Weise aus einfachen Verbindungen synthetisiert. Dies führte im 19. Jahrhundert zu der Definition eines ehrgeizigen Ziels der organischen Chemie: der künstlichen Synthese sämtlicher natürlicher organischer Substanzen (Fischer, 1907; vgl. dazu auch Kapitel 3 in diesem Band).

Emil Fischer (1852–1919) ist nicht nur für seine bahnbrechenden Arbeiten zur Synthese von Kohlenhydraten, Nukleotiden und Alkaloiden bekannt, sondern auch als Visionär und einer der berühmtesten Verfechter des Fortschritts in der synthetischen Chemie. Darüber hinaus glaubte er, dass die chemische Synthese von Leben ein realistisches Ziel sei. In diesem Glauben erarbeitete er zu Beginn des 20. Jahrhunderts das Programm der „chemisch-synthetischen Biologie“ (Fischer, 1915). Dieses Programm ist ein frühes Beispiel für ein Konzept der Synthetischen Biologie, da er darin erstmalig erklärt, dass der Stoffwechsel lebender Zellen durch den Einsatz synthetischer Verbindungen beeinflusst und sogar verändert werden könne und solle, um neuartige Fette, Wachse und Proteine zu erzeugen. Fischer glaubte, dass Modifikation, Gestaltung und Erschaffung von Organismen mithilfe chemischer Verfahren eine Art Beginn eines großen Zukunftsprojekts seien. Er erwartete, dass neue, auf synthetische Weise erzeugte Lebensformen mit einer neuartigen oder alternativen chemischen Zusammensetzung fundamentale Vorteile gegenüber den bekannten Lebewesen haben würden und somit ein großes Potenzial besäßen, aus dem ein technologischer Nutzen für die Gesellschaft gezogen werden könnte (Fischer, 1907). Fischers Vision einer chemisch-synthetischen Biologie ist die einer spezifischen chemischen Modifikation von Organismen und ihrem Stoffwechsel für industrielle und technische Zwecke (Yeh/Lim, 2007).

Die ingenieurtechnische Sichtweise der Synthetischen Biologie geht von der Implementierung von Modularität, Standardisierung und präzisen Vorhersagemodellen auf diesem Gebiet aus – ähnlich wie bei der Entwicklung von elektronischer Software. Nach dieser Ansicht kann ein System als modular beschrieben werden, wenn seine Bestandteile funktionell getrennt und neu kombiniert werden können. Demnach ist die moderne Biologie in hohem Maße modular, angefangen mit den chemischen Grundbausteinen – Nukleotiden und Aminosäuren – bis hin zu höheren Organisationsebenen wie Zellen, Organismen und ganzen Populationen (Agapakis/Silver, 2009). Andererseits folgt die zeitgenössische chemisch-synthetische Biologie zumindest teilweise Fischers Vision mit dem eindeutigen Ziel, Vorläufersubstanzen in lebende Zellen einzuschleusen, die in der Natur nicht vorkommen und somit als nicht-kanonische Moleküle klassifiziert werden können (Budisa, 2004; Herdewijn/Marlière, 2009). Diese Moleküle haben ihren Ursprung größtenteils in den Labors der organischen Chemie, daher sind den strukturellen

Gestaltungsmöglichkeiten hierbei nahezu keine Grenzen gesetzt. Das langfristige Ziel könnte die Erzeugung von teilweise synthetischen lebenden Zellen mit vererbaren und spezifischen chemischen Veränderungen in Genom, Proteom und Metabolom sein.

Um dieses Ziel zu erreichen, muss man jedoch klassische mimetische Ansätze, die auf diesem Gebiet noch immer dominieren, aufgeben und versuchen, radikale chemische Veränderungen in den Monomeren biologischer Makromoleküle wie Nukleinsäuren, Proteinen oder Sacchariden, oder in Stoffwechszwischenprodukten zu nutzen (Budisa, 2005). Obwohl die letzten Jahrzehnte gekennzeichnet sind von der Forschung nach effizienten Möglichkeiten zur vollständigen oder teilweisen chemischen Synthese von Genomen, zusätzlichen Nukleinbasen und Basenpaaren, Alternativen für das Zuckerphosphatrückgrat der DNA, nicht-kanonischen Aminosäuren, die zur Proteintranslation geeignet sind, sowie dem Engineering von Transkriptions- und Translationsmaschinerie, steht das Gebiet noch ganz am Anfang einer langen Entwicklung zu einer chemisch-synthetischen Biologie. Deshalb sollte das Ziel in der Schaffung oder (zumindest) Neuprogrammierung von Lebewesen durch die Verwendung von nicht-kanonischen Molekülen liegen, um so neu entstehende Eigenschaften des Systems zu etablieren – entweder nach den Grundprinzipien oder durch künstliche Evolution. Sobald die Vermehrung künstlicher genetischer Sequenzen (synthetische Gene, synthetische Proteine, synthetische Stoffwechsel und Grenzsysteme) mit ständig wachsendem Anwendungsbereich gelungen ist, wird die Erzeugung von chemisch modifizierten Organismen (CMOs) mit neuartiger Biologie (Xenobiologie) möglich werden (Schmidt, 2010).

4.4 Top-down-Ansätze in der Synthetischen Biologie

Der Top-down-Ansatz beruht auf der Vorstellung, dass der derzeit direkteste Weg zu synthetischen Systemen darin besteht, die Komplexität existierender biologischer Systeme zu reduzieren. Man nimmt an, dass der Einsatz der Synthetischen Biologie beim Engineering komplexer Systeme und der Umgestaltung biologischer Komponenten zu minimalen Zellfabriken einen großen Fortschritt hin zu effizienten und sicheren biotechnologischen Anwendungen bedeutet. Dabei können Minimalzellen mit synthetischen Genomen (oft als „Chassis“ bezeichnet) als eine Art Plattform dienen, auf der praktisch jede gewünschte Verbindung erzeugt werden kann. Diese Plattformen werden für weitere Untersuchungen auf dem Gebiet der Synthetischen Biologie verwendet, darunter (a) die Konstruktion komplexer genetischer Schaltkreise, (b) die Ge-

staltung maßgeschneiderter Stoffwechselwege und (c) die Erzeugung orthogonaler biologischer Systeme. Man erwartet, dass diese Bestrebungen die Konstruktion von maßgeschneiderten Zellen ermöglichen werden.

Im Zentrum der gegenwärtigen Synthetischen Biologie stehen Bestrebungen, konstruierte biologische Systeme in zunehmend größerem Maßstab aufzubauen. Das Chassis oder die Zelle als Kernelement biologischer Systeme ist ein komplexes Netzwerk molekularer Wechselwirkungen mit einem erheblichen Potenzial für unerwartete Effekte, die eine korrekte Ausführung der Konstruktion stören können. Das trifft selbst für bezüglich ihrer Genomgröße relativ kleine Bakterienzellen zu, wie zum Beispiel *Escherichia coli*. Derzeit gibt es folgende Strategien zur Lösung dieses Problems:

- (1) *Reduktion der Genomgröße*: Dies kann entweder durch Reduktion der Genome bereits bestehender, industriell bewährter mikrobieller Stämme wie *E. coli* geschehen oder durch Modifikation oder De-novo-Synthese von außergewöhnlich kleinen Genomen. Man hofft, durch einen solchen Ansatz grundsätzliche Einblicke in die minimale Funktionsweise einer Zelle zu gewinnen. Darüber hinaus besteht das Ziel letztendlich im Bau einer Zelle von minimaler Komplexität, die vollständig verstanden werden kann, obwohl Ergebnisse aus jüngster Zeit darauf hinweisen, dass diese Idee in gewisser Weise naiv sein könnte (Yus, 2009). Es ist allgemein anerkannt, dass Organismen mit kleinen Genomen entweder durch einen Top-down- oder einen Bottom-up-Mechanismus entstanden sind. Die Minimalgenome von „Uroorganismen“ sind durch die Addition von Genen durch eine Art evolutionäres „Aufstocken“ entstanden (Bottom-up), die Minimalgenome „moderner“ Organismen dagegen durch die Reduktion des Genoms durch evolutionären Selektionsdruck (Top-down). Das Minimalgenom von Mykoplasmen beispielsweise entwickelte sich durch Selektionsdruck, allerdings wird diese Genomreduktion meist naiver Weise als eine Reduktion der Komplexität missverstanden, was nicht der Fall ist (für nähere Einzelheiten sei z. B. auf Feher et al., 2007 verwiesen).
- (2) *Anwendung von In-vitro-Plattformen*: In-vitro-Plattformen ermöglichen erheblich mehr Freiheitsgrade bei der Systemmanipulation und -analyse und reduzieren zugleich die Komplexität des Systems dadurch, dass die Zusammensetzung der Zelle zu einem bestimmten Zeitpunkt festgehalten und auf wesentliche Teile der Zelle (z. B. Membranen) verzichtet wird. Trotz der geringeren Komplexität werden zellfreie Systeme recht erfolgreich einge-

setzt, um sehr komplexe Synthesaufgaben zu bewältigen, vor allem die zellfreie Synthese von Proteinen. Der Schwerpunkt liegt dabei aber derzeit auf Anwendungen im Labormaßstab (Siegel et al., 2010).

- (3) „*Channelling*“: Neuere Ergebnisse weisen darauf hin, dass sich beispielsweise durch die Anordnung der Enzyme eines Stoffwechselwegs in einen geeignet organisierten Komplex die Reaktionsgeschwindigkeit erhöhen und die Konzentration von Zwischenprodukten verringern lässt. Der Komplex isoliert den betreffenden Signalweg räumlich vom restlichen Stoffwechsel. Obwohl dieser Ansatz für den Aufbau von Stoffwechselwegen sehr vielversprechend ist, stehen derzeit nur sehr elementare Werkzeuge zur Verfügung, um diese Strategie als eine Plattform zur Konstruktion von Systemen zu nutzen (Dueber et al., 2009).
- (4) *Orthogonalisierung biochemischer Systeme*: Prozesse, die losgelöst vom biologischen Kontext in lebenden Zellen stattfinden, werden mit dem Begriff Orthogonalität beschrieben. Die Robustheit und Leistung von künstlichen orthogonalen Vorgängen kann durch Ausnutzung natürlich vorkommender orthogonaler Systeme wesentlich verbessert werden. Zu den neuesten Entwicklungen gehört die Orthogonalisierung von Netzwerken durch systematisch evolvierende Proteine (Acevedo-Rocha/Budisa, 2011). Dabei ist es möglich, einige Interaktionen in einem Netzwerk zu entfernen oder zu schwächen und andere einzuführen oder zu verstärken, bis ein bestimmter biochemischer Prozess ohne (übermäßige) Störung durch andere Prozesse ablaufen kann. Ein archetypisches Beispiel ist die von Schultz entwickelte zweifache Selektionsstrategie zur Entwicklung orthogonaler tRNA-Aminoacyl-tRNA-Synthase-Paare, bei der eine positive Selektion angewendet wird, um erwünschte neuartige Interaktionen zu selektieren, und ein negativer Screen zum Einsatz kommt, um unerwünschte Wechselwirkungen zu eliminieren (Hoesl/Budisa, 2012). Diese Strategie wurde kürzlich auch auf die Selektion von orthogonalen Ribosomen angewendet, die nur mit einem spezifischen Satz von zellulären mRNAs interagieren, sowie auf ein orthogonales Ribosom-tRNA-Paar (Wang et al., 2007). Dieser Schritt ermöglicht die isolierte Implementierung neuartiger genetischer Codes auf einer kleinen Untereinheit des genetischen Materials – ein eleganter Ansatz zum Engineering des genetischen Codes, obwohl dabei ein zweiter Expressionskanal in der Zelle etabliert wird. Dies steht in einem gewissen Widerspruch zu dem derzeit zentralen Gedanken bei der Assemblierung von Biosystemen, nämlich der Standardisierung auf einen Kernbestand von genetischen Elementen.

Die Reduktion der Genomgröße und die Orthogonalisierung biochemischer Systeme waren im letzten Jahrzehnt die am weitesten fortgeschrittenen Bestrebungen in der Synthetischen Biologie (Panke, 2008). Während rationalisierte Genome unter Produktionsbedingungen getestet wurden, stellte sich dies für orthogonale Stämme mit verändertem genetischem Code als schwierig heraus, da der bislang erreichte Grad der Orthogonalisierung in der Regel unzureichend ist. Obwohl mit neuartigen Aminosäuren beladene tRNAs diese wie gewünscht in rekombinante Proteine einbauten, wurden dieselben Aminosäuren außerdem zu zahlreichen anderen Positionen im Genom fehlgeleitet, an denen das entsprechende Codon eigentlich für eine andere Funktion verwendet wird. Diese (unerwünschte) Nebenwirkung führt in der Regel zu schlechtem Zellwachstum und geringer Produktivität. In einzelnen Fällen konnten diese Probleme zwar überwunden werden, aber eine robuste Strategie, die an der Ursache des Problems ansetzt, fehlt. Die Entwicklung von neuen Methoden ist hier unerlässlich. Im Einklang damit stehen Bemühungen, DNA-Bauteile und -Vektoren (wie BioBricks) zu „standardisieren“, DNA- oder RNA-Schaltkreise und -Logikgatter zu generieren und Gene, Genome, Plasmide und Signalwege zu konstruieren, umzugestalten oder chemisch zu synthetisieren. Darüber hinaus wird erwartet, dass Bestrebungen zur Konstruktion der „Minimalzelle“ und das Konzept der „Orthogonalität“ auch zu unserem Verständnis von biologischen Prinzipien und dem Sinn des Lebens beitragen (Jewett/Forster, 2010).

4.5 Bottom-up-Ansätze in der Synthetischen Biologie

Unter dem Bottom-up-Ansatz versteht man die Erzeugung synthetischer Systeme von Grund auf durch schrittweise Steigerung der Komplexität und der funktionellen Diversität. Das Ziel ist, zukünftig ganze biologische Systeme aus anorganischer Materie herstellen zu können. Um Protozellensysteme (s. u.) aus elementaren Bausteinen (z. B. Aminosäuren, Lipiden, Nukleotiden oder synthetischen Monomeren) zu synthetisieren, können gesteuerte molekulare Assemblierungsprozesse eingesetzt werden. Die Grundbausteine können im Prinzip biologischen, organischen oder sogar anorganischen Ursprungs sein. Ziel des Bottom-up-Ansatzes ist es, einen vollständig künstlichen Organismus zu erschaffen, wenn irgendwann nicht nur das Genom, sondern auch alle anderen Komponenten *in vitro* synthetisiert werden können. Die Protozellforschung kann als ein Beispiel hierfür dienen.

Darüber hinaus kann der Bottom-up-Ansatz auch eine solide Basis für die Untersuchung von Proteinen oder enzymatischen Reaktionen in einem umgrenzten Raum (innerhalb eines

Vesikels von kontrollierter Größe) oder für die kontinuierliche Produktion und Freisetzung von bioaktiven Verbindungen an einer Oberfläche darstellen. Ein anderes interessantes Beispiel ist die Rekonstruktion von künstlichen Organellen als ein Modell zum Engineering von biologischen Kompartimenten und der Konstruktion von mimetischen Systemen. Man nimmt an, dass die allmähliche Steigerung der Komplexität beim Bau dieser Systeme zu einem besseren Verständnis entsprechender natürlicher Systeme beiträgt. Beispielsweise wurde die Durchführbarkeit der Protein- oder DNA-Produktion in von künstlichen Membranen begrenzten Kompartimenten bereits gezeigt (Luisi, 2007). Die unmittelbare Herausforderung besteht darin, diese verschiedenen Ansätze zu integrieren, um den molekularen Systemen eine neue Ebene der Komplexität hinzuzufügen, welche die Erhaltung der genetischen Information mit Synthesekapazitäten vereint.

Protozellen sind zellähnliche Strukturen, die räumlich durch eine wachsende Membran begrenzt sind und replizierbares biologisches Material enthalten. Idealerweise bilden sie selbstorganisierende chemische Systeme (z. B. Oparinsche Koazervate),³ die zur Selbstreproduktion und Selbstreplikation in der Lage sind. Die aktuelle Forschung auf diesem Gebiet setzt größtenteils die Tradition früherer Arbeiten über den Ursprung des Lebens fort.

Das Hauptziel besteht darin, den Übergang von komplexer, abiotischer Chemie zu einfacher Biologie zu verstehen und experimentell zu bewältigen, das heißt, die Entstehung komplexer chemischer Gefüge zu ermöglichen, die alle Kriterien für Leben erfüllen (siehe Abschnitt 4.7.2). Eine andere Motivation für die Protozellenforschung ist die Forschung zu künstlichem Leben („artificial life“, abgekürzt als AL), zu dem traditionell das In-silico-Design von Systemkonstruktionen gehört, die lebensähnliches Verhalten zeigen („soft AL“), sowie die Robotik („hard AL“). In diesem Zusammenhang bezeichnet man mit „wet AL“ die Erschaffung lebensähnlicher Protozellen auf Basis von Kohlenstoffverbindungen in Wasser, mit reproduzierbaren Sätzen autokatalytischer chemischer Zyklen, die in geeigneter Weise koordiniert sind. Zu diesen autokatalytischen Zyklen gehört die Replikation von Informationsträgern, die innerhalb der Membrangrenzen abläuft und mit inneren Stoffwechselreaktionen so gekoppelt ist, dass sie die Selbsterhaltung des Systems ermöglicht (Rasmussen et al., 2008). Im Idealfall sollten auch die Bedingungen für die Koordination von Wachstum und Formänderung der Zellmembran (d. h. Zellwachstum und -teilung) festgelegt sein. Auf der Ebene einfacher physikochemischer Geset-

3 Vgl. zum Konzept von Oparin z. B. Vasas et al., 2012.

ze laufen die Prozesse des Vesikelwachstums und der Reproduktion als eine Folge der Unterbrechung der Raumsymmetrie einer synthetischen Protozelle ab (Szathmary et al., 2005). Schließlich kann die Protozellenforschung in der Medizin zur Konstruktion von Systemen zur Arzneimittelverabreichung eingesetzt werden, beispielsweise zum Verkapseln von Arzneimittelcocktails in Liposomen und verschiedenen Nanopartikeln (Luisi/Stano, 2011; vgl. zu weiteren biomedizinischen Anwendungen der Synthetischen Biologie auch Kapitel 5 in diesem Band).

Es gibt zwei Modelltypen für von Grenzmembranen umhüllte Protozellen. Autotrophe Modelle enthalten autokatalytische Reaktionsnetzwerke, die in einer räumlich lokalisierten Weise evolviert sind, um die für die Zellerhaltung notwendigen Bausteine in situ zu erzeugen (dynamischer Stoffwechsel). Heterotrophe Modelle nehmen an, dass Leben in einer chemisch komplexen Umwelt evolviert, die als externe Quelle von Nährstoffen und Energie für Protozellen dient. In beiden Modellen sind aus Lipiden bestehende Membranen die erste Wahl für die Umhüllung oder Kompartimentalisierung komplexer chemischer Zyklen und der damit verbundenen Moleküle wie Polymere (z. B. Nukleinsäuren, Proteine). Theorie, Simulation und experimentelle Arbeiten über Membranen für Protozellen beinhalten gewöhnlich verschiedene einfache oder autokatalytische Lipide, die zur Selbstorganisation in der Lage sind. Solche Strukturen werden außerdem bezüglich ihrer Eignung untersucht, die Permeabilität der Lipiddoppelschicht zu erhöhen (z. B. durch Addition von Kanälen, Änderung des elektrischen Felds) oder der Fähigkeit, eine innere Mikrotubulation (d. h. eine festgelegte innere Architektur) zu erzeugen. Darüber hinaus konzentrierte sich die Forschung bislang auf die reguläre oder fotoinduzierte Bildung oder Fusion von Liposomen beziehungsweise Vesikeln. Die Integration von Selbstreproduktion, Selbstreplikation und Selbstorganisation zählt nach wie vor zu den Hauptschwierigkeiten der Protozellenforschung (Szostak, 2011).

Besonders interessant ist die Möglichkeit, Membransysteme zu verwenden, um Mikrocontainer oder Minimalsysteme zur Umhüllung verschiedener biochemischer Prozesse zu erzeugen. Eine solche künstliche Protozelle könnte beispielsweise ausschließlich Nukleinsäuren oder gereinigte „molekulare Maschinen“ (z. B. das Proteintranslationssystem aus *E. coli*) enthalten. Komplexere Versionen von Protozellen sind zur enzymgesteuerten Vesikelreplikation, Vesikelreplikation mit gekoppelten RNA-Matrizen oder zu fotochemisch gesteuertem Wachstum und Replikation von Zellhülle und -kern in der Lage. Leider ist die Terminologie auf diesem Gebiet noch immer nicht standardisiert. So versteht man zum Beispiel unter „enzymgesteuerten“ oder „informationslosen“ Protozellen Vesikel mit enzymvermittelten Stoffwechselreaktio-

nen, die eine Membrandestabilisierung verursachen und schließlich zur Zellteilung führen können. Chemoton-ähnliche Protozellen (vgl. Abschnitt 4.7) sind so konstruiert, dass bestimmte stöchiometrisch gekoppelte autokatalytische Zyklen ablaufen, während Turing-ähnliche Protozellen eine sehr einfache Kopplung zwischen Stoffwechsel und Membrandynamik aufweisen. „Ribocells“ sind hypothetische RNA-basierte Protozellen, die minimalen Ribooorganismen ähneln sollen: Ein umhülltes Ribozym würde darin die Vesikelmembran komponente synthetisieren, und ein zweites Ribozym sich selbst und das erste replizieren. „Transduktionsgesteuerte“ Protozellen besitzen ein effizientes Protozellensystem mit DNA und RNA sowie ein in die Membran eingebettetes Untersystem, das aus zwei Proteinen besteht, nämlich Bakteriorhodopsin (eine lichtaktivierte Protonenpumpe) und ATPase. Dabei treibt der transmembrane Protonengradient die ATP-Syntheseaktivität der ATPase an und ermöglicht so einen einfachen Stoffwechsel innerhalb der Protozelle. Dies sind nur einige der wichtigen und wertvollen Beiträge zur Protozellenforschung, die in der gegenwärtigen Literatur zu finden sind. Aktuelle Übersichtsartikel zu diesem Thema finden sich bei Szostak, Luisi und Mitarbeitern (Budin/Szostak, 2010; Schrum et al, 2010; Luisi, 2006).

4.6 Systems Engineering und Synthetische Biologie

Die vorherrschende Meinung unter Forschenden auf dem Gebiet der Synthetischen Biologie ist, dass die Biologie sich ohne Engineering nicht erheblich weiterentwickeln kann, und die Ingenieurtechnik in diesem Jahrhundert durch die Biologie beherrscht werden wird. Die Synthetische Biologie macht sich eine Strategie zu eigen, die häufig von Ingenieurinnen und Ingenieuren angewendet wird, um Einblicke in die Funktionsweise einer Reaktion, Maschine oder eines Prozesses zu gewinnen. Dieser Ansatz:

„[...] is driven by the notion that only when principles borrowed from mathematics, fluid mechanics, materials science, etc. are applied to classical problems in developmental biology, will sufficient comprehension be achieved to permit successful understanding and therapeutic manipulation of embryos. As it now stands, biologists seldom possess either skills or interest in those areas of endeavour. Thus, we have determined that it is easier to educate engineers in the principles of developmental biology than to help biologists deal with the complexities of engineering.“ (Gordon/Melvin, 2003)

Die Perspektive des systemweiten Engineerings ist demnach ein typischer Aspekt der Synthetischen Biologie. Zum Beispiel bezeichnet „reverse engineering“ den Prozess der Analyse eines Systems mit dem Ziel, die Bestandteile des Systems und ihre Wechselbeziehungen zu identifizieren und Repräsentationen des Systems in einer anderen Form oder auf einer höheren Abstraktionsebene zu erzeugen. Die meisten traditionellen Fachgebiete der Biologie sind auf die Analyse und Aufgliederung biologischer Systeme ausgerichtet und können somit als „reverse engineering“ betrachtet werden. Im Gegensatz dazu betreibt die Synthetische Biologie „forward engineering“ mit dem Ziel, biologische Systeme zu konstruieren und synthetisieren, die so in der Natur nicht vorkommen. Die Synthetische Biologie wirft dabei einige zentrale Fragen auf. Die erste Frage ist, wie sich biologische Grundfunktionen und -prozesse in künstliche zelluläre Einheiten integrieren lassen. Die nächste Frage ist, wie sich umgrenzte Systeme erzeugen lassen, die zur Selbsterhaltung und sogar zur Evolution in der Lage sind. Eine weitere Herausforderung ist die Erschaffung eines vollständig synthetischen biologischen Systems. Schließlich stellt sich die Frage, welche Voraussetzungen die Synthetische Biologie erfüllen muss, um durch Konstruktion, Umgestaltung und Engineering funktioneller Einheiten und Systeme, die skalierbar und für synthetische Zwecke geeignet sind, einen wesentlichen Beitrag zur Biotechnologie zu leisten. Die auf bakteriellen Biokatalysatoren basierende industrielle Biotechnologie ist beispielsweise generell von der unter den Betriebsbedingungen mangelnden Stabilität der natürlichen oder gentechnisch veränderten Mikroorganismen betroffen. Ursache hierfür ist oft eine nicht beabsichtigte und dennoch unvermeidliche Verbindung zwischen dem nativen biologischen Programm des Wirts und der Expression der gewünschten enzymatischen Aktivitäten. Die Ansätze der Synthetischen Biologie zur Lösung dieses Problems beinhalten die Konstruktion künstlicher Zellfabriken, zum Beispiel durch Orthogonalisierung der Proteinsynthese, und die Verknüpfung mit dem Engineering von Stoffwechselwegen, um eine ökonomische Produktion von Proteinen aus Salz, Wasser, Spurenelementen und einfachen Kohlenstoffquellen zu ermöglichen.

Die Analyse der Wechselwirkungen einer großen Anzahl von natürlichen und künstlichen biologischen Modulen erfordert eine quantitative Modellierung und systemtheoretische Konzepte. Aus ingenieurtechnischer Sicht übersteigen biologische Systeme jedoch bei weitem die Komplexität künstlicher technischer Systeme. In der Elektrotechnik und der chemischen Verfahrenstechnik ist die Konstruktion neuer Systeme heutzutage ohne eine entsprechende modellbasierte Systemanalyse undenkbar. Die Erfahrung zeigt, dass systemweite Wechselwirkungen in komplexen Netzwerken auf Grundlage eines rein qualitativen Verständnisses kaum steuerbar

sind. Eine quantitative Beschreibung der relevanten Untersysteme ist für eine erfolgreiche Konstruktion neuartiger biologischer Systeme dringend erforderlich. Wie genau ein Modell ein Untersystem für ein bestimmtes Konstruktionsvorhaben beschreiben muss, wird ein Thema zukünftiger systemtheoretischer Forschung sein.

Die Systembiologie hat in den letzten zehn Jahren bereits eine Grundlage an quantitativem biologischen Wissen und mathematischen Werkzeugen etabliert. Zu den neuen Herausforderungen der Synthetischen Biologie zählt die Erweiterung dieser Werkzeuge vor allem in zwei Richtungen. Die erste Richtung betrifft die Konstruktion funktioneller Systeme, dazu gehören Multi-Scale-Aspekte, Verfahren zur Behandlung von Modularität, die Standardisierung von Schnittstellen sowie die Abstimmbarkeit und Komponierbarkeit von Modulen. Die zweite Richtung betrifft die Konstruktion robuster Systeme, die Behandlung stochastischer Systemeigenschaften und die Frage der erforderlichen Genauigkeit von Modellen. In den meisten neueren Studien auf dem Gebiet der Synthetischen Biologie geschieht die Modellierung anlässlich von experimentellen Ergebnissen und führt so zu zahlreichen unzusammenhängenden Ansätzen. Stattdessen sollte in Zukunft die experimentelle Arbeit durch theoretische Ansätze vorangetrieben werden. Auf diese Weise ließe sich eine solide Grundlage für die integrierte Konstruktion synthetischer biologischer Systeme schaffen. Die synthetische Chemie lehrt, dass das ganze Leben gleichsam „in der Sprache der Chemie geschrieben ist“. Selbstverständlich erfordert eine vollständige Theorie lebender Systeme nicht nur die Kenntnis sämtlicher biologischer Details, sondern muss außerdem den Gesetzen der Chemie und Thermodynamik sowie einem komplexen mathematischen Formalsystem gehorchen (Binder/Danchin, 2011).

4.7 Definition des Lebens – das Chemoton-Konzept

4.7.1 Chemoton und Autopoiesis

Da das Konzept von der Minimalzelle beinahe zu einem Dogma in der Synthetischen Biologie geworden ist, ist es notwendig, genau zu untersuchen, was eigentlich das Minimalsystem ist, das bereits die Eigenschaften und Kennzeichen von „Leben“ aufweist und aus dem nichts entfernt werden kann, ohne dass diese Eigenschaften verloren gehen. In diesem System wäre nichts überflüssig, da es lediglich aus der minimalen Anzahl von Elementen besteht, die für das Vorhandensein der gegebenen quantitativen Eigenschaft notwendig ist. In der Kristallografie beispielsweise ist die kleinste Einheit, die nicht weiter reduziert werden kann, die Elementarzelle. Doch

was ist die Grundeinheit in der Biologie? Dies sollte in der Tat eine wichtige Frage der Synthetischen Biologie sein, denn bevor der Arbeitsplan zur Herstellung von „synthetischem Leben“ festgelegt werden kann, muss das einfachste System definiert werden, dessen Attribute als „Leben“ bezeichnet werden können.

Das bereits 1978 von Gánti vorgeschlagene Chemoton-Modell stellt ein mögliches abstraktes Modell zur Definition der minimalen Voraussetzungen für Leben dar – basierend auf einer chemischen Denkweise (Bensaude-Vincent, 2009). Der Begriff „Chemoton“ ist abgeleitet aus „chemisches Automaton“. Es ist wahrscheinlich das beste aller bestehenden Modelle, da es Leben von der Bottom-up-Perspektive aus eindeutig definiert. Es ermöglicht, zu verstehen, wie es möglich ist, ein chemisches Supersystem, das zur Selbstreproduktion in der Lage ist, aus mehreren Untersystemen zu organisieren, die von einem zentralen Programm gesteuert werden.

In seiner chemischen Denkweise ähnelt das Chemoton-Konzept dem Autopoiesis-Konzept von Maturana (Varela et al., 1974), ist aber nicht mit diesem identisch. Letzteres wird verwendet, um die charakteristischen Organisationsmerkmale lebender Organismen oder lebender Systeme mithilfe der Systemtheorie zu definieren. Ein autopoietisches System ist rekursiv organisiert, das heißt, das Ergebnis der funktionellen Wechselwirkung seiner Komponenten ist durch die Organisation, die diese Komponenten produziert, genau definiert. Autopoietische Einheiten sind in abgegrenzten Strukturen organisiert, wie Zellkern, verschiedene Organellen, Zellmembran und Zytoskelett, und durch einen externen Strom von Molekülen und Energie gekennzeichnet. Diese Form der Organisation unterscheidet sich von nicht lebenden Systemen darin, dass sie zur kontinuierlichen Erhaltung der organisierten umgrenzten Struktur in der Lage ist.

In diesem Sinne kann das Chemoton als eine autopoietische Einheit betrachtet werden, ein System, das aufgrund eines inneren Netzwerks von Reaktionen, die die Systemkomponenten regenerieren, zur Selbsterhaltung in der Lage ist. Trotz der ständigen chemischen Umwandlungen, die in der lebenden Zelle ablaufen, baut sich das System nicht ab – inhärente Stabilität oder Homöostase ist eine organisatorische Eigenschaft lebender Zellen. In diesem Zusammenhang lässt sich Homöostase als die Beständigkeit der inneren Umgebung eines lebenden Systems definieren.

4.7.2 Grundkriterien des Lebens

Das Chemoton-Modell ist nicht nur einfach, es ist auch universell, da es jede Art von lebendem System repräsentieren kann, selbst möglicherweise existierende außerirdische Lebensformen. Das ist möglich, weil „Leben“ nicht als die Eigenschaft einer besonderen Art von Molekülen im chemischen Sinne (also chemischen Verbindungen wie Proteinen, Nukleinsäuren, Polysacchariden) betrachtet wird, sondern als eine Eigenschaft von in spezifischer Weise organisierten Systemen (Gayon, 2010). Leben ist demnach stets die Eigenschaft eines ganzheitlichen Systems.

Das Chemoton ist ein solches System mit drei grundlegenden Untersystemen: (i) eine Grenzmembran, (ii) ein Zytoplasma und (iii) ein Polymer als Informationsträger sowie eventuell weitere Komponenten. Die Grenzmembran, der Intermediärstoffwechsel und der Informationsträger werden autokatalytisch, also durch Selbstreproduktion, synthetisiert. Aus ihrem Zusammenspiel ergibt sich ein chemisches Supersystem. Das Chemoton stellt verglichen mit zeitgenössischen Prokaryonten eine einfachere Stufe der Komplexität dar. Es ist erwähnenswert, dass Gánti sich nicht mit dem Ursprung des genetischen Codes beschäftigte (Gánti, 2003).

Welche Attribute können einem System zugeschrieben werden, das als „lebend“ definiert wird? Genügt es zu wissen, dass funktionelle lebende Systeme in der Lage sind, zu arbeiten unglücklich (d. h. chemische Energie in Arbeit umzuwandeln), oder dass sie in der Lage sind, ständig chemische Umwandlungen (Reaktionszyklen), Steuerung, Regulation und Energieübertragung in Lösung durchzuführen? Um diese Fragen beantworten zu können, unterscheidet Gánti (1975) zwischen realen und potenziellen Kriterien für Leben (Tabelle 1).

Tabelle 1: Eigenschaften lebender Systeme nach Gánti

reale (= absolute) Kriterien	potenzielle (= fakultative) Kriterien
inhärente Stabilität	Wachstum
Stoffwechselprozesse	Reproduktion
Regulations- und Steuerungsprozesse	Vererbungs- und Evolutionsvorgänge
Aufbau aus separaten Untersystemen	Mortalität (und Recycling des organischen Materials)
Untersystem(e) in Funktion als Informationsträger	

Quelle: eigene Darstellung

Obwohl diese Kriterien logisch und einfach sind, sollen sie hier nicht als eine vollständige Theorie des Lebens präsentiert werden, sondern vielmehr als ein Satz verständlicher Definitionen betrachtet werden, die bei der eindeutigen Formulierung von Zielsetzungen und der Planung von Experimenten auf dem Gebiet der chemischen-synthetischen Biologie helfen sollen.

4.7.3 Das Chemoton-Konzept im Verhältnis zu Darwinscher Evolution und Reproduktion

Leben ist ein chemisches Phänomen. Was heute in der Umgangssprache als „Forschung zu künstlichem Leben“ oder „synthetische Zellen“ bezeichnet wird, basiert, wie oben erläutert, auf der Verwendung einer ungenauen Terminologie. Derartige Studien konzentrieren sich hauptsächlich auf Vererbung, Mutationen und differenzielle Reproduktionskapazitäten (d. h. Evolution) von bereits vorhandenen lebenden Systemen. Daher lautet die korrekte Bezeichnung für diese Arbeiten „künstliche Evolution“ (Gánti, 2003); denn sie haben mit den von Gánti definierten fundamentalen Prinzipien des Lebens nichts zu tun (Evolution ist laut Gánti keine inhärente Eigenschaft lebender Systeme). Demgegenüber vertritt Dobzhansky, eine der großen Autoritäten der Evolutionsbiologie des 20. Jahrhunderts, die Ansicht, dass „nothing in biology makes sense except in the light of evolution“ (Benner et al., 2011) – eine Meinung, die in der heutigen Biologie nahezu unbestritten ist. Selbst Chemiker wie Steven Benner, die sich mit fundamentalen Problemen biologischer Komplexität befassen, definieren Leben als „a self-sustaining chemical system capable of Darwinian Evolution“ (Griffiths, 2009). In dem ausgezeichneten Essay mit dem Titel „What does it mean to be alive?“, der von Rosens mathematischem Konzept metabolischer Kreisläufe handelt, bemerken Cornish-Bowden und Cárdenas richtigerweise:

„The point here is that staying alive was the problem that needed to be solved first: the early organisms could not begin to reproduce or evolve until they had learned how to stay alive, maintaining organizational invariance in the face of changing conditions.“
(Cornish-Bowden/Cárdenas, 2006)

Zusammenfassend kann man sagen: Das Chemoton als eine abstrakte Grundeinheit hat alle Merkmale lebender Systeme, da es aus drei funktionell unabhängigen autokatalytischen Untersystemen besteht. Das metabolische chemische Netzwerk ist integriert oder gekoppelt mit dem

Matrizenpolymer (Untersystem mit genetischer Information) und eingeschlossen durch die Grenzmembran. Das Chemoton funktioniert durch die präzise stöchiometrische Kopplung dieser drei Untersysteme.

4.8 Definieren eines minimalen Bakteriengenoms

4.8.1 Genomreduktion und Neuordnung von Codons

Die Aminosäurezusammensetzung von Proteinen hängt mit dem charakteristischen GC- oder AT-Gehalt der genomischen DNA eines bestimmten Organismus zusammen, der wiederum durch dessen Evolutionsgeschichte sowie seiner taxonomischen und phylogenetischen Stellung bedingt ist. Neben Unterschieden zwischen einzelnen Arten gibt es Unterschiede im GC-Gehalt auch in verschiedenen Abschnitten des Genoms einer bestimmten lebenden Zelle oder eines bestimmten Organismus. Der CG-Gehalt der DNA verändert sich durch den Mutationsdruck, wie von Kimura (1983) dargestellt. Zudem finden sich in jedem Organismus und sogar jeder Organelle individuelle Abweichungen bei der Verwendung der 61 Aminosäurecodons und in der tRNA-Population, die in direkter Beziehung zur Genomzusammensetzung stehen (Santos/Tuite, 2004).

Der genetische Code wurde in einem frühen Stadium der Evolution gleichsam „eingefroren“ (Crick, 1968), als die Genome kleiner waren und Substitutionen tolerieren konnten, die in den heutigen – wesentlich größeren – Genomen eine schädliche Wirkung hätten. Dasselbe wurde in Organellen wie Chloroplasten und Mitochondrien beobachtet, deren reduzierte Genome zu einer eingeschränkten Verwendung und sogar Neuordnung von Codons geführt haben. Organellen mit kleineren Genomen, die nur für wenige Polypeptide codieren (ca. 10–20 Proteine) sind davon abhängig, eine Vielzahl von Biomolekülen aus ihrer „Wirtszelle“ (d. h. Proteine, die von Genen im Zellkern codiert werden) zu importieren (Berg, 2002). Das interessanteste Phänomen sind sicher Variationen in der Translation des genetischen Codes in tierischen Mitochondrien. Hier ist zum Beispiel UGA kein Stopp-Codon, sondern steht für die Aminosäure Tryptophan, und das Codon AUA ist Methionin zugeordnet, während es im Zytosol für Isoleucin reserviert ist. Die Codons AGA und AGG sind nicht wie im Zellkern Arginin zugeordnet, sondern führen zum Translationsstopp. Eine solche „Aufweichung“ des genetischen Codes findet man auch bei obligatorischen intrazellulären Parasiten wie *Mycoplasma*, das als eine degenerierte Form eines grampositiven Bakteriums betrachtet wird (Ribas de Pouplana/Schim-

mel, 2004). Natürlich vorkommende Variationen des genetischen Codes sind sehr selten, da eine solche Neuordnung von Codons innerhalb von großen, komplexen, relativ jungen Genomen sehr viel schwieriger wäre.

Mögliche Mechanismen der Codon-Neuordnung in minimierten Genomen sind für das Gebiet der Synthetischen Biologie natürlich von größter Bedeutung. Die Untersuchung dieser Mechanismen könnte insbesondere dazu geeignet sein, das Ergebnis von Experimenten zum Engineering des genetischen Codes zu erklären (Wiltschi/Budisa, 2007). In der Natur geschieht die Neuordnung von Codons über einen relativ langen Evolutionszeitraum; mögliche Mechanismen dieses Prozesses werden hauptsächlich durch zwei Theorien erklärt. Die „codon capture theory“ (Osawa/Jukes, 1989) postuliert, dass ein Sinn- oder Stopp-Codon infolge des Mutationsdrucks durch GC-AT-Transitionen aus dem offenen Leseraster verschwindet. Wenn Mutations- und Selektionsdruck die Zusammensetzung der DNA-Sequenz wieder ändern, (z. B. den AT-Gehalt erhöhen oder erniedrigen), werden die wieder auftauchenden Codons von einer bestimmten tRNA „gefangen“, die sie mit einer neuen Aminosäure verknüpft. Alternativ schlägt die „ambiguous intermediate theory“ (Schultz/Yarus, 1996) vor, dass die Neuordnung eines Codons über ein Zwischenstadium verläuft, in dem das Codon von zwei tRNAs erkannt wird, die verschiedenen Aminosäuren zugeordnet sind. Bei einer Änderung des Selektionsdrucks könnte dieser Zwischenzustand zu einer neuen, eindeutigen Zuordnung im Code führen, besonders, wenn aus dieser Neuordnung ein positiver Nutzen erwächst.

4.8.2 Definition des minimalen Bakteriengenoms

Biologische Systeme sind in der Lage, unter verschiedenen Umweltbedingungen stabile Phänotypen zu erhalten, was mit dem Begriff „Robustheit“ bezeichnet wird. Sie können auch den Verlust funktioneller Komponenten durch Inaktivierung von Genen kompensieren. Beispielsweise war es durch Kombination mehrfacher Deletionen in den Chromosomen von *E. coli* und *B. subtilis* möglich, Stämme mit unerwarteten vorteilhaften Eigenschaften zu identifizieren. Noch wichtiger war es, dass diese Arbeiten zu neuartigen Methoden zum Engineering von Chromosomen führten, die mehrfache Deletionen mit ausgeklügelten Systemen zum Monitoring der Phänotypen kombinierten (Fabret et al., 2002).

Die grundlegende praktische Motivation hinter diesen Bemühungen ist die Konstruktion von Stämmen mit modifizierten Regulationsnetzwerken und optimierten Stoffwechseleigenschaften. Die Deletion von großen, entbehrlichen Chromosomenbereichen soll einfachere

Stämme mit reduziertem Energiebedarf zur Selbsterhaltung ergeben. Dies kann durch Entfernung von potenziell energieaufwändigen Prozessen wie Flagellenbildung, Sporulation, Biofilmbildung und dergleichen erreicht werden.

Zu diesem Ziel wurden 101 proteinkodierende Gene von *Mycoplasma genitalium* inaktiviert, wobei das Bakterium seine Lebensfähigkeit behielt (Gibson et al., 2010). Diese Gene sind demnach entbehrlich, das heißt für das Wachstum nicht essenziell. Es ist zu erwarten, dass weitere Experimente in diese Richtung zu einem fundamentalen Durchbruch im Verständnis der Systembiologie dieser Organismen führen. Beispielsweise könnten diese Experimente zu einem besseren Verständnis der Beziehungen zwischen dem Translationsapparat, der globalen Organisation metabolischer Netzwerke und der Regulation von Zellwachstumsprozessen führen. Darüber hinaus wären die Ergebnisse von industriellem Nutzen – bislang werden Bakterienstämme mit reduzierten Genomen in der Regel systematisch geprüft, um genetisch stabile Phänotypen zu finden, die ein optimales Gleichgewicht zwischen Wachstumsrate, Proteinbiosynthese, Nährstoffquellen, niedrigem Energiebedarf und Abfall aufweisen.

Obwohl Bakteriengenome sich in ihrer Größe und ihrem Genrepertoire stark unterscheiden, müssen selbst kleine Genome alle Informationen enthalten, die es der Zelle erlauben, die grundsätzlichen Funktionen zu erfüllen, die zur Aufrechterhaltung des Stoffwechselgleichgewichts notwendig sind (Mushegian, 1999). Eine Minimalzelle kann einfache Metaboliten aus ihrer Umgebung importieren, nicht aber funktionelle Proteine, daher sind Minimalzellen zur Ausführung essenzieller Funktionen auf ihre eigenen Genprodukte angewiesen. Es ist schwierig, die Untergrenzen für die Größe des minimalen Bakteriengenoms und -proteoms zu schätzen. Beispielsweise besitzt *M. genitalium* mit einem Genom von 540 kb 480 Protein codierende Gene, während der Endosymbiont von Blattläusen, *Buchnera aphidicola* (450-kb-Genom), über nur 400 Protein codierende Gene verfügt (Lagesen et al., 2010). Nach Mushegian und Koonin sollen schätzungsweise 250 konservierte Gene für eine „moderne“ Zelle notwendig und ausreichend sein (Mushegian/Koonin, 1996). Diese Zahl basiert auf der Annahme, dass Gene, die gemeinsam in unterschiedlichen Genomen vorkommen, wahrscheinlich essenziell sind. Eine weitere Reduktion des Minimalgenoms wird auch als Strategie in Betracht gezogen, um das genetische Material des letzten gemeinsamen Vorfahrens von Prokaryonten und Eukaryonten zu rekonstruieren (Koonin et al., 1997).

In diesem Sinne sind prokaryontische Genome von Endosymbionten Beispiele für natürlich evolvierte Minimalzellen, ihre Analyse kann daher Licht auf die minimalen Voraussetzungen

zur Aufrechterhaltung von Leben werfen. Obligatorische intrazelluläre Parasiten wie *Mycoplasma* oder Zellen mit einem wirtsgebundenen Lebensstil leben in relativ unveränderlichen Nischen, die nur eine begrenzte Anpassungsfähigkeit erfordern. Es wirkt somit nur ein geringer Selektionsdruck auf die Erhaltung von Genen, die in einer geschützten Umgebung nicht erforderlich sind. Aus diesem Grund ist es kaum möglich, die Idee einer Minimalzelle exakt zu definieren – abhängig von Umweltbedingungen oder experimentellen Zielen lassen sich jeweils verschiedene essenzielle Funktionen bestimmen. Es könnte demnach eine Vielzahl von Minimalzellen geben (Mushegian, 1999).

Das bedeutet, dass das Phänomen der metabolischen Komplementierung in endosymbiontischen Bakterien diese nicht zu den optimalen Kandidaten für die Suche nach der Minimalform von Leben macht. Der Schwerpunkt sollte daher auf der Entdeckung von natürlich evolvierten Zellen mit eingeschränkten (reduzierten) Genomen liegen. Dabei sollte durch vergleichende Analyse definiert werden, welche Zellkomponenten notwendig und ausreichend für die Aufrechterhaltung von Leben sind, und wie dieselben Grundfunktionen des Lebens von einer Vielzahl von (oft nicht verwandten) Genen ausgeführt werden (Mushegian, 1999).

4.8.3 Grundanforderungen an die Minimalzelle

Die Konstruktion von Minimalzellen durch Top-down-Ansätze ist in chemischer Hinsicht ein aufwändiges und schwieriges Unterfangen. Selbst die kleinsten heute noch lebenden Zellen besitzen ein sehr komplexes Transkriptions-Translations-System und äußerst komplizierte Stoffwechselsysteme und Erbanlagen. Dagegen ist die natürliche Reduktion von Genomen in erster Linie mit dem Übergang von einer freilebenden zu einer wirtsabhängigen Lebensweise verbunden. Man sollte allerdings bedenken, dass das Konzept eines Minimalgenoms bestimmte Umweltbedingungen voraussetzt, im Idealfall (d. h. in einer nährstoffreichen Umgebung) stehen alle essenziellen Nährstoffe zur Verfügung ohne Stressbedingungen zu verursachen.

Im Folgenden wird versucht, Prozesse und Strukturen zusammenzufassen, die in der aktuellen Literatur als unbedingt essenziell für das Funktionieren von Minimalzellen definiert werden (Walde, 2010):

- (1) *Informationsspeicherung und -verarbeitung* – Speicherung und Verarbeitung von DNA (Stoffwechsel und Synthese, Replikation, Reparatur, Restriktion und Modifikation) und RNA (Stoffwechsel und Synthese, Transkription, Translation, Degradation). Die größte

- Kategorie konservierter Gene (ca. 80 Gene) ist an der Proteinsynthese beteiligt (Gil et al., 2004).
- (2) *Proteinassemblierung, -prozessierung, -faltung und -sekretion* – Biologische Funktionen sind vor allem das Ergebnis der Wechselwirkung von Proteinen, die sich zu Proteinkomplexen und Netzwerken organisieren. Hochdynamische Proteinkomplexe sind die Basisebene der Organisation des zellulären Proteoms. Größere Zusammenschlüsse – oft als molekulare Maschinen bezeichnet – spielen bei allen wichtigen zellulären Prozessen eine entscheidende Rolle. Proteinkomplexe interagieren miteinander und erzeugen verschiedene Netzwerkebenen – ein Merkmal, das entscheidend für die Aufrechterhaltung der zellulären Homöostase und Funktionen ist. Erste strukturelle Genomexperimente unter Einbeziehung von bekannten Komplexen in *M. pneumoniae* als Modellorganismus führten zu dem Schätzwert von ungefähr 300 Kopien pro molekularer Maschine (140 für das Ribosom, 100 für GroELs, 100 für Pyruvatdehydrogenase; vgl. Kühner et al., 2009).
 - (3) *Zelluläre Strukturen und Prozesse* – Zellwand, Form der Zellorganellen und Transport von Substraten müssen ebenfalls in Betracht gezogen werden. Minimalzellen können viele essenzielle Metaboliten nicht selbst synthetisieren und sind auf den Import dieser Substanzen aus der Umwelt angewiesen. Deshalb müssen zur Aufnahme der notwendigen Moleküle zahlreiche Transportsysteme vorhanden sein.
 - (4) *Energie- und Intermediärstoffwechsel* – Man setzt voraus, dass Minimalzellen in einem nährstoffreichen Medium leben und wichtige Metaboliten uneingeschränkt zur Verfügung stehen. Dazu gehören Aminosäuren, stickstoffhaltige Basen (Adenin, Guanin, Uracil), Fettsäuren, Glukose, Vorstufen von Coenzymen (Nikotinamid, Riboflavin, Folat, Pantothenat und Pyridoxal) und Glukose als das Hauptsubstrat von Glykolyse, Glukoneogenese, Pyruvatstoffwechsel, Zitratzyklus und Pentosephosphatweg. Schließlich sind Elektronenübertragungsmechanismen und der Aufbau eines elektrochemischen Protonengradienten erforderlich. In bisherigen Minimalgenomen ist der Intermediärstoffwechsel normalerweise auf die ATP-Synthese reduziert, während Fettsäure-, Nukleotid- und Aminosäuresynthese fehlen (obwohl die Existenz einiger „salvage pathways“ nicht ausgeschlossen werden konnte, Yus et al., 2009).

Grundsätzlich ist die Idee eines Minimalgenoms auf der derzeitigen Entwicklungsstufe noch ein konzeptionelles Werkzeug für theoretische Betrachtungen über die minimalen Vorausset-

zungen für heutiges zelluläres Leben und über mögliche experimentelle Wege zur Konstruktion noch einfacherer zellulärer Systeme auf Basis eines enzymvermittelten Stoffwechsels und nukleinsäurebasierter Erbanlagen.

4.9 Xenobiologie

4.9.1 Gerichtete Evolution alternativer chemischer Zusammensetzungen

Lebende Systeme können näherungsweise als chemische Maschinen betrachtet werden, die von einem genetischen Programm gesteuert werden. Das Grundmerkmal von Leben sind standardisierte und koordinierte chemische Reaktionen in Form von gekoppelten Kreisprozessen (Stoffwechsel und Informationstransduktion), wobei Enzyme und Enzymkomplexe eine wichtige Rolle bei der Aufrechterhaltung der Homöostase spielen. Alle für die anfängliche Entwicklung und Erhaltung der Zelle notwendigen Informationen sind in Form von Nukleinsäuren gespeichert, die nach den Regeln des genetischen Codes zu Proteinen translatiert werden.

In der Synthetischen Biologie ist man davon überzeugt, dass in Zellpopulationen mit vollständig integrierten neuartigen chemischen Prozessen unerwartete Lebensformen und Eigenschaften entstehen würden. Deshalb soll die Synthese chemisch modifizierter Biomoleküle (wie Aminosäuren, Nukleinbasen oder enzymatischen Kofaktoren), die in der klassischen biomimetischen Chemie eingesetzt werden (die jene Moleküle gewöhnlich außerhalb der Zelle untersucht), nur der erste Schritt auf dem Weg zur Änderung der zellulären Zusammensetzung sein. Der Grundgedanke ist, dass die Synthetische Biologie unter Verwendung von biologischen Materialien die Synthetische Chemie in der gleichen Weise nachahmen sollte, wie die Chemie natürliche Strukturen und Prozesse nachahmt. Im fortgeschrittenen Stadium sollen die funktionellen Eigenschaften lebender Systeme durch den Erwerb neuartiger chemischer Prozesse im Zuge der künstlichen Evolution von bestehenden Zellen weiter diversifiziert werden. In diesem Zusammenhang besteht eine wichtige Aufgabe der chemisch-synthetischen Biologie darin, die künstliche Evolution von Zellen mit veränderter chemischer Zusammensetzung zu etablieren, die lebensfähig und so robust sind, dass sie für eine unbegrenzte Dauer wachsen und sich replizieren, und zwar in genetischer Isolation von natürlichen Arten (Marlière, 2009).

Dies ist jedoch keine einfache Aufgabe, da die chemischen Prozesse in lebenden Zellen bekanntermaßen standardisiert sind. Alle derzeit bekannten Zellen verfügen über dieselbe Organisation von Hauptstoffwechselwegen und Informationsverarbeitung und denselben Satz von

Makromolekülen (Nukleinsäuren, Proteine, Fettsäuren). Proteine enthalten zum Beispiel ein Standardrepertoire aus 20 kanonischen Aminosäuren, während DNA, das genetische Material, aus vier verschiedenen kanonischen Nukleotiden besteht: Adenin (A), Thymin (T), Guanin (G) und Cytosin (C). Der universelle Charakter des genetischen Codes ermöglicht zudem einen horizontalen Gentransfer über die Grenzen der biologischen Taxa hinweg. Aufgrund des hohen Grades der Standardisierung und Interkonnektivität sind alle Veränderungen der zentralen chemischen Prozesse eines lebenden Systems tendenziell letal.

Wenn ein Organismus einer Umwelt ausgesetzt wird, die so neuartig ist, dass kein bestehendes System daran angepasst ist, kann er nur durch umfangreiche Modifikation von Enzymen und Proteinen adaptieren, die ursprünglich in Reaktion auf ganz andere Umstände evolviert sind. Dies erfordert in jedem Fall eine Umschreibung des genomischen Textes durch Anhäufung und Kombination verschiedenartiger Mutationen. Zu diesem Zweck eignen sich Langzeitkultivierungsexperimente mit Bakterienzellen. Dem Wegbereiter dieser Arbeiten, Richard Lenski, gelang es in einem seit 1988 andauernden Experiment mehr als 50.000 aufeinanderfolgende Generationen von *E. coli* zu kultivieren (Stanek et al., 2009).

Vor Kurzem verwendeten Marlière und Mutzel einen experimentellen Aufbau, der als „Genmotor“ oder „Genemat“ bekannt ist, eine Art „automatisierter Lenski-Apparat“ (Marlière et al., 2011). Diese Fluidikvorrichtung ist mit zwei Kammern ausgestattet, die abwechselnd sterilisiert werden, sodass keine kultivierte Variante der Verdünnung und der Selektion für ein gewünschtes Merkmal entgehen kann. Das Arbeitsvolumen der Kultur beträgt 25 ml, die durchschnittliche Zelldichte 10^9 /ml; daraus ergibt sich eine Anzahl von 2×10^{10} Zellen im Kulturvolumen. Da die durchschnittliche Mutationsrate in *E. coli* $5,4 \times 10^{-10}$ pro Basenpaar beträgt, gibt dieser experimentelle Aufbau unter dem gewählten ein Selektionsdruck ausreichend Zeit für kumulative Mutationen. Die Wachstumszyklen werden durch einen einfachen Algorithmus automatisch gesteuert: Wenn die optische Dichte der Kultur unterhalb eines Schwellenwerts liegt, wird ein „Erholungsmedium“ zugeführt, liegt sie darüber, wird ein Selektionsmedium zugesetzt. Im Gleichgewichtszustand (in Gegenwart einer Fremdschubstanz) sind Wachstums- und Verdünnungsrate gleich groß. Taucht jedoch eine Variante mit einer höheren Wachstumsrate auf, wird mehr Biomasse produziert, dies führt zu einer Zunahme der Verdünnungsrate. Demnach korreliert die Änderung der Verdünnungsrate direkt mit der Fitness der zu selektierenden genetischen Variante.

Basierend auf den oben beschriebenen Prinzipien führten Marlière und Mutzel den ersten erfolgreichen Versuch zur künstlichen Evolution von Mikroben mit einer stark veränderten che-

mischen Zusammensetzung der genomischen DNA durch. Dabei evolvierten *E. coli*-Varianten mit der Fähigkeit, auf 5-Chlorouracil (5-ClU; kurz χ) zu wachsen, dank einer umfangreichen Modifikation des normalerweise zur Verstoffwechslung von Thymin verwendeten Biosynthesewegs. Ein *E. coli*-Stamm wurde durch Einführung eines Stoffwechselwegs, der in der Lage ist, χ als Ersatz für Thymin zu verwenden, für die Evolution konfiguriert. Die Zellen waren dadurch in der Lage, Chlordesoxyuridin-Triphosphat ($d\chi cTP$) zu synthetisieren, das anschließend enzymatisch polymerisiert in genomische DNA eingebaut wurde. Obwohl die evolvierten Bakterien die Fähigkeit zum Wachstum auf Thymin behielten, ist dieses Experiment ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur vollständigen genetischen Isolation, das heißt einer vollkommenen Abhängigkeit der Zellen von χ (wobei die Zellen gleichzeitig auf kanonisches Thymin nicht mehr angewiesen sind). Schließlich sollte die gerichtete Evolution von Bakterienstämmen nicht nur synthetische DNA-Basen umfassen, sondern auch nicht-kanonische Basenpaare, um die Codierungskapazität des zellulären genetischen Materials zu erhöhen. Das Ziel ist letztendlich ein integrativer evolutionärer Ansatz, der die gerichtete Evolution künstlicher Zellen mit erweiterter Codierungskapazität, neuartige genetische Codes sowie de novo erzeugte Stoffwechsel- und Informationswege beinhaltet und lebende Systeme nicht nur mit neuen chemischen Prozessen, sondern auch mit neuen Eigenschaften ausstattet, die im Zuge der natürlichen Evolution nicht entstanden sind (Acevedo-Rocha/Budisa, 2011).

4.9.2 Das Konzept des genetischen Schutzwalls

Ein wichtiges Ziel der Synthetischen Biologie besteht darin, orthogonale biologische Systeme zu konstruieren, deren genetische Ausstattung soweit verändert ist, dass daraus die genetische Inkompatibilität mit sämtlichen natürlichen biologischen Systemen auf der Erde resultiert. Eine derartige genetische Isolation synthetischer Zellen kann durch Anwendung von in der Natur nicht vorkommenden DNA-Komponenten („Xeno-DNA“) oder einem vollständig veränderten genetischen Code erreicht werden.

Da der natürliche genetische Code für alle Lebensformen (beinahe) universell ist, verhindern grundlegende Veränderungen in seinem Aufbau den sonst natürlicherweise stattfindenden Transfer von genetischem Material zwischen synthetischen und natürlichen Mikroorganismen (horizontaler Gentransfer). Auf diese Weise würde eine genetische „Firewall“ gegen Organismen errichtet werden, die auf natürlicher DNA basieren. Aspekte der Biosicherheit von gentechnisch veränderten Zellen, in denen eine genomweite Reprogrammierung des genetischen Codes

vorgenommen wurde, wurden erst kürzlich ausführlich diskutiert (Schmidt, 2010; Herdewijn/Marlière, 2009).

Spätestens seit der Asilomar-Konferenz im Jahr 1975 werden Sicherheitssysteme für gentechnologische Anwendungen entwickelt, die als Mechanismen in erster Linie die physische Isolation oder die Abhängigkeit von essenziellen Nährstoffverbindungen nutzen, die in der Umwelt nicht zur Verfügung stehen (Auxotrophie). Zu den Bedenken, die von Umweltaktiven, politischen Entscheidungsträgern und der besorgten Bevölkerung in diesem Zusammenhang geäußert werden, zählt die Möglichkeit des horizontalen Gentransfers von gentechnisch veränderten Organismen auf Wildtyp-Arten. Das Konzept eines solchen „genetischen Schutzwalls“ kann unter Umständen viel dazu beitragen, diese Befürchtungen durch die Entwicklung technischer Lösungen zu zerstreuen, die allerdings sorgfältig überdacht und geprüft werden müssen.

4.9.3 Jenseits der Grenzen der vertrauten biologischen Welt

Die dominierenden Themen der aktuellen Forschung auf dem Gebiet der Synthetischen Biologie sind die Konstruktion genetischer Schaltkreise, das Engineering von Genomen und Stoffwechselwegen, die zelluläre Signaltransduktion sowie eine erweiterte Systembiologie. Die Vorherrschaft dieser Bereiche lässt sich eventuell durch das derzeitige Dogma der heutigen Molekular- und Systembiologie erklären, dass der In-vivo-Einsatz neuartiger (d. h. nicht-kanonischer) chemischer Reaktionen eher begrenzt ist, da hierbei in der Regel nur kleine, vernachlässigbare Variationen im grundlegenden Design lebender Zellen möglich sind. Folglich könne die Neuprogrammierung von Zellen mit synthetischen Elementen nicht mit der chemischen und funktionellen Diversität Schritt halten, die durch genetische Mutationen, Rekombination und horizontalen Gentransfer in der Evolution natürlicher Organismen erzeugt wird.

Diese Annahme wurde bereits in den 1950er und 1960er Jahren angezweifelt, als gezeigt wurde, dass beispielsweise der Einbau von nicht-kanonischen Aminosäuren in das Proteom eines Organismus tatsächlich möglich ist (Cowie/Cohen, 1957). Darüber hinaus zeigte eine Reihe von Experimenten aus jüngster Zeit unzweifelhaft, dass synthetische Verbindungen, die in natürlichen Arten nicht vorkommen, trotzdem als unverzichtbare Nährstoffe von lebenden Zellen verwendet werden können (Pezo et al., 2004). Wie zu erwarten ist, wachsen Mikrobenstämme (Auxotrophe), die vollständig mit fremden Komponenten substituiert sind, schlecht und kehren leicht zur Verwendung der kanonischen Substanzen zurück. Diesbezüglich besteht

die wichtige Aufgabe der chemisch-synthetischen Biologie darin, Bedingungen zur Kultivierung solcher Zellen für unbegrenzte Dauer und in genetischer Isolation von natürlichen Arten zu finden. Zweifellos würden in einem Experiment, bei dem natürliche Komponenten lebender Zellen durch fremde ersetzt werden, nicht vorhersehbare Lebensformen aus diesen Populationen erwachsen. Somit eröffnet sich die Möglichkeit einer vollkommen neuen biologischen Welt. Dabei war die Konstruktion genetisch modifizierter Organismen (im Rahmen der klassischen Genetik) nur der Beginn einer langen Entwicklung auf der Suche nach zuverlässigen Methoden zur Konstruktion und Anwendung von künstlicher Biodiversität, die es erlauben, zugleich die alte, natürliche Welt zu bewahren (Marlière, 2009).

4.10 Literatur

Acevedo-Rocha, C. G./Budisa, N. (2011): On the road towards chemically modified organisms endowed with a genetic firewall. In: *Angew Chem Int Ed Engl* 50(31):6960–6962.

Agapakis, C. M./Silver, P. A. (2009): Synthetic biology: exploring and exploiting genetic modularity through the design of novel biological networks. In: *Mol Biosyst* 5(7):704–713.

Benner, S. A. et al. (2011): Synthetic biology, tinkering biology, and artificial biology. What are we learning? In: *Comptes Rendus Chimie* 14(4):372–387.

Bensaude-Vincent, B. (2009): The chemists' style of thinking. In: *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte* 32(4):365–378.

Berg, J. M. et al. (2002): *Biochemistry*. New York.

Binder, P. M./Danchin, A. (2011): Life's demons: information and order in biology. What subcellular machines gather and process the information necessary to sustain life? In: *EMBO Rep* 12(6):495–499.

Budin, I./Szostak, J. W. (2010): Expanding roles for diverse physical phenomena during the origin of life. In: *Annu Rev Biophys* 39:245–263.

Budisa, N. (2004): Prolegomena to future experimental efforts on genetic code engineering by expanding its amino acid repertoire. In: *Angew Chem Int Ed Engl* 43(47):6426–6463.

Budisa, N. (2005): *Engineering the Genetic Code*. Weinheim.

Budisa, N. (2012): A brief history of the „Synthesis of Life“. In: *Nova Acta Leopoldina* 394:79–97.

Cello, J. et al. (2002): Chemical synthesis of poliovirus cDNA: generation of infectious virus in the absence of natural template. In: *Science* 297(5583):1016–1018.

- Cornish-Bowden, A./Cárdenas, M. L. (2008): Bringing chemistry to life: what does it mean to be alive? In: Hicks, M. G./Kettner, C. (eds.): *Molecular Interactions. Bringing Chemistry to Life*. Berlin:27–39.
- Cowie, D. B./Cohen, G. N. (1957): Biosynthesis by *Escherichia coli* of active altered proteins containing selenium instead of sulfur. In: *Biochim Biophys Acta* 26(2):252–261.
- Crick, F. H. C. (1965): Recent Research in Molecular Biology: Introduction. In: *Br Med Bull* 21(3):183–186.
- Crick, F. H. C. (1968): The origin of the genetic code. In: *J Mol Biol* 38(3):367–379.
- Dueber, J. E. et al. (2009): Synthetic protein scaffolds provide modular control over metabolic flux. In: *Nat Biotechnol* 27(8):753–759.
- Fabret, C. et al. (2002): A new mutation delivery system for genome-scale approaches in *Bacillus subtilis*. In: *Mol Microbiol* 46(1):25–36.
- Feher, T. et al. (2007): Systematic genome reductions: theoretical and experimental approaches. In: *Chem Rev* 107(8):3498–3513.
- Fischer, E. (1907): Synthetical chemistry in its relation to biology (Faraday Lecture). In: *J Chem Soc Chem Commun* 91:1749–1765.
- Fischer, E. (1915): *Die Kaiser-Wilhelm-Institute und der Zusammenhang von organischer Chemie und Biologie*. Berlin.
- Fontecave, M. (2010): Understanding Life as Molecules: Reductionism versus Vitalism. In: *Angew Chem Int Ed Engl* 49(24):4016–4019.
- Gamborg, O. L. (1975): Plant tissue culture methods in somatic hybridization by protoplast fusion and transformation. In: *Adv Exp Med Biol* 62:45–63.
- Gánti, T. (1975): Organization of chemical reactions into dividing and metabolizing units: the chemotons. In: *Biosystems* 7(1):15–21.
- Gánti, T. (2003): *The Principles of Life*. Oxford.
- Gayon, J. (2010): Defining life: synthesis and conclusions. In: *Orig Life Evol Biosph* 40(2):231–244.
- Gibson, D. G. et al. (2010): Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. In: *Science* 329(5987):52–56.
- Gil, F. et al. (2004): Determination of the core of a minimal bacterial gene set. In: *Microbiol Mol Biol Rev* 68(3):518–537.
- Gordon, R./Melvin, C. A. (2003): Reverse engineering the embryo: a graduate course in developmental biology for engineering students at the University of Manitoba, Canada. In: *Int J Dev Biol* 47(2–3):183–187.
- Griffiths, P. E. (2009): In what sense does ‘nothing in biology make sense except in the light of evolution’? In: *Acta Biotheor* 57(1–2):11–32.

- Hein, G. E. (1961): The Liebig-Pasteur controversy: Vitality without vitalism. In: *J Chem Educ* 38(12):614–620.
- Herdewijn, P./Marlière, P. (2009): Toward safe genetically modified organisms through the chemical diversification of nucleic acids. In: *Chem Biodivers* 6(6):791–808.
- Hoesl, M. G./Budisa, N. (2012): Recent advances in genetic code engineering in *Escherichia coli*. In: *Curr Opin Biotechnol*, Online-Publikation 09.01.2012. Unter: <http://dx.doi.org/10.1016/j.copbio.2011.12.027> [16.07.2012].
- Jewett, M. C./Forster, A. C. (2010): Update on designing and building minimal cells. In: *Curr Opin Biotechnol* 21(5): 697–703.
- Kimura, M. (1983): *The Neutral Theory of Molecular Evolution*. Cambridge.
- Koonin, E. V. et al. (1997): Comparison of archaeal and bacterial genomes: computer analysis of protein sequences predicts novel functions and suggests a chimeric origin for the archaea. In: *Mol Microbiol* 25(4):619–637.
- Kühner, S. et al. (2009): Proteome organization in a genome-reduced bacterium. In: *Science* 326(5957):1235–1240.
- Lagesen, K. et al. (2010): Genome update: the 1000th genome – a cautionary tale. In: *Microbiology* 156(Pt 3):603–608.
- Luisi, P. L. (2006): *The emergence of life. From chemical origins to synthetic biology*. Cambridge.
- Luisi, P. L. (2007): Chemical aspects of synthetic biology. In: *Chem Biodivers* 4(4):603–621.
- Luisi, P. L./Stano, P. (2011): Synthetic biology: minimal cell mimicry. In: *Nat Chem* 3(10):755–756.
- Marlière, P. (2009): The farther, the safer: a manifesto for securely navigating synthetic species away from the old living world. In: *Syst Synth Biol* 3(1–4):77–84.
- Marlière, P. et al. (2011): Chemical evolution of a bacterium's genome. In: *Angew Chem Int Ed Engl* 50(31):7109–7114.
- Multhauf, R. P. (1966): *The Origins of Chemistry*. London.
- Mushegian, A. R./Koonin, A. R. (1996): A minimal gene set for cellular life derived by comparison of complete bacterial genomes. In: *Proc Natl Acad Sci U S A* 93(19):10268–10273.
- Mushegian, A. (1999): The minimal genome concept. In: *Curr Opin Genet Dev* 9(6):709–714.
- Nirenberg, M. (2004): Historical review: Deciphering the genetic code – a personal account. In: *Trends Biochem Sci* 29(1):46–54.
- Osawa, S./Jukes, T. H. (1989): Codon reassignment (codon capture) in evolution. In: *J Mol Evol* 28(4):271–278.

- Panke, S. (2008): Synthetic Biology – Engineering in Biotechnology. A report written on behalf of the Committee on applied Bioscience, Swiss Academy of Engineering Sciences. Unter: www.bsse.ethz.ch/bpl/publications/SATW.pdf [16.07.2012].
- Pezo, V. et al. (2004): Artificially ambiguous genetic code confers growth yield advantage. In: *Proc Natl Acad Sci U S A* 101(23):8593–8597.
- Rasmussen, S. et al. (Hrsg.) (2008): *Protocells. Bridging Nonliving and Living Matter*. Cambridge/London.
- Ribas de Pouplana, L./Schimmel, P. (2004): Aminoacylations of tRNAs: Record-keepers for the Genetic Code. In: Nierhaus, K. H./Wilson, D. N. (eds.): *Protein Synthesis and Ribosome Structure*. Weinheim:169–184.
- Santos, M. A. S./Tuite, M. F. (2004): Extant Variations in the Genetic Code. In: Ribas de Pouplana, L. (eds.): *The Genetic Code and the Origin of Life*. Georgetown:183–200.
- Schmidt, M. (2010): Xenobiology: A new form of life as the ultimate biosafety tool. In: *Bioessays* 32(4):322–331.
- Schrum, J. P. et al. (2010): The Origins of Cellular Life. In: *Cold Spring Harb Perspect Biol* 2(9):a002212.
- Schultz, D. W./Yarus, M. (1996): On malleability in the genetic code. In: *J Mol Evol* 42(5):597–601.
- Schummer, J. (2011): *Das Gotteshandwerk: Die künstliche Herstellung von Leben im Labor*. Berlin.
- Siegel, J. B. et al. (2010): Computational design of an enzyme catalyst for a stereoselective bimolecular Diels-Alder reaction. In: *Science* 329(5989):309–313.
- Spiegelman, S. et al. (1970): Characterization of the Products of RNA-directed DNA Polymerases in Oncogenic RNA Viruses. In: *Nature* 227(5258):563–567.
- Stanek, M. T. et al. (2009): Identification and dynamics of a beneficial mutation in a long-term evolution experiment with *Escherichia coli*. In: *BMC Evol Biol* 9:302.
- Szathmary, E. et al. (2005): Evolutionary Potential and Requirements for Minimal Protocells. In: Walde, P. (Hrsg.): *Prebiotic Chemistry: From Simple Amphiphiles to Protocell Models (Topics in Current Chemistry)*. Berlin/Heidelberg:167–211.
- Szostak, J. W. (2011): An optimal degree of physical and chemical heterogeneity for the origin of life? In: *Phil Trans R Soc B* 366:2894–2901.
- Varela, F. G. et al. (1974): Autopoiesis: the organization of living systems, its characterization and a model. In: *Curr Mod Biol* 5(4):187–196.
- Vasas, V. et al. (2012): Evolution before genes. In: *Biol Direct*, Online-Publikation 05.01.2012. DOI: 10.1186/1745-6150-7-1.
- Walde, P. (2010): Building artificial cells and protocell models: experimental approaches with lipid vesicles. In: *Bioessays* 32(4):296–303.

Wang, H. et al. (2007): Evolved orthogonal ribosomes enhance the efficiency of synthetic genetic code expansion. In: *Nat Biotechnol* 25(7):770–777.

Wiltschi, B./Budisa, N. (2007): Natural history and experimental evolution of the genetic code. In: *Appl Microbiol Biotechnol* 74(4):739–753.

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

Yus, E. et al. (2009): Impact of genome reduction on bacterial metabolism and its regulation. In: *Science* 326(5957):1263–1268.

5. Therapeutische Perspektiven der Synthetischen Biologie

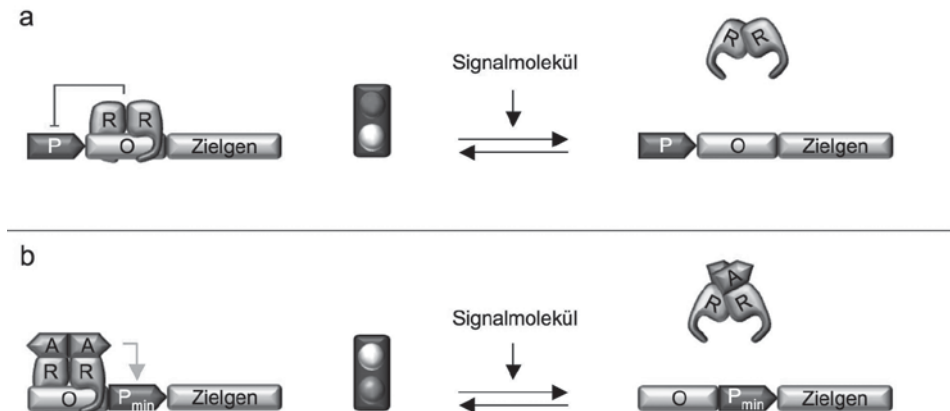
5.1 Synthetische genetische Schalter und Netzwerke

Die großen Fortschritte in der molekularbiologischen Forschung und der Systembiologie haben dazu beigetragen, dass inzwischen eine große Anzahl an biologischen Komponenten entdeckt und charakterisiert wurde. Diese einzelnen Bausteine können nun in einem synthetischen Ansatz neu kombiniert und zu Systemen zusammengesetzt werden, die gewünschte Aufgaben übernehmen, zum Beispiel in der Vorbeugung von Krankheiten oder in der Herstellung von Medikamenten. Wichtige Bausteine in diesen konstruktiven Prozessen sind molekulare Schalter, mit denen gewünschte Prozesse in Zellen wie Wachstum, Differenzierung oder die Produktion von therapeutischen Substanzen orts- und zeitkontrolliert ausgelöst werden können. Durch eine geeignete Verknüpfung der molekularen Schalter können nun in Analogie zu Designprinzipien aus der Elektrotechnik Schaltkreise realisiert werden, die es erlauben, komplexe Programme in einzelnen Zellen zu steuern.

Hierzu wird zuerst dargestellt, wie genetische Schalter konstruiert werden können, mit denen sich die Aktivität eines Gens in tierischen und menschlichen Zellen über externe Signale steuern lässt (Abbildung 1). Das Kernstück von genetischen Schaltern sind häufig sogenannte Repressorproteine (R), die sehr spezifisch an eine passende DNA-Operatorsequenz (O) binden können und sich von dieser Sequenz durch Zugabe eines geeigneten Signalmoleküls wieder ablösen lassen. Wird nun so eine Bindesequenz zwischen ein Zielgen und den dazugehörigen Promoter geschaltet, verhindert die Bindung des Repressorproteins das Ablesen des Zielgens. Wird hingegen das Signalmolekül zugegeben, löst sich das Repressorprotein von seiner Ziel-DNA-Sequenz ab, worauf das Zielgen exprimiert werden kann (Abbildung 1a). Ein weiteres Designkonzept zur Herstellung genetischer Schalter beruht darauf, dass das Repressorprotein R an eine Aktivierungsdomäne fusioniert wird. Dieses Fusionsprotein kann nun dazu verwendet werden, um einen sogenannten Minimalpromoter P_{\min} anzuschalten, sofern dieser an eine für

das Repressorprotein spezifische DNA-Sequenz (O) gekoppelt wurde (Abbildung 1b). In dieser Konfiguration führt die Zugabe des Signalmoleküls dazu, dass sich das Fusionsprotein von dem Promoter-Konstrukt ablöst und somit die Aktivierung des Zielgens ausgeschaltet wird. Beide Designprinzipien können folglich die Grundlage für genetische Schalter bilden, die es ermöglichen, entweder durch Zugabe oder durch Wegnahme eines Signalmoleküls die Aktivität eines Zielgens auf Kommando zu steuern. Solche Schalter bilden die molekulare Basis für viele der im Folgenden beschriebenen synthetischen biologischen Systeme mit viel versprechenden Einsatzmöglichkeiten in der Prävention sowie der Behandlung von Krankheiten.

Abbildung 1: Funktionsweise synthetischer genetischer Schalter



(a) Repressions-basierter genetischer Schalter: Die Aktivität eines Promoters P wird durch die Bindung eines Repressorproteins R an seine Ziel-Operatorsequenz O reprimiert. Durch Zugabe eines Signalmoleküls kann die Bindung des Repressorproteins an die Ziel-Operatorsequenz aufgehoben werden und die Aktivität des Promoters wird dereprimiert, wodurch die Expression des Zielgens aktiviert wird. (b) Aktivierungs-basierter Schalter: Ein Repressorprotein R wird an eine Aktivierungsdomäne A fusioniert. Bindet dieses chimäre Protein nun an seine Ziel-Operatorsequenz O, kann dadurch ein sogenannter minimaler Promotor P_{min} aktiviert werden, was dann zur Expression des Zielgens führt. Wird hingegen ein Signalmolekül hinzugegeben, wird die Bindung des chimären Aktivatorproteins an seine Ziel-Operatorsequenz verhindert, was zu einer Deaktivierung der Expression des Zielgens führt.

5.2 Prävention von Krankheiten

Weit verbreitete Krankheiten wie Malaria oder Gelbfieber werden durch Mückenstiche übertragen, was besonders in tropischen Ländern ein Problem ist. Ein viel versprechender Weg zur Vorbeugung gegen diese Krankheiten ist die Bekämpfung des Überträgers zum Beispiel durch die Verwendung von Insektiziden, die in die Umwelt ausgebracht werden oder mit denen Insektenschutznetze imprägniert werden können. Während chemische Insektizide neben der gewünschten Mückenart häufig auch andere Arten schädigen oder sogar gesundheitsschädliche Einflüsse auf Säugetiere und Menschen haben können, entwickelte ein Forschungsteam um Luke Alphey von der Universität Oxford (UK) einen synthetischen biologischen Schaltkreis, der es ermöglicht, hochspezifisch Moskitos in der Natur abzutöten, wohingegen andere Tierarten nicht betroffen werden. Dieses System basiert auf einem Gen, das dazu führt, dass weiblichen Insekten keine Flügel wachsen und somit diese Tiere nicht überleben, geschweige denn, andere Säugetiere für eine Blutmahlzeit stechen können. Werden nun männliche Insekten mit diesem Gen in die Natur entlassen, können sie sich mit den dort lebenden Weibchen paaren, was dazu führt, dass die weiblichen Nachkommen dieser Insekten keine Flügel haben und absterben.

Die Herausforderung bei diesem Ansatz war es nun, genügend männliche Insekten mit diesem Gen zu züchten, um somit eine ausreichend große Population dieser Insekten in die Natur zur Paarung entlassen zu können. Um diese Herausforderung zu überwinden, entwickelte die Forschergruppe einen genetischen Schalter analog zu Abbildung 1b, mit dem das zur Flügellosigkeit führende Gen durch die einfache Zugabe des Signalmoleküls Tetrazyklin (TET) abgeschaltet werden konnte. Wurden die Insekten im Labor nun mit Tetrazyklin-haltigem Futter ernährt, war das Zielgen ausgeschaltet und die Insekten konnten vermehrt werden. Werden die Insekten jedoch in eine Tetrazyklin-freie Umgebung entlassen, wird das zur Flügellosigkeit führende Gen wieder in den weiblichen Nachkommen aktiviert, was zu deren Absterben führt. Die männlichen Nachkommen hingegen tragen das Gen in sich und können sich mit weiteren Weibchen paaren und somit schlussendlich zum Aussterben der gesamten Insektenpopulation führen. Dieses Verfahren wurde erfolgreich im Labor entwickelt und kürzlich auf den Cayman Islands auch im Feldversuch erprobt (Harris et al., 2011). Es konnte gezeigt werden, dass die Freisetzung der Insekten mit dem genetischen Schaltkreis zu einer signifikanten Reduktion der Moskitos in den behandelten Regionen führte.

Da sich Moskitos, wie jedes andere Tier auch, nur innerhalb derselben Art fortpflanzen können, ist diese Insektenbekämpfungsmethode inhärent auf eine Art beschränkt und es ist nicht zu erwarten, dass mit dieser Methode ebenfalls andere, nützliche Insektenpopulationen beschädigt werden können, was einen großen Vorteil gegenüber den klassischen chemischen Bekämpfungsmethoden darstellt. Dieser Ansatz wurde bereits auf andere Insekten, zum Beispiel landwirtschaftliche Schädlinge übertragen. In weiteren Studien (Simmons et al., 2011) konnte ebenfalls gezeigt werden, dass diese Methode einen geeigneten Ansatz darstellt, um die Population einer bestimmten Insektenart hochspezifisch zu bekämpfen.

5.3 Entdeckung von neuen Medikamenten dank genetischer Schalter

5.3.1 Entdeckung neuer Antibiotika

Analog dazu, wie eine Lampe als Sensor dienen kann, um zu sehen, ob der Lichtschalter betätigt wurde, können genetische Schalter, die auf Medikamente reagieren, dazu verwendet werden, Medikamente nachzuweisen. Hierzu wird der medikamentenabhängige Schalter an ein Zielgen gekoppelt, dessen Aktivität sich leicht nachweisen lässt, zum Beispiel dadurch, dass eine farbige Substanz produziert wird. Wird nun ein Medikament zu der Zelle mit diesem synthetischen biologischen System hinzugegeben, wird das Zielgen aktiviert, wodurch sich die Zelle entsprechend verfärbt. Solche Zellen wurden für die Entdeckung von Substanzen mit antibiotischen Eigenschaften verwendet.

Hierzu wurde das Repressorprotein PIP verwendet, das an seine Ziel-DNA-Sequenz PIR3 bindet und diese Sequenz in Gegenwart von Antibiotika aus der Klasse der sogenannten Streptogramine wieder loslässt (Abbildung 2). Wird diese PIR3-Sequenz nun zwischen einen Promoter sowie einem Zielgen platziert, verhindert die Bindung des PIP-Proteins an PIR3 die Aktivierung dieses Gens. Die Zugabe eines Streptogramin-Antibiotikums zu den Zellen hingegen bewirkt die Ablösung des PIP von PIR3, wodurch das Zielgen aktiv wird, was zum Beispiel dazu verwendet werden kann, in der Zelle ein Farbsignal zu generieren. Dieses System wurde verwendet, um in chemischen und biologischen Substanzsammlungen nach neuen Streptogramin-Antibiotika zu suchen (Aubel et al., 2001). Neben der Entdeckung von Streptogramin-Antibiotika bietet dieses zellbasierte Screeningverfahren zwei weitere Vorteile: Da direkt mit einem auf menschlichen Zellen basierendem System gescreent wird, werden nur Substanzen identifiziert, die keine direkten toxischen Effekte auf menschliche Zellen haben, da ansonsten die Zelle abge-

tötet wird und kein Signal wahrgenommen werden kann. Des Weiteren ergeben nur solche Substanzen ein Signal, die in der Lage sind, in menschliche Zellen einzudringen, was besonders bei der Bekämpfung von intrazellulären bakteriellen Krankheitserregern von Interesse ist.

Somit stellt dieser auf einem synthetischen genetischen Schalter beruhende Ansatz zur Identifikation von Antibiotika ein integriertes Screeningsystem dar, mit dem in einem einzigen Schritt Substanzen identifiziert werden können, die nicht nur zielspezifisch sind, sondern auch in der Lage sind, in menschliche Zellen einzudringen und gleichzeitig keine offensichtlichen Nebenwirkungen haben.

Abbildung 2: Entdeckung von Streptogramin-Antibiotika



In tierischen Zellen wurde ein genetischer Schalter implementiert, der in Gegenwart von Streptogramin-Antibiotika zur Expression des Zielgens SEAP (sekretierte alkalische Phosphatase) führt. Hierzu wurde das Repressorprotein PIP exprimiert, das an seine Ziel-Operatorsequenz PIR3 bindet und damit die Expression von SEAP verhindert (linke Seite). Kommt nun so eine Zelle in Kontakt mit einem zellgängigen, nicht-toxischen Streptogramin-Antibiotikum, wird das Repressorprotein PIP von PIR3 losgelöst, was zur Expression des SEAP-Gens führt (rechte Seite). Da die Aktivität dieses Gens leicht nachgewiesen werden kann, eignet sich so ein System zur Suche nach neuen Streptogramin-Antibiotika in großen Substanzbibliotheken.

5.3.2 Ausschalten der Antibiotikaresistenz

Der oben beschriebene Ansatz wurde mittlerweile verfeinert (Weber et al., 2008), wie das Beispiel der Entdeckung von neuen Wirkstoffen gegen antibiotikaresistente Tuberkulosebakterien verdeutlicht.

Tuberkulose (TB), oder besser gesagt, der Erreger von Tuberkulose, *Mycobacterium tuberculosis*, ist einer der am meisten verbreiteten Krankheitserreger weltweit. Annähernd 30% der Weltbevölkerung sind mit dem Bakterium infiziert, was zu etwa 1.5 Millionen Todesfällen pro Jahr führt.¹ In der Vergangenheit konnte der Tuberkuloseerreger mit Hilfe von Antibiotika bekämpft werden, was heutzutage immer schwieriger wird, da multiresistente Tuberkulosestämme auf dem Vormarsch sind. Diese Stämme, die häufig gegen zwei, drei oder vier Antibiotika gleichzeitig resistent sind, stellen für die erfolgreiche Behandlung ein großes, teilweise unüberwindbares Problem dar.

Ein Ansatz zur Lösung dieses Problems könnte die Entwicklung von Strategien sein, mit denen sich diese Resistenzen wieder ausschalten lassen, sodass dann die Krankheitserreger mit bewährten Antibiotika abgetötet werden könnten. In der oben genannten Studie (Weber et al., 2008) wurde diese Strategie anhand der natürlich vorhandenen Resistenz des Tuberkuloseerregers gegen das Antibiotikum Ethionamid umgesetzt. Ethionamid ist an sich eine ungiftige Substanz, die zuerst von *Mycobacterium tuberculosis* aufgenommen wird und dann innerhalb des Bakteriums durch ein Enzym EthA, eine sogenannte Monooxygenase aktiviert wird. Die daraus resultierende aktivierte Form hat einen zytotoxischen Effekt und führt letztendlich zum Abtöten des Tuberkuloseerregers. Das Problem dabei ist jedoch, dass die EthA-basierte Aktivierung von Ethionamid nicht sehr effizient ist, da die Expression des EthA-Gens durch die Bindung des Repressorproteins EthR an den EthA-Promoter gehemmt wird. Diese intrinsische Resistenz gegen Ethionamid sollte überwunden werden können, wenn es gelänge, die Bindung des EthR-Repressorproteins an den EthA-Promoter zu verhindern. In diesem Falle sollte das EthA-Gen stärker exprimiert werden und das Ethionamid sollte entsprechend effizienter aktiviert werden, was somit zu einer effizienteren Abtötung des Tuberkulosebakteriums führen sollte.

1 Online unter: www.who.int/mediacentre/factsheets/fs104/en/ [08.08.2012].

Um Substanzen zu identifizieren, die in der Lage sind, das EthR-Repressorprotein von seiner Ziel-DNA loszulösen, wurde ein Screeningsystem in menschlichen Zellen entwickelt. Hierzu wurde basierend auf dem EthR-Repressorprotein sowie seiner spezifischen DNA-Bindesequenz ein genetischer Schalter analog zur Abbildung 1 konstruiert. Dabei wurde das Repressorprotein EthR an die aus dem Virus *Herpes simplex* abgeleitete VP16-Aktivierungsdomäne gekoppelt, wohingegen die EthR-spezifische DNA-Bindesequenz O_{EthR} an einen aus der Fruchtfliege *Drosophila melanogaster* abgeleiteten minimalen Promoter P_{min} fusioniert wurde. Um die Aktivität dieses Promoters auszulesen, wurde das menschliche Reportergen sekretierte alkalische Phosphatase (SEAP) verwendet, dessen Expression sich über eine Farbreaktion leicht nachweisen lässt (Abbildung 3). In dieser Konfiguration führt die Bindung des EthR-VP16-Fusionsproteins zur Aktivierung des minimalen Promoters P_{min} sowie der Expression des Zielgens SEAP.

Abbildung 3: Überwindung der Resistenz von *Mycobacterium tuberculosis* gegen das Antibiotikum Ethionamid



Ein genetischer Schalter zur Identifikation von Substanzen, die in der Lage sind, die Resistenz gegen Ethionamid auszuschalten: Hierzu wurde das Repressorprotein EthR an die Aktivierungsdomäne VP16 fusioniert. Bindet dieses chimäre Protein nun seine Ziel-Operatorsequenz (O_{EthR}), wird dadurch der Minimalpromoter P_{min} aktiviert, was zur Expression des Zielgens SEAP führt. Diese Zelle wurde zur Suche nach Substanzen verwendet, die nicht toxisch sind, die zellgängig und in der Lage sind, EthR von seiner Ziel-Operatorsequenz abzulösen. In dieser Konfiguration werden erfolgreiche Substanzen durch eine spezifisch verringerte Expression des Zielgens SEAP angezeigt.

Dieser genetische Schalter wurde nun in menschliche Zellen eingebracht und zur Suche nach Wirkstoffen verwendet, die in der Lage sind, EthR von seiner DNA-Bindesequenz O_{EthR} abzulösen. Hierzu wurden verschiedenste chemische Moleküle zu den Zellen gegeben und es wurde untersucht, welchen Effekt diese Substanzen haben. Bei dieser Suche können im Wesentlichen vier verschiedene Szenarien auftreten:

- (1) *Keine Wirkung*: Die untersuchte Substanz hat keinen Effekt; dies führt dazu, dass keine Änderung in der SEAP-Aktivität nachgewiesen werden kann.
- (2) *Toxizität*: Die untersuchte Substanz hat Nebenwirkungen auf die Zelle; dies führt dazu, dass die Zelle abstirbt oder in ihrer Vitalität beeinträchtigt ist.
- (3) *Keine Zellgängigkeit*: Die untersuchte Substanz ist nicht in der Lage, in menschliche Zellen einzudringen; dies führt dazu, dass keine Änderung der SEAP-Aktivität nachgewiesen werden kann.
- (4) *Zellgängig, nicht toxisch, wirksam*: Die untersuchte Substanz ist in der Lage, in Zellen einzudringen, hat keine Nebenwirkungen auf die Zelle und kann EthR-VP16 von seiner Ziel-DNA Sequenz O_{EthR} ablösen. Dies führt zu einer spezifischen Abnahme der SEAP-Expression, da der Minimalpromoter P_{min} nicht mehr von dem Fusionsprotein EthR-VP16 aktiviert werden kann. Dieses vierte Szenario identifiziert somit Substanzen mit gewünschten Eigenschaften, wobei besonders die Zellgängigkeit (Szenario 3) wichtig ist, da der Tuberkuloseerreger nicht etwa frei in der Blutbahn schwimmt, sondern vielmehr in menschliche Zellen eindringt und sich innerhalb der Zellen vermehrt. Somit wird eine Substanz, die nicht in der Lage ist, in menschliche Zellen einzudringen, nicht in der Lage sein, den Tuberkuloseerreger zu erreichen.

Die Suche nach Substanzen mit den oben erwähnten Eigenschaften führte zur Identifikation von 2-Phenylethylbutyrat, ein einfaches Molekül, das als Lebensmittelaromastoff verwendet wird. Es wurde im nächsten Schritt untersucht, ob dieses neu identifizierte Molekül nun in der Lage ist, die intrinsische Resistenz des Tuberkuloseerregers gegen Ethionamid abzuschalten. Hierzu wurden Tuberkuloseerreger in Gegenwart von steigenden Ethionamidkonzentrationen kultiviert. Die Bakterien wuchsen aufgrund ihrer Resistenz trotz der Gegenwart des Antibiotikums. Ebenfalls wuchsen sie in Gegenwart der neu entdeckten Substanz 2-Phenylethylbutyrat, wodurch gezeigt war, dass diese Substanz keine unspezifischen toxischen Effekte auf den Tuber-

kuloseerreger hat. Die Kombination der beiden Substanzen, Ethionamid und 2-Phenylethylbutyrat, führte jedoch zur Abtötung des Tuberkuloseerregers. Basierend auf diesen Resultaten, sowie in Kombination mit weiteren detaillierten molekularbiologischen Methoden, konnte gezeigt werden, dass 2-Phenylethylbutyrat effektiv in der Lage ist, die Antibiotikaresistenz auszuschalten, woraufhin das Antibiotikum Ethionamid wiederum in der Lage ist, den Tuberkuloseerreger abzutöten.

Da eine Vielzahl an Resistenzen gegen Antibiotika auf ähnlichen Mechanismen beruhen, sollte dieser, hier am Beispiel der Tuberkulose dargestellte Mechanismus, sich auch auf andere bakterielle Krankheitserreger und andere Antibiotika übertragen lassen.

5.4 Integration synthetischer genetischer Schalter in den Wirtsorganismus

5.4.1 Ein synthetischer genetischer Schalter zur Optimierung der künstlichen Besamung

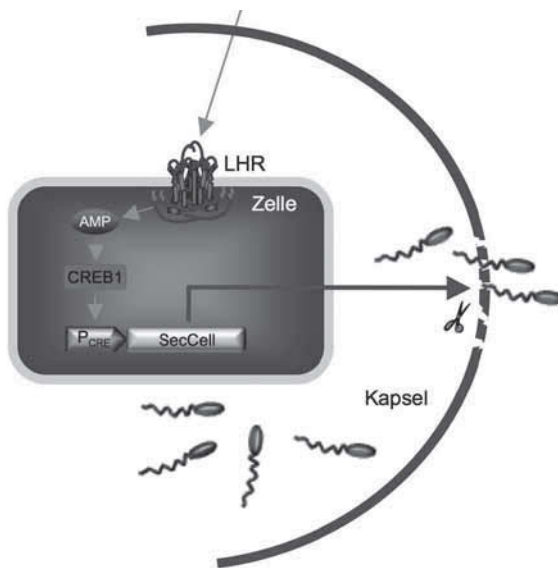
Die künstliche Besamung ist inzwischen eine Standardmethode zur Reproduktion von Nutztieren wie zum Beispiel von Kühen. Eine Herausforderung in der Besamung ist die Synchronisation des Eisprungs mit der Verabreichung der Spermien. Vor allem bei großen Herden ist es sehr schwierig, den optimalen Besamungszeitpunkt für die einzelnen Tiere abzapassen, was dazu führt, dass häufig weniger als 30% der Besamungsversuche erfolgreich sind. Eine Lösung dafür könnte sein, den Tieren ein Spermiendepot zu verabreichen, das zum optimalen Befruchtungszeitpunkt die Spermien freisetzt.

In einer kürzlich erschienenen Studie (Kemmer et al., 2011) wurde solch ein System konstruiert und erfolgreich an Kühen getestet. Als Spermiendepot wurde eine Mikrokapsel aus Cellulosesulfat und dem Polymer Poly-DADMAC synthetisiert, in die die Spermien eingeschlossen wurden. Um die Freisetzung optimal mit dem Eisprung zu synchronisieren, wurde ein genetischer Schalter konstruiert, der beim Eisprung zur Auflösung der Mikrokapsel führt.

Hierzu wurde in menschliche Zellen der Rezeptor für das luteinisierende Hormon (LH) eingefügt. Dieser Rezeptor wurde an eine Signalkaskade gekoppelt, sodass eine Aktivierung des Rezeptors durch LH zur Expression eines Gens für eine Cellulase führt. Die Cellulase wiederum ist ein Enzym, das in der Lage ist, die Cellulosesulfat-basierten Kapseln abzubauen (Abbildung 4). Für die Validierung dieses Systems wurden Zellen mit diesem genetischen Schalter sowie Spermien in die Mikrokapseln verpackt und in den Uterus von Kühen eingeführt. Es konnte gezeigt werden, dass der mit dem Eisprung assoziierte Anstieg des LH-Hormons zur

Aktivierung des LH-Rezeptors führte. Dadurch wurde die Produktion des Enzyms Cellulase ausgelöst und es wurde gezeigt, dass die Mikrokapseln abgebaut und die Spermien für eine erfolgreiche Befruchtung freigesetzt wurden. Die weitere Entwicklung dieser Technologie sowie die Verallgemeinerung auf andere Tierarten könnten dazu führen, die Züchtung und Reproduktion in Zukunft deutlich zu vereinfachen und die Anzahl der fehlgeschlagenen Befruchtungsversuche zu reduzieren.

Abbildung 4: Ein genetischer Schalter zur Optimierung der künstlichen Befruchtung



Um die Freisetzung von Spermien optimal mit dem Eisprung zu koordinieren, wurde ein Spermiendepot konstruiert, das in Gegenwart des luteinisierenden Hormons (LH, als Indikator des bevorstehenden Eisprungs) die Freisetzung der Spermien auslöst. Hierzu wurden Spermien und eine Zelle mit einem Schalter in Kapseln verpackt, die in den Uterus von Kühen implantiert wurden. Die Zellen enthalten einen Rezeptor für LH (LHR), der in Gegenwart des Hormons eine Signalkaskade auslöst, die schlussendlich zur Expression des Gens für eine sekretierte Cellulase (SecCell) führt. Diese aus der Zelle ausgeschleuste Cellulase ist in der Lage, die Kapselwand abzubauen, was zur Freisetzung der Spermien führt.

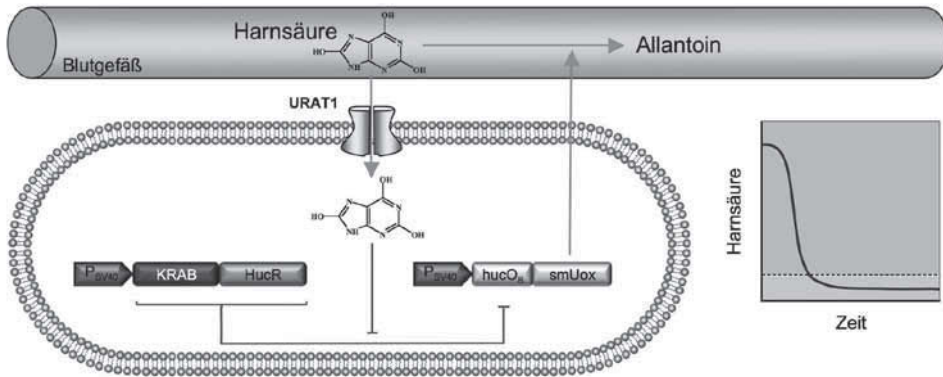
5.4.2 Ein synthetisch-biologischer Regelkreis gegen Gicht

Die oben erwähnten Studien stellen synthetische genetische Schalter dar, mit denen sich gewünschte biologische Effekte steuern lassen. Im Gegensatz dazu wurde in einer kürzlich erschienenen Studie am Beispiel der Behandlung von Gicht, ein synthetischer Regelkreis beschrieben, der es ermöglicht, über einen Rückkopplungsmechanismus einen biologischen Parameter auf einen Sollwert einzuregeln (Kemmer et al., 2010). Die klinischen Symptome von Gicht werden dadurch verursacht, dass die Harnsäurekonzentration im Blut so stark erhöht sind, dass sich Harnsäurekristalle bilden, die dann zum Beispiel in den Gelenken zu schmerzhaften Entzündungen führen können. Andererseits stellt Harnsäure ähnlich wie Vitamin A und C einen wichtigen Schutzmechanismus gegen sogenannten oxidativen Stress dar, der wichtige Zellbestandteile wie Proteine, die Membranen oder das Erbgut schädigen kann (Kemmer et al., 2010). Somit muss bei einer Therapie gegen Gicht die pathologisch erhöhte Harnsäurekonzentration abgesenkt werden, um die Bildung von Harnsäurekristallen zu vermeiden, gleichzeitig muss jedoch eine basale Harnsäurekonzentration aufrecht erhalten werden, um den Schutz gegen oxidativen Stress aufrecht zu erhalten.

Kürzlich wurde ein synthetischer genetischer Regelkreis entwickelt, welcher diese beiden Anforderungen erfüllt und er wurde auch bereits erfolgreich in einem Mausmodell für Gicht getestet (Kemmer et al., 2010). Hierzu wurde zuerst ein genetischer Schalter konstruiert, der über Harnsäure geschaltet werden kann. Dieser Schalter, der Analog zu Abbildung 1a aufgebaut wurde, basiert auf dem Repressorprotein HucR, das aus dem Bakterium *Deinococcus radiodurans* entnommen wurde. Dieser Schalter wurde verwendet, um bei erhöhten Harnsäurekonzentrationen die Expression des Gens für Harnsäureoxidase anzuschalten (Abbildung 5).

Die so produzierte Harnsäureoxidase führt zum Abbau der erhöhten Harnsäurekonzentrationen. Liegen hingegen physiologische Harnsäurekonzentrationen vor, bleibt der genetische Schalter ausgeschaltet und es wird keine Harnsäureoxidase produziert. Um die Sensitivität des Schalters zu erhöhen, wurde zusätzlich ein Harnsäuretransporter in die Zelle integriert, der dazu führt, dass die Harnsäure von außerhalb der Zelle besser in die Zelle hineintransportiert werden kann, um den Schalter zu erreichen. Es konnte gezeigt werden, dass diese Kombination aus dem Harnsäuretransporter und dem genetischen Schalter es ermöglichen, pathologisch hohe Harnsäurekonzentrationen abzubauen, wobei gleichzeitig physiologische Harnsäurekonzentrationen nicht beeinflusst werden. Nach umfassenden Tests in Zellkulturexperimenten wurde dieser Schalter in einem Gicht-Mausmodell funktional getestet. Hierzu konnten keine

Abbildung 5: Ein genetischer Regelkreis zur Kontrolle der Harnsäurekonzentration



Der genetische Regelkreis besteht aus einem Harnsäuresensor, der in Gegenwart erhöhter Konzentrationen dieses Metaboliten zur Aktivierung des Gens für eine Harnsäureoxidase (smUox) führt. Das daraus resultierende Protein wird aus der Zelle hinausgeschleust, wodurch erhöhte Harnsäurekonzentrationen abgebaut werden. Bei normalen Harnsäurekonzentrationen ist die Produktion der Harnsäureoxidase ausgeschaltet und die normalen Harnsäurekonzentrationen im Blut werden nicht beeinflusst. Der Regelkreis besteht aus dem Harnsäuretransporter URAT1, der die Harnsäure in die Zelle hineintransportiert. Dort verhindert die Harnsäure die Bindung des chimären Repressorproteins HucR-KRAB an seine Ziel-Operatorsequenz (hucO), wodurch das Zielgen smUox aktiviert wird. Bei normalen Harnsäurekonzentrationen hingegen bleibt das chimäre Repressorprotein HucR-KRAB an seine Ziel-Operatorsequenz gebunden und das Gen für die Harnsäureoxidase bleibt ausgeschaltet. Dieser Regelkreis führt dazu, dass erhöhte Harnsäurekonzentrationen (Bereich über gestrichelter Linie, rechte Grafik) schnell abgebaut werden und sich die Harnsäurekonzentration in den gesunden Bereich einpendelt (Bereich unter gestrichelter Linie).

normalen Mäuse genommen werden, da Mäuse, wie alle anderen Säugetiere (bis auf den Menschen), eine funktionale Harnsäureoxidase besitzen, die verhindert, dass krankhaft hohe Konzentrationen dieser Substanz auftreten können (basierend auf der Beobachtung, dass der Mensch das einzige Säugetier ist, das aufgrund nicht funktionaler Harnsäureoxidase an Gicht erkranken kann, wurde die Hypothese aufgestellt, dass erst aufgrund der Schutzwirkung der beim Menschen erhöhten Harnsäurekonzentrationen sich ein so hoch entwickeltes Gehirn ausbilden konnte). Um den genetischen Regelkreis in einem Mausmodell funktional charakterisieren zu können, wurde daher eine Mauslinie verwendet, in der das Gen für die Harnsäureoxidase entfernt wurde und die dann, analog zur Symptomatik bei Menschen, ebenfalls an Gicht erkrankte. Wurde nun der oben beschriebene genetische Regelkreis in Zellen implementiert und diese Zellen in Mäusen appliziert, konnte beobachtet werden, dass die erhöhten Harnsäure-

konzentrationen auf physiologische Werte zurückgehen, wobei gleichzeitig physiologische Harnsäurekonzentrationen nicht beeinflusst wurden. Dieses erste Beispiel für einen funktionalen synthetisch-biologischen Regelkreis, der direkt an die Physiologie des Wirtsorganismus angekoppelt war, stellt ein allgemeines Designprinzip dar, wie pathologische Parameter erkannt und in einer autonomen Weise direkt behandelt werden können. Aktuelle Forschungen bauen auf diesem selbstregulierenden Prinzip auf, und in ersten Studien konnten bereits Systeme entwickelt werden, die autonom erkennen, ob eine Zelle gutartig oder bösartig ist. In diesen Systemen wurden bösartige Krebszellen autonom erkannt und gezielt abgetötet.

Diese Studien mit therapeutischen synthetisch biologischen Regelkreisen befinden sich momentan noch in ihrer experimentellen Phase, aber mit den aktuellen Fortschritten in Gen- und Zelltherapie könnten sie in nicht allzu ferner Zukunft in ersten klinischen Studien münden.

5.5 Transfer von biologischen Schaltern aus der Synthetischen Biologie in die Materialwissenschaften zur Synthese intelligenter Materialien

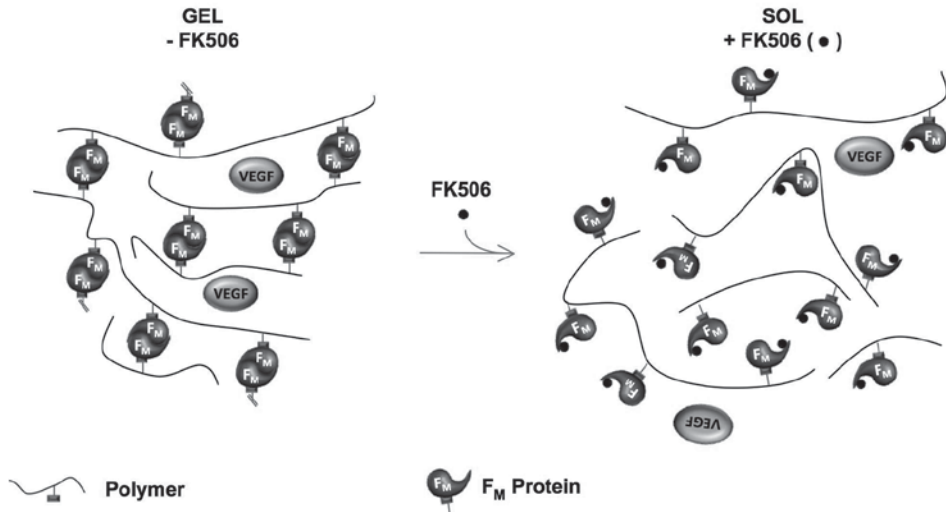
Die oben angeführten Beispiele zeigen, wie genetische Schalter für therapeutische Zwecke in tierischen Zellen verwendet werden können. Das Anwendungspotenzial dieser Schalter geht jedoch über die Biologie hinaus. Kürzlich erschienene Studien haben gezeigt, dass diese Schalter ebenfalls in den Materialwissenschaften eingesetzt werden können, um neuartige Materialien mit extern steuerbaren Eigenschaften herzustellen. Materialien, die auf ein äußeres Kommando hin ihre Eigenschaften ändern, sich zum Beispiel auflösen oder einen therapeutischen Wirkstoff freisetzen, haben ein großes Anwendungspotenzial im biomedizinischen Bereich als intelligentes Implantat oder extern steuerbares Medikamentendepot. Bevorzugte Materialien in diesem Bereich sind sogenannte Hydrogele, die aus mit Wasser gefüllten Polymernetzwerken bestehen (Beispiele für Hydrogele aus dem täglichen Gebrauch sind Gelatine-basierte gelartige Lebensmittel). Solche Hydrogele haben aufgrund ihres hohen Wassergehalts sowie ihrer gewebeähnlichen mechanischen Eigenschaften eine hohe Biokompatibilität und werden routinemäßig bereits als Implantate medizinisch verwendet.

Sollen solche Hydrogele nun mit schaltbaren Eigenschaften versehen werden, um zum Beispiel einen Einsatz als extern steuerbares Medikamentendepot zu ermöglichen, muss sichergestellt werden, dass der Schaltmechanismus ebenfalls mit physiologischen Bedingungen kompatibel

ist. Die Möglichkeiten, die Eigenschaften von konventionellen Hydrogelen unter physiologischen Bedingungen gezielt zu verändern, sind relativ limitiert. Die meisten Hydrogele mit extern steuerbaren Eigenschaften reagieren zum Beispiel auf Änderungen der Temperatur oder des pH-Wertes, wobei beide Parameter nicht ohne Weiteres im Körper geändert werden können. Eine Lösung hierzu könnten molekulare Schalter aus der Synthetischen Biologie sein, die aufgrund ihrer biologischen Herkunft inhärent kompatibel mit physiologischen Bedingungen sind.

Ein Beispiel für solch ein durch die Synthetische Biologie inspiriertes, schaltbares Hydrogel wurde in einer kürzlich erschienenen Studie von Kämpf und Kollegen beschrieben (Kämpf et al., 2010). In dieser Studie wurde ein synthetischer, proteinbasierter Schalter verwendet, der bereits zuvor erfolgreich zum An- und Abschalten der Genexpression in menschlichen Zellen verwendet wurde. Dieser Schalter basiert auf dem sogenannten FK-Binding-Protein (FKBP), einem menschlichen Protein, das in der Signalleitung von Zellen eine wichtige Rolle spielt. Dieses Protein wurde durch das Einfügen einer Mutation so verändert, dass jeweils zwei dieser nun F_M genannten Proteine spontan miteinander dimerisieren. Wird nun hingegen die niedermolekulare Verbindung FK506 zugegeben, bindet diese an F_M und verhindert die Ausbildung des F_M -Dimers. Wenn diese dimeren Proteine an lineare Ketten des chemischen Polymers Polyacrylamid gekoppelt werden, findet dadurch eine Quervernetzung des Polymers statt, wodurch sich ein stabiles Hydrogel ausbildet (Abbildung 6). Durch Zugabe der Signalsubstanz FK506 wird die F_M -Dimerisierung verhindert und die Polymerketten können sich voneinander lösen, was schlussendlich zur Auflösung des Hydrogels führt. Dieses induzierte Auflösen kann verwendet werden, um ein therapeutisches Molekül auf Kommando freizusetzen. Dieser Ansatz wurde am Beispiel des vaskulären endothelialen Wachstumsfaktors VEGF gezeigt, der zum Beispiel dazu eingesetzt werden kann, um die Neubildung von Blutgefäßen auszulösen. Es konnte gezeigt werden, dass der Wachstumsfaktor stabil in das Hydrogel eingebaut werden kann und dass die Freisetzung des Faktors durch Zugabe von FK506 ausgelöst werden kann. Hierbei konnte eine gewünschte VEGF-Freisetzungsrate durch die Konzentration des Signalmoleküls FK506 eingestellt werden. Diese Studien, die sowohl in Zellkultur als auch in Mausmodellen durchgeführt wurden, zeigen die Eignung dieses Hydrogels als extern steuerbares Medikamentendepot.

Abbildung 6: Transfer genetischer Schalter aus der Synthetischen Biologie in die Materialwissenschaften zur Synthese intelligenter Materialien



Das spontan dimerisierende Protein F_M wird an lineare Polyacrylamid-Polymere gekoppelt. Dadurch werden die Polymerfäden vernetzt und es bildet sich ein stabiles Hydrogel aus. Durch Zugabe des Signalmoleküls FK506 werden die Proteindimere wieder dissoziiert, was zur Auflösung des Hydrogels führt. Dieses induzierbare Auflösen kann zum Beispiel dazu verwendet werden, um ein zuvor eingebettetes Medikament wie zum Beispiel einen Wachstumsfaktor (gezeigt ist der vaskuläre endotheliale Wachstumsfaktor VEGF) auf Kommando freizusetzen.

5.6 Zusammenfassung und Ausblick

Die in dieser Arbeit aufgeführten Studien zeigen die Entwicklung der Synthetischen Biologie, von den Anfängen, in denen erste synthetische biologische Schalter zur Kontrolle der Genexpression verwendet wurden bis hin zu selbstregulierten genetischen Netzwerken und intelligenten Materialien zur Behandlung von Krankheiten. Einige dieser Ansätze haben bereits Eingang in die kommerzielle Anwendung gefunden. Beispiele hierfür sind der erfolgreiche Feldeinsatz von Insektenschädlingen mit genetischen Schaltern² zur Kontrolle der Fortpflanzung oder die

2 Vgl. z. B. www.oxitec.com [08.08.2012].

Entdeckung neuer Wirkstoffe gegen antibiotikaresistente Krankheitserreger.³ Andere Ansätze, wie zum Beispiel die genetischen Schaltkreise zur Kontrolle der Harnsäurekonzentration bei Gicht oder die intelligenten Materialien zur Verabreichung von Medikamenten haben ein großes Anwendungspotenzial, wobei jedoch zunächst in klinischen Studien die optimale Verabreichung, Wirksamkeit und Patientensicherheit evaluiert werden muss.

Gemessen an den rasanten Fortschritten der Synthetischen Biologie im letzten Jahrzehnt ist jedoch zu erwarten, dass diese Hürden in nicht allzu ferner Zukunft ebenfalls überwunden werden können, um somit neuartige Lösungsansätze zur Behandlung von weit verbreiteten Krankheiten einer großen Anzahl an Patientinnen und Patienten verfügbar zu machen.

Die Arbeiten der Autoren wurden durch die Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder unterstützt (EXC 294 (BIOSS) und GSC-4 (SGBM)).

5.7 Literatur

Aubel, D. et al. (2001): Design of a novel mammalian screening system for the detection of bioavailable, non-cytotoxic streptogramin antibiotics. In: *J Antibiot Tokyo* 54(1):44–55.

Harris, A. F. et al. (2011): Field performance of engineered male mosquitoes. In: *Nat Biotechnol* 29(11):1034–1037.

Kämpf, M. M. et al. (2010): A gene therapy technology-based hydrogel for the trigger inducible release of biopharmaceuticals in mice. In: *Adv Funct Mater* 20(15):2534–2538.

Kemmer, C. et al. (2010): Self-sufficient control of urate homeostasis in mice by a synthetic circuit. In: *Nat Biotechnol* 28(4):355–360.

Kemmer, C. et al. (2011): A designer network coordinating bovine artificial insemination by ovulation-triggered release of implanted sperms. In: *J Control Release* 150(1):23–29.

Simmons, G. S. et al. (2011): Field performance of a genetically engineered strain of pink bollworm. In: *PLoS One* 6(9):e24110.

Weber, W. et al. (2008): A synthetic mammalian gene circuit reveals antituberculosis compounds. In: *Proc Natl Acad Sci USA* 105(29):9994–9998.

³ Vgl. z. B. www.bioversys.com [08.08.2012].

Hanna Wagner, Volker Morath

iGEM – Eine studentische Ideenwerkstätte der Synthetischen Biologie

Jährlich treffen sich studentische Teams im Rahmen des iGEM-(international Genetically Engineered Machine) Wettbewerbs, um sich auf dem Gebiet der Synthetischen Biologie zu messen. Der iGEM-Gedanke entstand 2003 durch einen Workshop am Massachusetts Institute of Technology (MIT) und entwickelte sich im Jahr 2005 zu einem internationalen Wettbewerb. Bei unserer Teilnahme 2010 reisten bereits 130 Teams mit insgesamt etwa 2000 Studierenden zum Endausscheid nach Boston.

Nachdem im Jahr 2007 die Albert-Ludwigs Universität Freiburg als erstes deutsches Team teilnahm, gewann der iGEM-Wettbewerb auch in der Bundesrepublik an Popularität. Vor allem die Teams aus Heidelberg und Freiburg erhielten jedes Jahr, neben einer Goldmedaille für die Erfüllung aller geforderten Wettbewerbskriterien, verschiedene Sonderpreise, die den Gesamtsieger einer Teildisziplin auszeichnen.

Die Themenwahl bei iGEM ist völlig frei – es ist alles erlaubt, was gefällt. Die Fülle an Projekten reicht von ölabbauenden Mikroorganismen, über nach Banane riechenden Bakterien, bis hin zu viralen Partikeln, die Krebs heilen. Der gemeinsame Nenner all dieser Projekte ist das BioBrick – ein standardisierter Genabschnitt mit definierter Funktion. Diese sind so aufgebaut, dass sie nach dem Baukastenprinzip kombinierbar sind und zu komplexeren Systemen zusammengesetzt werden können.

Unterstützt werden die Studierenden von einem Gruppenleiter, der Räumlichkeiten und Equipment zur Verfügung stellt, Wissenschaftlern, die bei Problemen mit Rat und Tat zur Seite stehen und der jeweiligen Universität, die für eine Grundfinanzierung sorgt. Der teilweise große Laboraufwand verschlingt nicht nur Zeit und Nerven, sondern auch Unmengen an Labormaterialien, sodass Industriepartner als Sponsoren gewonnen werden müssen.

Zur Projektfindung gehört eine umfassende Literaturrecherche, um an bereits publizierte Arbeiten sowie iGEM-Projekte anknüpfen zu können. Daran schließt sich eine detaillierte Planung an, die darauf abzielt, auf Nukleotidebene die BioBricks zu entwerfen und zu charakterisieren. Unter dem Schlagwort Human Practice wird viel Wert darauf gelegt, die Öffentlichkeit umfassend über potenzielle Chancen, aber auch über mögliche Risiken zu informieren. Der Projektverlauf und die Ergebnisse müssen sowohl auf einer Teamwebsite dargestellt werden, als auch bei der Abschlussveranstaltung, dem sogenannten Jamboree, einer Fachjury und den restlichen iGEM-Teams in Form einer Poster-Präsentation und eines Vortrages vorgestellt werden.

Der iGEM-Wettbewerb katalysiert im Bereich der Synthetischen Biologie in vielerlei Hinsicht den Fortschritt dieses Forschungszweigs: Zum einen werden jährlich mehrere Tausend Studierende weltweit begeistert, gleichzeitig haben aber auch Wissenschaft und Wirtschaft den Wert des Wettbewerbs als Ideenwerkstatt erkannt. Wie man mit diesem Ideenreichtum umgeht, wird momentan in der iGEM-Community noch diskutiert: Zum einen basiert die Parts Registry auf dem Open Source Gedanken und stellt selbst patentgeschützte Konstrukte als BioBricks kostenlos zur Verfügung, zum anderen versuchen aber auch manche iGEM-Teams ihre Projektidee als Industriekooperation zu vermarkten.

Für die Mitglieder unseres Teams waren die Beweggründe sich für unser Projekt zu engagieren vielfältig: Wir hatten die einmalige Chance, abseits von Kursen, Seminaren und Praktika ein Projekt völlig selbstständig entwickeln und verwirklichen zu können – aus unserer Sicht die wertvollste und lehrreichste Erfahrung, die wir während unseres Biologiestudiums machen durften. Die Aussicht auf Erfolg, die internationalen Kontakte zu den anderen Teams, sowie die Reise nach Boston machten die Teilnahme noch reizvoller. Unsere iGEM-Zeit hat uns nicht nur mit der Synthetischen Biologie in Kontakt gebracht, sondern viele Teammitglieder motiviert, auch die Zukunft dieses spannenden Wissenschaftszweigs mitzuprägen.

Abschließend möchten wir uns bei unseren Betreuern, Sven Hagen und Tobias Baumann, unserem Gruppenleiter, Dr. Kristian Müller, und dem Exzellenzcluster BIOS als unserem Hauptsponsor bedanken.

Kristian Köchy

6. Philosophische Implikationen der Synthetischen Biologie

Die philosophischen Implikationen der Synthetischen Biologie sind vielfältig und wie in jedem anderen Wissenschafts- und Technologiefeld setzen sie sich zusammen aus einerseits philosophischen Aspekten, die der Synthetischen Biologie als einem Forschungsprogramm direkt zukommen und andererseits denjenigen philosophisch relevanten Konsequenzen, die aus den Entwicklungen, Techniken und Konzepten der Synthetischen Biologie im gesellschaftlichen Umfeld resultieren können und das Forschungsprogramm möglicherweise nur indirekt betreffen. Dabei liegt der Fokus der folgenden Ausführungen insgesamt auf denjenigen philosophischen Fragen, die nicht in das engere Feld der Ethik fallen (vgl. Kapitel 7 in diesem Band). Diese Einschränkung ist jedoch lediglich arbeitsteiliger Natur – die vorgenommene Fokussierung meint nicht zugleich auch den faktischen Ausschluss jeglicher Bezüge zur Ethik. Im Gegenteil, um die Fülle möglicher philosophischer Fragen an die Synthetische Biologie übersichtlich zu strukturieren, wurde die Ausrichtung der Synthetischen Biologie als neue Form der Ingenieurbiologie zum Rahmenthema gewählt. Vor allem dieser Aspekt ist auch für die ethische Reflexion bedeutsam.

6.1 Synthetische Biologie als Forschungsprogramm

Das „Forschungsprogramm“ der Synthetischen Biologie verweist auf die Wissenschaftsphilosophie von Imre Lakatos (1970). Mit dessen Konzept ist die Einsicht verbunden, dass philosophische Überlegungen den sogenannten „harten Kern“ eines wissenschaftlichen Theoriegebäudes mitbestimmen. Mit dieser Überlegung ist zum Ausdruck gebracht, dass im Gegensatz zu früheren Behauptungen der Wissenschaftstheorie eine enge und wechselseitige Beziehung zwischen

philosophischen Rahmenkonzepten – selbst solchen, die man als „metaphysisch“ bezeichnen könnte – und wissenschaftlicher Sacharbeit besteht.¹

Dehnt man das eher sprachlich orientierte und theorienfokussierte Modell von Lakatos aus und bezieht die praktischen, technischen oder apparativen Voraussetzungen der Laborwissenschaften ein, wie es Ian Hacking (1992:43ff.) getan hat, dann wird klar, dass sich dieser wechselseitige Einfluss zwischen philosophischen „background beliefs“ (Hintergrundannahmen) und der konkreten Sacharbeit der Fachwissenschaft auch auf bestimmte Technologieformen oder Experimentalarrangements im Labor erstreckt.

Philosophische Vorgaben bleiben im Forschungsalltag jedoch zumeist weitgehend unthematisiert. Sie werden teilweise sogar offensiv von Fachvertreterinnen und Fachvertretern mit dem Verweis auf ihre objektiv-neutrale Sachstandsanalyse zurückgewiesen und als spekulative oder ideologische Verfälschung gedeutet. Auch wenn solche Zurückweisungen zumeist eine Art „falsches Bewusstsein“ der Fachgemeinde über die Bedingungen ihrer eigenen Laborarbeit zum Ausdruck bringen, so gibt es doch Phasen innerhalb wissenschaftlicher Entwicklungen, die für die Offenlegung und Anerkennung philosophischer Vorgaben prädestiniert sind als andere und bei denen der philosophische Input in die Wissenschaft sogar von der Fachgemeinde weitgehend anerkannt wird. Dabei kann dieser offener Umgang mit der Philosophie durch wissenschaftsinterne Bedingungen – etwa steigende Unsicherheiten über die theoretischen Deutungsmuster für empirische Befunde – oder durch wissenschaftsexterne Bedingungen – etwa wachsende gesellschaftliche Kritik an wissenschaftlichen Methoden oder Zielsetzungen – bedingt sein.²

Die Synthetische Biologie scheint nun eine solche Phase in der Entwicklung der Biowissenschaften zu sein, in der eine besondere philosophische Tragweite fachwissenschaftlicher Ent-

1 Vgl. dazu die auch für Fragen zur Synthetischen Biologie relevanten Fallstudien in Köchy, 2005; 2007; 2008a; 2008b.

2 Wobei schon die Unterscheidung von internen und externen Momenten eine philosophische Vorentscheidung darstellt, gegen die auch Einwände erhoben werden können; vgl. dazu Daston, 2001:144f.

wicklungen offenkundig wird, in dieser Hinsicht eine offenere Bezugnahme zur Philosophie herausfordert und diese selbst für die Fachgemeinde akzeptabel macht. Dabei wirken offensichtlich beide der oben genannten Faktorengruppen zusammen. So hat etwa die Publikation der ersten Herstellung einer Bakterienzelle, die ein komplett im Labor synthetisiertes Genom beinhaltet, durch die Arbeitsgruppe um Craig Venter nicht nur eine Reihe von philosophischen Fragen bei den wissenschaftlichen Kommentatoren oder in der medialen Öffentlichkeit heraufbeschoren (vgl. etwa Schummer, 2011:113ff., vgl. hier auch Kapitel 9 in diesem Band), sondern der wissenschaftliche Bericht über die Ergebnisse der Forschung endet selbst mit dem Hinweis auf die philosophische Bedeutung des Ansatzes:

„We have been driving the ethical discussion concerning synthetic life from the earliest stages of this work [...]. As synthetic genomic applications expand, we anticipate that this work will continue to raise philosophical issues that have broad societal and ethical implications. We encourage the continued discourse.“ (Gibson, 2010:56)

6.2 Der philosophische Rahmen der Synthetischen Biologie

Neben den immer wieder betonten Folgen der Synthetischen Biologie für gesellschaftliche und ethische Fragen drängen sich aus theoretischer Perspektive viele weitere philosophische Fragen auf. In der öffentlichen Wahrnehmung und auch im Fachdiskurs sind diese Aspekte allerdings weitgehend unthematisiert geblieben. Dabei sind diese im Vorfeld der Ethik liegenden Momente auch für eine ethische Standpunktbestimmung durchaus relevant. Zum philosophischen Rahmenwerk der Synthetischen Biologie gehören beispielsweise:

- ▶ *ontologische Überzeugungen* über die Beschaffenheit des Untersuchungsobjekts „lebendiges System“ (vgl. etwa Deplazes-Zemp, 2011),
- ▶ *methodische Fragen* zur Bevorzugung oder Bewertung von apparativer Ausrüstungen, Instrumentarien oder Verfahren (vgl. etwa die Überlegungen zum orthogonalen Ansatz bei Billerbeck/Panke, 2012:23ff.),
- ▶ *methodologische Vorannahmen* etwa über die Rolle molekularbiologischer Erklärungen für komplexe Biosysteme oder zu Funktion und Status von Computersimulationen aus der Systembiologie für den Einsatz in der Synthetischen Biologie (Krohs, 2010). Auch die Entscheidung zwischen elementaristischen oder holistischen Erklärungsformen respektive über die

relevanten Beziehungen zwischen chemischen, biologischen und technischen Systemen gehören in diesen Bereich (vgl. die Beiträge in Dabrock et al., 2011; Boldt et al., 2012).

Bedeutsam sind jedoch auch Überzeugungen zum *Forschungsethos*, die stets mehr sind, als nur ein Ausdruck für „Gute wissenschaftliche Praxis“. Sie umspannen den weiten Bereich *epistemischer Tugenden* (Daston/Galison, 2007:41ff.). Somit ist ein rein technisches Verständnis des „Kodes wissenschaftlicher Redlichkeit“ (Lakatos, 1970) zu eng. Hier geht es nicht nur um wissenschaftliche Exaktheit oder technisches Können, sondern immer auch um Wissenschaftsideale und Selbstbilder der Forschenden. Dabei greifen fachinterne Ideale, öffentliche Inszenierung und mediale Erwartung ineinander über, wie es etwa an der Präsentation von Craig Venter deutlich wird. Philosophisch interessant ist es vor allem, solche Phänomene im Rahmen sich ändernder wissenschaftlicher „Denkstile“ (Fleck, 1980) zu analysieren.

Schließlich kann die Synthetische Biologie auch unter dem Gesichtspunkt ihrer *Orientierung an philosophischen Konzepten* betrachtet werden. Beispielsweise ist der Zweig der Synthetischen Biologie, der sich aus der „origins of life“-Forschung ableitet (hier geht es um die Evolution von belebten Systemen aus unbelebten Vorformen) und in der die Konstruktion von Protozellen aus unbelebten Vorstufen eine wichtige Rolle spielt, durch die immer auch philosophischen Konzepte aus der Frühphase der Reflexionen zur chemischen Evolution bestimmt.³

6.3 Der Denkstil des Ingenieurs

Wie meine einleitenden Überlegungen in diesem Band deutlich machen, wird als typisch für die Synthetische Biologie vor allem deren Ausrichtung als eine neue Ingenieurbiologie erachtet (vgl. auch Brukamp 2011; Billerbeck/Panke 2012). Dieser Wandel ist nicht neu und auch nicht einmalig. Im Verlauf der Geschichte der Biologie war das technische Verständnis von Biologie immer wieder Gegenstand umfassender und kontroverser Methodendebatten (vgl. hierzu u. a. Maier/Zoglauer, 1994; Bud, 1995 sowie Kapitel 3 in diesem Band). Wie die derzeit geführten Diskussionen über die Synthetische Biologie andeuten, hat der sich abzeichnende Trend in Richtung auf eine Ingenieurbiologie möglicherweise jedoch hinsichtlich Umfang und Eingriff tiefe eine neue Qualität. Mit Blick auf den oben genannten Kanon philosophisch relevanter

3 Etwa die Koazervatkonzeption von Oparin; vgl. dazu Witt, 2012:105ff. Siehe dazu auch Kapitel 4 in diesem Band.

Aspekte der Synthetischen Biologie wäre dann vor allem bedeutsam, dass der Wechsel vom Denkstil des Biologen zum Denkstil des Ingenieurs auch einen Wandel der epistemischen Tugenden des Wissenschaftlers zu dem des Technikers bedingt.⁴

Hinsichtlich des Ideals der Forschung – das sowohl methodische als auch methodologische Annahmen beinhaltet – ist somit für die philosophische Sicht auf die Synthetische Biologie vor allem das die Disziplin kennzeichnende neue Leitbild des Ingenieurs bedeutsam. Diesen Aspekt betonen auch die aus dem Feld stammenden Kennzeichnungen des Faches. So hebt etwa Breithaupt hervor: „What is certainly different is the mindset that proponents of synthetic biology – many whom come from engineering – bring to biology“ (Breithaupt, 2006:22). Breithaupts Feststellung weist zudem Konsequenzen dieser Neuausrichtung aus. So resultiert für ihn aus dem „mindset“ des Ingenieurs ein pragmatischer und lösungsorientierter Umgang mit technischen Problemen. Ingenieurinnen und Ingenieure zeichneten sich zudem durch ihre Erfahrung im Umgang mit komplexen Systemen und deren Modellierung aus sowie durch ihre Konzentration auf diejenigen Teile des Systems, die man bereits verstanden hat sowie ein Ignorieren noch unbekannter Bereiche. Wie es ein Zitat von Tom Knight vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) deutlich macht, gilt diese pragmatische Eingrenzung von Forschungsfragen auf technisch Lösbares als typisch für die Synthetische Biologie: [An] „alternative to understanding complexity is to get rid of it“ (What’s in a name?, 2009:1073).

Die Orientierung am „Ingenieurideal“ meint in all diesen Fällen die Haltung eines Bastlers, „bricoleurs“ oder „tinkerers“ (vgl. dazu meine einleitenden Überlegungen in Kapitel 1 in diesem Band), wobei mit dieser Akzentuierung sowohl die Arbeitsweise im Kontext der offiziellen Laborforschung als eben auch die steigende Option einer konkreten Garagenbiologie (vgl. dazu auch Kapitel 7 und Spotlight III in diesem Band) angesprochen ist. Die soziologische Bestimmung des Leitbildes vom Bastler im Labor durch Knorr-Cetina (2002:17ff.) macht deutlich, dass mit dem in diesem Leitbild ausgedrückten Pragmatismus der Wissenserzeugung auch ein konstruktives Verständnis wissenschaftlicher Weltkonzeption einhergeht („Fabrikation von Erkenntnis“). Diese Bestimmung der Wissenschaftssoziologin bestätigt der Zellbiologe und

4 Den mit dem Wechsel des Denkstils verbundenen Wandel in der „Logik“ der Handlungsformen – etwa von Pflege- zu Züchtungspraktiken – hat Jürgen Habermas (2001:81) im Fall der Humangenetik thematisiert und in seiner ethischen Bedeutung bestimmt.

Pharmakologe Wendell Lim, wenn er auf eine Umfrage der Zeitschrift „Nature Biotechnology“ antwortet: „At its heart, all synthetic biology shares a constructivist philosophy of trying to figure out how simpler parts can be combined to build systems with more sophisticated behaviors“ (What’s in a name?, 2009:1072).

Nach Knorr-Cetina ist für einen Bastler wissenschaftliche Faktizität das, was im Labor fabriziert wird. Dinge zum Laufen zu bringen („to make things work“), wird zum Leitmotiv der Forschung. Insbesondere lokale Praktiken des Labors, weniger jedoch allgemeine Kriterien für Wissenschaftlichkeit überhaupt spielen eine bedeutsame Rolle. Die Arbeit der „tinkerer“ ist durch einen implizierten Opportunismus charakterisiert – den Umgang mit und die Anpassung an die materialen Gegebenheiten eines bestimmten Forschungsumfeldes und einer konkreten Forschungsaufgabe. In Übereinstimmung mit dieser Bestimmung von der Warte der Wissenschaftsforschung zitiert auch Breithaupt den Synthetischen Biologen George Church (Cambridge): „You focus on parts of the science that you do understand and clean out the parts that you don’t understand“ (Breithaupt, 2006:22). Ähnlich betont auch Serrano, es ginge bei der sich in der Synthetischen Biologie zeigenden Ausrichtung am Engineering weniger um Standardisierung von Teilen als vielmehr um das Design und die Simulation neuer Funktionen. Dabei sei es bedeutsam, dass wir selbst ohne vollständiges Verständnis darüber, wie lebende Zellen arbeiteten, in der Lage seien, sie in einer sinnvollen Weise nachzubauen (Serrano, 2007:2).

In diesen Überlegungen aus dem Feld wird allerdings ein deutlich anderes Forschungsideal formuliert, als es immer wieder durch die Hoffnung auf erstmaliges planmäßiges Engineering kompletter biologischer Systeme zum Ausdruck gebracht wird. Dieses zweite Ideal eines rationalen, mit den umfangreichen Datensätzen der Systembiologie operierenden Planungsverfahrens am Reißbrett findet sich vorwiegend in Bestandsaufnahmen durch Wissenschaftsorganisationen oder politische Förderinstitutionen (vgl. dazu Kapitel 1 in diesem Band). Jedoch auch aus dem Feld der Forschenden werden Hoffnungen auf neue Planungssicherheit betont. So liegt nach Billerbeck und Panke der Fokus der Synthetischen Biologie auf den Begriffen „Systeme“, „effizient“ und „planbar“ (Billerbeck/Panke, 2012:20). Die gesteigerte Effizienz der Synthetischen Biologie gegenüber der Gentechnologie ergibt sich demnach aus der Automation und Standardisierung in der Systembiologie sowie aus einem modularen Ansatz, der mit Standardbausteinen arbeitet. Hoffnungen auf Planbarkeit legitimieren sich auch aus neuen Techniken zum Ausschluss unerwarteter Interaktionen in komplexen Biosystemen, wie sie die Entwicklung von orthogonalen Systemen garantieren soll.

In vielen Fällen von Planbarkeitsrhetorik werden auch alte Vorstellungen zu rationalen Handlungslogiken mit abgerufen, die mit Ansprüchen auf Naturbeherrschung durch methodische Eingriffe einhergehen. Solche Leitbilder gehören seit den Überlegungen von Francis Bacon zum tradierten Kanon der neuzeitlichen Naturwissenschaft. Gerade die in diesem Zusammenhang immer wieder zum Einsatz kommende Maschinenmetaphorik (s. u.) fungiert als Ausdruck für die gesetzmäßige Struktur und Gestaltbarkeit des naturwissenschaftlich-technischen Objektfeldes. Es geht dabei sowohl um die planvolle Ordnung der Natur als auch um die dem ausgebildeten Techniker mögliche Durchschaubarkeit des mechanischen Geschehens. Beide Aspekte sind die konzeptionellen Säulen für eine erfolgreiche, auf Herrschaftswissen bauende Naturwissenschaft (vgl. dazu Sutter, 1988). Sie bilden zudem den Garanten für die Einlösbarkeit gesellschaftlicher Erwartungen an die neuen Verfahren und damit eine Berechtigung dafür, ihre Umsetzung zu finanzieren.

6.4 Menschenbilder und Handlungskonzepte: Vom Homo faber zum Homo creator

Philosophisch betrachtet ist das sich in der Synthetischen Biologie äußernde Leitbild der Ingenieurbiologie häufig mit einem Selbstverständnis der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler verbunden, das viele Elemente des anthropologischen Konzepts des *Homo faber* aufweist. Die Bezeichnung selbst wurde unter anderem vom Lebensphilosophen Henri Bergson geprägt, der mit diesem Konzept sowohl eine wissenschaftliche Haltung als auch eine Art von „Alltagsmetaphysik“ bezeichnete. Für Bergson ist diese Pragmatik vor allem auf anorganische Bildungen bezogen. Dieses am Modell des Bauens orientierte Leitbild des wissenschaftlichen Intellekts zielt auf Konstruktion und Fabrikation. Bergsons Überlegungen zur wesenhaften Nutzensausrichtung der Wissenschaft, des ihr zugrunde liegenden Selbstverständnisses des Menschen als Hersteller sowie des in Anschlag gebrachten Naturbildes als baukastenartige Ordnung steht selbst in einer langen philosophischen Tradition, deren Überlegungen im wissenschaftlichen Gewand auch in der Synthetischen Biologie immer wieder auftauchen. So werden, wie unter anderem von Hans Jonas bereits als Reaktion auf die ersten Entwicklungen der Gentechnologie postuliert (Jonas, 1987:204ff.), die im Bild des Homo faber kondensierten Momente des Gestaltungsoptimismus und der Kontroll- und Beherrschungseuphorie in der Debatte um die Verbindung von Biotechnologie und Nanotechnologie zur Nanobiotechnologie vermehrt abge-

rufen (vgl. Grunwald, 2008:41f.). Sie münden in einigen Fällen gar in transhumanistischen Utopien (vgl. Gammel, 2008). Im Kontext der Synthetischen Biologie ist das auf dessen Herstellungsfähigkeit ausgerichtete Bild vom Menschen offensichtlich nochmals potenziert und unter stärkerer Betonung des Schöpfungsmoments im Sinne eines Homo creator akzentuiert (Müller, 2012:223ff.). Erneut finden sich eingeleitet durch die Vorstellung eines „created co-creator“ auch Überhöhungen. Diese stilisieren sich in der Debatte um die Synthetische Biologie zur Hybris des „playing god“ (vgl. u. a. Schummer, 2011; vgl. auch Kapitel 9 in diesem Band).

Die philosophische Tradition der Bestimmung des Menschen unter Hervorhebung seiner Fähigkeit zur wissenschaftlich-technischen Naturbemächtigung (vgl. dazu auch Kapitel 8 in diesem Band) – eine Tradition, die der wissenschaftlichen Fachgemeinde und den Technikforschenden im Kontext der Synthetischen Biologie nicht immer präsent ist – beinhaltet weitere Aspekte. Hier ist an zentraler Stelle eine Überlegung zu nennen, die etwa schon Immanuel Kant („Kritik der reinen Vernunft“ B XIII) in Anlehnung an Giambattista Vico formulierte. Vico hatte zur Begründung des Sonderstatus der Kulturwissenschaften – welche es im Gegensatz zu den Naturwissenschaften stets mit menschlichen Produkten zu tun hätten – das „verum factum“-Argument vorgebracht. Demnach ergibt sich aus dem Herstellenkönnen auch ein Garant für die Wahrheitsansprüche eines Wissensgebietes. Dieses Argument wurde von Kant auf die Naturwissenschaften ausgedehnt. Auch hier sei die herstellkönnende Praxis Beleg für die Richtigkeit der Theorie. Die Fähigkeit, materielle Systeme entsprechend theoretisch-wissenschaftlicher Modelle herstellen zu können, wird in diesen Überlegungen zum wesentlichen Indiz für die Richtigkeit dieser Modelle. Analoges wird in großem Umfang mit Bezug auf die Synthetische Biologie postuliert. Unter Nennung dieses Mechanismus wird die Bedeutung der Synthetischen Biologie gerade darin gesehen, dass sie als „proof of principle“ fungiert. Wer komplexe Biosysteme aus einfachsten Bausteinen herstellen könne, habe gezeigt, dass er die Gesetze des Aufbaus und der Funktion dieser komplexen Systeme verstehe und einen Beleg für Richtigkeit systembiologischer Modelle geliefert. Kritik an dieser Überlegung wurde unter anderem von Schummer (2011:136ff.) formuliert.⁵ Für ihn bedeutet die künstliche Imitation eines Zusammenhangs nicht automatisch schon dessen Verständnis. Wie jedoch Rehmann-Sutter

5 Vgl. in anderer Ausrichtung auch Weiss, 2011.

(2011:285) in seiner Kritik an Schummer hervorhebt, ist der Nachbau ein zentraler Schritt im Zuge der naturwissenschaftlichen Überprüfung und der experimentellen Exploration.

In Übereinstimmung mit diesem Einwand wird auch von den Forscherinnen und Forschern der Synthetischen Biologie immer wieder die neue Fähigkeit hervorgehoben, mittels systembiologischer Modellierungen der Struktur von Biosystemen, funktionsfähige materiale Systeme nachbauen zu können. Dieses wird als entscheidender Beleg für die Richtigkeit der Modelle genannt (vgl. etwa Drubin et al., 2007:242). Insgesamt erlangt damit die Synthetische Biologie eine Belegfunktion für Modelle der Systembiologie. Auch nach Tucker und Zilinskas gilt „the ability to design and construct simplified biological systems“ als ein Weg zur Überprüfung unseres „understanding of the complex functional networks of genes and biomolecules that mediate life processes“ (Tucker/Zilinskas, 2006:25). Dabei erstreckt sich die Rolle des Überprüfungsinstruments nicht nur auf den theoretischen Prozess der Legitimierung von systembiologischen Modellen, sondern geht auch auf praktisch-technische Fertigungsziele über. Nicht nur geht es um die Nachahmung des Vorgegebenen, sondern immer auch um die schöpferische Konstruktion von Neuem. In diesem Sinne betont die Arbeitsgruppe um Venter für ihr synthetisiertes Bakterienzellgenom: „This work provides a proof of principle for producing cells based on computer-designed genome sequences“ (Gibson et al., 2010:55). Die Überprüfungsfunktion bezieht sich in diesem Fall auf ein primär technisches Herstellungswissens. Sie ist – vor allem angesichts der obigen Überlegungen zum „trial and error“-Ansatz des „tinkering“ – damit in den Geltungsansprüchen weniger weitreichend als die Überprüfung eines theoretischen Wissens mit Allgemeinheitsanspruch. Damit wäre zugleich auch der Geltungsumfang bestimmter wissenschaftlicher Modellierungsansätze eingeschränkt. Auf der anderen Seite kommt jedoch mit der Erweiterung des Nachbaus in Richtung auf konstruktive Neugestaltung nicht nur die Eigenständigkeit der technischen Sphäre deutlicher zur Geltung, sondern es wird zudem ein erhöhter Anspruch auf Machbarkeit und Gestaltungskraft formuliert.

6.5 Von der Biologie zur Ingenieurbiologie

Mit dem ingenieurwissenschaftlichen Denkstil ändert sich also nicht nur das Verständnis von der Aufgabe der Forschenden oder der Funktion ihres Forschungshandelns, sondern sukzessive auch das Verständnis der gesamten Disziplin – der Synthetischen Biologie ebenso wie möglicherweise der Biologie insgesamt. So heben Drubin und Kollegen hervor:

„From an engineering point of view, biology is a tool or a system of parts that can be used to construct devices that accomplish a variety of tasks. The engineering influence seeks out the simplicity in biological systems, and brings standardization and modular design principles to biology.“ (Drubin et al., 2007:242)

Nach dem Obigen gehören nicht nur Nachahmung und Nachbau zum Überprüfungsinstrumentarium der sich technisch verstehenden Biowissenschaft, sondern ebenso die gezielte Abweichung von der natürlichen Vorgabe. Dieses kommt insbesondere im Konzept der Orthogonalität zum Ausdruck, dem Versuch, natürliche Komplexität durch die Herstellung voneinander unabhängiger (künstlicher) Module zu reduzieren und technisch beherrschbar zu machen (Billerbeck/Panke, 2012:23ff.; Schmidt, 2012:68ff., vgl. auch Kapitel 4 in diesem Band). Wie die Methode der Variation ein methodisches Grundverfahren jeder experimentellen Erforschung des Gegebenen darstellt (vgl. Mach, 2002:181), so gehört die Variation eben auch zu den technischen Zielvorstellungen des Gemachten. Im Sinne der ersten, Wissen generierenden Funktion der Variation hebt Hana El-Samad die Rolle von gezielt erzeugten Störungen in biologischen Systemen für deren theoretisches Verständnis hervor: „Synthetic biology could provide the first ingredient by generating genetically encoded ‘perturbation’ generators that are well designed and characterized, while being tunable and portable“ (What’s in a name?, 2009:1073). Auch Benner betont: „Building artificial genetic, regulatory and metabolic systems should offer a new way to learn more about genetic, regulatory and metabolic systems in general“ (Benner, 2003:118).

Wie schon von Hans Jonas betont, ist diese Affinität der modernen Biologie zur Technik nicht zufällig, sondern vielmehr struktureller Natur und im Gedanken neuzeitlicher Naturwissenschaften selbst angelegt. Diese „Naturwissenschaft ist technologisch in ihrem Wesen“ (Jonas, 1973:276) und arbeitet im kleinen Maßstab mit der Praxis des Experiments zur Überprüfung von Theorie (die Seite des „proof of principle“), im großen Maßstab mit dem Einsatz von theoretischen Modellen für die praktisch-technischen Gestaltung von Natur (die Seite des „design of nature“ oder der „toolbox of nature“).

6.6 Biotechnik als Sonderform der Technik?

Trotz dieser strukturellen Bedeutung der Technik für die Wissenschaft bleibt nach Jonas' Bestimmungen „Herstellen“ als Zusammenstellen eines Produkts aus bestehenden Stoffen nach Art natürlicher Vorgaben vom „Erzeugen“ als Neubildung entsprechend subjektiver Vorgaben und Ziele qualitativ zu unterscheiden. Insbesondere für die Biologie erkennt Jonas Grenzen. So sind biologische Techniken durch die besonderen Eigenschaften der zu gestaltenden (oder erzeugenden) Systeme von Techniken am Anorganischen grundsätzlich verschieden (Jonas, 1987:164ff.). Nach dieser auf die klassische Gentechnologie gemünzten Überlegung bleibt biologische Technik darauf beschränkt, bestehende Strukturen abzuwandeln und ist wegen der Komplexität, Individualität, Ordnung und Dynamik ihres Gegenstandsbereichs kein Erzeugen im Sinne einer De-novo-Planung. Biologische Technik bleibt so stets Planveränderung (vgl. zum Folgenden Köchy, 2012a; 2012b).

Betrachtet man nun die Herstellungsideale und Ansätze der Synthetischen Biologie, dann ist etwa mit dem Bottom-up-Ansatz einerseits (Aufbau von den einfachsten Bausteinen aus) und dem systemischen Anliegen andererseits (Aufbau bis zur Ebene ganzer Systeme) die Gegenposition zur beschränkenden These von Jonas zum Ausdruck gebracht. Tatsächlich wird innerhalb der Synthetischen Biologie der Anspruch erhoben, eine De-novo-Synthese komplexer Biosysteme oder modifizierter technischer Systeme umzusetzen. Es wird behauptet, man könne dieses Ziel durch Konstruktion von den elementaren natürlichen (oder künstlichen) Bausteinen ausgehend erreichen (Drubin et al., 2007:242). Künstliche Biosysteme aller Komplexitätsstufen (von „Protozellen“ bis hin zu neuen Lebewesen) sollen von der elementaren Basis her erzeugt werden. Allerdings kann mit Blick auf die derzeit existierenden Verfahren gezeigt werden (Köchy, 2011; 2012a; 2012b), dass dieser Anspruch die realen Bedingungen nur eingeschränkt wiedergibt. Auch die bisher vorliegenden Verfahren der Synthetischen Biologie werden unter biologisch vorgegebenen Rahmenbedingungen umgesetzt, sodass sich Jonas' Behauptung einer durch die Systembedingungen der Biologie bedingten Sonderform biologischer Technik cum grano salis auch unter den Bedingungen heutiger Synthetischer Biologie halten lässt (auf diesen Punkt geht auch der nächste Abschnitt ein). Die Argumente für diese Überzeugung betreffen drei Ebenen:

- ▶ *Berücksichtigung biologischer Modelle (als „Modelle von“) für die Fertigung:* Entsprechend der gängigen These von der Ergänzung systembiologischer Analysen durch die Konstruktionen

der Synthetischen Biologie erfolgt die Konstruktion auf der Basis eines vorliegenden Wissens über die Struktur und die Funktion biologischer Systeme. Das systembiologische Kartieren („mapping“) von Stoffwechselwegen oder Gen-Protein-Interaktionen, die daraus resultierenden logischen „Schaltkreise“ der Relationen in natürlichen Organismen (auf der Zell-, Gewebe oder Organismus-Ebene) sowie die Integration all dieser Daten in systembiologischen Computermodellen dienen demnach als Vorlage und Basis des Fertigungsgeschehens. Damit werden Modellbildung und Simulation zu wichtigen Werkzeugen. Bedeutsam ist, dass es sich in diesem Fall nicht nur um Modelle *für* bestimmte (künstliche) Funktionen handelt, sondern eben vor allem um Modelle *von* (natürlichen) Biosystemen. Im Gegensatz zu „Modellen für“, die vor allem die Zielsetzungen des Modellgebrauchs im Zuge von Konstruktionen betonen, beinhalten „Modelle von“ immer Verweise auf die Vorgaben des für den Modellgebrauch in Anschlag gebrachten Originals. So ist etwa bei dem viel diskutierten Nachbau des Genoms des Bakteriums *Mycoplasma mycoides* durch die Arbeitsgruppe Venter der erste Arbeitsschritt, die Daten des zuvor sequenzierten Genoms von mehr als einer Million Bausteinen im Computer zu rekonstruieren, um es dann als „Bauanleitung“ für die Nachkonstruktion zu nutzen.

- ▶ *Berücksichtigung biologischer Designprinzipien und einer biologischen Natur der Fertigung selbst:* Weiter ist bedeutsam, dass die Synthetische Biologie bei der Herstellung neuer Systeme und neuer Funktionen explizit auf biologische Designprinzipien zurückgreift oder biologische Produktionskapazitäten nutzt. Hinsichtlich des ersten Punktes heißt es in der Kennzeichnung der Europäischen Kommission: „synthetic biology aims to go one step further by building, i.e. synthesizing, novel biological systems from scratch *using the design principles observed in nature* [meine Hervorhebung, KK]“ (European Commission, 2005:11). Man folgt damit dem Ziel, biologische Selbstorganisationsmechanismen zur Fertigung von Produkten einzusetzen – ein Aspekt der immer wieder unter dem Label „the toolbox of nature“ zum Ausdruck gebracht wird. Mit dem Ansatz einer „gerichteten“ Selbstorganisation werden jedoch nicht nur spezifische biologische Organisationsbedingungen relevant, auch erlangt die Art der technischen Produktion den neuen Charakter einer Koproduktion mit natürlichen Produktionsweisen und biologischen Systemen. Dieser Aspekt wird im Fall der Venterschen Arbeit auf zwei Stufen des Fertigungsgeschehens relevant: Erstens erfolgt der Nachbau des im Computer rekonstruierten Genoms von *Mycoplasma mycoides* in Zellen der Bäckerhefe (*Saccharomyces cerevisiae*), in denen aus kurzen DNA-Fragmenten sukzessive

größere Einheiten mittels der Stoffwechselfunktionen und durch die spezifische Produktionsweise von lebenden Zellen erstellt werden. Zweitens wird dieses so auf biologische Weise erzeugte Genom dann in die Zellen eines zweiten Bakteriums (*Mycoplasma capricolum*) eingebaut. Das fremde Genom ist zwar in der Lage, die Empfängerzellen entsprechend seines „Bauplanes“ umzuprogrammieren, aber wieder erfolgt dieser Prozess innerhalb der Organisationsbedingungen einer lebenden Zelle und stellt somit weitgehend ein biologisches Geschehen dar.

- ▶ *Berücksichtigung der biologischen Materialeigenschaften für die Fertigung:* Schließlich ist man mit diesen Bezugnahmen auf biologische Grundstrukturen und Produktionsprinzipien, ja gar den Einsatz eines biologischen Materials, in vielerlei Hinsichten mit der technischen Fertigung an biologische Vorgaben gebunden, die die Fertigungsziele modifizieren oder gar verunmöglichen können. Trotz der Vokabulare, die Organismen und deren Bestandteile im Kontext des Maschinellen deuten (s. u.), haben damit genuin biologische Kategorien eine essenzielle praktische Funktion für die Synthetische Biologie. Betrachtet man etwa die „Bausteine“ und „Werkzeuge“ des Ansatzes genauer, wie sie exemplarisch durch die BioBricks repräsentiert werden, dann handelt es sich zumeist um Einheiten eines komplexen biologischen Regulationsgeschehens (etwa „genetic circuits“). Der bedeutsame Aspekt der biologischen Komplexität wird nicht nur von den Protagonistinnen und Protagonisten der Synthetischen Biologie immer wieder zu den zentralen Rahmenbedingungen und Herausforderungen ihres technischen Ansatzes gezählt, auch gerade die Minimalisierungsstrategien (Minimalgenom, Orthogonalität etc.) müssen als methodische Antwort auf diese Rahmenbedingungen verstanden werden.⁶

Die hier berührte biologische Plastizität und Variabilität wird im Kontext der Synthetischen Biologie immer wieder hervorgehoben und mit dem Begriff „Robustheit“ bezeichnet. Darunter wird etwa die Tatsache verstanden, dass lebende Zellen eine große Toleranz gegenüber der Veränderung ihrer Systemorganisation aufweisen. Sie tolerieren den Einbau von fremden Netzwerken und Stoffwechselwegen in großem Umfang (Serrano, 2007:2). Auch der Einsatz orthogonaler Verfahren (Billerbeck/Panke, 2012:21) gilt als Weg zur Umgehung biologischer Komplexität unter

6 Vgl. auch die Untersuchung der biologischen Oszillation mittels synthetisch hergestellter genetischer Ringoszillatoren (Drubin et al., 2007:243).

Nutzung der Robustheit. Die Tatsache, dass lebende Systeme in der Lage sind, ihre Systemidentität trotz Systemdynamik aufrechtzuerhalten, ist jedoch nicht nur als Ermöglichungsgrund des technischen Eingriffs zu verstehen. Man kann alternativ auch betonen, dass Robustheit für besondere biologische Qualitäten steht. Die Weise, wie Biosysteme Robustheit erlangen, liegt in deren plastischer Reaktion auf Änderungen der inneren und äußeren Umwelt. Unter philosophischen Vorzeichen wird die Fähigkeit, Systemidentität selbst bei großen Störungen aufrecht zu erhalten, immer wieder als Ausdruck für die Autonomie von Organismen genannt. Diesbezüglich betont auch Ron Weiss:

„[...] we must also be cognizant of the interesting and challenging features of the biological substrate that make it different from all other existing engineering disciplines (e.g. self-replication, self-repair, mutation and evolution, high degree of noise, incomplete information.“ and the importance of cellular context).“ (What’s in a name?, 2009:1073)

6.7 Organismen als Maschinen?

Die planvolle Ordnung des Systemgeschehens, der strukturierte Bau von angepasst funktionierenden Systemteilen, der zweckmäßige Aufbau und Ablauf von Systemprozessen wurden seit der Antike durch teleologische Modelle und Deutungen zum Ausdruck gebracht, also durch Rekurse auf eine Zweckmäßigkeit und Zielgerichtetheit des Geschehens. Seit den Einwänden gegen dieses Verfahren, wie sie vor allem in der frühen Neuzeit vorgebracht wurden, sind teleologische Erklärungen in den Naturwissenschaften allerdings als anthropomorphe Verfremdung der Natur verpönt. Man sieht in ihnen eine unerlaubte Vermenschlichung der Natur. Hier werde menschliche Handlungsplanung illegitimer Weise auf Naturprozesse übertragen.

Obwohl diese Behauptung sicher verkürzt ist und den Bedingungen teleologischen Urteilens vor allem in der Biologie nicht gerecht wird (vgl. Toepfer, 2004), hat sie im Lauf der Geschichte der Wissenschaften dazu geführt, dass technologische Modelle und eine technomorphe Deutung an die Stelle der Teleologie traten (vgl. Rothschuh, 1970; Sutter, 1988; Canguilhem, 2009). Noch im 20. Jahrhundert werden in diesem Sinne die aus den Erfahrungen mit der Regelung und Steuerung technischer Systeme abgeleiteten kybernetischen Modelle auf Lebensvorgänge übertragen, weil damit auch eine explizit teleologische Konnotation einhergeht (Wieser, 1959:16).

Entsprechend der erwähnten Verbindung von Erzeugen und Erkennen ergibt sich auch in der Synthetischen Biologie ein solchermaßen technisches Verständnis des Lebendigen. Es werden Analogien aus der Welt der Artefakte und Maschinen bemüht, um Strukturen und Funktionen von Lebewesen zu beschreiben. So gilt nach der Studie des Rathenau Instituts: „If we view life as a machine, then we can also make it: this is the revolutionary nature of synthetic biology“ (Rathenau Institut, 2007:2). Lebewesen oder Biosysteme werden also umfänglich als Maschinen gedeutet. Der Vergleich mit Maschinen, die Rede von „living machines“, „Nanomachines“, „Nanomotoren“ oder gar „Nanorobotern“, ist seit der Proklamierung der Nanobiotechnologie auf dem Vormarsch. Transportprozesse in der Zelle etwa, die auf der Wechselwirkung von Biomolekülen des Zellskeletts beruhen, werden als Wechselwirkung von längenveränderlichen Molekülfäden mit leistungsfähigen Nanomaschinen oder biomolekularen Motoren beschrieben (vgl. Köchy, 2008c; auch VDI, 2002:3/51f.). Berücksichtigt man verwandte Debatten in der Entwicklungsbiologie des frühen 20. Jahrhunderts (vgl. Haraway, 1976), dann entsteht der Eindruck, durch die heutige inflationäre Verwendung der Maschinenkonzeption werde konzeptionell ein Schritt rückwärts vollzogen. Bereits in der genannten Debatte hatte man sich nämlich zur Ablösung von einem festgefahrenen weltanschaulichen Streit zwischen Mechanisten und Vitalisten von simplen Maschinenmodellen verabschiedet:

„Despite the fact that each camp rested secure in the belief that reason and experiment resided with it alone, no resolution could or did occur until the machine paradigm common to mechanist and vitalist alike was fundamentally altered [...]. [...] a process of paradigm change in metaphor from machine to organic system.“ (Haraway, 1976:6f.)

6.8 Maschine und „automaton“

Allerdings ist in Rechnung zu stellen, dass sich der Organismus-Maschine-Vergleich durch die veränderten Maschinenkonzepte der letzten Jahrzehnte deutlich gewandelt hat. Gerade dieser Wandel macht eine Besonderheit der Synthetischen Biologie deutlich. Treten wir deshalb bildlich gesprochen einen Schritt zurück, um ein vollständigeres Bild zu erlangen: Der Streit um die Angemessenheit eines Vergleichs von Organismen, deren Teilstrukturen und -prozessen mit den Abläufen und Strukturen von Maschinen bildet ein philosophisches und wissenschaftliches Großthema, das zeitlich lange zurück reicht und über das auch in der Biologie immer wieder

vehement gestritten wurde. Angesichts der Vielfalt der hierzu vorliegenden Positionen und der Heterogenität der Definitionen und Bestimmungen von „Maschine“ ist es zur Orientierung sinnvoll, auf der Basis historischer und systematischer Klassifikationsversuche (vgl. Schmidt-Biggemann, 1980) eine vorläufige Bestimmung von „Maschine“ vorzunehmen: Maschinen sind künstliche, durch Menschen entworfene Gebilde, deren struktureller und materialer Aufbau zur Erfüllung einer definierten Funktion, zur Erreichung eines definierten Zweckes oder zur Erzeugung eines definierten Effektes konzipiert wurde. Maschinen sind von deren Erfindern auf den Effekt (oder die Effekte) hin angelegt. Ihre Existenz verdankt sich wie bei Werkzeugen auch dem menschlichen Gebrauch. Die Tatsache, dass sie den Grund ihrer Existenz, ihren strukturellen Aufbau und ihre Funktion einem Erfinder oder Konstrukteur verdanken, macht Maschinen im Sinne der Aristotelischen Disjunktion von „Dingen der Natur“ (physis) und „Dingen der Technik“ (techné) zu technischen Artefakten.

Hinsichtlich des Einsatzes des Maschinenkonzepts in der Biologie ist nun zunächst festzuhalten, dass die bereits von Aristoteles vorgenommene Grenzziehung bei jeder Übertragung von maschinellen Eigenschaften auf Lebewesen zu berücksichtigen ist. Lebewesen als Naturdinge sind nach wie vor grundsätzlich durch die Tatsache bestimmt, dass sie im Sinne von Aristoteles das Prinzip sowohl für ihre Existenz als auch für ihre Wandelbarkeit in sich selbst tragen und eben nicht menschlicher Herstellung verdanken. In modernen Begrifflichkeiten gesprochen wären hier Begriffe wie Selbstorganisation, Selbsterhaltung oder Selbstveränderung ins Spiel zu bringen; wir werden auf diesen Gesichtspunkt zurückkommen. Dieser Unterschied zwischen Gewachsenem und Gemachtem schließt allerdings nicht aus – schon bei Aristoteles nicht –, Lebewesen mit Blick auf ihren Organisationsgrad, die strukturelle und funktionelle Wechselwirkung ihrer Teile oder die auf ein bestimmtes Ergebnis hin ausgerichtete „Planhaftigkeit“ ihres Verhaltens nach dem Modell technischer Bildungen, also technomorph zu deuten. Aber auch solche Analogieschlüsse, Modelltransfers oder theoretische Bezugnahmen stehen weiterhin unter der beschränkenden Vorgabe, dass mit ihnen die Charakteristik des „automaton“ (im Sinne der Selbstbewegung) nicht tangiert ist.

Diesen wichtigen Punkt unterstreicht Canguilhem (2009:190), wenn er betont, die antiken Maschinenmodelle seien nur bei Berücksichtigung der Unterscheidung zwischen Maschinen im Sinne von „kinematischen Dispositiven“ und Maschinen im Sinne von „Motoren“ adäquat zu würdigen. Gemeint ist damit, dass von Maschinen im ursprünglichen Wortsinne einer künstlichen Konstruktion durch einen Konstrukteur nur dann gesprochen werden kann, wenn der „Motor“ eine andere Quelle hat als die tierische oder menschliche Muskelkraft – also letztlich keine organische Quelle der Bewegung vorliegt. Dieser Punkt wird unterschlagen, sobald man den Maschinenbegriff allein mit Blick auf den Mechanismus verwendet (ebd.:185). Das bedeutet: Man kann zwar mit Blick auf die planhaften Beziehungen und Abläufe in Lebewesen technomorphe Modelle durchaus einsetzen. Dabei ist jedoch stets zu berücksichtigen, dass die technologische Erklärung in diesem Fall deshalb als Ersatz für die Teleologie fungieren kann, weil der für den Modelltransfer verwendete technische Vollzug eben wegen seiner Grundlegung in menschlicher Planung eine teleologische Note besitzt. Auch bei diesem Modelltransfer ist also von „Maschine“ in einer Weise die Rede, bei der das Prinzip der Maschine in einem anderen, menschlichen Konstrukteur verbleibt. Somit ist mit Blick auf die Ursache der Konfiguration weiter zwischen künstlichen Konstruktionen (Maschinen) und natürlichen Bildungen (Organismen) zu unterscheiden. Der Charakter des „automaton“ ist von der Maschinenanalogie nicht tangiert.

6.9 Plastische Maschinen: Von klassischen Energiewandlern zur Kybernetik

Das obige Argument gilt jedoch in vollem Umfang nur für Maschinen im Sinne von klassischen Energiewandlern wie etwa einem Windrad. Für die angemessene Bewertung der Maschinenanalogie ist aber zu berücksichtigen, dass die Maschinenvorstellungen historisch wandelbar sind, sodass die jeweils paradigmatischen Maschinen einer Epoche in die Überlegung einzubeziehen sind. Während etwa für die antiken Überlegungen Theater- und Kriegsmaschinen leitbildhaft waren, sind es in der neuzeitlichen Debatte vor allem Vergleiche zwischen Organismus und Uhren. Für das obige Argument ändert sich bei diesem Paradigmenwechsel allerdings zunächst wenig. Bedeutsamer und zur Debatte um die Synthetische Biologie hinführend ist hingegen der Übergang von klassischen Energiewandlern zu kybernetischen Maschinen.

Wie bereits betont, hat die Diskussion der Maschine-Organismus-Vergleiche von jeher die Grenzen der Biologie überschritten und stets zentrale philosophische Anteile besessen, die im-

mer auf das Bild vom Menschen einwirkten. So ist es nicht verwunderlich, wenn auch die Diskussionen zu Beginn des 20. Jahrhunderts im Horizont der philosophischen Anthropologie erfolgten (vgl. etwa Plessner, 2003:138ff. und Heidegger, 2010:311ff). Dass hier zunächst die oben genannten Argumentationsmuster weiter gelten, zeigen die Überlegungen des Philosophen Max Scheler. Zugleich zeichnet sich in seiner Überlegung ein Wandel ab, der für die Bestimmung eines neuen Maschinenkonzepts bedeutsam ist. Beginnen wir also mit Scheler: Auch er erkennt, dass die zur Vermeidung teleologischer Deutungen eingesetzte Maschinenkonzeption keine Verringerung, sondern im Gegenteil eine Verstärkung des Anthropomorphismus beinhaltet (Scheler, 1972:137ff.). Deute man Aufbau und Funktion von Lebewesen nach dem Vorbild von Werkzeugen oder Maschinen, dann ziehe man Bilder und Kategorien zur Interpretation von Lebensprozessen heran, die auf eine bestimmte Form des menschlichen Verstandes – des Homo faber – und der mittels dieses spezifischen Verstandes möglich werdenden technischen Veränderung der Umwelt über Werkzeuggebrauch abgestimmt sei. Gegen die Maschinenanalogie spricht für Scheler insbesondere, dass hierbei das Lebendige in Analogie mit dem Toten verstanden würde. Man gehe von einer fest fixierten Umwelt aus, in die sich das Leben mittels seiner Organisation lediglich einpasse. In der Maschinenanalogie werde der aktive, entwerfende und erkundende Charakter lebender Systeme verkannt. Zeitgleich mit Scheler bringt auch der Systemtheoretiker Ludwig von Bertalanffy (1937:11) eine ähnliche Kritik vor. Für ihn trifft die Maschinenanalogie mit Blick auf die Ordnung des Prozessgeschehens durchaus zu. Dennoch ist der Vergleich zu analytisch, lediglich auf Teile und Teilprozesse bezogen und könne den besonderen Systemgesetzen des Lebensgeschehens nicht gerecht werden. Vor allem jedoch spricht für von Bertalanffy die organische Plastizität gegen den Maschinenvergleich. In eben diesem Sinne hat der Umwelttheoretiker und Verhaltensbiologe Jakob von Uexküll hervorgehoben, es gebe keine plastischen Maschinen:

„Die Fähigkeit, sich äußeren Umständen anzuschmiegen, besitzen nur solche Maschinen, deren innere Gefüge frei beweglich sind. Plastische Leistungen können nur von plastischen Maschinen ausgeführt werden. Plastische Maschinen, die automatisch arbeiten, kennen wir nicht, weil jede echte Mechanik zwangsläufig ist. Wo eine Umstellung der Teile in einer Maschine stattfindet, ist immer ein Lebewesen vorhanden, das die Umstellung vornimmt.“
(von Uexküll, 1973:168f.)

Mit Blick auf diesen wesentlichen Aspekt wird nun ein Wandel im Maschinenparadigma bedeutsam. Für die Debatte um die Anwendbarkeit auf die Biologie hat vor allem die Kybernetik zu neuen Bedingungen geführt. Wie Wieser (1959:16) in seinen Reflexionen über kybernetische Modelle und deren Anwendbarkeit auf Lebensprozesse hervorhebt, muss zwischen klassischen Maschinen, deren Funktion eine Nachahmung und Verstärkung der Energieleistung von Organismen sei, und elektronischen Maschinen streng unterschieden werden. Letztere seien keine „Kraftmaschinen“ mehr, sondern „Nachrichtenmaschinen“ oder „Steuerungsmaschinen“. Nicht Energie, sondern Information stehe im Vordergrund. Der Maschinenvergleich für Organismen betreffe nun nicht mehr allein biologische Kraftwandlersysteme, sondern auch biologische Informationsverarbeitungssysteme (vgl. Ewald, 1971:11). Nach Wieser ist damit der Wandel zu plastischen Maschinen vollzogen. Kybernetische Maschinen können Leistungen vollbringen, die nicht bloß quantitativ, sondern qualitativ anders gelagert sind als die von klassischen Maschinen. Begriffe wie „Suchen“, „Zielbewusstsein“, „Anpassung“, „Assoziation“ und „Wahl“ sind nach dieser Überlegung auf die Funktion der Maschinen anwendbar. Insofern könnten sie im Rücktransfer von Maschinen auch wieder auf Organismen übertragen werden. Kybernetische Maschinen sind nach diesem Verständnis in der Lage, Input und Output über ein Input verarbeitendes System und Rückkoppelungsschleifen zu verkoppeln und könnten sich damit adaptiv verhalten. Auch in diesem Fall ist jedoch zu berücksichtigen, dass kybernetische Artefakte – wie die paradigmatischen Regelsysteme für die Raumheizung – eben auf einen außer ihnen liegenden Planer und Konstrukteur zurück gehen, der auch die zu erreichenden Sollwerte des Regelungssystems vorgibt. In diesem Sinne ist biologische Regelung jedoch ohne Konstrukteur selbstorganisierend.

6.10 Selbstreplizierende Maschinen: Nanomaschinen und Assembler

Für die Synthetische Biologie ist dann vor allem der auf die Kybernetik folgende Umbruch im Maschinenparadigma wesentlich. Dieser ist durch die mit den Entwicklungen der Gentechnologie, Nanotechnologie und Computertechnologie verbundene Miniaturisierung und Flexibilisierung gegeben. Maßgeblich für die heutige biologische Verwendung des Maschinenbegriffs – etwa in der Nanobiotechnologie – ist eine Vision der frühen Nanotechnologie: Es ist die Utopie K. Eric Drexlers (1986) zu sich selbstreplizierenden Nanorobotern, Assemblern oder Nanobots, die das Feld bereiten. Auch Drexler, der als Schöpfer des Begriffes „Nanotechnolo-

gie“ gilt, zielte mit seinen Gedanken auf technische Anwendung. Er propagierte einen zukünftigen Fertigungsprozess von Materialien auf der atomaren Ebene („molecular manufacturing“) und postulierte dazu entsprechende molekulare Fertigungseinheiten. Seine Fiktionen prägen heute nicht nur die Begriffsbildung der Fachwissenschaft, sondern sind vor allem im öffentlichen Diskurs um Synthetische Biologie und Nanobiotechnologie omnipräsent. Die visionären Szenarien von Nanorobotern sind allerdings in ihrer Wirkung auf die Öffentlichkeit durchaus ambivalent und prägen sowohl Hoffnungen als auch Ängste (Coenen, 2003). In dystopischer Form hat sich das Assembler-Modell beispielsweise in der sogenannten Bill Joy Debatte (Joy, 2000) niedergeschlagen, die auf einem Schreckensszenario beruht, nach der unkontrolliert sich fortpflanzende Nanoroboter die gesamte Materie in grauen Schleim verwandeln.

Für die Organismus-Maschine-Analogie ist diese nanotechnologische Version der Maschinenanalogie vor allem wegen der Miniaturisierung und der neuen Bedingungen des Nanokosmos bedeutsam. Dieses macht Richard Jones in seinem Buch „Soft Machines“ deutlich. Hier sind zwei Punkte wesentlich. Der erste Punkt führt zu einer radikalen Kritik am üblichen Maschinenmodell. Jones betont (2004:88), wie verfehlt tradierte Maschinenvorstellungen im Bereich der Nanoskala sind. Aufgrund der veränderten physikalischen Bedingungen in der Nanowelt laufen unsere alltäglichen Assoziationen von Maschinen, Konstruktionsprinzipien und Kraft-Wirkungs-Beziehungen ins Leere. Die gängigen Vorbilder der Maschinenteknik entstammten der anschaulich-klassischen Mechanik. Sie müssen deshalb vom mesokosmischen Anschauungsraum in die neue Dimension von Atomen und Molekülen transferiert werden und verändern dabei grundsätzlich ihre Bedeutung. Damit sind wir beim zweiten Punkt: Nach Jones ist auch das Designgeschehen der Nanotechnologie durch gegenüber dem Mesokosmos veränderte Designprinzipien bestimmt. Diese sind auf der Ebene einzelner Moleküle als „self-assembly“ zu fassen: „The blueprint, if it makes sense to talk about one at all, is contained in the molecules, and all we have to do is to gather the molecules together for them to make the structures themselves“ (Jones, 2004:89). Die Prozesse des Nanokosmos, die auch die Möglichkeit von Selbstkorrektur oder Selbstheilung beinhalten, so Jones, erinnern an die Eigenschaften von lebenden Systemen (ebd.:90).

Berücksichtigt man vor diesem Hintergrund den Technologiewechsel von der Nanotechnologie zur Synthetischen Biologie, dann wird dieser besondere Aspekt noch bedeutsamer. Wie oben betont, sind schon die als Standardbausteine des Verfahrens propagierten BioBricks (etwa genetische Regelkreise) mehr als nur stofflich-materiale Bausteine. Sie sind vielmehr komplexe

funktionelle Einheiten eines übergeordneten Regelungsgeschehens, durch das die Form (die Organisation) von Biosystemen erstellt und erhalten wird. Zudem gehört es zum Selbstverständnis der Synthetischen Biologie, dass die unterschiedlichen Stufen dieses natürlichen Selbstorganisationsgeschehens technisch genutzt werden sollen. Es soll eine kontrollierte Selbstorganisation im Dienste der technischen Herstellung neuer Strukturen und Funktionen eingesetzt werden („gerichtete“ Selbstorganisation). Das Konstruktionsprinzip natürlicher Selbstorganisation bildet damit das Vorbild für das Bottom-up-Verfahren der Biotechnik. Zu berücksichtigen sind diesbezüglich jedoch die je unterschiedlichen Systemebenen und Teilprozesse, die bei der Selbstorganisation auf den verschiedenen Organisationsniveaus von Biosystemen eine Rolle spielen – Zusammenlagerung von Molekülkomplexen als „self-assembly“, Bildung von Molekülaggregaten, Selbstorganisation von Zellen, Geweben oder Organismen. Auf jeder dieser Ebenen werden jeweils spezifische Organisationsbedingungen relevant.

Aus diesem Grund bedeutet die Ausrichtung des technischen Fertigungsprozesses auf „programmierte“ oder „gerichtete“ Selbstorganisation stets auch die Berücksichtigung der jeweiligen Rahmenbedingungen des biologischen Systemgeschehens. Dieses muss sich auch in den relevanten Maschinenmodellen niederschlagen: Indem diese zunehmend zu „soft machines“ im Sinne von Jones werden, ändert der Modelltransfer quasi seine Richtung: Während vormals das Geschehen in mehr oder weniger simplen Maschinen zur Deutung von Organismen herangezogen wurde, werden nun umgekehrt organismische Abläufe zum Vorbild für ein neues Verständnis von komplexen Maschinen. Auch damit wird das Amalgam von technischer Produktion und natürlicher Produktion in der Synthetischen Biologie unterstrichen, das bei zunehmender Komplexität der gewünschten Syntheseprodukte immer inniger wird. Mit diesem Prozess der Amalgamierung werden aber auch die Grenzen eines Verständnisses von Technik deutlich, das allein auf die technischen Zielsetzungen der erfindenden Ingenieurinnen und Ingenieure ausgerichtet ist. Hier kommt die alte Bedeutung von „automaton“ unter neuen Vorzeichen zur Geltung. Mit steigender Komplexität der Bedingungen wird das Verfahren jedoch nicht nur in diesem Sinne „kollaborativ“ (vgl. auch Jonas, 1987:165), sondern es sinken auch die Möglichkeiten planerischer und gestalterischer Kontrolle über den technischen Fertigungsprozess.

6.11 Literatur

Benner, S. A. (2003): Act natural. In: *Nature* 421(6919):118.

Billerbeck, S./Panke S. (2012): Synthetische Biologie – Biotechnologie als eine Ingenieurwissenschaft. In: Boldt, J. et al. (Hrsg.): *Leben schaffen? Philosophische und ethische Reflexionen zur Synthetischen Biologie*. Paderborn:19–40.

Boldt, J. et al. (Hrsg.) (2012): *Leben schaffen? Philosophische und ethische Reflexionen zur Synthetischen Biologie*. Paderborn.

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

Brukamp, K. (2011): Lebenswelten formen – Synthetische Biologie zwischen Molekularbiologie und Ingenieurtechnologie. In: Dabrock, P. et al. (Hrsg.): *Was ist Leben – im Zeitalter seiner technischen Machbarkeit? Beiträge zur Ethik der Synthetischen Biologie*. Freiburg/München:61–75.

Bud, R. (1995): *Wie wir das Leben nutzbar machten. Ursprung und Entwicklung der Biotechnologie*. Braunschweig/Wiesbaden.

Canguilhem, G. (2009): Maschine und Organismus. In: ders.: *Die Erkenntnis des Lebendigen*, 1965. Berlin:183–232.

Coenen, C. (2003): Utopien und Visionen zur Nanotechnologie. In: *TAB-Brief* 24:5–8.

Dabrock, P. et al. (Hrsg.) (2011): *Was ist Leben – im Zeitalter seiner technischen Machbarkeit? Beiträge zur Ethik der Synthetischen Biologie*. Freiburg/München.

Daston, L. (2001): Die Kultur der wissenschaftlichen Objektivität. In: Hagner, M. (Hrsg.): *Ansichten der Wissenschaftsgeschichte*. Frankfurt a. M.:137–160.

Daston, L./Galison, P. (2007): *Objektivität*. Frankfurt a. M.

Deplazes-Zemp, A. (2011): Leben als Werkzeugkasten. Die Auffassung von Leben in der Synthetischen Biologie. In: Dabrock, P. et al. (Hrsg.): *Was ist Leben – im Zeitalter seiner technischen Machbarkeit? Beiträge zur Ethik der Synthetischen Biologie*. Freiburg/München:95–115.

Drexler, K. R. (1986): *Engines of Creation*. New York.

Drubin, D. A. et al. (2007): Designing biological systems. In: *Genes Dev* 21(3):242–254.

European Commission (2005): *Synthetic Biology. Applying Engineering to Biology. Report of a NEST High-Level Expert Group*. Luxembourg.

Ewald, G. (1971): *Der Mensch als Geschöpf und kybernetische Maschine*. Wuppertal.

Fleck, L. (1980): *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache. Einführung in die Lehre vom Denkstil und Denkkollektiv*. Frankfurt a. M.

- Gammel, S. L. (2008): Visionen der Nano(bio)technologie. In: Köchy, K. et al. (Hrsg.): Nanobiotechnologien. Philosophische, anthropologische und ethische Fragen. Freiburg/München:203–228.
- Gibson, D. G. et al. (2010): Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. In: *Science* 329(5987):52–56.
- Grunwald, A. (2008): Auf dem Weg in eine nanotechnologische Zukunft. Philosophisch-ethische Fragen. Freiburg/München.
- Hacking, I. (1992): The Self-Vindication of Laboratory Sciences. In: Pickering, A. (ed.): *Science as Practice and Culture*. Chicago/London:29–64.
- Habermas, J. (2001): Die Zukunft der menschlichen Natur. Auf dem Weg zu einer liberalen Eugenik? Frankfurt a. M.
- Haraway, D. J. (1976): Crystals, Fabrics, and Fields. Metaphors of Organicism in Twentieth-Century Developmental Biology. New Haven/London.
- Heidegger, M. (2010): Die Grundbegriffe der Metaphysik, 1929/30. Frankfurt a. M.
- Jonas, H. (1973): Organismus und Freiheit. Ansätze zu einer philosophischen Biologie. Göttingen.
- Jonas, H. (1987): Technik, Medizin und Ethik. Praxis des Prinzips Verantwortung. Frankfurt a. M.
- Jones, R. L. (2004): *Soft Machines*. Nanotechnology and Life. Oxford.
- Joy, B. (2000): Why the Future doesn't need us? Our most powerful 21st-century technologies – robotics, genetic engineering, and nanotech – are threatening to make humans an endangered species. In: *Wired*, 8.04:238–262.
- Knorr-Cetina, K. (2002): Die Fabrikation von Erkenntnis. Zur Anthropologie der Naturwissenschaft. Frankfurt a. M.
- Köchy, K. (2005): Norm und Kontext. In: Dabrock, P./Ried, J. (Hrsg.): *Therapeutisches Klonen als Herausforderung für die Statusbestimmung des menschlichen Embryos*. Paderborn:69–88.
- Köchy, K. (2007): Naturphilosophie und aktuelle Biologie. Das Fallbeispiel der Debatte um die Potentialität von Zellen. In: Falkenburg, B. (Hrsg.): *Natur – Technik – Kultur*. Paderborn:111–128.
- Köchy, K. (2008a): Wie beeinflussen naturwissenschaftliche Fakten moralische Vorstellungen? In: Brand, C. et al. (Hrsg.): *Wie funktioniert Bioethik?* Paderborn:233–254.
- Köchy, K. (2008b): Kontextualistische Bioethik. Zur Rolle von biowissenschaftlichen Fakten bei bioethischen Fragen. In: Zichy, M./Grimm, H. (Hrsg.): *Praxis in der Ethik. Zur Methodenreflexion der anwendungsorientierten Moralphilosophie*. Berlin/New York:153–185.
- Köchy, K. (2008c): Konzeptualisierung lebender Systeme in den Nanobiotechnologien. In: Köchy, K. et al. (Hrsg.): *Nanobiotechnologien. Philosophische, anthropologische und ethische Fragen*. Freiburg/München:175–201.

- Köchy, K. (2011):** Konstruktion von Leben? Herstellungsideale und Machbarkeitsgrenzen in der Synthetischen Biologie. In: Gerhardt, V. et al. (Hrsg.): *Evolution*. Berlin:233–242.
- Köchy, K. (2012a):** Zum Verhältnis von Natur und Technik in der Synthetischen Biologie. In: Boldt, J. et al. (Hrsg.): *Leben schaffen? Philosophische und ethische Reflexionen zur Synthetischen Biologie*. Paderborn:155–176.
- Köchy, K. (2012b):** Sind die Überlegungen von Hans Jonas zum Sonderstatus biologischer Technik angesichts der Entwicklungen in der Synthetischen Biologie noch haltbar? In: Gadebusch Bondio, M./Siebenpfeiffer, H. (Hrsg.): *Konzepte des Humanen*. Freiburg/München:81–101.
- Krohs, U. (2010):** Epistemic consequences of two different strategies for decomposing biological networks. In: Suárez M. et al. (eds.): *EPSA Philosophical Issues in the Sciences. Launch of the European Philosophy of Science Association*. Berlin:153–162.
- Lakatos, I. (1970):** Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes. In: Lakatos, I./Musgrave, A. (eds.): *Criticism and the Growth of Knowledge*. Cambridge:91–196.
- Mach, E. (2002):** Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung, 1926. Berlin.
- Maier, W./Zoglauer, T. (Hrsg.) (1994):** Technomorphe Organismuskonzepte. Modellübertragungen zwischen Biologie und Technik. Stuttgart.
- Müller, O. (2012):** Vom Homo faber zum Homo creator? Synthetische Biologie und menschliches Selbstverständnis. In: Boldt, J. et al. (Hrsg.): *Leben schaffen? Philosophische und ethische Reflexionen zur Synthetischen Biologie*. Paderborn:217–230.
- Plessner, H. (2003):** Die Stufen des Organischen und der Mensch, 1928. Darmstadt.
- Rathenau Instituut (2007):** *Constructing Life. The World of Synthetic Biology*. The Hague.
- Rehmann-Sutter, Ch. (2011):** Rezension: Joachim Schummer, *Das Gotteshandwerk*. In: *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte* 34:284–285.
- Rothschuh, K.E. (1970):** Technomorphes Lebensmodell contra Virtus-Modell (Descartes gegen Fernel). In: *Sudhoffs Archiv* 54(1970):337–354.
- Scheler, M. (1972):** *Vom Umsturz der Werte*. Bern.
- Schmidt, M. (2012):** Xenobiologie. Neues Leben mit integrierter Biosicherheit. In: Boldt, J. et al. (Hrsg.): *Leben schaffen? Philosophische und ethische Reflexionen zur Synthetischen Biologie*. Paderborn:65–79.
- Schmidt-Biggemann, W. (1980):** Maschine. In: Ritter, J./Gründer, K. (Hrsg.): *Historisches Wörterbuch der Philosophie*. Bd.5. Darmstadt:790–802.
- Schummer, J. (2011):** *Das Gotteshandwerk. Die künstliche Herstellung von Leben im Labor*. Berlin.
- Serrano, L. (2007):** Synthetic biology. Promises and challenges. In: *Mol Syst Biol* 3(158):1–5.

- Sutter, A. (1988):** Göttliche Maschinen. Die Automaten für Lebendiges. Frankfurt a. M.
- Toepfer, G. (2004):** Zweckbegriff und Organismus. Über die teleologische Beurteilung biologischer Systeme. Würzburg.
- Tucker, J. B./Zilinskas, R. A. (2006):** The promise and perils of synthetic biology. In: *The New Atlantis* 12:25–45.
- VDI Technologiezentrum (Hrsg.) (2002):** Nanobiotechnologie I. Grundlagen und technische Anwendungen molekularer, funktionaler Biosysteme. Technologieanalyse. Düsseldorf.
- von Bertalanffy, L. (1937):** Das Gefüge des Lebens. Leipzig/Berlin.
- von Uexküll, J. (1973):** Theoretische Biologie, 1928. Frankfurt a. M.
- Weiss, M. G. (2011):** Verstehen wir, was wir herstellen können? Martin Heidegger und die Synthetische Biologie. In: Dabrock, P. et al. (Hrsg.): *Was ist Leben – im Zeitalter seiner technischen Machbarkeit? Beiträge zur Ethik der Synthetischen Biologie*. Freiburg/München:173–193.
- What's in a name? (2009):** What's in a name? In: *Nat Biotechnol* 27(12):1071–1073.
- Wieser, W. (1959):** Organismen, Strukturen, Maschinen. Zu einer Lehre vom Organismus. Frankfurt a. M.
- Witt, E. (2012):** Konzepte und Konstruktionen des Lebenden. Philosophische und biologische Aspekte einer künstlichen Herstellung von Mikroorganismen. Freiburg/München.

Hans-Jörg Rheinberger, Horst Bredekamp

Die neue Dimension des Unheimlichen

Jeder größere Durchbruch in der stürmischen Entwicklung der Lebenswissenschaften im Laufe des 20. Jahrhunderts wurde begleitet von Stimmen, welche die Beherrschung des Lebens durch seine gezielte Herstellung und Veränderung am Horizont heraufziehen sahen. Seit gut zehn Jahren, als sich das Projekt der Entschlüsselung des menschlichen Genoms seinem ersten Höhepunkt näherte, breitete sich der Begriff der synthetischen Biologie wie ein Flächenbrand aus. Der allgemeine Eindruck ist: Es wird am Leben gebastelt.

Craig Venters Totalsynthese des Genoms eines Bakteriums mit dem sprechenden Namen *Mycoplasma laboratorium* wurde in der Presse weltweit als entscheidender Durchbruch auf dem Weg zur künstlichen Herstellung von Leben sowohl gefeiert als auch von entsprechenden Befürchtungen begleitet. Die von Venter als Verkündigung inszenierte Präsentation seiner Ergebnisse erzeugte eine derart überschüssige Resonanz im Aufrufen des Schöpfungsmythos, dass mehr im Spiel zu sein schien als nur die Würdigung einer neuen rein technischen Errungenschaft.

Die Selbststilisierung Venters als Künstler war dabei weder zufällig noch spontan. Seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts haben die künstlerischen Utopien des italienischen Futurismus davon geträumt, neue Geschöpfe aus organischen und anorganischen Materialien zu erzeugen, welche die Grenzen der gegebenen Schöpfung hinter sich lassen würden. Der synthetische Kubismus und die Kunstform der Collagen haben das Prinzip der schöpferischen Kombinatorik zu einem so nachhaltigen Prinzip der Gestaltung werden lassen, dass sie wiederholt als Kündler der Gentechnik erachtet worden sind. Vor diesem Hintergrund haben sich in den letzten Jahrzehnten immer wieder Künstler und Künstlerbewegungen als Partner, Kritiker, aber auch als Avantgarde der Biowissenschaften empfunden.

Künstler bedienen sich heute in der Auseinandersetzung um die Herstellbarkeit von Leben zunehmend auch der Methoden und Techniken der Synthetischen Biologie

selbst, um Leben und Lebendiges darzustellen; sie sondieren Grenzbereiche zwischen künstlichem Leben und lebendiger Kunst. Ästhetik und Epistemologie gehen hier spannungsreiche neue Verbindungen ein und werfen Fragen auf, die nicht nur das traditionelle Selbstverständnis von Wissenschaft und Kunst sowie ihre Beziehungen zueinander berühren, sondern auch neue ethische Reflexionen herausfordern.

Die Synthetische Biologie ist im Gefolge der Gentechnologie und der Nanoforschung der dritte Bereich, der sich strukturell der Kunst insofern angenähert hat, dass die Grenze zwischen Gestaltung und Reflexion nicht mehr trennscharf aufrecht zu erhalten ist. Hierin zeichnet sich einer der tiefsten Brüche in der Geschichte der Biowissenschaften ab. Das über Jahrtausende bestehende Privileg, zu analysieren und zu reflektieren, und nicht etwa unmittelbar selbst zu gestalten, was zum lebendigen Objekt der Analyse wird, scheint im Moment mit einer solchen Kraft aufgefressen zu werden, dass allein schon die Erinnerung, dass es bestanden hätte, ausgelöscht wird. Craig Venter stilisiert sich selbst als Künstler, indem er das Genom eines künstlichen Bakteriums, in das er seine Künstlersignatur verschlüsselt eingegeben hat, als ein Gemälde vorführt, so wie Künstler seit jeher ihre Bilder präsentiert haben. Dies könnte zunächst als ein überzogener Scherz genommen werden, aber es könnte sich auch erweisen, dass hier ein Jahrhundertbild erzeugt worden ist.

Künstler haben bislang ihr Tun mit dem Gebot der Freiheit verbunden. Die Wissenschaft hat ihr Ideal nicht minder scharf mit der Freiheit der Forschung verknüpft. Sie stößt jedoch schneller an ethische Grenzen als die Kunst. In der zu beobachtenden Annäherung von Kunst und Wissenschaft könnte nicht zuletzt die Verdeckung eines „künstlerischen“ Anspruches seitens der Wissenschaften liegen, mit dem Hinweis auf die bildende Kunst eine weitere Dimension von Freiheit und Anerkennung zu erringen. Liegt hierin eine verquere Antwort auf den Paradigmenwechsel der Naturwissenschaften, gestaltende Kunst sein und dem Designprinzip folgen zu wollen? Mit Sigmund Freud könnte man von einer neuen Dimension des Unheimlichen sprechen, die alles andere als ausgelotet erscheint.

gekürzt aus: Der Tagesspiegel, 13.01.2012, Berlin

Johannes Achatz, Martin O'Malley, Peter Kunzmann

7. Der Stand der ethischen Diskussionen um Synthetische Biologie

7.1 Ethik und Synthetische Biologie

Synthetische Biologie umfasst verschiedene Ansätze des (Bio-)Engineerings, bei denen genetisches Material als Baustoff für biologische Systeme verwendet wird. Die Funktionen von biologischen Systemen und deren Teile zu verstehen, die „Leben“ hervorbringen, bestimmt das Erkenntnisinteresse dieses Forschungszweiges. Darüber hinaus wird eine Standardisierung der biologischen Bauteile angestrebt, um auch neue Funktionen in bekannten biologischen Systemen oder gänzlich neue Systeme zu entwickeln. Diese Umschreibung des Forschungsfeldes soll für den Anfang anstelle einer Definition von Synthetischer Biologie genügen (vgl. Kaebnick, 2011:25).

Der folgende Beitrag beschreibt den Stand der ethischen Diskussionen um Synthetische Biologie. Die Eckpunkte lassen sich dabei wie folgt fassen:

- ▶ Ethische Beratungsgremien in Deutschland, der Schweiz und auch in den USA schreiben der Öffentlichkeit eine uneinheitliche und mitunter ablehnende Haltung gegenüber den Entwicklungen der Synthetischen Biologie zu, raten jedoch selbst gemeinhin zu einer Haltung des „wait and see“. Es wird erwartet, dass Entwicklungen bis auf Weiteres innerhalb schon bestehender rechtlicher, politischer und Sicherheitsrichtlinien verbleiben (vgl. Catenhusen, 2011; EKAH, 2010; PCSBI, 2010; vgl. auch Kapitel 11, Indikator 8).
- ▶ Synthetische Biologie ist aus zwei Gründen dennoch von besonderem Interesse: Erstens eröffnet sie einen interdisziplinären Zugang des Engineering von biologischen Systemen für selbst gesteckte Ziele. Zweitens gehen mit der Betonung von Open-Source-Konzepten in der Synthetischen Biologie neuartige Chancen und Risiken einher, da weiten Personenkreisen damit eine Wissenschaft und Technologie zugänglich wird, die sonst nur innerhalb geordneter Institutionen wie Universitäten oder Unternehmen Anwendung findet (vgl. dazu auch Spotlight III in diesem Band).

- ▶ In einem weiteren Sinne bedarf Synthetische Biologie einer besonderen ethischen Aufmerksamkeit, da die Meinungen, Haltungen und Reaktionen, die von Teilen der Bevölkerung den Entwicklungen in der Synthetischen Biologie entgegen gebracht werden, zur Schärfung (alter) Probleme im Umgang mit Biotechnologien beitragen. Strittige Themen sind (a) die Philosophie des „Lebens“, (b) die Lastenverteilung der wissenschaftlichen Risiken, (c) die gerechte Verteilung der technischen Neuerungen, (d) der öffentliche Eindruck der „Lebensferne“ mancher Regelungen und (e) Möglichkeiten der Patentierung von Formen des Lebens (vgl. zu diesen Punkten auch Kapitel 8 in diesem Band).
- ▶ Synthetische Biologie ist von besonderer Faszination, da bereits in dem frühen Stadium ihrer Entwicklung ein Kampf um das „Framing“, also um die sprachliche Prägung und Darstellung des Forschungsfeldes, ausgetragen wird. Craig Venter's früherer Erfolg in der Herstellung einer neuen Form von Leben ist ebenso bedeutsam wie seine Beschreibung des Erzeugnisses als „programmierbares Bakterium“. Dieser Prozess des Framings ist weder entschieden noch abgeschlossen (vgl. dazu auch ausführlich Kapitel 1 in diesem Band).

Venter gelang es im Mai 2010, die bestehende Zelle eines Bakteriums auszuweiten, um sie anschließend mit einem synthetischen Minimalgenom eines anderen Bakteriums zu versehen. Das Ergebnis ist ein „programmiertes“ Bakterium, eine vermehrungsfähige Zelle, deren Nachkommen die von Venter einprogrammierten phänotypischen Merkmale aufweisen. Dieser Erfolg kann als „proof-of-concept“ gelten (vgl. Gibson et al., 2010:56), denn in einem ersten Schritt konnte von Craig Venter und seinem Team realisiert werden, was zuvor nur der Theorie nach funktionierte. Die selbst gesteckten Ziele und die Erwartungen an zukünftige Fortschritte durch Synthetische Biologie reichen dabei weit:

„In time, research on these forms of artificial life will illuminate the perennial questions ‚What is life?‘ and ‚Where do we come from?‘ It will also eventually produce dramatic new technologies, such as self-repairing and self-replicating nanomachines.“ (Rasmussen et al., 2004:965)

Auch jenseits der Antworten auf große Fragen wie „Was ist Leben?“ und „Woher kommen wir?“ werden konkretere Hoffnungen in Synthetische Biologie gesetzt. Unter den angedachten und selbsterklärten Zielen findet sich zum Beispiel die Entwicklung „intelligenter“ medizinischer

Wirkstoffe. Der Bau komplexer Molekularstrukturen, die dazu eingesetzt werden, verletztes oder zerstörtes Gewebe zu regenerieren oder zu ersetzen, wird propagiert. Die Entwicklung von künstlichen Zellen, die der menschlichen Gesundheit förderlich sind, wurde vorgeschlagen. Künstliche Zellen könnten zur gezielten und kontrollierten Wirkstoffproduktion eingesetzt werden und damit die Medikamentenherstellung revolutionieren oder auch günstigen Biokraftstoff erzeugen. Die mögliche Reichweite des Einsatzes Synthetischer Biologie umfasst Mittel der Terrorabwehr ebenso wie „human enhancement“, die künstliche Leistungssteigerung und Verbesserung menschlicher Fähigkeiten (vgl. BBSRC, 2008; European Commission, 2006:3–5; European Commission, 2007; EGE, 2010:11f.).

7.2 Zum Aufbau: Konzeptuelle Fragen und reale ethische Probleme

In einem ersten Teil werden konzeptuelle Fragen von allgemeiner Natur behandelt, die für konkrete ethische Fragen relevant sind, aber nicht selbst moralische Probleme darstellen. Darunter fallen in einem ersten Schritt Fragen nach dem wissenschaftstheoretischen Charakter der Synthetischen Biologie und ihrem Verhältnis zur Gentechnologie und klassischen Biologie. Der Anspruch Synthetischer Biologie, neue Formen des Lebens zu entwickeln und die damit einhergehende Veränderung des Lebensbegriffs sowie die gesellschaftlichen Reaktionen auf eine derartige Veränderung, werden in einem zweiten Schritt aufgegriffen. Drittens werden allgemeine Haltungen und werthafte, das heißt handlungsleitende, Vorstellungen über „Natur“ skizziert, wie sie sich bei Akteuren der Synthetischen Biologie und in der Bevölkerung finden.

In einem zweiten Teil werden konkrete Konfliktfelder ausgewiesen, die ethischer Aufmerksamkeit bedürfen. Darunter fallen Fragen nach den Akteuren und Betroffenen Synthetischer Biologie und in der Folge Fragen nach Biosafety und Biosecurity sowie allgemeinere Fragen nach gerechter Verteilung von Vor- und Nachteilen. Darüber hinaus werden Fragen nach der Akzeptanz der Vorgänge in der Synthetischen Biologie und Möglichkeiten der Transparenz und Einbindung verschiedener Interessengruppen (Stakeholders) in die Gestaltung der Rahmenbedingungen der Synthetischen Biologie aufgegriffen.

7.3 Konzeptuelle Fragen

7.3.1 Wissenschaftstheoretischer Charakter der Synthetischen Biologie

„Die synthetische Methode, das künstliche Hervorrufen biologischer Erscheinungen durch physikalische Kräfte, muß mehr und mehr dazu beitragen, uns wirkliches Verständnis vom Wesen des Lebens beizubringen.“ (Leduc, 1914:13)

Schon vor einhundert Jahren sah sich Stephane Leduc gezwungen, eine neue Methode der Biologie zu fordern, da die klassische „analytische Methode in der Biologie [...] durch die unlösliche Vereinigung der Einzelerscheinungen gelähmt und gehemmt“ werde (Leduc, 1914:11; vgl. dazu auch Kapitel 3 in diesem Band). Er forderte dies in einem Buch mit dem Titel „Synthetische Biologie“. Zwar ging Leduc von kristallinem Wachstum aus, welche die Grundlage des Lebens bilde, doch steht auch die zeitgenössische Synthetische Biologie vor der Frage, was sie als „synthetische“ Biologie von bisherigen Formen der Biologie unterscheidet.

Biologielehrbüchern (vgl. Kutschera, 2008:12–14) kann das Selbstverständnis entnommen werden, dass „beschreibende Biologie“ eine zurückhaltende Beobachtung der Natur betreibt, während moderne und experimentelle Biologie stärker in die Natur eingreift. Synthetische Biologie hat ganz in diesem Sinne die Veränderung der Natur zum Forschungsziel erhoben (vgl. European Commission, 2006:5; vgl. Deplazes-Zemp, 2011). Eine einflussreiche Definition wurde im Rahmen des EU-finanzierten TESSY- (Towards a European Strategy in Synthetic Biology) Projekts erarbeitet:

„Synthetic Biology aims to engineer and study biological systems that do not exist as such in nature, and use this approach for achieving better understanding of life processes, generating and assembling functional modular components, developing novel applications or processes.“ (Gaisser et al., 2008:4)

Dabei steht noch zur Debatte, ob Synthetische Biologie im strengen Sinn als eigene Wissenschaft bezeichnet werden soll oder eher als interdisziplinäres Forschungsfeld (vgl. Lam et al., 2009:24–25). Ebenso kann diskutiert werden, ob Synthetische Biologie „nur“ eine Fortführung der Gentechnologie ist (vgl. DFG et al., 2009:8/32; Erickson et al., 2011:1254–1256) oder

durch weitergehende Neuerungen bestimmt wird (vgl. Kudlell, 2007; Boldt et al., 2009:36–37; Engelhard, 2011:45).

Neben der wissenschaftsinternen Debatte steht jedoch auch die Frage der öffentlichen Außerdarstellung und Außenwahrnehmung. Gerade da das Forschungsfeld Synthetischer Biologie noch nicht gefestigt ist, wird nicht über konkrete Anwendungen der Synthetischen Biologie gestritten, wohl aber darüber, welcher Art die Forschung der Synthetischen Biologie ist und wem (oder was) sie zum Wohl gereicht. Protagonisten der Forschungslandschaft wie Craig Venter stellen sich als nüchterne Programmierer dar, die an der „Software des Lebens“ arbeiten. Kritiker sprechen dagegen von „extremer Gentechnik“, die über das sowieso schon bedenkliche Unterfangen von gentechnologischer Forschung in ungebührlicher Weise noch hinausreiche. In gewisser Weise zeichnen sich hier Fronten ab, die sich ähnlich auch durch Diskussionen gerade grüner Gentechnologie zogen (vgl. Müller-Röber et al., 2009:384–419). Für die einen ist schon die Idee aberwitzig, man hätte beim Umgang mit den mikroskopisch kleinen Molekülsystemen etwas zu verantworten, für die anderen umreißt die Forschungsfrage, wie sich Lebensprozesse funktional nachvollziehen und nachbauen lassen, ein blasphemisches Unterfangen. Dieses „Framing“ der Synthetischen Biologie wird weder die involvierten Teildisziplinen unberührt lassen, noch werden die interdisziplinäre Arbeit selbst, die verwendeten Methoden und letztlich die ethischen Leitlinien für den Bereich gänzlich von „Framing“-Effekten freigesprochen werden können.

7.3.2 Umdeutung des Lebensbegriffs

Wenn Venter nur an der „Software des Lebens“ arbeitet, dann ist „Leben“ kein gewachsener Naturgegenstand, sondern wird, um mit Deplazes-Zemp zu sprechen, zu einem Baukasten. Deplazes-Zemp nennt diese Sichtweise „The Conception of Life as a Toolbox“ (Deplazes-Zemp, 2011). Venters Umschreibung der Synthetischen Biologie als eine Art Computerwissenschaft von Lebewesen könnte, wie Boldt, Müller und Maio anmerken, somit eine Abwertung des Lebens bedeuten:

„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.“ (Boldt et al., 2009:82)

Leben – künstlich hergestellt – könnte für vollumfänglich kontrollierbar gehalten werden, was es jedoch nicht ist (vgl. Boldt et al., 2009:65). Ebenso könnte sich die „Einschätzung und [der] Umgang mit Lebendigem“ (Boldt et al., 2009:82) im Alltag ändern und auch der Respekt vor komplexeren Lebewesen geschädigt werden (vgl. Boldt/Müller, 2008:387–389; vertiefend auch Boldt et al., 2008). Diese Befürchtung ist in ihrer Unbestimmtheit weder zu bestätigen noch widerlegbar und genau darin liegt eine besondere Schwierigkeit. Analoge Befürchtungen wurden auch im Kontext der Nanobiotechnologie diskutiert (vgl. Schmidt, 2008). Der Konflikt zwischen „funktionaler“ Beschreibung des Lebens und einer, die Leben für mehr als nur ein Bündel von Funktionen erachtet, lässt sich nicht einfach auflösen (vgl. EGE, 2010:40–42). Auch professionelle Ethikerinnen und Ethiker sind dieser Aufgabe mitunter nicht gewachsen: „Es gelingt nicht, diese unterschiedlichen Herangehensweisen und die damit verknüpften Bedeutungen von Leben zusammenzuführen“ (EKAH, 2010:12), schreibt etwa die Schweizer Ethikkommission in ihrer Stellungnahme zur Synthetischen Biologie. Das Misslingen dieser Zusammenführung drückt sich auch in der ungenauen metaphorischen Redeweise von „living machine“ und „artificial cell“ aus, wie sie im Zusammenhang mit Synthetischer Biologie Verwendung findet (Boldt et al., 2009:56; vgl. Deplazes/Huppenbauer, 2009). Boldt, Müller und Maio gehen dabei so weit, dem Menschen zu unterstellen, er könne sich aufgrund dieser misslingenden Redeweise und einem reduzierten Lebensbegriff für einen „veritable[n] ‚Schöpfer‘ von Leben“ (Boldt et al., 2009:82) halten. Der Mensch könnte sich selbst nicht nur als Techniker, als Homo Faber sehen, sondern sich zum Homo creator aufschwingen wollen, der Lebewesen nach Bedarf aus dem Nichts produziere (vgl. dazu auch Kapitel 6.4 in diesem Band).

Zwei Grundintentionen können als die beiden Pole der Debatte um den Lebensbegriff bezeichnet werden, und zwischen diesen Polen lassen sich die verschiedenen Antworten auf die Frage „Was ist Leben?“ lokalisieren: Einen Pol bilden „bio-konservative“ Intuitionen, die darauf verweisen, dass es etwas gibt, das wir „Natur“ nennen, welches für sich genommen „heilig“ ist, und hinsichtlich dessen eine moralische Pflicht zur Erhaltung besteht. Den anderen Pol bilden „bio-liberale“ Intuitionen, die Menschen in die moralische Pflicht nehmen, Intelligenz und wissenschaftliche Erkenntnisse zu nutzen, um auch durch Technologie einen „Fortschritt“ in biologischen Systemen zu erreichen. Dass es sich dabei nicht um launische Geschmacksurteile handelt, lässt sich unter anderem daran erkennen, dass sich dieser Spannungsbogen widerstreitender Intuitionen ähnlich zwischen „alter“ beobachtender und „neuer“ stärker eingreifender Biologie abbildet (vgl. Bölker, 2011:38–39). Beide intuitiven Pole, konservativer Naturerhalt wie auch technologischer Fortschritt, generieren vernünftige Forderungen.

Diese Positionen können in reiner, wenn auch etwas radikaler Form an Äußerungen der Nicht-regierungsorganisation ETC Group und Craig Venter aufgezeigt werden:

„The fundamental differences between what we do and what’s been done before and how we define synthetic genomics is: we start with digital information in the computer. From all our reading of the genetic code, my team sequenced the first genome of the living organism in 1995. And we went from having the ‚A‘, ‚C‘, ‚G‘ and ‚T‘’s to 1’s and 0’s in the computer. Synthetic genomics as we defined it starts with those 1s and 0s and remakes the software of life and then activating that in cells.“ (Venter, 2010)

Hat „Leben“ eine „Software“ und lässt sich Biologie, die Wissenschaft der belebten Natur, tatsächlich digitalisieren, wie es Venter behauptet? Schwierigkeiten bestehen nicht erst in der Bewertung von Handlungsfolgen, sondern entstehen schon in der Beschreibung dessen, was zur Debatte steht. Kritiker der Synthetischen Biologie sprechen dagegen von „Patenting Pandora’s Bug“; ein Wortspiel, das aus der Büchse der Pandora (Pandora’s Box) ein Lebewesen, in diesem

Fall Pandoras Käfer macht (Pandora's Bug). Hier werde „Extreme Genetic Engineering“ betrieben (ETC, 2007).¹

Wenn sich Venters Beschreibung der Synthetischen Biologie durchsetzen könnte, wäre Synthetische Biologie eine nüchterne Programmierstätigkeit und Leben nur eine Software, die beliebig neu oder umgeschrieben werden kann.

Der ETC Group zufolge wäre die schon bedenkliche Gentechnologie der kleine Bruder der noch bedrohlicheren Synthetischen Biologie, deren Erfolge nur Wenigen zu Gute kämen und deren Gefahrenpotenzial für Umwelt und zukünftige Gesellschaften nicht absehbar sei.

Beide Seiten sehen sich in Gefahr, von der jeweils anderen Position übergangen zu werden. Synthetische Biologie nach Craig Venters Sichtweise wird (wieder einmal) von einem Paradigma (vgl. Kuhn, 1973:28/44ff.) geprägt, nach dem Lebewesen nicht mehr nur durch natürliche Prozesse innerhalb der Natur hervorgebracht werden können, sondern prinzipiell aus unbelebter Materie zusammengesetzt werden können (vgl. Leduc, 1914; Keller, 2002; vgl. dazu auch ausführlich Kapitel 3 in diesem Band). Damit ist „Leben“ kein Naturgegenstand in jenem Sinne mehr, wie er von der ETC Group bewahrt und erhalten werden will.

7.3.3 Natur und Naturbilder

Der Gegensatz von naturkonservativer Intuition und dem Wunsch nach technologischem Fortschritt, der sich, wie eben gezeigt, am „Leben“ bricht, reicht noch tiefer, bis hinab zu dem, was wir „Natur“ nennen. Im alltagsmoralischen Denken, um ein Beispiel von Birnbacher zu verwenden, wird das Natürliche dem Künstlichen vorgezogen und natürliche Gefahren werden weniger gefürchtet als Gefahren menschlichen Ursprungs (vgl. Birnbacher, 2006a:81; 2006b).

Diese eigentümliche Form der „Bevorzugung“ natürlicher Gefahren kann, wie Christina Aus der Au anmerkt, auf verschiedenen Bildern von Natur, auf unterschiedlichen Naturvorstellungen fußen. Als „thick concepts“ (vgl. Williams, 1985:140ff.) liegt den Begriffen „Natur“ und „Natürlichkeit“ neben ihrem deskriptiven, beschreibenden Gehalt auch ein wertendes Element bei. „Natürlich“ gilt als selbstverständlich, normal und gut – es ist ein wertgeladenes Konzept, das explizite und implizite Überzeugungen enthält, „wie die Welt sein sollte“.

„Künstlich“ gilt im Gegensatz dazu als unecht und schlecht imitiert. Mitunter können dennoch beide Begriffe zutreffend auf denselben Gegenstand angewandt werden, wenn etwa eine

1 Siehe auch die Studie zur Darstellung Synthetischer Biologie in den Medien von Cserer/Seiringer, 2009.

gentechnisch veränderte Tomatenart beschrieben wird. In der Diktion von Christina Aus der Au treffen hier zwei Naturbilder aufeinander, die sie als „aristotelisch“ und „galileisch“ bezeichnet. Das aristotelische Naturbild beschreibt als natürlich, was ein „telos“, ein eigenes Werden, eine eigene Zweckbestimmung in sich trägt. Lebewesen in diesem Sinn entwickelten sich von selbst und entstanden nicht auf Geheiß oder unter Einflussnahme des Menschen. Wissenschaftliche Beschreibung nach aristotelischem Muster ist eine möglichst einflusslose Beobachtung und Betrachtung von außen. Das modernere galileische Naturbild fasst dagegen alles unter „Natur“, was Naturgesetzen folgt (die Prinzipien und Anwendung menschlicher Vernunft eingeschlossen). Möglichst exakt, unter Zuhilfenahme mathematischer Methoden und bis ins kleinste Detail des Gegenstandes reichend, werden die gesetzmäßigen Zusammenhänge beschrieben. Aristotelische Untersuchungen würden die Frage stellen: Wie lebt ein Organismus? Galileische Untersuchungen würden die Frage stellen: Wie funktioniert ein Organismus? Wenn es also darum geht, was die Gentomate „ist“, würde sie aristotelisch als „künstlich“, galileisch als „natürlich“ bezeichnet werden. Nach Christina Aus der Au hängen Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftler meist einem galileischen Naturbegriff an und halten zum Beispiel eine Ablehnung von Gentomaten daher für unverständlich und führen sie auf Unwissen zurück (vgl. Aus der Au, 2008:22–24):

„Ihr plakatives Beispiel ist der Wunsch einer besorgten Konsumentin, möglichst ‚Tomaten ohne Gene‘ kaufen zu können. Aber damit wird man der Gegenseite nicht gerecht. Die Bezeichnung ‚ohne Gene‘ ist tatsächlich keine naturwissenschaftliche Aussage, sondern letztlich eine Metapher, hinter der sich der Wunsch nach einer Ernährung ohne Chemie, Industrie und Labor verbirgt. Eine Belehrung darüber, ‚wie es wirklich ist‘, wird der Konsumentin nicht das Gefühl geben, ernst genommen zu werden.“ (Aus der Au, 2008:24)

Als moralischer Akteur bleibt der Mensch im Mittelpunkt und kann sein Verhalten demnach nicht verteidigen, indem er auf Naturprozesse verweist. Wenn auch keine direkte Handlungsanweisung aus dem Ganzen der Natur entnommen werden kann, so sind Orientierungen, leitende Naturbilder, idyllische Vorstellungen und ästhetischer Naturgenuss durchaus weiterhin von nachhaltigem Einfluss auf menschliches Denken und Handeln. Da Naturvorstellungen hintergründig und oft nicht Gegenstand einer bewussten Reflexion und Entscheidung sind, gilt es, sie diskursiv zu erfassen und bei wissenschaftspolitischen Entscheidungen und Regelungen zu berücksichtigen

(vgl. DFG et al., 2009:31; EKAH, 2010:20–27; EGE, 2010:30–37; PCSBI, 2010:121/130/141). Gelöst werden kann der Konflikt der widerstreitenden Intuitionen nicht (vgl. Ried et al., 2011:366–367), er sollte jedoch bei der Entwicklung und Etablierung von Richtlinien für den Bereich der Biotechnologien, im Besonderen der Synthetischen Biologie, berücksichtigt werden.

7.4 Ethische Probleme

7.4.1 Akteure, Shareholder und Stakeholder

Ein Novum der Synthetischen Biologie, das sie deutlich vom verwandten Feld der grünen Gentechnologie abhebt, liegt in der Pluralität der Akteure. Zum einen sind dies staatliche und private Forschungseinrichtungen, wie sie auch aus der Gentechnologie bekannt sind. Diese Akteure haben ihren Sitz mehrheitlich in den westlichen Industrieländern (vgl. European Commission, 2006:35–42; vgl. Pei et al., 2012:151).

Neu ist, dass nicht nur professionelle Biowissenschaftlerinnen und Biowissenschaftler im neuen Forschungsfeld tätig sind, sondern sich auch „Laien“ (allerdings mit Vorbildung und deutlichen technischen Fähigkeiten) mit Synthetischer Biologie beschäftigen (vgl. dazu auch Spotlight III in diesem Band). Biotechnologische Verfahren werden immer günstiger und es haben sich bereits erste biologische Hobby-Bastler-Vereinigungen gegründet.² Biotechnologische Geräte, Vorrichtungen und Präparate können mitunter gebraucht von offiziellen Forschungseinrichtungen aufgekauft werden und in gemeinschaftlich zugänglichen Räumlichkeiten von den Do-it-yourself-Biologinnen und -Biologen in ihrer Freizeit verwendet werden (vgl. DIYbio.org; Bennett et al., 2009). Internetseiten wie openwetware.org bieten freie Informationen über Funktionen und Möglichkeiten einzelner modularer Bestandteile von Organismen an und können von Anwendern mit weiteren Daten gefüttert werden, die dann ebenfalls frei zur Verfügung stehen.³ Sofern Do-it-yourself-Biologinnen und -Biologen in Vereinen organisiert sind, können sie noch relativ einfach von staatlichen Kontrollen erfasst werden. Wenn die Preise für biotechnologische Geräte und Techniken jedoch weiter fallen, wird das Biolabor in der

2 Die Webseite <http://diybio.org/local/> [23.07.2012] bietet einen Überblick über Standorte von DIY-Biologinnen und Biologen weltweit und Informationen über regionale Vereinigungen.

3 Z. B. unter der Lizenz Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0.

Garage auch für eine größere Zahl an Privatpersonen erschwinglich und eine Überprüfung von Sicherheitsstandards entsprechend erschwert.

Als verantwortliche Akteure sind hier zunächst die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler selbst zu nennen. Nur ihnen ist es möglich, das Gefahrenpotenzial einzuschätzen. Da Synthetische Biologie starke ingenieurwissenschaftliche Züge trägt, ist sowohl die Rollenverantwortung des Wissenschaftlers als Wissenschaftler, als auch die Rollenverantwortung des Wissenschaftlers als Ingenieur (vgl. Alpern, 1993; vgl. EKAH, 2010:20–27) zu berücksichtigen. DIY-Laien sind nicht institutionell gebunden, daher ist es schwieriger an ein Berufsethos zu appellieren, doch stehen auch sie in der Verantwortung für ihr eigenes und das Gemeinwohl. Sowohl wissenschaftliche Institutionen als auch Gemeinschaftslaboratorien der DIY-Laien sind angehalten, Regelungen zu erlassen, um Sicherheit am Arbeitsplatz, also im Labor zu gewährleisten. Bestehende Verhaltensregeln müssen, sobald von Forschenden der Bedarf erkannt wird, gegebenenfalls angepasst werden. Darüber hinaus müssen von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die ingenieurwissenschaftlich tätig werden, auch die erwünschten und unerwünschten Folgen der Anwendung ihrer Erzeugnisse berücksichtigt werden (vgl. PCSBI, 2010:88–92).

Der Kreis der Akteure kann um den Bereich der Shareholder erweitert werden. Shareholder leisten einen Einsatz indem sie etwa Forschungen finanzieren von denen sie sich neue Erkenntnisse oder Anwendungsmöglichkeiten erhoffen. Neue Anwendungsmöglichkeiten werden wiederum von einem weiteren Personenkreis genutzt, der über den der Shareholder hinausreicht, wenn etwa mit Hilfe Synthetischer Biologie erzeugte Wirkstoffe bei der Produktion von Medikamenten weiterverarbeitet werden. Sowohl indirekte Weiterverarbeitung in industriellen Fertigungsanlagen als auch direkte Einnahme dieser Medikamente fallen in den weiten Personenkreis, der die Synthetische Biologie anwendet oder nutzt. Ein vierter und äußerster Personenkreis, der nur noch passiv von Nutzen und Risiken der Synthetischen Biologie betroffen ist, kann als Stakeholder bezeichnet werden. Stakeholder haben kein eigenmotiviertes Interesse an Synthetischer Biologie, doch stehen von ihnen geschätzte Werte zur Disposition. Bei ungewollter Freisetzung von synthetisch erzeugten Organismen werden sowohl die von Stakeholdern geschätzte Umwelt gefährdet, als auch ihre Steuergelder zur Finanzierung nationaler Notfallpläne verwendet.

Die von Synthetischer Biologie ausgehenden Risiken können mit Blick auf das unten dargestellte Stufenmodell (Abbildung 1) gemäß den verschiedenen Einflussgruppen differenziert werden. So befinden sich Forschungsakteure, Shareholder sowie Anwenderinnen und Anwender der Synthetischen Biologie zwar in einer erhöhten Risikolage, sie sind allerdings eher dazu

fähig, diese vernünftig einzuschätzen und gegebenenfalls freiwillig einzugehen. Das Stakeholder-Risiko ist indessen kaum von jeder einzelnen möglicherweise betroffenen Person einzuschätzen oder gar abzuwenden und bedarf einer umfassenderen Aufmerksamkeit seitens lokaler, nationaler oder internationaler Institutionen.

Abbildung 1: Personenkreise im Wirkungsbereich Synthetischer Biologie



Ein systematisches Problem besteht in der Versuchung, die möglichen Risiken, wie versehentliche oder absichtliche Freisetzung synthetisierter Mikroorganismen (vgl. PCSBI, 2010:62) zu externalisieren. So verweist etwa Carl Cranor (2009) darauf, dass diejenigen, die am meisten über ein Projekt wissen, zugleich das größte Interesse an seiner Förderung und ein entsprechend geringes Interesse daran haben, mögliche Risiken aufzuzeigen oder für diese einzustehen. Ein nur passiv betroffener Stakeholder wird jedoch weder das tatsächliche Risiko einer Freisetzung einschätzen können, noch Interesse daran haben, ein ihm unbekanntes Risiko zu tragen. Auf Ebene einzelner Akteure ist dieses systematische Problem nicht zu lösen. Hier müssen lokale, nationale oder internationale Institutionen tätig werden, um eine gerechte Verteilung von Nutzen und Risiken sicherzustellen (vgl. PCSBI, 2010:161–164).

7.4.2 Biosafety

Fragen der Biosafety umfassen den sicheren Umgang mit Erzeugnissen der Synthetischen Biologie im Labor, den sicheren Umgang bei Experimenten, die außerhalb des Labors stattfinden und die Entwicklung von sicheren – sprich: zuverlässigen – Anwendungen. Darüber hinaus umfassen sie die Sicherheit für spätere Anwendungen sowie Auswirkungen auf die Umwelt und ganz allgemein gesprochen weitere unerwünschte Folgen Synthetischer Biologie (vgl. hierzu WHO, 2004; Boldt et al., 2009:74):

- (1) *Arbeitssicherheit*: Gefahren für den Menschen im Labor
- (2) *Produktsicherheit*: Gefahren für den Menschen bei der Anwendung
- (3) *Betriebssicherheit*: Gefahren für die Umwelt durch Fehler im Labor (ungewollte Freisetzung)
- (4) *Umweltsicherheit*: Gefahren für die Umwelt bei der Anwendung (ungewollte Vermehrung, unvorhergesehene Schäden, usw.)

Die Kernfrage von Biosafety stellt sich dahingehend, ob Risiken, die von Erzeugnissen Synthetischer Biologie ausgehen, mit den (bekannten) Gefahren gentechnisch veränderter Organismen vergleichbar sind oder nicht. Neben der Frage, ob die Risiken vergleichbar sind, muss noch gefragt werden, ob die zukünftigen Erzeugnisse Synthetischer Biologie von bestehenden gesetzlichen Regelungen (etwa zur Gentechnologie) erfasst werden. Da noch keine konkreten Anwendungen Synthetischer Biologie vorliegen, sind diese Fragen prospektiv.

Ebenso prospektiv sind daher Maßnahmen, wie sie die Deutsche Forschungsgemeinschaft empfiehlt. Für Erzeugnisse Synthetischer Biologie sei das Vorsorgeprinzip aus dem Risikomanagement der Gentechnologie anzuwenden, welches „für gentechnische Experimente das vermutete Risiko als vorhandenes Risiko annimmt“ (DFG et al., 2009:33; vgl. auch Kapitel 11, Indikator 8). Die US-amerikanische Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues (PCSBI) übernimmt dieses Prinzip nicht in ihre Empfehlungen und wurde dafür heftig in einem offenen Brief von 58 internationalen Nichtregierungsorganisationen kritisiert, da der Verzicht auf das Vorsorgeprinzip einer mangelnden Risikoanalyse gleichkomme. Wie sich ein fortpflanzungsfähiger, synthetisch erzeugter Organismus auf bestehende Ökosysteme auswirke, sei nicht abzusehen (vgl. Friends of the Earth, 2010). Welche Akteure sind dabei in der Position, die auftretenden Risiken abschätzen zu können?

Es sind zweierlei Typen von Handlungen zu berücksichtigen: einerseits „die Forschung“ und andererseits „die Entwicklung“ einer Anwendung. Beide Handlungen treten in der Synthetischen

Biologie oft gemeinsam auf, da ein besonderes Erkenntnisinteresse auf die Funktion von Prozessen und modularen Einheiten gelegt wird, die sich in Organismen finden. Die so bestimmten funktionalen Komponenten werden dann beispielsweise in einer Datenbank, wie der Registry of Standard Biological Parts⁴ der US-amerikanischen BioBricks Foundation gespeichert und können als solche Bauteile standardisiert und frei von anderen Forschenden eingesehen und eingesetzt werden. Einfache Regeln der Sorgfalt bei Erstellung und Verwendung derlei Daten gehören zum Berufsethos sowohl der Natur- als auch der Ingenieurwissenschaften. Sie stellen eine gute Praxis dar und gewährleisten die Sicherheit anderer, die mit diesen Ergebnissen weiterarbeiten.

Darüber hinaus greifen hier technikethische Überlegungen zur Sicherheit der Anwendung der Erzeugnisse Synthetischer Biologie, wie sie aus Ingenieurberufen bekannt sind (als bekanntestes Beispiel die VDI-Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure). Es besteht nicht nur Verantwortung für einen guten Umgang und eine sorgfältige Entwicklung dieser Anwendungen, sondern auch über einen gegenwärtigen guten Umgang hinaus für die Folgen, die eine erwünschte so wie unerwünschte Verwendung der neuen Technologie mit sich bringen kann. Da Synthetische Biologie integrativ arbeitet, müssen dabei Verhaltensstandards aus den verwendeten Wissenschaftsbereichen wie der Nanotechnologie oder der Medizin übernommen werden. Konkrete Anwendungen der Synthetischen Biologie stehen jedoch noch aus, deshalb können auch hier keine konkreten Beispiele genannt werden.

Nimmt man diese Bedenken ernst, dann empfiehlt es sich generell, neben der guten Praxis integrierter Wissenschaften die rechtlichen Regelungen aus der Gentechnologie zu übernehmen, darüber hinaus jedoch ein Monitoring zu betreiben, das die bestehenden Regelungen regelmäßig überprüft und bei Bedarf anpasst (DFG et al., 2009:32,38–39; PCSBI, 2010:130). Laut schriftlicher Auskunft auf eine persönliche Anfrage beim Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL)⁵ wurden bisher noch keine Organismen entwickelt, die sich dem Gentechnikgesetz in Deutschland entziehen würden.⁶ Da dies jedoch durchaus der Fall sein könne, führt in Deutschland die Zentrale Kommission für die Biologische Sicherheit (ZKBS) ein Monitoring

4 <http://partsregistry.org> [23.07.2012].

5 Schriftliche Auskunft wurde von Nina Banspach, Pressesprecherin des BVL am 06.12.2011 erteilt.

6 Im Gentechnikgesetz §3 Begriffsbestimmungen, Absatz 3 gentechnisch veränderter Organismus (Stand 09.12.2010) wird ein gentechnisch veränderter Organismus definiert als „ein Organismus, mit Ausnahme des Menschen, dessen genetisches Material in einer Weise verändert worden ist, wie sie unter natürlichen Bedingungen durch Kreuzen oder natürliche Rekombination nicht vorkommt“.

der Entwicklungen im Feld der Synthetischen Biologie durch. Diese Kommission hat 2010 bereits eine Stellungnahme und Risikobewertung zu Venters Bakterium mit seiner künstlich synthetisierten DNA unter der aktuellen Gesetzeslage abgegeben (BVL, 2010).

7.4.3 Biosecurity

Biosecurity ist ein ergänzendes Konzept, das neben Biosafety-Überlegungen zu unerwünschten Folgen Synthetischer Biologie konkreter den Missbrauch von Erzeugnissen sowie deren Einsatz zu Schadenszwecken bezeichnet (vgl. WHO, 2004:47). Zumeist wird nur von Bioterrorismus gesprochen, der etwa in Form synthetisch gestalteter Viren zuschlagen könnte (vgl. Deutscher Bundestag, 2011:12). Diese Bedenken gewinnen vor dem Hintergrund an Substanz, dass eine gewisse Do-it-yourself-Mentalität im Bereich der Synthetischen Biologie vorherrscht und Datenbanken, wie die der BioBricks-Foundation frei zugänglich und somit – zugespitzt – frei missbräuchlich sind. Nicht institutionell gebundene Do-it-yourself-Laien verlangen über die von der Gentechnologie bekannten Akteure hinaus besondere Beachtung (vgl. DIYbio.org; Bennett et al., 2009). Wie lässt sich vermeiden, dass unbedenkliche Technologien nicht doch zu „bösen Zwecken“ verwendet werden?

Im englischsprachigen Raum wird von „dual use“-Technologien gesprochen (vgl. PCSBI, 2010:56), im Deutschen hat sich seit Hans Jonas die Rede von der Ambivalenz von Technik eingebürgert (vgl. Jonas, 1985:42–43). Es gilt, den gewollten Missbrauch, wie auch ungewollte Bedrohungen schon bei der Entwicklung entsprechender Anwendungen zu überblicken. Noch gibt es diese Anwendungen nicht und biotechnologische Geräte sowie Know-how sind noch zu teuer und zu schwer zu erlangen, um Do-it-yourself-Laien jetzt schon zur Gefahr zu erklären, so etwa die Meinung der amtierenden Bundesregierung in Deutschland. Bis auf Weiteres seien die Regelungen für Gentechnologien hinreichend, um auch Synthetische Biologie und deren Erzeugnisse zu erfassen (vgl. Deutscher Bundestag, 2011:12–14).

Gegenwärtig sind die ethischen Bedenken im Bezug auf Biosecurity daher als gering einzuschätzen, es gilt allerdings für die Zukunft, adäquate Mechanismen zu etablieren, die eine Kontrolle pathogener Sequenzen ermöglichen. Derzeit haben sich Biotechnologieunternehmen, die unter anderem Gensequenzen von Viren auf Bestellung liefern, in Eigenregie untereinander vernetzt, um sich über die Vertrauenswürdigkeit der Kunden auszutauschen.⁷ Hier könnte die

7 George Church teilte dies der PCSBI bei einer Anhörung am 08.07.2010 mit, vgl. www.bioethics.gov/cms/node/165 [23.07.2012]; vgl. auch die Präsentation von Edward H. You des FBI eben dort <http://bioethics.gov/cms/node/170> [23.07.2012].

Synthetische Biologie auch neue Möglichkeiten der Sicherheit eröffnen, indem etwa ein Wasserzeichen verlangt wird, das Organismen in ihrem Genom tragen. Ähnlich wie Venter und sein Team ihrem Bakterium ein Genom einsetzten, das unter anderem eine E-Mail-Adresse enthielt, könnten Biotechnologieunternehmen dazu verpflichtet werden, eine Signatur in die von ihnen erzeugten oder veränderten Organismen einzuschreiben. So könnten etwa gestohlene oder Organismen ungewisser Herkunft schneller identifiziert und auf ihr Risikopotenzial hin abgeschätzt werden (vgl. DFG et al., 2009:35; PCSBI, 2010:71–74; 84–88).

7.4.4 Gerechtigkeit

Gerechtigkeitsfragen stellen sich im Bezug auf den Zugang zu wissenschaftlichen Erkenntnissen, der Verteilung der Risiken und der Verteilung des wirtschaftlichen Nutzens (vgl. hier auch Kapitel 8). Nicht alle Länder werden sich gleichermaßen Forschung zur Synthetischen Biologie leisten, eine gute Ausbildung garantieren, Infrastrukturen schaffen und qualitativ hochwertige Forschung betreiben können. Gerade die Möglichkeiten der frei zugänglichen BioBricks-Datenbank und der DIY-Charakter Synthetischer Biologie bieten die Chance, eine offene Wissenschaftslandschaft zu etablieren. Zwar findet Forschung in Synthetischer Biologie nach wie vor hauptsächlich in den USA und Europa statt (vgl. Pei et al., 2011:151), doch bedeutet dies keinen systematischen Ausschluss anderer Länder. Aufgrund dieser Überlegungen und mit Verweis auf John Rawls' Gerechtigkeitstheorie (vgl. Rawls, 1999) wird von der PCSBI ein fairer Zugang zu den Erkenntnissen der Synthetischen Biologie gefordert (vgl. PCSBI, 2010:161). Diese Einschätzung teilt auch die European Group on Ethics in Science and New Technologies to the European Commission (EGE). Der freie Zugang könnte von Patenten auf Erfindungen im Bereich Synthetischer Biologie behindert werden (vgl. EGE, 2010:39–47). In ihren Empfehlungen spricht sich die EGE dafür aus, dass „Debatten über die am besten geeigneten Möglichkeiten angestoßen werden, um den Zugang der Öffentlichkeit zu den Ergebnissen der Synthetischen Biologie zu gewährleisten“ (EGE, 2010:82). Eine Regelvorgabe von oben herab ist nach Einschätzung der EGE nicht angemessen. Um eine gesunde Mischung aus strikter Rahmgebung und anpassungsfähigen Leitlinien zu erreichen, sollte vielmehr „governance“ zwischen „soft law“ und „hard law“ betrieben werden, also eine Steuerung, die ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Empfehlungen und wünschenswerten Regelungen einerseits und strafbewehrten Gesetzen andererseits verspricht.

Weitere Folgen des Einsatzes Synthetischer Biologie, die über wissenschaftliche Verwertung hinausgehen, sollten zudem fair auf Personen, Gruppen, Regionen oder auch Landschaften verteilt sein (vgl. PCSBI, 2010:161–164). Auch hier kann keine optimale Lösung festgeschrieben werden, da Versuchsflächen, wie auch Forschungsstandorte notwendig an lokalen Standorten und nicht gleichmäßig über eine Nation verteilt sind.

Gerechtigkeitsfragen stellen sich auch in der Hinsicht, wer die neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse wirtschaftlich nutzen können wird. Es wurde in einem Perspektivpapier des Deutschen Ethikrates angemerkt, dass ein Ungleichgewicht bei der Patentierung von Folgetechnologien der Synthetischen Biologie bedeutsame Unterschiede im Zugang zu den neuen Technologien erzeugen kann und sich in der Folge die Schere zwischen Nord- und Südhalbkugel weiter öffnen könnte (vgl. Deutscher Ethikrat, 2009:7). Ökonomisch interessante Anwendungsbereiche der Synthetischen Biologie sieht etwa die Deutsche Forschungsgemeinschaft vornehmlich „in der erhöhten Produktivität durch die Verbesserung von Herstellungsprozessen, der Gewinnung neuer Produkte, der Beschleunigung von Entwicklungszeiten durch Standardisierung biologischer Bauteile und Etablierung neuer Produktionskonzepte“ (DFG et al., 2009:27). Da in Deutschland gerade Bioenergie und medizinische Biotechnologie stark vertreten seien, könne jeder Fortschritt in effizienten, günstigeren Produktionsverfahren von großem ökonomischem Interesse sein. Neue Synthesewege für schon bekannte Stoffe und Materialien versprechen auch eine schnelle ökonomische Nutzung. Erstens sind neue Verfahren in bekannte Produktionsabläufe leichter einzubeziehen als völlig neue Anwendungen und zweitens besteht ein Bedarf an günstigen Biochemie-Produkten sowie an Dienstleistungen wie Genanalysen und Sequenzierungen. Die Dienstleistungen im Biotechnologiebereich könnten Schritt für Schritt günstiger werden, wenn sich etwa derzeit bestehende Patente mit neuen Möglichkeiten Synthetischer Biologie umgehen ließen (vgl. DFG et al., 2009:27).

Prinzipiell lassen sich sowohl gentechnisch veränderte Organismen als auch die Produkte, die mit ihnen erzeugt werden, patentieren. So hat etwa das J. Craig Venter Institute, Inc. im Jahr 2007 einen Patentantrag auf mehrere Gene gestellt, mit deren Hilfe eine synthetisierte Bakterienart (*Mycoplasma laboratorium*) erzeugt werden kann.⁸ Patente auf Biotechnologien sind nicht auf den US-amerikanischen Raum begrenzt:

8 United States Patent Application 20070122826, "Minimal bacterial genome", 31.05.2007.

„In Europa sind mikrobiologische Verfahren und die mithilfe dieser Verfahren gewonnenen Erzeugnisse grundsätzlich patentierbar (Art. 53b EPÜ). Ebenso ist biologisches Material, das mithilfe eines technischen Verfahrens aus seiner natürlichen Umgebung isoliert oder hergestellt wird, auch wenn es in der Natur schon vorhanden war, patentierbar (Regel 27a EPÜ).“ (DFG et al., 2009:29)

Patente können Marktvorteile gewähren und den Wettbewerb fördern. Patente können aber auch zu Monopolen oder undurchschaubaren Lizenzlandschaften führen. Für Erzeugnisse der Synthetischen Biologie werden sehr viele, sehr kleine biochemische Elemente benötigt (wie Module, Gene, Synthesewege). Wenn manche davon patentiert werden würden, wären die Möglichkeiten von Forschung und Entwicklung deutlich eingeschränkt. Ein Versuch, sich einem solchen Trend zu widersetzen, der auch den DIY-Charakter der Synthetischen Biologie unterstreicht, stellt die schon erwähnte „BioBricks-Foundation“ dar, die sich dafür einsetzt, die DNA-Bausteine für Biosynthesysteme frei verfügbar zu halten.⁹

Eine gerechte Regelung von Zugang und Verwertung der Erkenntnisse Synthetischer Biologie lässt sich nicht in einem Satz festschreiben. Als Richtlinie lässt sich jedoch der allgemeine Hinweis verstehen, dass Regelungen zum (geistigen) Eigentum an Ergebnissen der Synthetischen Biologie dem Allgemeinwohl dienen sollen. Ob dies im Einzelfall über freie Datenbanken oder Patente und wirtschaftlichen Wettbewerb besser gewährleistet werden kann, ist hier nicht zu beantworten. Auch die PCSBI enthält sich hier einer Empfehlung (vgl. PCSBI, 2010:118–121).

7.4.5 Transparenz/Akzeptanz

Gerade die Art und Anzahl der Berichterstattung in den Medien formt das Bild der Synthetischen Biologie in der Öffentlichkeit und damit die Akzeptanz und Unterstützung der neuen Technologien (vgl. Cserer/Seiringer, 2009; vgl. dazu auch Kapitel 9 in diesem Band): „Konkurrenz für Gott. Eine Truppe von Biologen macht sich daran, das Leben neu zu erfinden“ titelt etwa „Der Spiegel“ (2010:110) und rückt damit die gerade erst denkbar gewordene Erschaffung „neuen“ Lebens in den Bereich der Realität.

⁹ <http://biobricks.org/> [23.07.2012].

Je nachdem, welches Bild der Synthetischen Biologie sich festsetzt, wird auch die Vorstellung des Gegenstandsbereiches bei denjenigen besetzt, die eventuell zum ersten Mal von Synthetischer Biologie hören – und diese Zielgruppe umfasst derzeit 80% der Deutschen sowie der Europäer. Nach einer Umfrage unter 26.671 Europäern und 1.531 Deutschen haben weniger als 19% der Deutschen überhaupt je von Synthetischer Biologie gehört. Im europäischen Schnitt sind es sogar nur 17% (vgl. European Commission, 2010). Noch sind die Interessengruppen nicht in ihren Positionen verhärtet und ein Stellungskrieg, wie er in der grünen Gentechnologie geführt wird, könnte von vornherein vermieden werden. Beispielsweise glauben knapp 70% der Deutschen, dass Gentechnologie keine Verbesserungen ihres Alltagslebens hervorbringt, oder dieses sogar verschlechtern wird. Im Vergleich dazu erwarten 70% positive Auswirkungen der Telekommunikationstechnologie und 80% angenehme Veränderungen durch Solarenergie (vgl. Hampel/Pfenning, 2001:29). Es werden auch Zweifel an der Zuverlässigkeit des Expertenwissens von Forschenden im Bereich der Gentechnologie laut und die Legitimation aufgrund ihres Fachwissens, politische Entscheidungen zu beeinflussen, wird vielfach aberkannt (vgl. Peters, 2001:233; vgl. dazu auch Kapitel 10 in diesem Band).

Dass es Befürworter und Gegner neuer wissenschaftlicher Entwicklungen gibt, ist nicht überraschend und stellt auch per se noch keine ethische Herausforderung dar. Doch Synthetische Biologie ist als Wissenschaftszweig ein gesellschaftliches Unterfangen, dessen Erfolge und Gefahren noch in der Zukunft liegen. Verschiedene Gruppen von Beteiligten arbeiten und forschen einerseits im Bereich der Synthetischen Biologie oder befürchten andererseits, ungewollt von den Erkenntnissen und den Entwicklungen der Synthetischen Biologie betroffen zu werden. Was als Vertrauensvorschuss bezeichnet werden kann, mit der Wissenschaft und Wirtschaft neue Handlungsbereiche erschließen können, muss seinerseits gepflegt werden. In der Stellungnahme der European Group on Ethics in Science and New Technologies (EGE), wird sehr treffend von einer „Vertrauenssphäre“ gesprochen, einer „sphere of trust that provides the space for new technologies to be developed as part of a societal endeavour – and not against it“ (EGE, 2010:37). Eine Ausgrenzung von Teilen der Bevölkerung oder eine Überbelastung der „Vertrauenssphäre“ kann zu einer breiten Ablehnung der neuen Technologien und zu einem Legitimationsverlust führen. Die EGE verweist auch auf den starken Widerstand gegen grüne Gentechnologie in Deutschland (vgl. EGE, 2010:38), was als Negativbeispiel im Umgang mit der Öffentlichkeit dienen kann. Gerade im Umgang mit Konflikten, die aus der grünen Gentechnologie bekannt sind (zum Beispiel im Zusammenhang mit dem künstlich mit Vitamin A

angereicherten „Goldenen Reis“ oder der „Amflora“-Kartoffel mit gentechnisch veränderter Stärkezusammensetzung), deren Aktualität und heftige Auseinandersetzung den Blick auf eine Lösung oder Schlichtung erschweren, wird deutlich, welche langfristigen Folgen ein Vertrauensverlust haben kann. Einen ähnlichen Konflikt könnte es etwa um das Anti-Malariamittel Artemisinin geben (vgl. DFG et al., 2009:22-23; vgl. ETC, 2010, 3).¹⁰

Ein verantwortlicher Umgang mit den Möglichkeiten und zukünftigen Erzeugnissen Synthetischer Biologie hat damit Interessengruppen auf lokaler (DIY-Biologie Laboratorien), nationaler (Universitäten, Forschungsförderung) und internationaler (Forschungsk Kooperationen, EU-Projekte)¹¹ Ebene zu überblicken. Zudem gibt es selbst ernannte „Watchdogs“, NGOs die es sich zur Aufgabe gemacht haben, einen unabhängigen Blick auf neue Technologien zu werfen (Friends of the Earth, Greenpeace, ETC Group). In dieser Akteursvielfalt ist es schwierig, Verursacher und Mitwirkende von Handlungen klar zu identifizieren. Verantwortung droht im Akteursdickicht zu versanden. Ein solches Auslaufen der Verantwortung muss vermieden werden, denn biotechnologische Forschung steht in einem jetzt schon fragilen Vertrauensvorschluss der Bevölkerung, der durch die Entwicklungen der grünen Gentechnologie bereits angegriffen ist. Präziser ausgedrückt: Wenn Forschungen unternommen werden, die weit verbreiteten Wertvorstellungen und Intuitionen der Bevölkerung widersprechen, wie es bei grüner Gentechnologie in Deutschland der Fall ist (vgl. Odparlik et al., 2008; Hampel/Renn, 2001) und wie es bei Synthetischer Biologie der Fall sein *kann*, besteht die Gefahr, dass solche Forschung den Rückhalt in der Bevölkerung verliert und damit ihre Legitimation verspielt. In ihrem offenen Brief an Amy Gutmann, der Vorsitzenden der US-amerikanischen Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues fordern die 58 unterzeichnenden NGOs nicht nur die weiter oben erwähnte Anwendung des Vorsorgeprinzips, sondern darüber hinaus ein Moratorium der Freisetzung und kommerziellen Nutzung aller Erzeugnisse Synthetischer Biologie (vgl. Friends of the Earth, 2010). Auf einer öffentlichen Tagung des Deutschen Ethikrates zur Synthetischen

10 Derzeit werden zur Herstellung von Artemisinin die getrockneten Blätter des einjährigen Beifußes verwendet, der unter anderem in Südostasien und Afrika angebaut wird. Die Bill & Melinda Gates Stiftung fördert die Forschung zur synthetischen Erzeugung des Wirkstoffes – dies könnte eine der ersten erfolgreichen Anwendungen der Synthetischen Biologie werden – und wird daher von der ETC Group kritisiert: „These production facilities could undercut the livelihoods and rights of some of the poorest farmers and plantation workers in the world, by moving raw material production from the field to the fermentation vat. Any financial gains will also move from communities to big commercial interests“ (ETC, 2010:3). Vgl. auch Kapitel 8 in diesem Band.

11 Vgl. zur Förderung von EU-Projekten Kapitel 11, Indikator 5.

Biologie im November 2011 hat Rüdiger Stegemann vom BUND diese Forderung nach einem Moratorium noch einmal erneuert.¹²

Um die Chance nutzen zu können, den noch unausgefochtenen Kampf um das „Framing“ der Synthetischen Biologie zu entschärfen, müssen Transparenz und Artikulationsmöglichkeiten sichergestellt werden, die sich als Forderungen auch in den bekannten Stellungnahmen zur Synthetischen Biologie finden (vgl. DFG et al., 2009:31; EKAH, 2010:20–27; EGE, 2010:30–37; PCSBI, 2010:121/130/141).

7.5 Fazit

Was also ist neu an ethischen Herausforderungen durch die Synthetische Biologie? Erstens ist das Erkenntnisinteresse an der Funktion und Standardisierung biologischer Teile und Systeme, verbunden mit dem Ziel der Nach- und Umgestaltung ein Schritt, der Synthetische Biologie weiter in Richtung Ingenieurwissenschaften trägt und eine Integration anderer Hilfswissenschaften, von der Informatik bis zur Medizin, zur Folge hat. Daraus folgt die noch bevorstehende Entwicklung neuer Formen des Lebens und neuer Anwendungen die, sollte sich der Erfolg einstellen, bekannten Regelungen für die Gentechnologie entschlüpfen könnten. Ein erwartungsvolles „wait and see“ wird daher staatlicherseits eingenommen, verbunden mit einem Monitoring der Entwicklungen im Bereich der Synthetischen Biologie, wie es in Deutschland etwa der Zentralen Kommission für die Biologische Sicherheit am Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit zur Aufgabe gemacht ist.

Zweitens kann der offene Charakter und ingenieurwissenschaftliche Anspruch der Synthetischen Biologie, der sich in der frei zugänglichen Datenbank der BioBricks Foundation zeigt, aber auch an dem um Biobastler erweiterten Akteurskreis, die ihre Freizeit am privaten Labortisch verbringen, als relevante Neuerung gefasst werden. Beides sind Chancen für eine freie und transparente Wissenschaft, die ihren Anwendern dient, aber zugleich auch die Gefahr des Missbrauchs hervorbringt. In Form von Biosafety, Biosecurity und gerechten Zugangsmöglichkeiten zu neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen und wirtschaftlichem Nutzen neuer Techniken drücken sich diese Gefahren und Chancen aus.

12 Audioprotokoll unter: www.ethikrat.org/veranstaltungen/weitere-veranstaltungen/werkstatt-leben [24.07.2012].

Drittens konnten zwei Intuitionen, „Biokonservatismus“ und „Bioliberalismus“, als äußere Pole ausgezeichnet werden, die diesen Wandel zum „bastelnden Biologen“ entweder rundherum ablehnen oder ihn vollumfänglich gutheißen und zwischen denen sich die Haltungen verschiedener Interessengruppen einordnen lassen. Wie gezeigt, lassen sich beide Positionen nicht auflösen. Sie sind jedoch Kernelemente für die Beurteilung von Fragen nach der Philosophie des Lebens, nach gerechter Verteilung der Vor- und Nachteile Synthetischer Biologie und sie bezeichnen die Eckpunkte von Diskussionen, etwa um die Patentierbarkeit von Formen des Lebens.

Viertens sind Beschreibung und Bewertung Synthetischer Biologie noch in einem Stadium des „Framings“, in dem verschiedene Akteure bemüht sind, eine Deutungshoheit über das neue Forschungsfeld zu erlangen (hier am Beispiel Venter vs. ETC Group). Gerade die in „Drittens“ genannten Punkte sind Gegenstand dieses notwendigen gesellschaftlichen Prozesses der begrifflichen Fassung des neuen Forschungs- und Anwendungsbereichs der Synthetischen Biologie.

Um gegenüber diesen ethischen Herausforderungen schon im frühen Stadium der Synthetischen Biologie gewappnet zu sein, empfiehlt es sich, die verschiedenen Interessengruppen zu berücksichtigen und ein Mindestmaß an Transparenz zu etablieren, das Gegnern wie Befürwortern erlaubt, sich ein Bild über den Stand der Forschung zu machen. Ebenfalls empfiehlt es sich, etwa über geeignete Diskursmaßnahmen einen Überblick über Positionen betroffener Interessengruppen einzuholen, bevor einschneidende Regelungen für den Umgang mit Synthetischer Biologie getroffen werden. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass die vielversprechenden Aussichten der Synthetischen Biologie auch gefahrlose Anwendung finden können und ihre Vor- wie Nachteile gesamtgesellschaftlichen Nutzen erbringen.

7.6 Literatur

Alpern, K. (1993): Ingenieure als moralische Helden. In: Lenk, H./Ropohl, G. (Hrsg.): Technik und Ethik. 2., rev. u. erw. Aufl. Stuttgart:177–193.

Aus der Au, C. (2008): Was dem einen seine Natur, ist dem anderen die Manipulation. Über den Gebrauch des Begriffs der ‚Natur‘ in der Debatte über die Grüne Gentechnik. In: Busch, R. J./Prütz, G.(Hrsg.): Biotechnologie in gesellschaftlicher Deutung. München:21–28.

BBSRC (2008) = Biotechnology and Biological Sciences Research Council (eds.): Synthetic Biology. Social and Ethical Challenges. Nottingham.

- Bennett, G. et al. (2009): From synthetic biology to biohacking: are we prepared? In: *Nat Biotechnol* 27(12):1109–1111.
- Birnbacher, D. (2006a): *Bioethik zwischen Natur und Interesse*. Frankfurt a. M.
- Birnbacher, D. (2006b): *Natürlichkeit*. Berlin.
- Boldt, J./Müller, O. (2008): Newtons of the leaves of grass. Certain ethical implications of synthetic biology research go beyond those of genetic engineering. In: *Nat Biotechnol* 26(4):387–389.
- Boldt, J. et al. (2008): Von der Manipulation zur Kreation. Ethische und ontologische Aspekte der synthetischen Biologie. In: *Jahrbuch für Wissenschaft und Ethik* 13:153–180.
- Boldt, J. et al. (2009): *Synthetische Biologie. Eine ethisch-philosophische Analyse*. Bern.
- Bölker, M. (2011): Revolution der Biologie? Ein Überblick über die Voraussetzungen, Ansätze und Ziele der Synthetischen Biologie. In: Dabrock, P. et al. (Hrsg.): *Was ist Leben – im Zeitalter seiner technischen Machbarkeit? Beiträge zur Ethik der Synthetischen Biologie*. Freiburg/München:27–41.
- BVL (2010) = **Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit**: Stellungnahme der ZKBS zur Risikobewertung von *Mycoplasma mycoides* subsp. *capri*, *Mycoplasma capricolum* subsp. *capricolum* und *Mycoplasma mycoides* JCVI-syn1.0 als Spender- und Empfängerorganismen für gentechnische Arbeiten nach § 5 Absatz 1 GenTSV. Az: 6790-05-01-94). Unter: www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/06_Gentechnik/ZKBS/01_Allgemeine_Stellungnahmen_deutsch/02_Bakterien/Mycoplasmen.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [01.08.2012].
- Catenhusen, W.-M. (2011): Schlusswort der Tagung „Werkstatt Leben. Bedeutung der Synthetischen Biologie für Wissenschaft und Gesellschaft“ des Deutschen Ethikrates am 23.11.2011. Audioprotokoll online unter: www.ethikrat.org/veranstaltungen/weitere-veranstaltungen/werkstatt-leben [01.08.2012].
- Cranor, C. (2009): The acceptability of risks of protocells. In: Bedau, M. A./Parke, E. C. (eds.): *The ethics of protocells. Moral and social implications of creating life in the laboratory*. Cambridge:49–67.
- Cserer, A./Seiringer, A. (2009): Pictures of Synthetic Biology. A reflective discussion of the representation of Synthetic Biology (SB) in the German-language media and by SB experts. In: *Syst Synth Biol* 3(1–4):27–35.
- Deplazes, A./Huppenbauer, M. (2009): Synthetic organisms and living machines. Positioning the products of synthetic biology at the borderline between living and non-living matter. In: *Syst Synth Biol* 3:55–63.
- Deplazes-Zemp, A. (2011): The Conception of Life in Synthetic Biology. In: *Sci Eng Ethics*, Online-Publikation 12.04.2011 unter: www.springerlink.com/content/a619582xg082603/fulltext.pdf [01.08.2012].
- Der Spiegel (2010): Konkurrenz für Gott. 04.01.2010.
- Deutscher Bundestag (2011): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten René Röspel, Dr. Ernst Dieter Rossmann, Dr. Hans-Peter Bartels, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der SPD (BT-Drucksache 17/4898). Stand und Perspektiven der Synthetischen Biologie. BT-Drucksache 17/5165. Berlin.

Deutscher Ethikrat (Hrsg.) (2009): Perspektivenpapier Synthetische Biologie. Unter: www.ethikrat.org/dateien/pdf/Perspektivenpapier_Synthetische_Biologie_2009-04-23.pdf [01.08.2012].

DFG et al. (2009): Synthetische Biologie. Stellungnahme. Weinheim.

EGE (2010) = European Group on Ethics in Science and New Technologies to the European Commission: Opinion No. 25. Ethics of Synthetic Biology. Luxembourg. Unter: http://ec.europa.eu/bepa/european-group-ethics/docs/opinion25_en.pdf [01.08.2012].

EKAH (Hrsg.) (2010) = Eidgenössische Ethikkommission für die Biotechnologie im Ausserhumanbereich: Synthetische Biologie – Ethische Überlegungen. Bern.

Engelhard, M. (2011): Die synthetische Biologie geht über die klassische Gentechnik hinaus. In: Dabrock, P. et al. (Hrsg.): Was ist Leben – im Zeitalter seiner technischen Machbarkeit? Beiträge zur Ethik der Synthetischen Biologie. Freiburg/München: 43–59.

Erickson, B. et al. (2011): Synthetic Biology: Regulating Industry Uses of New Biotechnologies. In: Science 333(6047):1254–1256.

ETC Group (2007) = Extreme genetic engineering Group: Patenting Pandora's Bug: Goodbye, Dolly... Hello, Synthia! J. Craig Venter Institute Seeks Monopoly Patents on the World's First-Ever Human-Made Life Form. Unter: www.etcgroup.org/node/631 [01.08.2012].

ETC Group (2010): Briefing and recommendations for CBD delegates to COP 10. Unter: www.etcgroup.org/sites/www.etcgroup.org/files/publication/pdf_file/ETC_COP10SynbioBriefing081010.pdf [01.08.2012].

European Commission (2006): Synbiology. An Analysis of Synthetic Biology Research in Europe and North America. Final Report on Analysis of Synthetic Biology Sector. Unter: www2.spi.pt/synbiology/documents/news/D11%20-%20Final%20Report.pdf [01.08.2012].

European Commission (2007): Synthetic Biology. A NEST Pathfinder Initiative. Luxembourg.

European Commission (2010): Eurobarometer 73.1. Results for Germany. Unter: http://ec.europa.eu/public_opinion/archives/ebs/ebs_341_fact_de_en.pdf [01.08.2012].

Friends of the Earth (2010): Letter to the Commission on Synthetic Biology, 16.12.2010. Unter: http://libcloud.s3.amazonaws.com/93/19/6/586/Civil_Society_Letter_to_Presidents_Commission_on_Synthetic_Biology.pdf [01.08.2012].

Gaisser, S. et al. (2008): TESSY Achievements and Future Perspectives in Synthetic Biology. TESSY Final Report. Unter: www.tessy-europe.eu/public_docs/TESSY-Final-Report_D5-3.pdf [01.08.2012].

Gibson, D. G. et al. (2010): Creation of a Bacterial Cell Controlled by a Chemically Synthesized Genome. In: Science 329(5987):52–56.

Hampel, J./Renn, O. (Hrsg.) (2001): Gentechnik in der Öffentlichkeit. Wahrnehmung und Bewertung einer umstrittenen Technologie. Frankfurt/New York.

Hampel, J./Pfenning, U. (2001): Einstellungen zur Gentechnik. In: Hampel, J./Renn, O. (Hrsg.): *Gentechnik in der Öffentlichkeit. Wahrnehmung und Bewertung einer umstrittenen Technologie*. Frankfurt/New York:28–55.

Jonas, H. (1982): Warum die moderne Technik ein Gegenstand für die Ethik ist. erstmals veröffentlicht in: *Social Research* 49 (1982): No 4, hier zitiert nach: Jonas, H. (1985): *Technik, Medizin und Ethik. Zur Praxis des Prinzips Verantwortung*. Frankfurt a. M.:42–52.

Kaebnick, G. E. (2011): Of Microbes and Men. In: *The Hastings Center Report* 41(4):25–28.

Keller, E. F. (2002): *Making Sense of Life. Explaining Biological Development with Models, Metaphors, and Machines*. Cambridge/London.

Kuhn, T. (1973): *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. Frankfurt a. M.

Kuldell, N. (2007): Authentic teaching and learning through synthetic biology. In: *J Biol Eng*, online-Publikation 27.12.2007. DOI:10.1186/1754-1611-1-8.

Kutschera, U. (2008): *Evolutionsbiologie*. 3. akt. u. erw. Aufl. Stuttgart.

Lam, C. M. C. et al. (2009): An introduction to Synthetic Biology. In: Schmidt, M. et al. (eds.): *Synthetic Biology. The technoscience and its societal consequences*. Dordrecht [u. a.]:23–48.

Leduc, S. (1912): *Die synthetische Biologie*. erstmals veröffentlicht als: *La Biologie Synthétique*. Paris 1912, hier: Halle 1914.

Müller-Röber, B. et al. (2009): Querschnitt Ethik: Argumentative Dimensionen in der ethischen Bewertung der Gentechnologie. In: ders.: *Zweiter Gentechnologiebericht. Analyse einer Hochtechnologie in Deutschland*. Dornburg:383–419.

Müller-Röber, B. et al. (2009): Querschnitt Ethik: Argumentative Dimensionen in der ethischen Bewertung der Gentechnologie. In: ders.: *Zweiter Gentechnologiebericht*. Dornburg:383–419.

Odparlik, S. et al. (Hrsg.) (2008): *Wie die Würde gedeiht. Pflanzen in der Bioethik*. München.

PCSBI (2010) = **Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues**: *New Directions. The Ethics of Synthetic Biology and Emerging Technologies*. Washington, D.C.

Pei, L. et al. (2012): Synthetic biology in the view of European public funding organisations. In: *Public Underst Sci* 21(2):149–162.

Peters, H. P. (2001): Das Bedürfnis nach Kontrolle der Gentechnik und das Vertrauen in wissenschaftliche Experten. In: Hampel, J./Renn, O. (Hrsg.): *Gentechnik in der Öffentlichkeit. Wahrnehmung und Bewertung einer umstrittenen Technologie*. Frankfurt/New York:225–245.

Rasmussen, S. et al. (2004): Transitions from Nonliving to Living Matter. In: *Science* 303(5660)963–965.

Rawls, J. (1999): *A theory of justice*. Oxford.

Ried, J. et al. (2011): Unbehagen und kulturelles Gedächtnis. Beobachtungen zur gesellschaftlichen Deutungsunsicherheit gegenüber Synthetischer Biologie. In: Dabrock, P. et al. (Hrsg.): Was ist Leben – im Zeitalter seiner technischen Machbarkeit? Beiträge zur Ethik der Synthetischen Biologie. Freiburg/München: 345–367.

Schmidt, J. C. (2008): Unbestimmtheit der Nanotechnologie. Über Kontrolle der (und in der) Nanotechnologie. In: Köchy, K. et al. (Hrsg.): Nanobiotechnologien. Philosophische, anthropologische und ethische Fragen. Freiburg/München:37–54.

Venter, J. C. (2010): Vortrag vor der Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues. Washington 08.07.2010. Online-Transkript unter: <http://bioethics.gov/cms/node/165> [01.08.2012].

WHO (2004) = World Health Organisation: Laboratory biosafety manual. 3. Aufl. Genf.

Williams, B. (1985): Ethics and the Limits of Philosophy. o. O.

Susanne Nessler

Biohacker – Über Laienforscher und die Synthetische Biologie

Hacker, das sind Kriminelle, die in Computer eindringen, Passwörter knacken und Daten oder Konten abräumen – so die gängige Meinung. Doch das Wort „hacken“ meint zunächst nichts Schlechtes. Im Gegenteil: wer hackt, will etwas genau analysieren, auseinandernehmen, von Grund auf verstehen. Hacker sind also neugierige Menschen. Gilt ihr Interesse der Biologie, dann nennen sie sich Biohacker.

Mit Bioterrorismus hat das überhaupt nichts zu tun, sagt die engagierte Biohackerin Lisa Thalheim. Die studierte Informatikerin experimentiert in ihrer Freizeit in einem kleinen selbstgebauten Labor in Berlin. Ihr Interesse gilt besonders forensischen Untersuchungen. Sie möchte zum Beispiel herausfinden, ob es möglich ist, am Tatort hinterlassene DNA-Spuren zu manipulieren. Vor einigen Jahren lauschte die 30jährige dem Vortrag eines amerikanischen Biologen über die Möglichkeiten der Synthetischen Biologie. Fasziniert von den technischen Aspekten des virtuellen Konstruierens von Leben, begann Lisa Thalheim sich in die Fachliteratur einzulesen. Ihr Hauptaugenmerk liegt vor allem auf der Aufklärung und Offenlegung neuer Techniken. Diese Haltung resultiert aus ihrem jahrelangen Engagement im Chaos Computer Club, jener Hackervereinigung, die mittlerweile selbst für das Bundesverfassungsgericht als Gutachter tätig ist. Ob als Hackerin oder Biohackerin, sagt Lisa Thalheim, das Ziel lautet immer: „Wir wollen Systeme verstehen und müssen mehr Informationen nach draußen tragen, damit die Gesellschaft an wichtigen Debatten kompetent teilhaben kann.“

Dieses Motiv lässt sich als ein Leitgedanke unter den europäischen Biohackern ausmachen. Daneben beschäftigen vor allem ethische und Sicherheitsfragen die Szene. Auf dem ersten europäischen Biohacker Kongress im Mai 2011 wurde darüber diskutiert, wie mit Viren, Bakterien und eigenen Körperzellen umzugehen ist, welche Sicherheitsmaßnahmen im Heimlabor notwendig sind. Auch über die geltenden gesetz-

lichen Regelungen wurde gesprochen. In Deutschland benötigt man für ein Gentechniklabor eine Genehmigung, ohne drohen bis zu drei Jahre Gefängnis. Wie viel Selbstkontrolle innerhalb der Biohackerszene ist nötig, um mit einem Experiment nicht versehentlich Schaden anzurichten? Ein Codex ist das Ergebnis, dem sich die Szene freiwillig verpflichtet. Die europäischen Biobastler erhalten über Mailinglisten, Tweets und Wikis Tipps und Tricks zu Experimenten von den Kolleginnen und Kollegen aus den USA, ebenso wie aktuelle Diskussionen über ethische Fragen und Fragen zur Sicherheit.

In den USA sind die rechtlichen Bestimmungen für Heimlabore nicht so streng wie in Deutschland, dort wird auch mehr experimentiert als hierzulande. Warum sollen wir nicht auch mit gefährlichen Viren arbeiten, schreibt da zum Beispiel ein Bastler aus der amerikanischen Szene, wir haben doch auch Schusswaffen zu Hause?

Die Szene in den USA ist um das Zehnfache größer und aktiver als in Europa. Zudem wollen amerikanische Biohacker auch neue Märkte erschließen, erzählt der Gründer des Netzwerkes DIY BIO (Do-It-Yourself-Biology) Mac Cowell aus Boston. So wie die IT-Branche in den 1970ern die Computerspiele-Industrie angestoßen hat, könnten Hobbybastler die Synthetische Biologie zu einer Art Hobbythek für den Privatanwender weiterentwickeln, sagt Cowell. Die Vision: Im Heimlabor baut sich jeder nach Lust und Laune die Organismen, die er für den Alltag benötigt. Zum Beispiel Joghurtkulturen, die den Geschmack des Joghurts im Kühlschrank bestimmen. Die Entscheidung Kirsche, Erdbeere oder Mango-Banane würde damit in Zukunft zu Hause und nicht mehr vor dem Kühlregal im Supermarkt getroffen. Erst kürzlich hat eine amerikanische Biohackerin einen Joghurt gebaut, der im Dunkeln leuchtet.

In den Heimlaboren stehen meist gebrauchte Geräte aus Universitäten und Forschungseinrichtungen. Einiges ist Marke Eigenbau, ausreichend um mit ein wenig Geschick DNA zu isolieren, zu vermehren und ein bisschen zu verändern. Noch sind die Experimente der deutschen Hobbybiologen bescheiden. Unterschätzen sollte man die Biohacker allerdings nicht. Sie liefern viel Anregendes zur Debatte über die Synthetische Biologie und sie haben Ideen, für die in den Profilabors weder Zeit noch Platz sind.

Hille Haker

8. Eine Verhältnisbestimmung von Theologie und Synthetischer Biologie aus ethischer Sicht

„Die christliche Sicht der Schöpfung beinhaltet ein positives Urteil hinsichtlich der Zulässigkeit menschlicher Eingriffe in die Natur einschließlich der anderen Lebewesen und gleichzeitig einen nachdrücklichen Appell an das Verantwortungsgefühl.“ (Päpstlicher Rat für Gerechtigkeit und Frieden, 2006:371)¹

Dieser Satz Johannes Paul II., der in das Kompendium der Soziallehre der Katholischen Kirche aufgenommen wurde, bildet eine Art Präambel für die prinzipiell positive Bewertung der modernen Wissenschaft und Technologie von Seiten der Katholischen Kirche. Wissenschaft gilt der Katholischen Theologie als *eine* Quelle der Wahrheit, die mit ihren eigenen Methoden dem umfassenden Ziel der Beförderung der menschlichen Erfüllung dient. Eingriffe in die Natur werden zuweilen auch als „Hilfe bei der Selbstentfaltung“ der Natur bezeichnet, was die positive Bewertung einer verantwortlichen, gleichwohl aber nutzenorientierten Behandlung der Natur und Umwelt unterstreicht. Theologie und Naturwissenschaften haben, insofern beide auf ihre Weise die „Wahrheit“ suchen, das gleiche Ziel, nämlich dem „Wohl“ des Menschen zu dienen. Aber auch wenn die Autonomie der Einzelwissenschaften in ihrer Weise der Wahrheitsuche anerkannt wird, muss sie doch in ihren Zielen und Methoden nach ethischen Kriterien beurteilt werden.

Diese grundsätzliche Anerkennung der „Autonomie“ der Wissenschaft bei gleichzeitiger Betonung einer allgemeinen ethischen Verantwortung, der grundsätzlich alle menschlichen Praxen zu unterstellen sind, bildet einen wichtigen Ausgangspunkt für die Verhältnisbestimmung von Theologie und Wissenschaft, die ich im folgenden ersten Teil mit Blick auf die Lebenswissenschaften und Biotechnologie etwas genauer betrachten will. Im zweiten Teil werde

1 Johannes Paul II., Ansprache an Teilnehmende einer Studienwoche der Päpstlichen Akademie der Wissenschaften, 23. Oktober 1982.

ich die kirchliche Position zur Biotechnologie in die theologisch-ethische Reflexion einordnen und zum Schluss kurz zeigen, inwiefern die Theologische Ethik den kirchlichen Stellungnahmen als wissenschaftliche Reflexion korrelativ und zum Teil auch korrektiv zur Seite zu stellen ist, um die Forschungsfelder der Synthetischen Biologie zukünftig in Einzelstudien zu bearbeiten. Eine Einschränkung sei meinen Überlegungen vorangestellt: Ich werde mich vor allem mit Ausführungen der Katholischen Theologie beziehungsweise der Katholisch-Theologischen Ethik beschäftigen, und ich werde mich nur auf theologische *Grundsätze* der ethischen Beurteilung beziehen können, von denen ich aber denke, dass sie zumindest in der christlichen Theologie unstrittig sind. Es liegt auf der Hand, dass allein Einzeluntersuchungen der Komplexität der Anwendungsbereiche der Synthetischen Biologie gerecht werden können. Die ethische Reflexion kann aber – so meine These für diesen Beitrag – in der (katholischen) Theologischen Ethik einen wichtigen Gesprächspartner finden, sofern sie das vielzitierte Klischee der theologischen Abwehrhaltung gegenüber wissenschaftlichen Erkenntnissen hinter sich lässt (vgl. zu ethischen Aspekten in anderer Ausrichtung Kapitel 7 in diesem Band).

8.1 Theologie und Wissenschaft

Um die theologische Perspektive, die der spezifisch theologisch-*ethischen* Beurteilung vorgeschaltet ist, einordnen zu können, will ich zunächst auf einige Argumentationsfiguren eingehen, die der Theologie im öffentlichen Diskurs zugeschrieben werden, um diese dann mit der aktuellen Verhältnisbestimmung von Theologie und Wissenschaft zu konfrontieren. Sie dient als allgemeiner Horizont für die ethische Beurteilung der Synthetischen Biologie.

Im öffentlichen Diskurs werden der Theologie häufig zwei Interpretationsfiguren zugeschrieben, die eine negative Beurteilung „der“ Synthetischen Biologie nahe zu legen scheinen: Aufgrund der von der Kirche angeblich behaupteten „Heiligkeit des Lebens“ seien Eingriffe in die Natur, vor allem natürlich in die menschliche Natur, grundsätzlich problematisch. Menschen sollen, so die Annahme, die „Schöpfung bewahren“ und nicht verändern; Eingriffe in die Natur, wie sie in den Lebenswissenschaften zwangsläufig erfolgen, laufen nach dieser Argumentation der Haltung der „Heiligkeit des Lebens“ zuwider.² Damit allerdings, so der Vorwurf an diese Position, beraubt sich die Theologie von vornherein der Möglichkeit, einen „vernünftigen“

2 Vgl. zu einer ideologisch motivierten Analyse des Theorems der Heiligkeit des Lebens z. B. Singer, 1994.

Dialog mit den Biowissenschaften zu führen, da diese ihren Gegenstand, das „Leben“, als „Bio-materie“ ansehen müssen, um sie für die Zwecke der Forschung und Entwicklung bearbeiten zu können. Das zweite Argument, das der Theologie im Kontext der modernen Wissenschaften häufig zugeschrieben wird, ähnelt dem ersten, legt aber den Akzent nicht auf die Werthaftigkeit der Natur, sondern auf die Einstellung des Menschen seinem eigenen Handeln gegenüber: Im Streben nach der Veränderung der Natur komme gerade nicht die Gestaltungsfreiheit, sondern vielmehr die menschliche „Hybris“ zum Ausdruck, die grundsätzlich von der Theologie kritisiert werde. Der theologisch unzulässige Herrschaftsanspruch des Menschen über die Natur wird häufig mit der biblischen Geschichte vom Turmbau zu Babel (Gen 11, 1–9) erläutert: Der Turm, den die Menschen in dieser Geschichte bauen wollen, soll in den Himmel reichen; Gott verteidigt jedoch seine Macht eifersüchtig und vereitelt das Herrschaftsgedanken der Menschen, indem er den Turm zerstört und so die Handlungsmacht der Menschen „auf die Erde“ beschränkt: Der „Turm“ wird in der Rezeptionsgeschichte zu einer Metapher der destruktiven Selbstüberschätzung und dem zum Scheitern verurteilten Versuch, das durch Gott begrenzte menschliche Handeln ins Unendliche auszudehnen. Im Kontext der Lebenswissenschaften wird diese theologische Figur nun auf die Zielsetzung etwa der Genforschung oder auch der Synthetischen Biologie bezogen: Die „Bausteine“ des Lebens selbst kreieren zu wollen, erscheint dann als eine Selbstüberschätzung, die nur destruktive Folgen haben kann, weil sie die Grenzen des menschlichen Wissens und Handelns außer Kraft setzt.³ Beide Interpretationsfiguren – die Unantastbarkeit des Lebens aufgrund ihrer intrinsischen Werthaftigkeit und die Hybris des Menschen, der die „Welt“ gerade nicht beherrschen kann – werden „der“ (christlichen?) Theologie meistens zugeschrieben, ohne einen Blick auf die komplexe Geschichte der Verhältnisbestimmung von Theologie und Wissenschaft zu werfen.⁴ Interessanterweise sind es selten Theologen

3 Weil es mir nur um die Rezeption der Metapher des „Turmbaus zu Babel“ als Ausdruck menschlicher Hybris geht, ignoriere ich an dieser Stelle die exegetische Interpretation des Textes – theologisch wäre eine genaue Analyse jedoch unerlässlich.

4 Bezeichnenderweise stammen beide Argumentationsfiguren aus der Hebräischen Bibel, aus christlicher Sicht dem „Ersten Testament“. Dies müsste entsprechend die Frage nach dem jüdischen Umgang mit Wissenschaft und Technologie genauso aufwerfen. Für diesen wird aber oft auf eine andere Geschichte rekurriert, die einen ähnlich prominenten Status im Diskurs von Theologie und Wissenschaft hat: Dies ist die Legende vom Golem, die in einer Fassung aus dem 19. Jahrhundert ebenfalls zu einer Geschichte der „Hybris“ wird, allerdings mit der Pointe, dass das „künstlich geschaffene Lebewesen“ in seiner Autonomie „zurückschlägt“ und vor allem destruktive, unkontrollierbare Kräfte gegenüber seinem „Schöpfer“ Rabbi Löw entfaltet. Die literarische Figur des Golems ist im Kontext der allgemeinen kulturellen Reflexion auf die modernen (Natur-) Wissenschaften und die Medizin seit dem 19. Jahrhundert zu sehen, die sich im Laufe der Zeit von den theologischen

oder Theologinnen, dafür aber häufiger Wissenschaftler oder Wissenschaftlerinnen, die eine potenzielle theologische oder gesellschaftliche Kritik einer bestimmten Forschungsrichtung mit dem Argument einer religiös motivierten „Fundamentalopposition“ faktisch neutralisieren: Wer im Grundsatz die theologische Interpretationsfigur der „Heiligkeit des Lebens“ oder der „menschlichen Hybris“ als leitende Metapher für das Verhältnis von Wissenschaft und Natur/Umwelt/Leben vertritt, so der Vorwurf, kann als Dialogpartner einer modernen Wissenschaft eigentlich nicht weiter ernst genommen werden.

Dieser negativen Interpretation in Bezug auf Eingriffe in die Natur steht eine ebenfalls biblisch fundierte positive Interpretation der Wissenschaft gegenüber, die vornehmlich von den meisten christlichen Theologen und Theologinnen vertreten wird: Zum einen wird dabei die biblische Interpretationsfigur der *Gottesebenbildlichkeit* auf die Freiheit – und Befähigung – zur Kreativität bezogen: Der Mensch, so heißt es, sei Gottes Ko-Schöpfer in einer Schöpfung, die sich kontinuierlich weiterentwickle.⁵ Dafür stehe nicht nur die Schöpfungsgeschichte selbst, in der der Mensch zur Nutzung der Erde geradezu aufgefordert werde, sondern zum Beispiel auch das Gleichnis von den Talenten (Mt 25,14–30): Darin gibt ein Mann seinen drei Dienern verschiedene „Talente“ (einen je unterschiedlichen Geldbetrag) für die Zeit seiner Abwesenheit; nach seiner Rückkehr werden diejenigen, die eigenständig etwas aus diesen Talenten gemacht haben, explizit gelobt, während dem Diener, der sein „Talent“ vergraben hat, dieses weggenommen wird, weil er mit dem ihm anvertrauten „Talent“ nicht eigenständig und kreativ umgegangen ist. Aus diesem Gleichnis, darauf weist etwa Patrick Heavey hin, könnte sogar eine Pflicht zur Forschungs- und Technologieentwicklung abgeleitet werden.⁶ Insgesamt, so die verbreitete Rezeption, schließt eine positive Interpretation der menschlichen Freiheit und des theo-

Interpretationen entfernt. Niemand würde allerdings auf den Gedanken kommen, etwa „science fiction“ als unmittelbaren oder gar maßgeblichen Ausdruck der kulturellen Deutungen moderner Wissenschaften zu betrachten. Es ist verwunderlich, wie religiöse Metaphern – im Kontext der Synthetischen Biologie ist dies vor allem die Metapher des Gott spielenden Wissenschaftlers – demgegenüber als „pars pro toto“ für theologische Positionen angeführt werden, anstatt ihren metaphorisch-narrativen Gehalt kritisch zu analysieren. Vgl. auch Kapitel 9 in diesem Band.

5 Vgl. ausführlich dazu für den Kontext der Synthetischen Biologie: Dabrock, 2009:47–54.

6 Auch hier geht es mir nur um diese Ebene der Rezeption und nicht um die „eigentliche“ theologische Auseinandersetzung, die diese Geschichte als Zeichen für die Gemeinden bis zur Rückkehr des Messias deutet (vgl. Heavey, 2011). Dieser Artikel fasst kirchliche Stellungnahmen zusammen, lässt allerdings den Bezug zu theologisch-ethischen Forschungen gänzlich vermissen. Er ist dennoch ein guter Ausgangspunkt für meine Untersuchung, weil er einen deskriptiv insgesamt zutreffenden „Blick von außen“ auf die kirchlichen Stellungnahmen widerspiegelt.

logisch-anthropologischen „Auftrags“ zum kreativen Handeln die dem Menschen eigene moralische *Verantwortung* für die Achtung vor dem Menschen genauso wie den Respekt gegenüber anderen Lebewesen ein. Die positive theologische Interpretation der Handlungsermächtigung des Menschen enthält, so sei hier nur verkürzt gesagt, zugleich eine ethische Wertung des Umgangs mit sich selbst, mit anderen Menschen, Lebewesen und der unbelebten Natur. Sie kommt theologisch im Begriff der „Verantwortung für die Schöpfung“ zum Ausdruck. Der Schöpfungsbegriff steht dabei als Metapher für die religiöse Überzeugung einer „relationalen Freiheit“: der Freiheit *in* „Abkünftigkeit“ des Menschen und seiner Lebenswelt von Gott – was keine wissenschaftliche These, sondern eine religiöse Äußerung, als Ausdruck der existenziellen Verortung des Menschen ist. Verantwortung erwächst aber nicht nur aus dieser Abkünftigkeit – die im Turmbau zu Babel vergessen scheint – sondern eben gerade auch aus der Handlungsermächtigung – wie sie das Gleichnis von den Talenten beschreibt. Die ethische Pointe dieser doppelten theologischen Argumentationsfigur, die als „verantwortliche Freiheit im Bewusstsein der eigenen Geschöpflichkeit“ verstanden werden kann, besteht in der Überzeugung, dass aus der Abkünftigkeit die *Fähigkeit*, zugleich aber auch die *Zumutung* der Verantwortung erwächst. Verantwortung gegenüber der „Schöpfung“ bedeutet in theologischer Hinsicht dann, dass der Mensch sowohl in der Lage als auch herausgefordert ist, zum „Wohl“ des Menschen zu handeln, ohne dabei andere Lebewesen beziehungsweise die „Natur“ zu missachten.

Nun ist es durchaus nicht unproblematisch, sich auf biblische Textstellen mit der Absicht der Rechtfertigung eines ethischen Standpunkts zu beziehen – zu viele hermeneutische Zwischenschritte werden dabei übergangen, die gerade aus theologischer (exegetischer wie auch ethischer) Sicht nicht übergangen werden dürfen. Dennoch ist die Wirkmacht gerade der genannten biblischen Quellen für den Diskurs von Theologie und Wissenschaft nicht leicht zu unterschätzen. Es gehört jedoch zur wissenschaftlichen Redlichkeit, theologische Argumentationen so darzustellen, dass sie einerseits deskriptiv richtig oder zumindest angemessen sind, andererseits aber müssen sie allgemein verständlich und nachvollziehbar sein. Dies bedeutet nicht, dass theologische Interpretationen von jedem geteilt werden müssen; aber wie etwa der Schöpfungsbegriff deutlich macht, bezieht sich die religiöse oder theologische Sprache mit ihm auf eine theologische Anthropologie, die die „Abkünftigkeit“ der menschlichen Existenz meint und die Moralität des Menschen nicht allein durch seine Freiheit begründet, sondern zugleich auch durch seine „Geschöpflichkeit“. Diese zeigt den Menschen einerseits in seiner Relation zum Schöpfergott, andererseits in Relation zu anderen „Geschöpfen“, und beide Relationen zu-

sammen schließen einen reduktionistischen, das heißt rein instrumentellen Umgang mit der „Natur“ beziehungsweise anderen Lebewesen aus.

Die Begründung der Moralität des Menschen ist selbstverständlich ein Thema der wissenschaftlich-philosophischen Reflexion. Aber jede Ethik kann letztlich nur Plausibilitätsgründe beziehungsweise Konsistenzgründe anführen, warum der Mensch überhaupt moralisch sein soll; die Moralphilosophie, der die Theologische Ethik hierin durchaus folgt, kann bestenfalls eine *reflexive* Begründung des Zusammenhangs von Freiheit und Moralität liefern, während die Kultur- und Sozialwissenschaften deskriptiv die An- oder Abwesenheit moralischer Perspektiven in verschiedenen Kulturen oder Gesellschaften untersuchen können. Die Theologische Ethik schließt sich diesen normativen und deskriptiven Untersuchungen zur Moral an, offeriert aber ergänzend eine spezifische, sinnbezogene Interpretation der theologisch-anthropologischen *Grundlage* der Moral, die weder für die Begründung noch für die Beschreibung relevant ist, sondern im Zwischenraum von Normativität und Deskriptivität angesiedelt ist. Dies ist der Ort und Status der (theologischen) Interpretation. Von dieser kann und soll aber nicht *unmittelbar* auf die Begründung oder Rechtfertigung einzelner Inhalte der normativen Ansprüche geschlossen werden; diese bedürfen einer eigenständigen Reflexion, die im Fall der Katholischen Kirche in der theologischen Ethik (Moraltheologie und Sozialethik) ihren genuinen Ort hat. Das Missverständnis der Rezeption theologischer Interpretationen – von dem auch Theologen und Theologinnen nicht frei sind – besteht darin, den hermeneutischen Status der theologischen Interpretationen nicht zu berücksichtigen und stattdessen von der Interpretation auf die Normativität zu schließen. Umgekehrt wird jedoch die theologische Hermeneutik zu einem Stachel auch für die wissenschaftlichen „Deskriptionen“ zur menschlichen beziehungsweise außermenschlichen Natur, insofern die Theologie diese dazu zwingt, ihre eigenen Interpretationen offen zu legen und so für die normative Reflexion zugänglich zu machen. Auf dieses Problem werde ich in Bezug auf die Synthetische Biologie gleich zurückkommen.⁷

7 Für eine ethische Begründung der christlichen Sozialethik vgl. einschlägig Hübenenthal, 2006. Für eine Interpretation des Verantwortungsbegriffs im Kontext der theologischen Sozialethik vgl. ebf. Haker, 2002, v. a. Kap 1.

8.2 Die theologischen Grundsätze der christlichen Sozialethik – die Position der Kirche zur Biotechnologie

Der Physiker und Bioinformatiker Patrick Heavey hat in seinem kürzlich erschienenen Artikel kirchliche Stellungnahmen der Vergangenheit mit Blick auf eine mögliche – bisher jedoch nicht vorliegende – Antwort der katholischen Kirche zu den neueren Entwicklungen der Synthetischen Biologie analysiert (vgl. Heavey, 2011). Er rechnet mit einer grundsätzlich positiven Beurteilung dieser Forschungsrichtung durch die Katholische Kirche, da sie auf einer Linie mit anderen biotechnologischen Forschungen (vor allem der genetischen Veränderung von Organismen und der somatischen Gentherapie) liegen. Allerdings hänge diese Beurteilung davon ab, ob die Synthetische Biologie in der Lage beziehungsweise willens sei, einen verantwortlichen Umgang mit der „Natur“ zu finden und dabei die normativen Prinzipien der Theologischen Ethik berücksichtigt. Heaveys Schluss mag die positive Haltung der Kirche gegenüber den Wissenschaften überbetonen – überraschen kann das Ergebnis aber nur diejenigen, die eine Art Fundamentabwehr vor allem der Lebenswissenschaften von Seiten der Theologie annehmen.

„Die Natur ist keine heilige oder göttliche Realität, die sich dem Wirken des Menschen entzieht. Sie ist vielmehr ein Geschenk, das der Schöpfer der menschlichen Gemeinschaft gemacht und der Intelligenz und moralischen Verantwortung des Menschen anvertraut hat. Deshalb tut dieser nichts Unzulässiges, wenn er mit Rücksicht auf die Ordnung, die Schönheit und den Nutzen der einzelnen Lebewesen und ihrer Rolle innerhalb des Ökosystems in einige ihrer Merkmale und Eigenschaften modifizierend eingreift. Das Eingreifen des Menschen ist beklagenswert, wenn es den Lebewesen oder der natürlichen Umwelt Schaden zufügt, doch es ist lobenswert, wenn es zu einer Verbesserung führt. Das ethische Problem erschöpft sich jedoch nicht in der Frage, ob es zulässig ist, biologische oder biogenetische Techniken einzusetzen: Wie bei jedem menschlichen Verhalten müssen ihr tatsächlicher Nutzen sowie ihre möglichen Folgen – und Risiken – gegeneinander abgewogen werden. Wo es um weitreichende und einschneidende wissenschaftlich-technische Eingriffe an lebenden Organismen geht und langfristig die Möglichkeit schwerwiegender Schädigungen besteht, darf man nicht leichtsinnig und verantwortungslos handeln.“ (Päpstlicher Rat für Gerechtigkeit und Frieden, 2006:371)

Die Katholische Kirche, so macht der bereits zu Beginn zitierte Artikel aus dem päpstlichen Kompendium der Soziallehre deutlich, schließt das Prinzip der „Heiligkeit des Lebens“, zumindest jenseits des menschlichen Lebens, explizit aus: Die Natur ist *nicht* heilig, aber sie ist auch nicht einfach nur Materie; weder entspricht ein Biozentrismus noch ein Ökozentrismus der kirchlichen Position – ein reduktionistischer Anthropozentrismus ist jedoch ebenfalls ausgeschlossen, wenn die theologische Einsicht in die Verantwortung für und gegenüber der Schöpfung ernst genommen werden soll, als deren Teil sich der Mensch verstehen soll. Das Kompendium vermeidet es an dieser Stelle, die naturteleologische Sicht, die die Katholische Kirche sehr wohl auch vertritt, anzuführen – damit ist allerdings der Weg zur Klärung verstellt, welcher moralische Status der „Natur“ in der ethischen Reflexion zukommt. Dies ist eine Leerstelle, die durch die wissenschaftliche Reflexion in der theologischen Ethik gefüllt werden muss – aber diese Reflexion mündet in die allgemeine ethische Debatte um die Reichweite von Rechten. Gemeint ist im Kontext der Natur- und Wissenschaftsethik, ob die Rechte, die dem Menschen als leiblichem wie als Freiheitswesen zukommen, auf Tiere ausgedehnt werden müssen, sodass Tierrechte als Anspruch auf die Sorge für das den jeweiligen Tierarten entsprechende Wohlergehen begründet werden können (zum Beispiel Vermeidung von Leiden oder artgerechte Haltung). Noch weitergehende Argumentationen begründen die Pflicht des Menschen gegenüber anderen Lebewesen mit einer allgemeinen „Integrität“ von Lebewesen, die dadurch einen besonderen Schutzstatus erhält.⁸ Das Kompendium betont demgegenüber im zitierten Artikel die Haltung der Verantwortung des Menschen gegenüber der Natur: Natur sei als „Geschenk“ zu interpretieren, das vom Menschen verlangt, sie mit Rücksicht auf ihre Ordnung, ihre Schönheit, den Nutzen und ihre Rolle im Ökosystem zu behandeln. Was dies in Bezug auf die Synthetische Biologie bedeutet, will ich kurz zu klären versuchen, indem ich auf kirchliche Stellungnahmen zur biotechnologischen Forschung recurriere.

8 Einige Argumentationen gehen von einem „intrinsischen Wert“ der natürlichen Lebewesen aus – dieser Argumentation folgt die Kirche jedoch explizit nicht. Was diese Position allerdings im Hinblick auf die Diskussion um sogenanntes „künstliches Leben“ bedeutet, ist nicht von vorneherein abzusehen – und bedarf der gründlichen ethischen Reflexion. Zur Analyse des Arguments der „Natürlichkeit“ und „Künstlichkeit“ vgl. in einem anderen Zusammenhang Pawlenka, 2010.

In der Tradition der Katholischen Soziallehre bildet neben dem Fundamentalprinzip der Menschenwürde das *Gemeinwohl* das Sozialprinzip der Moral. Als Grundlage der ethischen Beurteilung bringt es die soziale und gemeinschaftliche Dimension des moralisch Guten zum Ausdruck; zunächst einmal ist es anthropozentrisch gedacht, insofern es sich *als* Sozialprinzip aus der Achtung und Förderung der Person und ihrer Rechte ergibt (Päpstlicher Rat für Gerechtigkeit und Frieden, 2006: Art. 134). Zusammen mit dem Theorem der „geschenkten Natur“, für die der Mensch Verantwortung trägt, bedeutet das Prinzip des Gemeinwohls im Kontext der Lebenswissenschaften und Biotechnologie formal, dass Eingriffe in die Natur dem Menschen, den Lebewesen und der natürlichen Umwelt zum Wohl reichen müssen. Es reicht also nicht, vom Prinzip der „Nichtschädigung“ auszugehen, sondern für die Rechtfertigung wissenschaftlicher Forschung ist ein positiver Nutzen anzugeben, der sich einerseits an den Rechten des Menschen auf Freiheit und Förderung seines Wohlergehens orientiert, andererseits aber dem Gemeinwohl dienen muss.⁹ Wissenschaften und Technologien gelten nach den Prinzipien der kirchlichen Soziallehre entsprechend als verantwortliche Praxen, wenn sie grundsätzlich die *Würde* des Menschen achten, wenn sie *gerecht* und *solidarisch* sind, *subsidiär* organisiert sind und insgesamt dem *Gemeinwohl* dienen.

Die Kirche bleibt bei diesen Grundsätzen der Beurteilung selbstverständlich nicht stehen. Sie hat sich in den letzten Jahrzehnten zu einer ganzen Reihe von Einzelfragen geäußert, und die kirchlichen Stellungnahmen werden von der wissenschaftlichen, theologisch-ethischen Forschung komplementiert.¹⁰ In Bezug auf die Nutzung der *Biomedizin* hat die Katholische Kirche in ihren offiziellen Stellungnahmen die grundsätzliche Unterstützung der diagnostischen und therapeutischen Anwendungen betont – so etwa im Bereich der potenziellen therapeutischen Nutzung der Pränataldiagnostik oder somatischen Gentherapie, während sie Forschungen, die der von der Kirche vertretenen Würde des Menschen widersprechen, ablehnt: Dazu gehören

9 Es versteht sich von selbst, dass die allgemeinen Prinzipien der Soziallehre in der Sozialethik analysiert, begründet und konkretisiert werden müssen. Für eine philosophische Begründung der Moral, die mit den Prinzipien der Katholischen Soziallehre in vielen Punkten kompatibel ist und ihr eine rationale Fundierung gibt, vgl. Gewirth, 1978 sowie Gewirth, 1996.

10 Vgl. zur Ethik in der Biotechnologie einschlägig Mieth, 2002.

etwa die sogenannte „verbrauchende“ Embryonenforschung genauso wie nicht-therapeutische Interventionen, zum Beispiel die selektive Präimplantationsdiagnostik oder das Enhancement.¹¹

Im Unterschied zur ethischen Beurteilung der biomedizinischen Forschung und Anwendung kann sich die Beurteilung der *Biotechnologie* nicht an erster Stelle auf das Würde-Argument stützen – dies kommt allenfalls indirekt, etwa in der Forderung nach menschenwürdiger Arbeit im Bereich der Landwirtschaft oder in Bezug auf gesundheitsgefährdende Lebensmittel, Textilien oder Umweltprodukte zum Tragen. Dadurch kommt die zweite „Säule“ der ethischen Prinzipien – das Sozialprinzip des Gemeinwohls – unterstützt durch Gerechtigkeit, Solidarität und Subsidiarität, stärker zum Tragen. Auf die großen (und hier nur grob angedeuteten) Anwendungsbereiche der Synthetischen Biologie im Bereich der Biotechnologien bezogen, ergibt sich eine erste Orientierung für die Richtung der kirchlich-theologischen Beurteilung: Grundsätzlich gilt für die Biotechnologie wie auch schon für die Biomedizin: (a) biotechnologische Forschungen in der Landwirtschaft, (b) biotechnologische Umweltforschung und – wie heute hinzugefügt werden muss – (c) biotechnologische Energieforschung werden von Seiten der Kirche beziehungsweise Theologie grundsätzlich begrüßt. Freilich wird die Bewertung, ob eine Forschungsrichtung und ihre Anwendung dem Gemeinwohl dient, mit der Risikoforschung und Technikfolgenabschätzung gekoppelt: Kriterien für die Risikobewertung und Folgenabschätzung sind dabei die Eintrittswahrscheinlichkeit eines „Schadensfalls“ sowie das potenzielle Ausmaß des Schadens, aber auch die sogenannten mittleren Prinzipien, zum Beispiel das Prinzip der Vorsicht („precautionary principle“, mit der Umkehrung der Beweislast bei einer anzunehmenden Gefährdung für Menschen, Tiere und Natur im Worst-Case-Szenario) oder das Prinzip der Proportionalität (Ausmaß des potenziellen Schadens im Verhältnis zum Nutzen) dienen als wichtige Maßstäbe für die Risikobewertung.

Ein weiterer Bereich, der in ethischen Analysen zur Synthetischen Biologie eine zunehmend wichtige Rolle spielt, ist die (d) militärische Forschung. Da die Kirche die Entwicklung von Biowaffen ablehnt, lehnt sie auch die militärische Forschung der Biotechnologie ab, insofern diese die Rüstungsspirale weiter dreht. Diese Position lässt sich aller Voraussicht nach auch für die Synthetische Biologie rechtfertigen. Und nicht zuletzt versteht sich insbesondere die Katho-

11 Dabei soll freilich der Disput zwischen Theologie und Kirche zu Fragen der Sexualmoral nicht verschwiegen werden, der u. a. auch biomedizinische Praktiken betrifft. Vgl. Haker, 2002; für den deutschen Sprachraum Hilpert/Mieth, 2006.

liche Soziallehre als Anwältin für einen verantwortlichen Umgang mit der (e) kommerziellen Nutzung der Biotechnologie. Dies betrifft vor allem die Patentierung: Auch wenn das Eigentum in der Tradition der Soziallehre ein hoher Wert ist, lehnt die Kirche Eigentumsrechte und Patente zumindest auf *Lebewesen* ab.¹²

8.3 Perspektiven für die zukünftige theologisch-ethische Forschung zur Synthetischen Biologie

Die Synthetische Biologie ermöglicht es, die Konstitution von Lebewesen auf der DNA-Ebene so zu verändern, dass neue Lebewesen oder aber „Wesen“ entstehen, die eine neue Kategorie zwischen Lebewesen und Artefakten darstellen. Der Zweck der Synthetischen Biologie ist instrumentell, aber da sich das wissenschaftliche Handeln auf Lebendiges bezieht, ist damit zugleich die Frage nach dem wissenschaftstheoretischen und moralischen Status von dieser neuen Kategorie gestellt. Damit ist natürlich nicht gemeint, dass etwa synthetisch erzeugte Bakterien oder Viren einen „moralischen“ oder gar theologischen Eigenwert haben, sondern vielmehr stellt sich die Frage umgekehrt: Reicht es aus, die mittels der Synthetischen Biologie entwickelten „Erzeugnisse“ einzig als Produkte zu betrachten, deren instrumenteller Charakter unter anderem darin besteht, dass ihre Merkmale vom Erzeuger kontrolliert werden (können)? Die theologische Verhältnisbestimmung von Theologie und Wissenschaft, so habe ich gezeigt, zieht die Grenze des menschlichen Handelns nun gerade nicht an der Stelle der Erzeugung von Leben, sondern vielmehr zwingt sie den Menschen dazu, sein Handeln vor dem Hintergrund der umfassenden Verantwortung für sich selbst, für andere (Menschen und Tiere) und für die Natur insgesamt, und zwar im Hinblick auf die Lebensdienlichkeit seines Handelns, zu rechtfertigen – dies ist der Sinn der theologischen Interpretation der Verantwortung des Menschen für die Bewahrung der Schöpfung. Das heißt, dass in den Bereichen der Medizin, Landwirtschaft, Umwelt, Energie oder Friedenssicherung die Synthetische Biologie einen selbstverständlichen Ort hat – sofern sie als verantwortliche Forschung entworfen und realisiert werden kann. Die

12 Ob und inwiefern dies die Synthetische Biologie betrifft, muss ich an dieser Stelle offenlassen: Da der Begriff der Synthetischen Biologie keineswegs trennscharf etwa gegenüber der genetischen Veränderung von (Mikro-)Organismen ist, gehört die Eingriffstiefe der Synthetischen Biologie, die zum Beispiel auch die Erzeugung von Lebewesen betrifft, zum Zukunftsprogramm.

Beweislast für den Ausweis der „Lebensdienlichkeit“¹³ liegt, wie immer in der Forschung, bei der Forschung selbst, und zwar vor dem Hintergrund alternativer Wege zur Erreichung der jeweiligen Ziele: Innovation ist kein Wert an sich, sondern sie wird erst zu einem Wert durch größere Effizienz oder die Vermeidung von Nachteilen anderer Wege; Forschungsrichtungen sind per se komparativ angelegt. Der Ethik kommt – im Unterschied zur gesellschaftlichen Willensbildung, aber auch im Unterschied zur wissenschaftsinternen, politischen und rechtlichen Kontrolle – die Aufgabe zu, die Verantwortbarkeit der Synthetischen Biologie zu überprüfen. Insofern ist die Ethik per se kritisch.

Der (wissenschaftlichen) *theologischen* Ethik kommen vor dem Hintergrund der allgemeinen theologischen Verhältnisbestimmung von Wissenschaft und Theologie sowie vor dem Hintergrund der kirchlich-theologischen Stellungnahmen zwei Aufgaben zu: Zum einen muss sie auf die Grundlagen der Ethik und die Grundlagen der normativen Urteilskriterien im Kontext der Wissenschaften reflektieren. Sie wird dies einerseits als normative philosophische Ethik tun, die in gleicher Weise wie andere philosophische Theorien die Begründung normativer Urteile zum Gegenstand hat; andererseits wird sie dies als interdisziplinäre Wissenschaftsethik tun, die in Kooperation mit den Naturwissenschaften, der Medizin, den Informationswissenschaften, aber auch mit den Sozial- und Kulturwissenschaften um die bestmöglichen Antworten ringt. Drittens wird sie es aber als hermeneutische Ethik tun, die sich ihrer eigenen Geschichte, ihren Sinnvorstellungen und den religiösen Fundamenten stets neu zu vergewissern hat. Um es auf eine Formel zu bringen: Über das „Rechte“, das heißt das normativ von einem moralischen Handelnden beziehungsweise einer Gesellschaft zu Fordernde, kann nur philosophisch gestritten werden; über die angemessenen Beschreibungen einer Handlungssituation oder Praxis kann nur mit Hilfe der Wissenschaften selbst sowie mit Hilfe der Sozial- und Kulturwissenschaften gestritten werden; über das „Gute“ jedoch, das die jeweils existenzielle Sinnperspektive des Lebens und gesellschaftliche Vorstellungen eines „guten Lebens“ betrifft, die in unterschiedlichen individuellen, kulturellen und geschichtlichen Erfahrungen gründen, darf nicht nur philosophisch gestritten werden: Hier spielen andere Reflexionsformen wie die Interpretation von Er-

13 Häufig reduktionistisch als „Nutzen“ verstanden, was aber gerade den Adressaten des Nutzens offen lässt, während „Lebensdienlichkeit“ zumindest implizit auf die Gewährleistung der sozialen oder auch der ökologischen und ökonomischen Bedingungen des Lebens ausgerichtet ist.

fahrungen in Erzählungen mit ihrer „Erschließungs- und Motivationsfunktion“ eine große Rolle. Die hermeneutische Ethik wird kritisch auf die notwendig pluralen Entwürfe reflektieren und wo immer möglich für ein Nebeneinander unterschiedlicher Praxismodelle plädieren: So kann es in einer Kultur sinnvoll sein, bestimmte Umwelttechnologien zu entwickeln, weil sie eine große Akzeptanz besitzen und zum Beispiel die ökologischen Bedingungen bestimmte Technologien nahelegen, während andere Kulturen die ihnen entsprechenden Wege gehen. Erst wenn die Technologien den Test des normativen Urteils, also die Prüfung auf ihre Dienlichkeit für das Gemeinwohl und auf ein vertretbares Risiko *nicht* bestehen, ist die Option für ein bestimmtes Technologiemodell unzulässig. Da die Theologische Ethik zudem Fragen der Gerechtigkeit, Solidarität und Subsidiarität als Fragen begreift, die einer Technikethik zur Seite zu stellen sind, kann sie als Theologische Ethik in den Wissenschaften zugleich auch als Sozialethik betrachtet werden. Anders als die Zuschreibungen im Diskurs es nahelegen, ist eine solche theologische Perspektive nicht wissenschaftsabwehrend, sondern wissenschaftskritisch im besten Sinn des Wortes: Sie orientiert sich in ihren Urteilen daran, ob wissenschaftliche Projekte oder Forschungsrichtungen sowohl in ihrem Selbstverständnis, in ihren Methoden, in ihren Zielen und in ihrer gesellschaftlichen Verankerung (durch Forschungsförderung, Forschungsregulierung und die Organisation gesellschaftlicher Partizipation mittels Transparenz) mit den ethischen Kriterien einer allgemeinen, immer aber auf den einzelnen Menschen hin auszubuchstabierenden Lebensdienlichkeit einhergehen.

Aus den Grundsätzen der katholischen Soziallehre: der Verpflichtung auf die Würde des Menschen, auf das Gemeinwohl, die Gerechtigkeit und Solidarität sowie die Subsidiarität kann – wiederum nur in sehr allgemeiner Hinsicht – geschlossen werden, was als *unverantwortliche* Wissenschaft und Forschung anzusehen ist: Unverantwortlich ist eine Wissenschaft, die die Entfremdung des Menschen von der Natur durch eine „szientistisch-technokratische Ideologie“, wie es im Kompendium heißt, befördert. Gemeint ist dabei die Nichtberücksichtigung des ökologischen Gleichgewichts, die Gleichgültigkeit gegenüber dem ästhetischen Wert der Natur und vor allem die Missachtung des allgemeinen gesellschaftlichen Ziels der Lebensdienlichkeit aller gesellschaftlicher Praxen als leitendes Prinzip des menschlichen Handelns (Gemeinwohl als Sozialprinzip). Unverantwortlich ist, konkreter, eine Forschung und Technologieentwicklung, die auf die Ausbeutung zum Beispiel der natürlichen Ressourcen angelegt ist, ohne die Effekte für die gesamte Natur und damit für die Lebensbedingungen der Menschen zu berücksichtigen (dies betrifft zuweilen auch ganze Kulturen, wie die Kirche zum Beispiel im Hinblick auf indi-

gene Völker im Amazonasgebiet betont). Unverantwortlich ist es auch, die Verteilung der Lasten etwa von nichtintendierten Nebeneffekten, aber auch die Lasten durch zu antizipierende Folgen von Unfällen (Umweltschäden, Vernichtung von Ernten, neue Resistenzen etc.) nicht bereits in den Szenarien gerecht zu verteilen. Metaphern von der „zurückschlagenden Natur“ machen deutlich, dass die Kirche hier vor allem die Systemeffekte (Klimawandel, Reduzierung von bewohnbaren Gebieten, Wassermangel als globales Problem etc.) vor Augen hat. Eine „Entfremdung“ im Umgang mit der verantwortlichen Nutzung der Natur, das heißt die Abkehr von der „verantwortlichen Freiheit im Bewusstsein der eigenen Geschöpflichkeit“, konkret vom Ziel der Lebensdienlichkeit der wissenschaftlichen Praxis, ist aber auch dann gegeben, wenn zum Beispiel durch ungerechte Handelsstrukturen der Zugang zu medizinischen Produkten erschwert wird, oder wenn die Entwicklung der Landwirtschaft behindert wird; sie kommt in der Überbetonung eines kommerziellen Interesses zum Ausdruck, das sich etwa in einer exzessiven Patentierungspraxis manifestiert; und sie zeigt sich in der Indifferenz gegenüber einem notwendigen Technologietransfer in Länder, die die technische Entwicklung besonders brauchen. Verantwortliche Wissenschaft bedarf der Regulierung durch politische Institutionen, die international kooperieren müssen, die die Subsidiarität der Institutionen und gesellschaftlichen Akteure ermöglichen, und die die Öffentlichkeit über die wissenschaftliche Forschung informieren müssen. Zudem müssen die politischen Institutionen dafür sorgen, dass die Forschung in den gesellschaftlich dringendsten Bereichen Gesundheit und Nahrung eine angemessene öffentliche Förderung erhält.¹⁴

14 An diesem letzten Punkt wird spätestens deutlich, dass die Beurteilung einer bestimmten Wissenschaft bzw. Technologie immer auch im Kontext des allgemeinen sozialen und politischen Handelns zu sehen ist. Die theologische und kirchliche Option für die Bekämpfung von (globaler) Armut und für soziale Gerechtigkeit bezieht sich dann aber auch auf die Prioritäten der Forschungsförderung und Technologieimplementierung.

Aus diesen wenigen Bemerkungen lässt sich der ethische Rahmen für die Beurteilung der Synthetischen Biologie ablesen: Insofern die verschiedenen Felder der Synthetischen Biologie im Einklang mit den ethischen Prinzipien der Soziallehre respektive den Prinzipien der theologischen Sozialethik stehen, steht die Theologie ihr aufgeschlossen gegenüber. Um dies jedoch zu gewährleisten, bedarf es eines selbstreflexiven und eines gesellschaftlichen beziehungsweise politischen Reflexionsrahmens, der gerade diese Kohärenz transparent zu machen hat. Um einen in diesem Sinne verantwortlichen Umgang zu gewährleisten, sind einerseits die Ziele wissenschaftlicher Projekte daraufhin zu prüfen, ob sie den Lebewesen oder der natürlichen Umwelt unmittelbaren Schaden zufügen (Nichtschadensprinzip) – dies betrifft zum Beispiel die Szenarien der Freisetzung von synthetisch biologisch hergestellten Bakterien im Umweltschutz oder auch die Auswirkung der Herstellung von Biotreibstoffen: Dies zu prüfen ist Aufgabe der Wissenschaften selbst oder der politischen Institutionen, die die ethische und rechtliche Zulässigkeit der Forschung kontrollieren. Um den positiven Nutzen von Einzelforschungen zu eruieren, sind darüber hinaus aber komparative Studien notwendig; und es sind die Prioritäten festzulegen, die sich nicht aus der Wissenschaft selbst ergeben, sondern die der Dringlichkeit gesellschaftlicher Probleme geschuldet sind.

Ich will dies kurz an einem Beispiel erläutern: Der Forschung und Entwicklung effektiver Medikamente insbesondere von Infektionskrankheiten wie Malaria und Tuberkulose kommt sicherlich eine hohe gesellschaftliche Priorität zu. Mit dieser Zielsetzung vor Augen, wird nun folgendermaßen argumentiert: Wenn mittels der Synthetischen Biologie zum Beispiel die synthetische Herstellung von Artemisinin möglich ist, so könnte dies für die Bekämpfung von Malaria einen ähnlich positiven Effekt wie die synthetische Herstellung von Insulin für Diabetes haben, insbesondere in Bezug auf die Verfügbarkeit und die Kosten. Der Forscher Jay D. Keasling steht stellvertretend für die Medikamentenentwicklung durch die Synthetische Biologie; er wurde damit sozusagen die „Galionsfigur“ der Synthetischen Biologie. Die Argumentation für die Akzeptanz dieser Forschungsrichtung lautet zusammengefasst so: Wenn die Verfügbarkeit des Ausgangsstoffes Artemisinin gewährleistet ist, können die Kosten für die Medikation so gering gehalten werden, dass sie auch für Menschen in Ländern mit hoher Malarialate erschwinglich würden. Was aber aus der einen Perspektive wünschenswert erscheint,

ist aus einer umfassenderen gesellschaftlichen Perspektive weitaus weniger eindeutig zu beurteilen. Zwei Kontexte werden nämlich in der Erfolgsgeschichte der Artemisinin-Herstellung ausgeblendet: So ist zum Beispiel in China, Vietnam, Ost- und Südafrika der Anbau der Beifußpflanze, aus der Artemisinin gewonnen wird, im letzten Jahrzehnt so gestiegen, dass der Bedarf auch mit herkömmlicher Landwirtschaft gut gedeckt werden kann – die synthetische Herstellung ist weder medizinisch noch ökonomisch notwendig; vielmehr führt sie unter Umständen zur Verarmung von Landwirten, die sich auf den Anbau von Beifußpflanzen spezialisiert haben (derzeit liegt das Kombinationsmedikament bereits bei einem Preis unter einem USD; je nach Angebot und Nachfrage schwanken die Preise für Artemisinin natürlich auch). Zweitens: Es gibt immer mehr Hinweise auf Artemisinin-resistente Malariaerreger, sodass es in naher Zukunft nicht nur zu einer gesundheitlichen Katastrophe, sondern im Gefolge dessen auch zu einer weiteren Verarmungswelle kommen kann.¹⁵ Das heißt, in der ethischen Analyse ist die Entwicklung eines Anti-Malaria-Medikaments zugleich im Kontext der Landwirtschaftsentwicklung wie auch im Kontext der zunehmenden Artemisinin-Resistenz zu sehen: Ob also in Zukunft die Synthetische Biologie in diesem Bereich für einen „Durchbruch“ sorgt, der Millionen von Menschenleben retten kann, ist nicht aus der alleinigen Bewertung des synthetisch hergestellten Artemisinins zu ersehen. Die allgemeine theologische Interpretation gibt ebenfalls keine Antwort darauf, wie die einzelnen Forschungs- und Technikentwicklungen zu beurteilen sind. Und auch die kirchlich-theologischen Stellungnahmen bilden nur einen allgemeinen Rahmen, der in die kontextuellen, sozialetischen Einzelanalysen überführt werden muss, die sich unter anderem auch mit den Alternativen beschäftigen müssen.¹⁶

Ähnlich gilt dies für die Umwelt- und Energieforschung und genauso für die Landwirtschaft. Hier stellen sich neben Fragen nach den ökologischen Effekten „künstlich hergestellter Organismen“ insbesondere Fragen der Gerechtigkeit (vgl. dazu auch Kapitel 7 in diesem Band). Sie betreffen den Zugang, den Handel und die gleiche Verteilung des Nutzens beziehungsweise auch die Haftungsfragen für den potenziellen Schaden. Der Nutzen der jeweiligen Forschungsfelder ist, so sagt die Kirche, mit einer Risiko- und Technikfolgenabschätzung zu koppeln, die sowohl die Wahrscheinlichkeit als auch das Ausmaß eines potenziellen Schadens beurteilen muss. Dies ist aktuell vor allem im Hinblick auf die Freisetzungproblematik von synthetisch

15 Zur Artemisinin-Resistenz vgl. White, 2010:2051–2052, sowie Dondorp, 2011:1073–1075.

16 Zur sozialetischen Methode der Technikbewertung vgl. Haker, 2008:293–319.

hergestellten Organismen notwendig – und erst hier wird die grundsätzliche Diskussion virulent, ob und inwiefern die Synthetische Biologie im Bereich des Umweltschutzes, der Entwicklung neuer Energien sowie neuer landwirtschaftlicher Produkte sinnvoll eingesetzt werden kann, wenn die Risiken eines „Schadensfalls“ unabschätzbar geworden sind. Nicht zuletzt aber bedarf die militärische Forschung einer ethischen Analyse: Ihr wird von der Theologie zumindest *prima facie* der Nutzen *abgesprochen*, sodass die Synthetische Biologie im Kontext der militärischen Forschung und Entwicklung der besonderen ethischen Aufmerksamkeit bedarf.¹⁷

8.4 Vorläufiges Fazit

Als vorläufiges Fazit kann festgehalten werden, dass es keine kategorischen theologischen Argumente gegen die Synthetische Biologie gibt. Im Gegenteil: Die kirchliche Soziallehre spannt einen ethischen Rahmen für eine verantwortliche Forschung, innerhalb dessen die Forschung und Entwicklung neuer Technologien in der Medizin, Landwirtschaft, Energiegewinnung oder Umweltschutz prinzipiell begrüßt werden kann. Die Theologie ist ein Gesprächspartner nicht deshalb, weil sie *prinzipiell* die Grenzen des menschlichen Handelns bestimmen könnte – das kann und will sie nicht. Die Theologie zwingt die modernen Gesellschaften vielmehr dazu, sich selbst Rechenschaft darüber abzulegen, wie das notwendig instrumentelle Handeln der Natur- und Lebenswissenschaften das Verhältnis zur menschlichen und außermenschlichen Natur bestimmt. Das theologisch-ethische Kriterium für diese Bestimmung ist dabei nicht die Beherrschung oder „Unterwerfung“ der Natur und schon gar nicht die „Reifikation“ oder Verdinglichung der Natur, sondern die Lebensdienlichkeit. Verantwortung ist daher kein leerer Begriff, sondern er ist auf das bezogen, was die Theologie als „Bewahrung der Schöpfung“ auf eine Formel bringt. Freilich darf die Formel von der „verantwortlichen Forschung“ nicht dahingehend (miss-)verstanden werden, dass die *Ziele* der Armutsbekämpfung, der Krankheitsbekämpfung, der Energiegewinnung oder des Umweltschutzes allein schon die Verantwortbarkeit belegen: So definiert das Ziel, mittels Synthetischer Biologie kostengünstige Medikamente für Infektionskrankheiten

17 Kirchliche Stellungnahmen zur militärischen Forschung stammen zumeist aus der Zeit der Forschung an ABC-Waffen zur Zeit des „Kalten Kriegs“. Die gegenwärtige Sicherheitsforschung im Kontext der Synthetischen Biologie bezieht sich einerseits auf mögliche terroristische Anschläge mit in Zukunft unter Umständen relativ leicht herstellbaren synthetischen Viren, andererseits aber auf staatliche militärische Forschung. Diese ist in weiten Teilen intransparent und unterliegt bisher kaum der internationalen Kontrolle.

wie Malaria oder Tuberkulose zu entwickeln und zu vertreiben, noch nicht die Legitimität der Entwicklung von Artemisinin auf dem Wege der Synthetischen Biologie. Erst eine umfassende wissenschafts- und sozialetische Beurteilung, die die Risikoforschung und Technikfolgenabschätzung genauso einschließt wie den Vergleich mit Alternativen und die gerechte Verteilung der Lasten durch eine Technologie, ermöglicht es, die Frage der Verantwortbarkeit zu klären.

Die Sozialethik kann sich daher auch im Kontext der Wissenschaftsethik nicht allein als Risiko- und Technikfolgenabschätzung beziehungsweise als „Begleitforschung“ der Synthetischen Biologie verstehen, sondern sie wird die allgemeinen ethischen Prinzipien in historischer, gesellschaftlicher, kultureller und ökonomischer Perspektive auf die jeweiligen Forschungsrichtungen der Synthetischen Biologie hin konkretisieren. Diese Aufgabe, so habe ich zu zeigen versucht, kann aber nur geleistet werden, wenn versucht wird, nicht „die“ Synthetische Biologie zu beurteilen, sondern vielmehr die vielfältigen Forschungsprojekte, die sich unter diesem Dach versammeln. Sie sind in ihrer jeweiligen Ausrichtung im Kontext der jeweiligen Alternativen ethisch zu untersuchen, und es sind diese differenzierten Einzelstudien, derer es in den nächsten Jahren bedarf.

8.5 Literatur

- Dabrock, P. (2009): Playing God? Synthetic biology as a theological and ethical challenge. In: *Syst Synth Biol* 3(1–4):47–54.
- Dondorp, A. et al (2011): The Threat of Artemisinin-Resistant Malaria. In: *N Engl J Med* 365(12):1073–1075.
- Gewirth, A. (1978): *Reason and morality*. Chicago.
- Gewirth, A. (1996): *The community of rights*. Chicago.
- Haker, H. (2002): *Ethik der genetischen Frühdagnostik. Sozialetische Reflexionen zur Verantwortung am menschlichen Lebensbeginn*. Paderborn.
- Haker, H. (2008): *Ethische Reflexionen zur Nanomedizin*. In: Köchy, K. et al. (Hrsg.): *Nanobiotechnologien. Philosophische, anthropologische und ethische Fragen*. Freiburg/München:293–319.
- Heavey, P. (2011): *The place of God in synthetic biology: How will the Catholic Church respond?* In: *Bioethics*, Online-Publikation 29.04.2011. DOI: 10.1111/j.1467-8519.2011.01887.x.

Hilpert, K./Mieth, D. (Hrsg.) (2006): Kriterien biomedizinischer Ethik. Theologische Beiträge zum gesellschaftlichen Diskurs. Herder.

Hübenthal, C. (2006): Grundlegung der christlichen Sozialethik. Versuch eines freiheitsanalytisch-handlungsreflexiven Ansatzes. Münster.

Mieth, D. (2002): Was wollen wir können? Ethik im Zeitalter der Biotechnik. Herder.

Päpstlicher Rat für Gerechtigkeit und Frieden (2006): Compendium der Soziallehre der Kirche. Freiburg i. B.:371.

Pawlenka, C. (2010): Ethik, Natur und Doping. Paderborn.

Singer, P. (1994): Praktische Ethik. Stuttgart.

White, N. J. (2009): Artemisinin resistance – the clock is ticking. In: The Lancet 376(9758):2051–2052.

Julia Diekämper

9. Die Synthetische Biologie in den Medien

Dass in der Synthetischen Biologie auf Wachstum gesetzt wird, ist wissenschaftspolitisch offensichtlich. Die hohen Fördergelder, die in diese junge Disziplin fließen, bieten die angemessene Umgebung für dieses Wachstum.¹ Noch bevor die Synthetische Biologie es in den allgemeinen Schul- oder Universitätskanon geschafft hat, erregt sie zudem – auch jenseits der Forschungs- und Bildungsstätten – Aufmerksamkeit. Nicht anders lässt sich etwa eine sie thematisierende im Winter 2010 gestellte und im Frühjahr 2011 beantwortete Kleine Anfrage der SPD-Fraktion deuten, in der es unter anderem um Anwendungsmöglichkeiten und Rahmenbedingungen ging (Deutscher Bundestag, 2011). Nicht nur Wissenschaft und Politik nehmen jedoch regen Anteil an dem expandierenden Feld aus dem Bereich der Gentechnologie. Die gegenwärtige Dichte an – insbesondere interdisziplinären – Veranstaltungen zum Thema Synthetische Biologie belegt dies.² Auch zahlreiche Zeitungs- und Zeitschriftenartikel veranschaulichen bereits seit 1981³ ein reges Interesse an dem aufstrebenden Wissensgebiet. Erst 2004 allerdings erschien in der „Frankfurter Allgemeinen Sonntagszeitung“ unter dem Titel „Wir

1 Darauf, dass explizite Auskünfte zu konkreter Forschungsförderung derzeit unmöglich sind, weil entsprechende Forschung nicht unter dem Label „Synthetische Biologie“ durchgeführt wird, verweist Sauter (2011).

2 Im Jahr 2011 veranstaltete etwa das Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) unter dem Titel: „Auf dem Weg zum künstlichen Leben?“ (Juni) eine öffentliche Diskussionsveranstaltung zu den Chancen und Risiken der Synthetischen Biologie. Im Rahmen des 4. Bonner Ethik-Forums des Deutschen Referenzzentrums für Ethik in den Biowissenschaften (DRZE) und des Instituts für Wissenschaft und Ethik (IWE) fand die Konferenz „Synthetische Biologie: Auf dem Weg zum künstlichen Leben?“ (Juli) statt. Die Universität Bielefeld organisierte die Veranstaltung „Synthetische Biologie: philosophische Grundlagen und ethische Probleme“ (September). Auf der Jahresversammlung der Leopoldina 2011 (September) umkreiste die Frage „Was ist Leben?“ explizit die Synthetische Biologie. Der Deutsche Ethikrat lud ein zur „Werkstatt Leben. Bedeutung der Synthetischen Biologie für Wissenschaft und Gesellschaft“ (November). In der Berlin-Brandenburgischen Akademie wurden im Rahmen der Tagung „Synthetische Biologie. Leben – Kunst“ (Dezember) die Berührungspunkte zwischen Naturwissenschaft und Kunst ausgelotet. Vgl. hier auch Kapitel 11, Indikator 7.

3 Bereits am 03.10.1979 erschien in der „Frankfurter Allgemeinen Zeitung“ (F.A.Z.) ein Artikel von Barbara Hobom mit dem Titel „An der Schwelle zur synthetischen Biologie. Beliebige Koppelung von Erbanlagen im Reagenzglas/Evolution durch natürliche Gen-Rekombination.“

basteln uns ein neues Leben“ ein Beitrag, der sich dem Thema ausschließlich annahm (F.A.S., 2004b).

Der Titel jenes Artikels erweist sich für die Berichterstattung über Synthetische Biologie allgemein seither als symptomatisch: Er vereint eine spielerische beziehungsweise eine auf das Bauen, Herstellen fokussierende Komponente (das Basteln) mit der Mahnung vor wissenschaftlicher Hybris (Leben machen). Damit stehen sich zwei Einschätzungen von Wissenschaft – als Handwerk auf der einen Seite, als Grenzüberschreitung auf der anderen – gegenüber. Darf ein solcher – in erster Linie kindlicher – Spaß auf der einen Seite ohne Gesichtsverlust Triebbefüllung sein, wenn Wissenschaft doch seriöse Arbeit ist? Und obliegt es auf der anderen Seite dem Menschen, sich zum Herrn über die Natur zu machen? Für beide Richtungen gibt es unzählige Bilder, die im Kontext der Synthetischen Biologie regelmäßig aufgerufen werden, sodass kaum ein Beitrag ohne einen entsprechenden Verweis auf sie auskommt. So gelangten Gschmeidler und Seringer etwa angesichts ihrer diesbezüglichen Metapheranalyse für deutsche Medien zu dem Ergebnis, dass solche Sprachbilder im Zusammenhang mit der Synthetischen Biologie primär aus den Bereichen Design und Religion stammen, dass aber auch der Aspekt des Spiels maßgeblich sei (Gschmeidler/Seringer, 2012:168). Und so beginnt auch der Beitrag in der „F.A.S.“ über Craig Venters „Suche nach den Bausteinen für künstliches Leben“ in Reminiszenz auf eine alte Weise: „Es ist fast wie ein Kinderlied: Wer will neue Tiere machen, der braucht dafür viele Sachen“ (F.A.S., 2004a). Das Kinderlied, das dieser Anspielung Pate steht, formuliert bezeichnenderweise: „Wer will guten Kuchen backen, der muss haben sieben Sachen.“ Der kindliche Enthusiasmus gilt im Kontext des Artikels einem technischen Prozedere: Stehen nur alle Zutaten zur Verfügung, dann erweist sich die Synthetisierung als Kinderspiel. Weniger (wissenschaftliche) Begabung als vielmehr die Sicherung der Grundnotwendigkeiten sind hier also maßgeblich. Die Protagonisten dieses Akts, die Kinder, stehen aber nicht nur für einen besonderen Eifer, was ihr Tun betrifft, sondern auch für die Reinheit ihrer Ziele, die mit ihrer Person erst einmal wenig gemein haben. Das unterscheidet sie grundlegend von solchen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die unehrenhafte Motive verfolgen. Beide Bilder von Wissenschaft erzählen eine Geschichte über gute und schlechte Wissenschaft. Sie dienen auszuhandeln, was kann, was darf Wissenschaft. Welche Forschung gilt als legitim, welche nicht?⁴

4 Laut „F.A.S.“ verurteilte etwa Craig Venter das Experiment von Eckard Wimmer und Kollegen, Polioviren synthetisch herzustellen als „unverantwortliche Wissenschaft“ (ebd., 2004b). Vgl. zu Wimmers Experiment auch Kapitel 4.2 in diesem Band.

Diese Beobachtungen sind Ausgangspunkt nachfolgender Überlegungen. In einer Analyse ausgewählter deutscher Zeitschriften- und Zeitungsartikel lässt sich nachverfolgen, wie eine neue Disziplin in der Öffentlichkeit ihren Platz findet. Dass dabei keine Klärung im Sinne einer Fach-Definition Ergebnis sein kann, unterscheidet die öffentliche Diskussion wenig von der fachbezogenen naturwissenschaftlichen Auseinandersetzung, die entsprechende Klärungsversuche zu einem ihrer stetigen Themen macht (vgl. dazu auch Kapitel 1 in diesem Band). Grundlegend für eine solche Untersuchung der öffentlichen Auseinandersetzung ist stattdessen die Annahme, dass es sich auch bei der öffentlichen Bezugnahme auf ein Wissensgebiet wie das der Synthetischen Biologie nicht um eine Popularisierung oder Simplifizierung naturwissenschaftlicher Wissensbestände handelt. Vielmehr akkumulieren unterschiedliche Bilder und Bildquellen im selben Raum. Diese Bilder sind Sprachbilder – das heißt zu ihnen zählen Metaphern ebenso wie Allegorien oder Analogien. Indem sie Bedeutungszusammenhänge stiften, sind diese (altbekannten) (Sprach-) Bilder maßgeblich an der Produktion von Denkbareiten der neuen Wissenschaft beteiligt. Dadurch, dass hier alte und neue Stränge ineinandergreifen, liefern sie zudem ein Indiz für die Produktivität solcher Prozesse. Zentrale Grundannahme einer solchen Perspektive besteht also genauer darin, dass es keine klare Trennlinie gibt zwischen einer „reinen“ Wissenschaft und einer etwa in den Printmedien auftauchenden Populärwissenschaft. Beide Ausdrucksformen gehören vielmehr zu einem gemeinsamen Feld des Wissens, in dem sie sich begegnen als zwei soziale Ordnungen, die sich produktiv zueinander verhalten.⁵ Das spezialisierte Wissen der Naturwissenschaft integriert sich auf diese Weise nicht nur in den kulturellen Wissensbestand und wird nicht nur aus diesem gespeist, sondern durch die so entstehende Interdependenz ereignet sich eine eigene Dynamik.

Dies werde ich exemplarisch in drei Schritten vorführen. Während ich in einem ersten herausarbeite, wie beziehungsweise als was die Synthetische Biologie innerhalb ausgewählter deutscher Printmedien wahrgenommen wird, untersuche ich in einem zweiten und dritten Schritt das Feld, das sich zwischen den eingangs erwähnten divergierenden Zuschreibungen von Wissenschaft erstreckt. Ich wähle diese Bilder für eine Analyse, weil sie paradigmatisch in der Öffentlichkeit Verwendung finden. Damit ist allerdings nicht gesagt, hiermit alle entsprechenden

5 Das hat Philipp Sarasin (2006) anhand der Bakteriologie gezeigt, das verdeutlichen auch Hans-Jörg Rheinberger und Staffan Müller-Wille (2009) anhand der Vererbung, und Christina Brandt (2007) stellt die Verbindung zwischen Science-Fiction und Genetik her.

Zuschreibungen abzubilden. Dies wäre an dieser Stelle nicht leistbar. Es handelt sich vielmehr um eine repräsentative Auswahl. Eine Auseinandersetzung mit den ausgewählten Beispielen verlangt schließlich, nach deren Funktionen zu fragen. Dabei werde ich argumentieren, dass die beiden Figuren – Spiel und Hybris – als „verkürzte Argumente“ verstanden werden können: Sie unterscheiden sich deshalb erheblich von der normalen Argumentstruktur von Thesen, Schlüssen und Begründungen. Verkürzte Argumente sind vielmehr Chiffre von bereits Begründetem beziehungsweise von etwas, das einer nicht wissenschaftlichen Öffentlichkeit als Begründung zumindest akzeptabel erscheint. Eine solche Perspektive bietet sich auch deshalb an, da die öffentliche Auseinandersetzung mit Synthetischer Biologie offensichtlich macht, wie komplex und dynamisch sich das Sprechen über Wissenschaft ausnimmt.

9.1 Das Auftauchen der Synthetischen Biologie

Gegenstand der Untersuchung sind insgesamt 94 Beiträge aus den Tageszeitungen „Frankfurter Allgemeine Zeitung“ (F.A.Z.) und „Süddeutsche Zeitung“ (SZ) und den wöchentlich erscheinenden Zeitungen/Zeitschriften „Die Zeit“ und „Der Spiegel“, die zwischen 1994 und 2011 erschienen und die sich die Synthetische Biologie zum Gegenstand machten.⁶ War die Disziplin in den Jahren bis zur Jahrtausendwende Gegenstand von Beiträgen, die sich mit Genetik befassen, erscheinen seither Artikel, die sich speziell mit den Verfahrensweisen beschäftigen. Zwei Ereignisse sind es dabei primär, die die Berichterstattung befeuerten. Zum einen stieß der vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) organisierte Studentenwettbewerb „*International Genetically Engineered Machine*“ (iGEM) mit seinen innovativen Projekten auf Interesse (u. a.

6 Recherchiert wurde in den jeweiligen Suchmaschinen nach der Phrase „Synthetische Biologie“ im Volltext – das bedeutet für die Ergebnisse, dass nicht alle erhobenen Beiträge die Synthetische Biologie exklusiv thematisieren. Für eine Auseinandersetzung, wie ich sie hier vorschlage, sind allerdings auch diese möglichen Seitenwege von Bedeutung, weil sie die Synthetische Biologie etwa in größere Zusammenhänge einordnen. Während Die Zeit und Der Spiegel ihr Archiv ab 1946 bzw. seit 1947 im Internet öffnen, gilt dies für die täglich erscheinenden Medien erst ab 1993 (SZ) bzw. 1994 (F.A.Z.). Aufgrund dessen ergibt sich ein Ungleichgewicht. Dieses in Kauf zu nehmen, rechtfertigt, dass es sich bei den erfassten Artikeln um alle öffentlich zugänglichen Artikel handelt. Ausgewählt wurden die vier Printmedien aufgrund ihrer überregionalen Verbreitung und ihres hohen Marktanteils. Die ausgewählten Medien tragen offensichtlich dazu bei, dass und wie das Thema Synthetische Biologie in der Öffentlichkeit Verhandlungsgegenstand wird. Beide Aspekte würden es rechtfertigen, auch die Bild-Zeitung zu untersuchen. Die durchgeführte Recherche brachte keine Suchergebnisse und zeigte, dass das Thema Synthetische Biologie von der Bild-Zeitung im untersuchten Zeitraum nicht thematisiert wurde.

Der Spiegel, 2010; Die Zeit, 2010c; F.A.Z., 2008b; 2010d).⁷ Zum anderen sind es besonders die von Craig Venter und seinem Team (und hier insbesondere im Frühjahr des Jahres 2010) präsentierten Ergebnisse eines künstlich synthetisierten bakteriellen Genoms, die für Aufmerksamkeit sorgten.

In den meisten der erhobenen Beiträge schließt an die Erwähnung der Synthetischen Biologie eine entsprechende Erklärung an. Für die Erwähnungen in den 1980er Jahren gilt, dass der Begriff als Zitat verwandt wird. Sowohl „Die Zeit“ (1983) als auch „Der Spiegel“ (1987) schreiben den Begriff dabei dem deutschen Biochemiker Ernst-Ludwig Winnacker zu. Allgemein wird die Synthetische Biologie als Zusammen- beziehungsweise Weiterführung bereits bestehender Disziplinen eingeordnet. Sie gilt über den gesamten Untersuchungszeitraum von Anfang der 1990er Jahre bis 2011 als „junge“ Disziplin. Was aber genauer zeitlich darunter zu verstehen ist, bleibt vergleichsweise vage und reicht von den 1970er Jahren⁸ bis in die „Mitte des Jahrzehnts“⁹ (SZ, 2009b). Seither mache „ein neuer Zweig der Molekularbiologie von sich reden, die sogenannte synthetische Biologie“ (ebd.). Der Umstand, dass es sich bei der Synthetischen Biologie um einen neuen Forschungszweig handelt, rechtfertigte nach Ansicht des Vorsitzenden des Deutschen Ethikrats Edzard Schmidt-Jortzig Zurückhaltung in Bezug auf deren (ethische) Beurteilung. Nach Angaben der Zeitschrift Der Spiegel beschied er, „das klinge zu sehr nach Zukunftsmusik, sei also ‚noch nicht interessant‘“ (Der Spiegel, 2009b).¹⁰

Nicht nur der Entstehungszeitraum, sondern auch das konkrete Beschäftigungsfeld der Disziplin ist innerhalb der Auseinandersetzung unklar umrissen. Gegenstand dieser „jungen Disziplin“ sei es, „Zellen [...] als Biomachines [zu betrachten], welche sich in ihre Einzelteile zerlegen und aus diesen neu zusammensetzen“ lassen, konstatierte etwa die SZ (2009b). Die Synthetische Biologie sei gar „ein Zukunftsfeld, bei dem es um künstliche Zellen und Organismen geht“ präzisiert Der Spiegel (2009a). Entscheidend für die Betrachtung und Einschätzung der Synthetischen Biologie ist zudem ihr Hervorgehen aus unterschiedlichen, bereits bestehen-

7 Vgl. zum iGEM-Wettbewerb in diesem Band auch Spotlight I und IV sowie Kapitel 11, Indikator 4.

8 Etwa F.A.Z., 1998 und 2000. In letzterem Beitrag wird dabei besonders die Bedeutung des Jahres 1973 betont. Von da an „konnte die Erbsubstanz von Fröschen in Bakterien eingeschleust und vermehrt werden“ (ebd., 2000).

9 Gemeint ist dasjenige zwischen 2000 und 2010.

10 Eine Haltung, die im Übrigen dem Magazin Anlass für eine herbe Kritik an der Institution des Deutschen Ethikrats bot. Denn „[w]enig später legte die Nationale Akademie der Wissenschaften umfassend dar, was für eine gewaltige Dimension die neue Biologierichtung hat - peinlich für den Ethikrat“ (ebd.).

den Disziplinen. Welche dabei aber genau beteiligt sind, variiert innerhalb der unterschiedlichen medialen Darstellungen. So wollen nach Ansicht *Der Zeit* „Biologen, Erforscher künstlicher Intelligenz, Chemiker und Chipkonstrukteure [vereint] versuchen, mit einfachen biologischen Bausteinen, sogenannten BioBricks nützliche Konstruktionen zu schaffen“ (Die Zeit, 2005). Die SZ gelangt zu der Ansicht, dass Synthetische Biologie „aus Sicht der Forscher“ der Name einer „viel versprechenden Disziplin [ist], bei der chemische Moleküle mit Ingenieurmethoden zu biologischen Strukturen kombiniert werden“ (SZ, 2009a).

Bei einer der ersten Nennungen der Synthetischen Biologie ordnet Ernst-Ludwig Winnacker diese 1983 folgendermaßen ein: „Schon jetzt bahnt sich eine ganz neue Entwicklung in der molekularen Biologie an, die sogenannte synthetische Biologie“ (Die Zeit, 1983). Die „F.A.Z.“ kommt zu einem ähnlichen Befund, wenn sie räsoniert: „Mit Entdeckung der DNS kann man Makromoleküle analysieren und synthetisieren“ (F.A.Z., 1998). Mit dem Verfahren sei es möglich, die „Artengrenzen zu überwinden, eine ganz neue synthetische Biologie eröffnete sich“ (ebd.). In diesem Verständnis stellt die Synthetische Biologie eine Erweiterung der molekularen Biologie dar. Grundlage hierfür bot und bietet die Gentechnik. Eine Verbindung zur Gentechnik besteht aber nicht nur aufgrund der technischen Verfahren. Auch Drew Endy, einer der maßgeblichen Protagonisten der Synthetischen Biologie, formuliert in *Der Zeit*: „Aufbauend auf bisherigen Arbeiten in der Gentechnik, versucht die synthetische Biologie, biotechnische Anwendungen im großen Maßstab zu erweitern und deren Design einfacher zu machen“ (Die Zeit, 2006).

Die heterogene Auffassung über die jeweils beteiligten Disziplinen findet auch Ausdruck in der unterschiedlichen Bezeichnung der Verfahren. So wird etwa synonym zur Synthetischen Biologie der Begriff der Synthetischen Genomik (etwa F.A.Z., 2009b) verwandt. Eine deren Herausforderungen sei es, so die „F.A.Z.“, „die Organismen auf ein Minimum an Genen zu reduzieren, die zum Leben notwendig sind. ‚Reduktionistische Biologie‘ nennt Venter das“ (ebd.). Man kann also sagen, dass das Bild der Synthetischen Biologie in der diskursiven Öffentlichkeit konstitutiv unscharf ist: weder Umfang, noch Disziplinenzuordnung sind eindeutig. In der Unschärfe werden allein die Konturen von „Gentechnik“ und „synthetischem Machen“ im Sinne der Erschaffung beziehungsweise Schöpfung kenntlich. Diese Konturen erweisen sich allerdings als erstaunlich beharrlich.

Nachdem Venter im Mai 2010 seine Ergebnisse zu einem künstlich synthetisierten bakteriellen Genom medienbegleitet präsentierte, schien die Disziplin, die er vertritt, immer weniger erklärungsbedürftig. So ist etwa selbstverständlich von „synthetischem Leben“ (Die Zeit,

2010a), „synthetischen Zellen“ (SZ, 2010a) oder vom „synthetischen Genom“ (F.A.Z., 2010b) die Rede. Zwei unterschiedliche Anschlussmöglichkeiten zeichnen sich zudem seither in Bezug auf die Disziplinen-Frage ab und vermischen sich in der öffentlichen Wahrnehmung: Zum einen schließt die Synthetische Biologie theoretisch an Felder etwa der Systembiologie und der Genetik an. Diesen widmet sie sich jedoch zum anderen mit einem neuen, kombinatorischen methodischen Zugriff, der wiederum beispielsweise aus den Ingenieurwissenschaften bekannt ist. In der Zusammenführung der Disziplinen liegt nach dem allgemeinen Verständnis das Neue. Die Bedeutung insbesondere der Ingenieurwissenschaft ist allerdings per se nicht neu. Bereits in den 1970er Jahren artikuliert sich eine ähnliche Annahme anlässlich der Genetik. Das Bild des Ingenieurs, der das Leben zur Technik macht, gewinnt jedoch angesichts der ins Feld geführten Möglichkeiten der Synthetischen Biologie besondere Nachdrücklichkeit.

Die Unschärfe einer Standortbestimmung der Synthetischen Biologie einerseits und der Gegenstand und die Verfügbarkeit des Lebens andererseits stellen offensichtlich eine für die öffentliche Wahrnehmung gefährliche Mischung dar. Das wurde insbesondere politisch relativ schnell klar: Im Interview mit der „F.A.S.“ verglich Wolf-Michael Catenhusen, Mitglied des Deutschen Ethikrats, beispielsweise die Entwicklung und die Wahrnehmung der Synthetischen Biologie mit der Synthetischen Chemie und kommt zu dem Schluss: „Wir sind blind in das Zeitalter der synthetischen Chemie geschlittert. Das sollten wir im Zeitalter der synthetischen Biologie vermeiden“ (F.A.S., 2010; vgl. zu den Parallelen zwischen Synthetischer Biologie und Synthetischer Chemie auch Kapitel 3 und 4 in diesem Band). Eine solche Einschätzung markiert die über die Wissenschaftssphäre hinausgehende Relevanz der Synthetischen Biologie, und sie macht zudem deutlich, dass auch hinsichtlich der Wahrnehmung der Synthetischen Biologie Handlungsbedarf besteht.

Denn im Gegensatz zu einer terminologischen Festlegung besteht in der öffentlichen Wahrnehmung wenig Zweifel an den Wirkungsweisen der Synthetischen Biologie: Diese werden von Beginn an allgemein hoch eingeschätzt. Bei dem Verfahren handle es sich nicht nur um einen „zusehends populären und international durchaus konkurrenzfähigen Forschungszweig“, wie etwa die „F.A.Z.“ (2009a) verlaublich. Inwiefern jedoch nicht nur wissenschaftsintern weitreichende Konsequenzen betroffen sind, manifestiert sich allerdings in der „radikale[n] Aussicht, den Planeten bald mit neuartigen Lebensformen zu teilen, die Produkte kultureller Evolution sind. Sie werden nicht den Kräften eines Schöpfers oder wenigstens darwinistischem Treiben entspringen, sondern den Designideen menschlicher Erfinder“ (F.A.Z., 2006).

Um die Bildwelten, die hier aufgerufen werden, soll es im zweiten und dritten Teil gehen. An dieser Stelle ist entscheidend, dass das spekulative Szenario seine Begründungszusammenhänge daraus schöpft, dass „Synthesebiologen Lebewesen als hyperkomplexe Moleküle begreifen und die zweite Genesis als ein Ingenieurproblem. ‚Biobricks‘ sollen entstehen, standardisierte Grundbausteine des Lebens, mit denen sich Kleinstlebeformen wie aus Lego zusammensetzen lassen“ (F.A.Z., 2006). Das öffentliche Bild der Synthetischen Biologie ist also nicht von der Wirklichkeit dieser Wissenschaft geprägt, sondern von deren Möglichkeiten, von den Möglichkeitsbedingungen. Nicht das Sein, sondern die Denkbare steht im Fokus öffentlichen Interesses.

9.2 Unter Hybrisverdacht: Wissenschaft als Eingriff in die Schöpfung

Inwiefern in den Aushandlungen bezüglich einer vordergründig (natur-)wissenschaftlichen Sphäre andere Bildwelten als diese zum Tragen kommen, unterstreichen beispielsweise all jene Hinweise auf den christlichen Schöpfungsmythos. Das „Projekt Genesis“ (Die Zeit, 2006) war in diesem Zusammenhang genauso titelgebend wie die „Schöpfung am Reißbrett“ (SZ, 2006), die „Bauklötze der Schöpfung“ (SZ, 2004) oder die „Gott-Maschine“ (SZ, 2008).

Allgemein gilt, dass Verbindungen zu religiösen Bezügen kein exklusives Phänomen der Synthetischen Biologie sind. Sie kennzeichnen vielmehr nahezu alle Bereiche der Biomedizin, und sie tun es insbesondere dann, wenn es um das Verhältnis des Menschen zur Natur geht, beziehungsweise um die mögliche Gefährdung der „natürlichen“ Ordnung.

Die Anspielungen etwa auf die Bibel legen allerdings Zeugnis von weit mehr ab, als von einer Simplifizierung von Forschungsergebnissen im Sinne einer bildlichen Überführung einer Sphäre in eine andere. Das wird auch dann augenscheinlich, wenn man sich vergegenwärtigt, dass hier an eine alte – naturrechtliche – Tradition angeknüpft wird: Obgleich Teil der Natur, kommt dem Menschen als Gottes Ebenbild eine Sonderstellung zu.¹¹ Nun ließe sich einwenden,

11 In vielen naturrechtlichen Argumentationszusammenhängen war die zugrunde gelegte „Natur des Menschen“ letztlich dadurch bestimmt, dass der Mensch als Geschöpf Gottes gedacht wurde, das von Gott mit einer bestimmten Aufgabe bedacht

in der Neuzeit trete schließlich an die Stelle Gottes die Vernunft als Quelle des Wissens und das Recht gälte auch deshalb, weil es die Bedingungen der Gesellschaft und der menschlichen Natur so erfordern, womit aus dem empirischen Sein ein normatives Sollen wird. Eine solche säkularisierte und wissenschaftshistorisch evidente Perspektive vermag jedoch nur bedingt Klärungspotenzial im Kontext der Verwendung entsprechender Bilder zu liefern. Denn ein offensichtlich nach wie vor bestehendes Verweissystem auf den Schöpfungsmythos unterstreicht auf der einen Seite dessen Eindringlichkeit: Hier geht es um nicht weniger als um die prometheische Faszination, Leben zu machen und diesem Tun eine Geschichte zu geben. Zum anderen wird augenscheinlich, dass es sich um das anmaßende Vordringen in ein dem Menschen *eigentlich* verschlossenes Terrain handelt. Mit seiner Neugier und Selbstüberschätzung riskiert der Mensch damit bildlich gesprochen abermals die Vertreibung aus dem Paradies, was säkular gewendet nicht weniger als die Ordnung der Welt meint. Eine solche (göttliche) Aneignung stelle genauer eine „Konkurrenz für Gott“ (Der Spiegel, 2010) dar. Unter einen solchen Verdacht gerät vorrangig Craig Venter, „[w]enn ein Schöpfer experimentiert“ (SZ, 2010b). In seiner Person spiegelt sich der Vorwurf der menschlichen Hybris, die eben genau darin bestehe, dass „Craig Venter [...] Gott“ (ebd.) spielt. Jedoch: Er *ist* es nicht, er *spielt* es lediglich. So möchte auch die „F.A.Z.“ von ihm wissen: „Die Welt fragt sich wieder, ob Sie Gott gespielt haben, Dr. Venter. Haben Sie's getan?“ (F.A.Z., 2010b). Craig Venter wird aber hier nicht nur zum Darsteller des Schöpfers, sondern sein Spiel ist zugleich eines mit dem Leben. Nicht nachahmendes Wiedergeben eines Lebens (Gottspieler), sondern das herstellende Produzieren (Leben machen) bringt den entscheidenden Unterschied ans Licht. Das Spiel, das zu spielen Venter unterstellt wird und das Schöpfung heißt, ist zudem gefährlich. Schließlich steht an ihrem Ende ein Produkt namens Leben. Wenn die „F.A.Z.“ zu dem Schluss kommt, „Craig Venter [habe] die Schöpfung endgültig zur Kunst erhoben“ (F.A.Z., 2010a), heißt das: Im Spielparadigma kommt die Technik im klassischen (antiken) Wortsinn als ‚*téchne*‘ vor. Zum einen ist *téchne* nach Platon das Wissen um die Gründe, Ursachen und Zusammenhänge von Vorgängen, zum anderen ordnet sie Aristoteles der *Poiesis* zu, also dem schöpferischen Hervorbringen (Wörterbuch der Philosophie, Bd.10, 1998:941). Insofern dieses schöpferische Hervorbringen sich auf den Bereich des Lebendigen ausdehnt, macht es Sinn, wie Nicole Karafyllis, hier im Unterschied von Artefakten von

worden war. Der „Natur“ des Menschen hatte es folglich entsprochen, diesen göttlichen Auftrag zu erfüllen. Aufgrund dessen war es nicht möglich, die Vorstellung eines biblischen Gottes aus der Wissenschaft zu eliminieren (Braun, 2006:18).

Biofakten¹² zu sprechen. Für die öffentliche Wahrnehmung ergibt sich daraus eine normative Unverträglichkeit. Diese normative Unverträglichkeit entsteht aus zwei konfligierenden Bildern: Hier der allmächtige Schöpfer der jüdisch-christlichen Tradition, dort der kalkulierende Schöpfermensch als planender Bastler.

Der Bezug auf den jüdisch-christlichen Schöpfungsmythos ist innerhalb der ausgewählten Beispiele unübersehbar. Insbesondere auch, weil keiner der ausgewählten Zeitungen und Zeitschriften religiöse Ambitionen unterstellt werden kann, ist ein solcher Befund im säkularisierten 21. Jahrhundert aber zumindest erklärungsbedürftig. Warum sind es gerade diese Bilder, die mit großer Regelmäßigkeit in der Öffentlichkeit erscheinen, deren Wertekanon vorderhand anderen Orientierungsmaßstäben folgt? Joachim Schummer kam unlängst zu dem Schluss, dass das mediale Rekurren auf den biblischen Schöpfungsmythos letztlich einer alten Idee – nämlich der des Kreationismus – geschuldet sei (Schummer, 2011).¹³ Im Gegensatz zu ihm gehe ich jedoch davon aus, dass es sich bei der Verwendung spezifisch jüdisch-christlicher Bilderwelten weniger um ein theologisches Missverständnis handelt, sondern vielmehr um das Zurückgreifen auf eine allgemein bekannte Bilderwelt, das in einem nächsten Schritt als verkürztes Argument funktioniert. Ich stimme also zu, dass es hier nicht um eine konkrete religiöse Ausdeutung geht.¹⁴ Ich halte es jedoch für irrelevant, ob hiermit eine zeitgemäße Exegese vorliegt. Das haben etwa auch Gschmeidler und Seringer bereits herausgestellt. Die Verwendung entsprechender Bilder illustrierte ihres Erachtens viel mehr die Angst, soziale und kulturelle Grenzen zu überschreiten (Gschmeidler/Seringer, 2012:168). Damit treffen sie eine Aussage über die Situationen, in denen solche Verweise Anwendung finden. Wie aber funktionieren sie? Dabrock und Kollegen (2011) decken in diesem Zusammenhang eine interessante Verbindung auf: Sie deuten die Zurückhaltung, die sich angesichts der Synthetischen Biologie in der (deutschen) Öffentlichkeit artikuliert, als eine Ausdrucksform dessen, was Sigmund Freud „Unbehagen“

12 Zum Begriff der Biofakte siehe auch Karafyllis, 2009; 2010.

13 Ähnlich argumentiert Heil, wenn er in Bezug auf die Figur des Frankenstein konstatiert: „Zwar wird häufig auf Frankenstein verwiesen, sich dabei aber ausschließlich auf den schöpferischen Aspekt bezogen.“ Stattdessen sei die tragische und moralische Dimension vernachlässigt (Heil, 2011:169).

14 Dazu, dass die Erschaffung/Erzeugung aus religiöser Sicht zudem nicht zwangsläufig als Hybris zu verstehen ist, vgl. etwa Heil (2011), aber auch Schummer (2011). Beide Autoren weisen etwa darauf hin, dass die Schaffung von Leben erst in der Moderne zu einem moralischen Problem wird.

nannte. Der Modus, in dem dieses in Erscheinung tritt, erklären sie unter Rückgriff auf Jens Assmanns Modell des „kulturellen Gedächtnisses“ (Dabrock et al. 2011). Die These, die sie aus dieser Beobachtung ableiten, lautet, dass das anlässlich der Synthetischen Biologie artikulierte Unbehagen sich aus den tradierten Wissensbeständen speist, die wiederum selbst insofern in eine Krise geraten sind, als sie an Eindeutigkeit verloren haben (ebd.:356). Die religions-kulturellen Deutungspotenziale werden als primäre Ressource für den öffentlichen Diskurs wiedergewonnen, dabei aber formal verdoppelt und inhaltlich neu und durchaus nicht widerspruchsfrei gefüllt.

Bedeutsam ist dabei weniger, ob und wie die Geschichte erzählt wird. Weil das Bild der Synthetischen Biologie wie oben beschrieben in der Öffentlichkeit signifikant unscharf bleibt, ist es vielmehr relevant, dass die Geschichten, die hier erzählt werden, einem Sammelbecken von tradierten und insofern geteilten Wissensbeständen entstammen und eine moralische Imprägnierung in sich tragen. Diese besagt nichts anderes: Es steht dem Menschen nicht zu, sich in die Schöpfung einzumischen. Diese Einmischung macht sich paradigmatisch am Lebensbegriff fest. Die Verbindung von Schöpfung und Leben impliziert nämlich eine Exklusivität, die auf ein Wertegefüge verweist, dessen Priorisierung als unhintergebar gilt. Bei dem Rekurs auf den Schöpfungsmythos handelt es sich also genauer um die Zuschreibung absoluter Werte im Bezug auf das Leben. Eine solche Zuschreibung verbindet sich innerhalb der Debatten mit dem „Dambruchargument“, wonach es keine trennscharfen Kriterien, sondern einen kaum kontrollierbaren Übergang gibt zwischen moralisch möglicherweise vertretbaren Ausnahmefällen und mehr oder weniger gravierenden Fällen des Missbrauchs, sodass man mit der Zulassung von Ausnahmefällen auf eine abschüssige Bahn gerate (die sogenannte „slippery slope“). Die metaphysisch-konservative Position beruft sich hier auf eine biologische Basis, die sich auf einem normativen Naturverständnis gründet, für welches die Natur selbst, das Leben oder die Natur des biologischen Organismus einen *Wert an sich* darstellt. Eine solche Haltung beruht auf der Annahme von intrinsischen Werten der biologischen Natur. Dass es sich hier im weitesten Sinne um christliche Narrationen handelt (weil auch der abwesende Schöpfer immer mitgedacht wird), muss als Indiz für ihren Kollektivcharakter verstanden werden, denn ganz offensichtlich erweisen sich diese Erzählungen als zeitgemäßer Speicher für weiterverwertbare Plots, deren religiöser Assoziationsraum von entsprechenden Verweisen lebt. Die verwendeten Erzählungen werden dabei innerhalb der gesellschaftlichen Kämpfe um die Deutungsmacht über Leben (die sich durch ihren kollidierenden Charakter ergeben) in Stellung gebracht. Die

Gesetze des Lebens im Kontext des „Lebenmachens“ rücken zu einem zentralen Element des Macht-Wissens, in dem es nicht um Einzelne geht. Es geht um die Produktion von Leben.

Die Ablehnung, Leben zu machen, entsteht aber aus dem Zusammenwirken des Eigenwerts der Natur – mit ihrem (subkutanen) Assoziationsraum eines Schöpfergottes – und den unperfekten Schöpfern, die irdische Menschen sind, den Bastlern und Ingenieuren, denen ja im Gegensatz zum vollkommenen Schöpfer einiges misslingen kann. In der Illustration dessen, was das genauer bedeuten kann, finden auch andere Ressourcen des kollektiven Speichers einen Platz. In diesem Sinne lassen sich etwa Verweise auf literarische Figuren wie Frankenstein lesen: „Das klingt nach göttlicher Schöpfung. Oder doch eher nach Frankenstein?“ (SZ, 2010a).¹⁵ Anhand solcher Verbindungen wird zudem offensichtlich, dass und wie unterschiedliche diskursive Stränge miteinander in Beziehung treten. Die normative Stoßkraft allerdings, die beiden zugrunde liegt, überbrückt dabei die Ferne der Herkunftsquellen der Bilder, der sie entstammen. Von dieser – verkürzt gesagt – Warnung und Mahnung unterscheiden sich dabei jene Anleihen, denen ich im Folgenden nachgehe.

9.3 Wissenschaft als Spiel

Der moralischen Schwere des Gottspiels steht innerhalb der öffentlichen Auseinandersetzung vordergründig das kindliche Spiel gegenüber. Eine Tätigkeit also, die einer bestimmten Ernsthaftigkeit beziehungsweise Folgenhaftigkeit entbehrt. Sie tut dies (auch) deshalb, weil sie – bildlich gesprochen – in die Kinderstube zurückkehrt: In eine Welt inmitten von Bauklötzen und Legosteinen. „Mit genetischen Bauklötzchen und synthetischen Molekülen wollen Forscher künstliche Bakterien und Viren konstruieren“ (F.A.S., 2004b). Craig Venter spielt in diesem Bild nicht nur Gott; „Dr. Venter spielt [auch] Lego“ (F.A.Z., 2008a). Die vordergründig den BioBricks (den molekulargenetischen Einheiten) geschuldete Illustration der Bauteile der

15 Siehe auch: van den Belt (2009), der die Beziehung zwischen dem Argument, Gott zu spielen und Frankenstein zu sein, untersucht.

Synthetischen Biologie durch Legosteine,¹⁶ die viele der Artikel nutzen,¹⁷ verdeutlicht neben dem Konstruktionsgedanken die Gefahr, leichtfertig – nämlich mit bunten Steinen hantierend – mit dem Leben umzugehen.¹⁸ Dass das Spiel eben weiter reichende Folgen besitzt, konstatiert etwa Wolf-Michael Catenhusen im Gespräch mit der „F.A.Z.“: „Was immer beim Legospiel im Labor an synthetischen Bausteinen entsteht, sollte öffentlich werden, damit Dritte beurteilen können, ob von den neuen Kreationen Risiken für Mensch und Umwelt ausgehen könnten“ (F.A.S., 2010). Unter dem Titel „Bauklötze für die Schöpfung“ wird noch einmal besonders augenscheinlich, inwiefern das Spiel kein kindliches sein muss, sondern mindestens so bedrohlich sein kann, wie Russisches Roulette: „Wenn er [Jack Szistak] mit Bruchstücken des Erbguts spielt, interessiert ihn, wie das Leben begann“ (SZ, 2004). Eine solche Gleichsetzung verbindet zudem den Schöpfungs-Topos mit jenem des Spiels.

Semantisch gilt es dabei zwischen Basteln und Spielen zu differenzieren. Trotz familiärer Ähnlichkeiten drückt doch ersterer Begriff bei aller Kreativität auch Genauigkeit aus. Die bastelnden Ingenieure, die Präzisions- und Maßarbeiter am Objekt Leben, überführen das Basteln produktiv ins Bauen und verleihen dem Vollzug so einen konstruktiven Charakter. Hier tritt also gegenüber dem freien Spiel die an den Regeln und Kunstfertigkeiten orientierte *téchne* erneut prägnant in Erscheinung. Insbesondere der Topos des Bauens ist auch gängigen Selbstwahrnehmungen der Synthetischen Biologie immanent: In dem von Venter in 2010 veröffentlichtem, künstlich synthetisiertem Bakteriengenom waren zum Beispiel drei Zitate in der Sequenz der DNA verborgen. Eines lautete: „What I cannot built, I cannot understand.“¹⁹ Das

-
- 16 Nicht nur werden entsprechende Fotos verwendet – unterschiedliche Artikel beziehen sich zudem explizit auf das Lego-Spiel. Bereits in dem 2004 in der SZ erscheinenden Beitrag „Bauklötze der Schöpfung“ heißt es etwa in der Unterüberschrift: „Molekularbiologen wollen Zellen und Organismen nach dem Legoprinzip zusammensetzen“ (SZ, 2004). Erklärend führt auch die „F.A.Z.“ im Kontext der Synthetischen Biologie aus „Manche sprechen von ‚Lego-Biologie‘“ (F.A.Z., 2008b). Ebenso verweisen entsprechende Titel auf das Motiv Lego: „Lego des Lebens“ (Die Zeit, 2009); „Die Bio-Elite spielt Lego“ (Die Zeit, 2010b).
- 17 Wie etwa: eine DNA-Helix (F.A.Z., 2008a; F.A.Z., 2010a), Giraffen und Löwen (SZ, 2004) und schließlich ein Lego-Hund (F.A.S., 2004b) – allesamt aus den bunten Steinen gebaut.
- 18 Ausschlaggebend in der Bewertung der Synthetischen Biologie ist der Begriff des Lebens. Das heben die Beiträge z. T. selbst wieder auf eine Metaebene (etwa Petra Gehring in F.A.Z., 2010c).
- 19 Die anderen beiden Zitate lauteten: „To live, to err, to fall, to triumph, and to recreate life out of life“ und „See things not as they are, but as they might be.“ Unter: <http://singularityhub.com/2010/05/24/venters-newest-synthetic-bacteria-has-secret-messages-coded-in-its-dna/> [01.08.2012]. Zu dem sogenannten „*verum factum*“-Prinzip siehe auch Boldt, 2010 und Kapitel 6.4 in diesem Band.

ist erkenntnistheoretisch aufschlussreich und unterscheidet sich maßgeblich vom Wissenschaftsverständnis vorangegangener Jahrhunderte.²⁰ Weiss argumentiert (allerdings), dass ein solches Argument keineswegs neu, sondern vielmehr bereits für den Beginn neuzeitlicher Naturwissenschaft konstitutiv sei. Die Synthetische Biologie schreibe sich damit in ein ontologisches Herstellungsparadigma ein (Weiss, 2011:185). An dieser Stelle geht es jedoch weniger um eine wissenschaftshistorisch adäquate Einschätzung dieses Postulats, als vielmehr um die es unter anderem hervorbringende öffentliche Auseinandersetzung.

Innerhalb der in den Medien angeführten (sprachlichen) Bildwelten wird ausgehandelt, welche Forschung, welche Wissenschaft als legitim und welche als illegitim gilt. Dabei entzieht die Auseinandersetzung diese den inneren wissenschaftlichen Zirkeln: Sie stellt über verkürzte Argumente einen lebensweltlichen Bezug her, der aufgrund seines Kollektivcharakters nicht ausbuchstabiert werden muss, um seine normative Prägkraft zu erhalten. Damit unterscheiden sie sich maßgeblich von (bio-)ethischen Aushandlungen. Sie gründen vielmehr auf einem gesellschaftlich geteilten Wissensfundus, der in Form der hier aktivierten Bilder wirkungsmächtig eine wertende mit einer emotionalen Ebene verknüpft. Dass dabei Arbeit und Mühen seitens der sie betreibenden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler maßgeblich sind, tritt in einer solchen metaphysischen Perspektive in den Hintergrund.

Relativierend schlussfolgert Venter im „F.A.Z.“-Interview allerdings: „Wenn man nach fünfzehn Jahren harter Arbeit ein erstes Stadium erreicht, in dem eine Sache funktioniert, dann macht mich das mächtig stolz. [...] Es kommt uns so vor, als würden uns in technologischer Hinsicht endlich einige nette Babyschritte gelingen, aber philosophisch gesehen sind es vielleicht Riesenschritte“ (F.A.Z., 2010b). Der spielerischen Leichtigkeit gilt es also mittels wissenschaftlicher Seriosität entgegenzutreten. Mit einem solchen Anliegen verbindet sich zusätzlicher der Hinweis, dass es innerhalb von Aushandlungsprozessen nicht eine, sondern immer vielfach konkurrierende Deutungsmöglichkeiten gibt.

20 Hierzu siehe etwa Weiss, 2011.

9.4 Fazit

Die sich seit den 1970er Jahren erweiternden Gestaltungs- und Einflussmöglichkeiten von Gentechnologien produzieren folgenreich auf das Leben bezogenes Wissen. Mit einem solchen stehen etwa Lebensanfang, Lebensvoraussetzungen und Lebensende erneut zur Disposition. Insbesondere die Verfahren der Synthetischen Biologie stellen dabei eine alte Frage mit neuer Dringlichkeit: Was bedeutet Leben, wenn sowohl dessen ontologische als auch normative Parameter zur Disposition zu stehen scheinen? Auf die Frage nach dem Leben folgt beinahe automatisch die Frage nach den Werten, die durch die normative Imprägnierung der beiden verkürzten Argumente – Schöpfungshybris und Wissenschaftsspiel – Bedeutung gewinnt. Das Spannungsverhältnis zwischen einem Eingriff in die Schöpfung und einem spielerischen Verständnis von Wissenschaft profitiert also in erster Linie von der Konzentration auf den Lebensbegriff.²¹

Die beiden exemplarisch ausgewählten Bilderwelten entstammen auf den ersten Blick Gegenwelten. Nichtsdestotrotz bewirkt ihr gemeinsames Auftauchen statt einer Relativierung des jeweiligen Geltungsbereichs der einzelnen Konzepte deren Verstärkung. Zuvor als disparat wahrgenommene Objekte werden so zu einer gemeinsamen Kategorie zusammengefasst. Ihre Gegensätzlichkeit dient mehr der Inszenierung als wahrer Grabenkämpfe. Das verbindende Moment liegt darin, dass sie beide ganz der Wissenschaft verpflichtet sind. Während aber die einen der Phantasie unterliegen, dominiert die anderen ein durchtriebenes Kalkül. Diese Konzepte einer „*science pour la science*“ gründet also auf Naivität auf der einen, Hybris auf der anderen Seite. In beiden Fällen mit ungewissem Ausgang. Dabei steht die Sinnhaftigkeit im Fall der Spiel-Welt deshalb in Frage, weil Handlung eben nur insofern in das Tun einbezogen ist, als sie der Triebbefriedigung dient. Im anderen Fall ist die Wissenschaft zwar einem Ziel verpflichtet,

21 So erkundigt sich etwa die Zeit bei George Church, ob es „wirklich synthetisches Leben aus Menschenhand geben“ werde, worauf dieser antwortet: „Ich denke, ja. Unsere Fähigkeiten, genetische Informationen zu lesen und neu zu schreiben, verbessern sich jedes Jahr. Bald gibt es kaum noch Grenzen des Vorstellbaren“ (Die Zeit, 2010a). Laut „F.A.Z.“ wollen der Wissenschaftler Panke und seine Kollegen „eine der Fragen klären, die Wissenschaft und Philosophie gleichermaßen beschäftigt: Was ist Leben? Lässt es sich mit einer einfachen Summenformel beschreiben oder steckt doch mehr dahinter als bloß Stoffwechsel, Reproduktion und Evolution?“ (F.A.Z., 2010a). Im Beitrag „Wir wollen die Grippe beherrschen“ wendet sich die „F.A.S.“ mit der Frage an Craig Venter, ob „wir nun anders über das Leben und sein Wesen nachdenken“ müssen, woraufhin der Befragte konstatiert, er für seinen Teil „denke jetzt völlig anders darüber. Die Ergebnisse, die wir vorgelegt haben, zeigen, wie dynamisch Leben ist“ (F.A.S., 2010; F.A.Z., 2010b). Und so bilanziert auch die F.A.Z., in Venters Labor sei ein „Bakterium mit künstlichem Genom entstanden, das krecht und fleucht – Leben aus der Retorte“ (F.A.Z., 2010a).

dieses Ziel allerdings folgt keinem hohen oder gar ethisch-moralischen Maßstab, sondern ist nur an die Person des – meist männlichen – Forschenden gebunden.²²

Inwiefern die gewählten Bilder und das sie enthaltende Misstrauen in Wissenschaft dabei an Grenzen stoßen, verdeutlicht die Beschwörung eines (visionären) Anwendungshorizonts der Synthetischen Biologie. Schließlich lockt gerade diese mit Heilsversprechen – saubere Umwelt, Verteilungsgerechtigkeit, Gesundheit. Nehmen wir diese in die Betrachtung hinzu, dann offenbart sich auf einer tiefer liegenden Ebene Folgendes: Das mittels der analysierten Bilder vorgeführte mangelnde Vertrauen dient in einem zweiten Schritt als Folie, vor der sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler positionieren und auf der zwischen guter und schlechter Wissenschaft entschieden wird; zwischen derjenigen, die ethisch vertretbar ist und jener, gegen die es sich zu schützen gilt. Ein solches Misstrauen und sie veranlassende (verantwortungsbewusste)²³ Selbstpositionierungen artikulieren sich insbesondere dann, wenn es um sogenannte Biobastler geht (vgl. dazu auch Kapitel 7 und Spotlight III).²⁴

Die hier exemplarisch vorgeführte mediale Thematisierung der Synthetischen Biologie bietet *eine* Perspektive auf das Verhältnis zwischen Wissen und Wissenschaft. Sie illustriert, dass es sich bei der öffentlichen Aushandlung um weit mehr handelt als um einen Übersetzungsakt naturwissenschaftlicher Erkenntnisse für ein breites Publikum. Denn die Bilder, die hier in Anschlag gebracht werden, sind Produkte eines allgemein zugänglichen Wissens. Dieses Wissen stellt dabei zwar eine unverzichtbare Vorbedingung von Wissenschaft dar, beide sind aber keinesfalls identisch. Wissen stellt „keine Summe von Erkenntnis“ dar, sondern eine Gesamtheit von Elementen, die aus ein und derselben Positivität heraus im Feld einer einheitlichen medialen Formation gebildet sind. Wengleich also die Praxis Wissen formiert, wirkt es umgekehrt auf die Praxis zurück. Dass dieses Verhältnis folgenreich ist, verdeutlicht auch die von ihr ausgehende beschriebene Produktivität.²⁵

22 Zur Figur des „mad scientist“ siehe Sarasin, 2006:231ff.

23 Zum Themenkomplex Verantwortung in der Synthetischen Biologie, siehe Grunwald, 2011.

24 Unterschieden wird in der Diskussion dabei zwischen Biosecurity und Biosafety. Die deutsche Sprache kennt diese Unterscheidung nicht. In beiden Fällen wird mit „Sicherheit“ übersetzt. Während ersteres vorsätzlichen Schaden bezeichnet, meint Biosafety unbeabsichtigte Auswirkung in Folge der Technikanwendung. Siehe hierzu etwa Schmidt, 2011.

25 Zu einem solchen Verständnis des Verhältnisses von Wissen und Wissenschaft siehe etwa Foucault (2001). Selbstverständlich handelt es sich um ein Verständnis von Wissen. Insbesondere in wissenschaftshistorischen Untersuchungen finden sich etwa zudem die Unterscheidungen zwischen explizierbarem und implizitem Wissen (Polanyi) oder die zwischen starkem und schwachem Wissen (Malcolm), hierzu Anacker, 2004.

9.5 Literatur

- Anacker, M. (2004):** Wissen. In: Historisches Wörterbuch der Philosophie. Bd. 12. Basel:963–956.
- Boldt, J. (2010):** Leben herstellen. Synthetische Biologie und menschliches Selbstverständnis. In: Die Politische Meinung Nr. 493:11–16.
- Brandt, C. (2007):** Wissenschaft – Literatur – Öffentlichkeit. Die Bedeutung des Science-Fiction in den 1970er Jahren für die öffentliche Debatte zum Klonen. In: Nikolow, S./Schirmmayer, A. (Hrsg.): Wissenschaft und Öffentlichkeit als Ressource füreinander. Bielefeld:137–164.
- Braun, J. (2006):** Einführung in die Rechtsphilosophie. Tübingen.
- Dabrock, P. et al. (2011):** Unbehagen und kulturelles Gedächtnis. Beobachtungen zur gesellschaftlichen Deutungsunsicherheit gegenüber Synthetischer Biologie. In: Dabrock, P. et al. (Hrsg.): Was ist Leben – im Zeitalter seiner technischen Machbarkeit? Beiträge zur Ethik der Synthetischen Biologie. Freiburg/München:345–367.
- Der Spiegel (1987):** Gen-Technik. Die Götter unter sich. 26.01.1987.
- Der Spiegel (2009a):** Klug aus der Krise? 11.04.2009.
- Der Spiegel (2009b):** Selbstfindung für Diven. 24.08.2009.
- Der Spiegel (2010):** Konkurrenz für Gott. 04.01.2010.
- Deutscher Bundestag (2011):** Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten René Röspel, Dr. Ernst Dieter Rossmann, Dr. Hans-Peter Bartels, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der SPD (BT-Drucksache 17/4898). Stand und Perspektiven der Synthetischen Biologie. BT-Drucksache 17/5165. Berlin.
- Die Zeit (1983):** Spart halt Zeit. 27.05.1983.
- Die Zeit (2005):** Kleines Einmaleins für Darmbakterien. 12.05.2005.
- Die Zeit (2006):** Projekt Genesis. 16.02.2006.
- Die Zeit (2009):** Lego des Lebens. 30.07.2009.
- Die Zeit (2010a):** Eine fremde Intelligenz. 25.03.2010.
- Die Zeit (2010b):** Die Bio-Elite spielt mit Lego. 27.05.2010.
- Die Zeit (2010c):** Leben vom Reißbrett. 04.11.2010.
- F.A.S. (2004a) = Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung:** Gefunden im Bermuda-Dreieck. 07.03.2004.
- F.A.S. (2004b):** Wir basteln uns ein neues Leben. 07.03.2004.

- F.A.S. (2010): Biologie ist keine Hexerei. 23.05.2010.
- F.A.Z. (1998) = *Frankfurter Allgemeine Zeitung*: Staunen statt urteilen. 29.05.1998.
- F.A.Z. (2000): Kommerz statt wissenschaftlicher Neugier? 23.02.2000.
- F.A.Z. (2006): Leben 2.0. Die synthetische Biologie beunruhigt ihre Vordenker. 06.07.2006.
- F.A.Z. (2008a): Dr. Venter spielt Lego. 27.01.2008.
- F.A.Z. (2008b): Sprechstunde bei den neuen Biovisionären. 12.11.2008.
- F.A.Z. (2009a): Synthetische Biologie. 29.07.2009.
- F.A.Z. (2009b): Der aktuelle Katalog der Schöpfung ist da. 13.08.2009.
- F.A.Z. (2010a): Vier Flaschen für ein Heureka. 21.05.2010.
- F.A.Z. (2010b): Wir wollen die Grippe beherrschen. 25.05.2010.
- F.A.Z. (2010c): Wenn es kein Leben ist, was ist es dann? 26.05.2010.
- F.A.Z. (2010d): Leben vom Reißbrett. 01.10.2010.
- Foucault, M. (2001): Über die Archäologie der Wissenschaften. In: *Dits et Ecrits*, Bd.1. Frankfurt a. M.
- Grunwald, A. (2011): Synthetische Biologie: Gesellschaftliche Verantwortung der Wissenschaft. In: Pühler, A. et al. (Hrsg.): *Synthetische Biologie. Die Geburt einer neuen Technikwissenschaft*. Heidelberg:103–110.
- Gschmeidler, B./Seiringer, A. (2012): "Knight in shining armour" or "Frankenstein's creation"? The coverage of synthetic in German-language media. In: *Public Underst Sci* 21(2):163–173.
- Heil, R. (2011): Von künstlichen Lebewesen und künstlichem Leben. In: Dabrock, P. et al. (Hrsg.): *Was ist Leben – im Zeitalter seiner technischen Machbarkeit? Beiträge zur Ethik der Synthetischen Biologie*. Freiburg/München:147–172.
- Historisches Wörterbuch der Philosophie* (1998): Bd. 10: Artikel: Technik. Darmstadt.
- Karafyllis, N. C. (2009): Artefakt – Lebewesen – Biofakt. Philosophische Aspekte lebendiger Bauten. In: de Bruyn, G. et al. (Hrsg.): *Lebende Bauten – Trainierbare Tragwerke*. Münster/New York:97–111.
- Karafyllis, N. C. (2010): Biofakte als neue Kategorie der Informatik? In: Jakob, R. et al. (Hrsg.): *Auf dem Weg zur Idee der Gerechtigkeit. Gedenkschrift für Ilmar Tammelo*. Münster:249–262.
- Rheinberger, H.-J./Müller-Wille, S. (2009): Vererbung. Geschichte und Kultur eines biologischen Konzepts. Frankfurt a. M.
- Sarasin, P. (2006): *Geschichtswissenschaft und Diskursanalyse*. Frankfurt a. M.
- Sauter, A. (2011): Synthetische Biologie: Finale Technisierung des Lebens oder Etikettenschwindel? In: *TAB-Brief* Nr. 39:23–30.

Schmidt, M. (2011): Biosicherheit und Synthetische Biologie. In: Pühler, A. et al. (Hrsg.): Synthetische Biologie. Die Geburt einer neuen Technikwissenschaft. Heidelberg:111–127.

Schummer, J. (2011): Das Gotteshandwerk. Die künstliche Herstellung von Leben im Labor. Berlin.

SZ (2004) = Süddeutsche Zeitung: Bauklötze der Schöpfung. 16.06.2004.

SZ (2006): Schöpfung am Reißbrett. 30.05.2006.

SZ (2008): Die Gott-Maschine. 19.07.2008.

SZ (2009a): Lebewesen maßgeschneidert. 28.07.2009.

SZ (2009b): Killerviren aus dem Küchenlabor. 10.11.2009.

SZ (2010a): Craig Venter spielt Gott. 21.05.2010.

SZ (2010b): Wenn ein Schöpfer experimentiert. 21.05.2010.

van den Belt, H. (2009): Playing God in Frankenstein's Footsteps. Synthetic Biology and the Meaning of Life. In: Nanoethics:257–268.

Weiss, M. G. (2011): Verstehen wir, was wir herstellen können? Martin Heidegger und die Synthetische Biologie. In: Dabrock, P. et al. (Hrsg.): Was ist Leben – im Zeitalter seiner technischen Machbarkeit? Beiträge zur Ethik der Synthetischen Biologie. Freiburg/München:173–193.

Mila Burghardt

Its hot, its new, its alive – Super Cell, der Supermarkt des Lebens



Synthetische Biologie lebt.

In den Laboren entsteht sie, dort wird sie diskutiert, erprobt, hinterfragt, auf ihre technischen Möglichkeiten hin untersucht. Bleiben soll sie dort aber nicht, hinter den dicken Glasscheiben und Sicherheitstüren. Synthetische Biologie wird sich hineinflechten in unser Leben, sie wird Dinge leichter, Unmögliches möglich machen und an der einen oder anderen Stelle für Verwunderung, Verängstigung, sicher aber für Veränderung sorgen. Kurz, sie wird Teil unserer Kultur werden.

Synthetische Biologie lebt.

In den Künstlerateliers entsteht sie, dort wird sie diskutiert, erprobt, hinterfragt und auf ihre kulturellen Möglichkeiten hin untersucht.

Studierende der Bauhaus-Universität Weimar und Studierende der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg haben sich anlässlich des jährlichen internationalen Studentenwettbewerbs für die Synthetische Biologie iGEM 2010 zusammengeschlossen und gemeinsam als „Team Weimar-Heidelberg-Arts“ am Wettbewerb des renommierten Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Boston teilgenommen. Begleitet wurden sie dabei von

Prof. Ursula Damm und Prof. Dr. Roland Eils. Synthetische Biologie sollte verständlich werden, angreifbar, akzeptierbar, fühlbar, begreifbar. Wir wollten sie aus dem abstrakten Laborweiß herauslösen und in unser Alltagsleben integrieren. Entstanden ist so Super Cell, der Supermarkt der Synthetischen Biologie. Kaufen Sie jetzt: Fleisch und Liebe. Sicherheit und Zeit. Gesundheit und Schönheit. Energie und ein gutes Gewissen. Wir bedienen uns der Ästhetik und der Sprache, die uns überall umgibt, wir bewerben, verkaufen, vermarkten, wir verkaufen nichts anderes, als das, was uns auch heute verkauft wird. Mit Super Cell und seinen Produkten nehmen wir die Bedürfnisse der heutigen Gesellschaft auf und gehen nur einen Schritt weiter: Wir verkuppeln sie mit der Synthetischen Biologie. Und das, was uns dann aus dieser Verbindung heraus im Supermarkt der Synthetischen Biologie begegnet, macht Gänsehaut und Schüttelfrost, Freudentaumel und Weltrettungshoffnung. Und all das zur gleichen Zeit. Denn nur die Produkte, die das Prädikat „mit Hilfe Synthetischer Biologie realisierbar“ – zugegebenermaßen in verschiedenen Zeit- und Umsetzungsabstufungen – erhalten haben, wurden in den Shop aufgenommen.

Super Cell ist dabei weder Werbung für noch Aggressor gegen die Synthetische Biologie. Es ging keinesfalls darum, ein Urteil zu fällen, zumal die Produktpalette ohnehin nicht in eine Richtung einzuordnen wäre. Aufgezeigt werden sollten vielmehr Möglichkeiten, Risiken und vor allem der Bedarf einer neuen Kompetenz im Umgang mit neuen Technologien. Wenn wir als Gesellschaft und Individuen selbstbestimmt leben können wollen, müssen wir uns mit den Neuheiten auseinandersetzen.

Ziel der Kooperation über die Disziplinen hinweg war und ist es, durch Dinge Visionen denkbar zu machen, als Anstoß einer offenen und auf breiter Basis geführten Diskussion, die die kulturellen und gesellschaftlichen Folgen der Einführung dieser neuen Technik untersucht. Jetzt ist der Zeitpunkt für eine fundierte Auseinandersetzung mit Synthetischer Biologie, um die Kompetenzen im jeweils selbstbestimmten Umgang auszubilden. Super Cell will den Weg dahin ermöglichen.

www.super-cell.org

Jürgen Hampel

10. Synthetische Biologie – eine unbekannte Technologie

Zu den neueren Anwendungen im Bereich der Biologie gehört die Synthetische Biologie. Bei der Synthetischen Biologie handelt es sich, so die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), um ein neues Forschungsgebiet in „einem interdisziplinären Umfeld von Biologie, Chemie, Physik, Mathematik, Ingenieurwissenschaften, Biotechnologie und Informationstechnik“ (DFG et al., 2009:12). Erklärter Zweck ist dabei, „biologische Systeme mit neuen, definierten Eigenschaften zu konzipieren. Dabei sollen die Systeme vornehmlich künstlich hergestellt bzw. nachgebaut werden, mit dem Ziel, neue biologische Komponenten sowie neuartige lebende Organismen, die in der Natur in dieser Form nicht bekannt sind, zu gewinnen“ (ebd.). Die Eigenschaften dieser Systeme werden maßgeblich „auf einem von Menschen entworfenen rationalen Design“ beruhen (ebd.). Gegenwärtig beschränkt sich die Synthetische Biologie primär auf die Grundlagenforschung. Anwendungen im Alltag sind bislang nicht zu beobachten. Ähnlich wie anderen Innovationen im Bereich der Mikrobiologie, etwa der Stammzellforschung oder der grünen Gentechnologie, wird der Synthetischen Biologie ein erhebliches Innovationspotenzial zugeschrieben. Anders als diese ist die Synthetische Biologie gegenwärtig aber noch nicht in den Fokus der Öffentlichkeit geraten.

Die geringe Bedeutung der Synthetischen Biologie in der Öffentlichkeit zeigt sich zum Beispiel daran, dass in den Medien bislang nur wenig über sie berichtet wurde (vgl. hierzu auch die Ausführungen in Kapitel 9 sowie Kapitel 11, Indikator 2). Der bislang aktuellsten Analyse der Medienberichterstattung über die Synthetische Biologie in den deutschsprachigen Ländern zufolge war die Synthetische Biologie vor 2007 nur selten Gegenstand medialer Berichterstattung (Gschmeidler/Seiringer, 2012). Einen Höhepunkt erreichte die Berichterstattung im Jahr 2008, um dann im Jahr 2009 wieder abzunehmen. Auslöser der Medienberichterstattung waren nicht konkrete Entwicklungen, sondern internationale Konferenzen zur Synthetischen Biologie oder die Veröffentlichung eines Berichts von drei deutschen Wissenschaftsorganisationen zur Synthetischen Biologie (DFG et al., 2009). Nach wie vor ist die Synthetische Biologie ein Nischen-

thema, das im Wesentlichen auf die Wissenschaftsberichterstattung fokussiert bleibt. Trotz der gegenwärtig noch geringen Bedeutung der Synthetischen Biologie in der Öffentlichkeit wird in der Wissenschaft die Frage diskutiert, inwieweit die Synthetische Biologie ähnliche Kontroversen auslösen wird wie etwa die grüne Gentechnologie (Torgersen, 2009; Torgersen/Hampel, 2012).

Im folgenden Beitrag wird versucht, auf der Basis von Umfragedaten herauszuarbeiten, wie die Synthetische Biologie in der Öffentlichkeit wahrgenommen wird. Die hier präsentierten Analysen beruhen auf Daten des Eurobarometers 73.1, einer Umfrage der Europäischen Kommission, die im Rahmen des von G. Gaskell von der London School of Economics koordinierten, im 7. Rahmenprogramm der Europäischen Union (EU) geförderten Projekts „Sensitive Technologies and European Public Ethics“ entwickelt und analysiert wurde (Gaskell et al., 2010). Die Interviews wurden zwischen dem 29. Januar und dem 17. Februar 2010 durchgeführt.

Die hier vorgestellte Studie ist, wie alle Eurobarometer-Untersuchungen,¹ eine in allen Mitgliedsstaaten der EU sowie den assoziierten Ländern² durchgeführte Befragung, für die je Land im Normalfall 1000 Personen befragt werden. Abweichungen gibt es nach unten für die kleinen Länder Malta, Zypern und Luxemburg mit jeweils 500 Befragten und nach oben für das Vereinigte Königreich von Großbritannien und Nordirland mit insgesamt 1300 Befragten sowie für Deutschland mit über 1500 Befragten. Für die 27 EU-Staaten umfasste die Stichprobe des Eurobarometers 73.1 insgesamt 26.676 Befragte. Der vollständige Fragenkatalog findet sich in Gaskell et al., 2010.³

1 Eurobarometer-Untersuchungen sind Bevölkerungsumfragen, die seit 1973 in den Mitgliedstaaten der Europäischen Union durchgeführt werden, um Einstellungen der europäischen Bürgerinnen und Bürger zu ausgewählten Themen ermitteln zu können. Die Befragungen sind repräsentativ für die Bevölkerung in den Mitgliedstaaten der EU und – durch Gewichtung, die Unterschiede der Bevölkerungszahlen berücksichtigen – für die gesamte EU. Die erste Eurobarometer-Befragung, die sich mit der modernen Biotechnologie beschäftigt hat, wurde im Jahr 1991 durchgeführt. Weitere Studien zu diesem Thema folgten in den Jahren 1993, 1996, 1999, 2002, 2005 und zuletzt 2010.

2 Neben den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union wurde diese Befragung auch in den folgenden Nicht-EU-Ländern durchgeführt: Island, Kroatien, Norwegen, Schweiz, Türkei. Die Analysen für diesen Beitrag beschränken sich, sofern nicht ausdrücklich darauf hingewiesen wird, auf die EU-Mitgliedsstaaten.

3 Die Fragenbatterie zur Synthetischen Biologie beruht auf wesentlichen Beiträgen von Nicole Kronberger und Wolfgang Wagner von der Johann-Kepler Universität in Linz.

10.1 Bekanntheit

Anders als die Forschung mit menschlichen embryonalen Stammzellen oder die grüne Gentechnologie hat die Synthetische Biologie bislang noch keine öffentlichen Kontroversen ausgelöst. Auch für die Medien ist sie, worauf bereits hingewiesen wurde, eher noch ein Randthema. Vor diesem Hintergrund ist es nicht überraschend, dass – wie die Daten des Eurobarometers 73.1 eindeutig zeigen – die Synthetische Biologie noch nicht im Bewusstsein der Öffentlichkeit angekommen ist. Das gilt gleichermaßen für Deutsche wie für die EU-Bevölkerung insgesamt.⁴ Nur 17,8% der befragten Deutschen geben an, vor dem Interview bereits von der Synthetischen Biologie gehört zu haben, über 80% haben diese Frage verneint. Dieser Wert liegt nur geringfügig über dem EU-Durchschnitt von 16,9%. Deutlich höher ist der Bekanntheitsgrad der Synthetischen Biologie mit 29,2% nur in der Schweiz. Selbst für die besser Gebildeten⁵ ist die Synthetische Biologie unbekannt, wenn auch der Anteil derjenigen, die von dieser Technologie gehört haben, in der höchsten Bildungsgruppe mit 28,8% deutlich über dem entsprechenden Anteil in der niedrigsten Bildungsgruppe (6,6%) liegt.

In Anbetracht der geringen Bekanntheit der Synthetischen Biologie ist es nicht überraschend, dass sie kein Thema der Alltagskommunikation ist. Diejenigen, die vor dem Interview bereits von der Synthetischen Biologie gehört haben, werden zusätzlich gefragt, ob sie über dieses Thema auch schon kommuniziert haben. In Deutschland geben nur 1,9% der Befragten an, häufig über dieses Thema zu reden, immerhin 28,5% reden gelegentlich über Synthetische Biologie, während 50,9% noch nie über dieses Thema gesprochen haben. Auch hier unterscheidet sich Deutschland kaum von der EU der 27, in der 3,8% angeben, häufig über die Synthetische Biologie zu sprechen, während ähnlich wie in Deutschland 50% noch nie über dieses Thema gesprochen haben.

4 Aussagen über die Europäer beziehen sich auf alle EU-Bürgerinnen und -Bürger einschließlich der Deutschen. Der disproportionale Stichprobenansatz der Eurobarometer-Befragungen, bei dem in fast allen EU-Staaten die gleiche Anzahl an Personen befragt wird, wird durch einen die unterschiedliche Bevölkerungszahl berücksichtigenden Gewichtungsfaktor korrigiert, sodass die ausgewiesenen Zahlen repräsentativ für die EU-Bevölkerung sind.

5 Um das Bildungsniveau international vergleichend operationalisieren zu können, werden bei den Eurobarometer-Umfragen drei Bildungsgruppen unterschieden. Das niedrigste Bildungsniveau haben demnach Personen, die ihren höchsten Bildungsabschluss bis zum Alter von 15 Jahren erreicht haben. Ein mittleres Bildungsniveau haben Personen, die ihren höchsten Bildungsabschluss im Alter von 16 bis 19 Jahren erreicht haben und ein hohes Bildungsniveau diejenigen, die beim Erreichen ihres höchsten Bildungsabschlusses 20 Jahre und älter waren.

Hinsichtlich der Bedeutung der Synthetischen Biologie als Thema der Alltagskommunikation gibt es allerdings erhebliche Unterschiede zwischen verschiedenen Ländern. Während die Synthetische Biologie in Deutschland in der Alltagskommunikation nur eine geringe Bedeutung besitzt, sprechen in Österreich immerhin jeder Zehnte (10,1%)⁶ und in Großbritannien immerhin noch über 7,5% regelmäßig über Synthetische Biologie. In fast allen europäischen Staaten liegt der Anteil derer, die noch nie über die Synthetische Biologie gesprochen haben, bei über 40%. In Frankreich (61,7%), Schweden (63,8%), Tschechien (61%) sowie außerhalb der EU in der Türkei (69,8%) liegt dieser Anteil sogar bei über 60%. Bemerkenswerte Ausnahmen bilden in diesem Zusammenhang Österreich (23%) und Italien (25,4%).

Bei der geringen Bedeutung der Synthetischen Biologie für die Alltagskommunikation ist auch nicht verwunderlich, dass selbst diejenigen, die vor dem Interview von der Synthetischen Biologie gehört haben, nur selten aktiv Informationen über die Synthetische Biologie suchen (vgl. zu öffentlich zugänglichen Informationen über die Synthetische Biologie auch Kapitel 11, Indikatoren 2, 3 und 9). In Deutschland geben drei Viertel der Befragten, denen die Synthetische Biologie bekannt ist (73,8%), an, noch nie nach Informationen gesucht zu haben, immerhin ein Viertel der Befragten (25,9%) gibt an, ein- oder zweimal respektive gelegentlich nach Informationen gesucht zu haben, während nur 0,4% regelmäßig Informationen über Synthetische Biologie suchen. Vergleicht man Deutschland mit Europa, fällt auf, dass das Niveau der Informationssuche in Deutschland noch unter dem europäischen Durchschnittswert liegt. Mit 70,3% geben weniger Europäer als Deutsche an, nie nach Informationen gesucht zu haben, während vor allem der Anteil derer größer ist, die regelmäßig nach Informationen zur Synthetischen Biologie suchen. Besonders hoch ist der Anteil der regelmäßig Informationssuchenden in Italien (8,4%) und in Österreich (6,1%).

6 Interessanterweise kommt eine Studie über die Förderung der Synthetischen Biologie zu dem Ergebnis, dass Österreich in diesem Bereich keine eigenständige wissenschaftliche Gemeinschaft hat (Pei et al., 2012:159).

10.2 Informationssuche

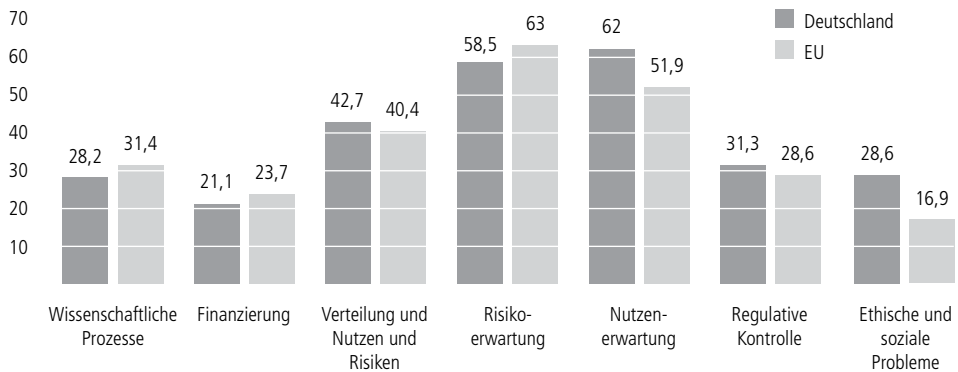
Auch wenn das klassische Defizit-Modell⁷ der Wissenschaftskommunikation, wonach Information über eine Technologie die Zustimmung zu dieser Technologie fördern, mittlerweile als überholt angesehen werden muss (vgl. Gaskell et al., 1997; Hampel/Pfenning, 1999), ist die Frage, welche Informationen über eine technische oder wissenschaftliche Entwicklung nachgefragt werden, für die Wissenschaft von herausragender Bedeutung. Im Rahmen des Eurobarometers 73.1 wird daher eruiert, welche Informationen die Befragten nachfragen würden, wenn sie an einem Referendum zur Synthetischen Biologie teilnehmen sollten. Zur Wahl stehen Informationen zur wissenschaftlichen Methodik (Was sind die wissenschaftlichen Prozesse und Techniken?), zu Nutzen und Risiken, zu sozialen Themen (Wie sind Nutzen und Risiken verteilt? Wer finanziert die Forschung?) bis hin zu ethischen und regulativen Fragen (Was wird getan, um die Synthetische Biologie zu regulieren und zu kontrollieren? Was wird getan, um die sozialen und ethischen Folgen der Synthetischen Biologie zu bewältigen?). Hinter diesen Antwortvorgaben stehen unterschiedliche Vorstellungen. Sind – wie es das Defizit-Modell implizit annimmt – die wissenschaftlichen Fakten von zentraler Bedeutung, oder sind es die Folgen der Anwendung, das heißt Nutzen oder Risiken, oder ist es die soziale und regulative Einbindung der Technik? Die Befragten müssen entscheiden, welche Informationen für sie am wichtigsten, am zweitwichtigsten und welche am dritt wichtigsten sind. In Abbildung 1 wird aufaddiert, wie viele Prozent der Befragten die entsprechende Kategorie an erster, zweiter oder dritter Stelle nennen.

Wie Abbildung 1 zeigt, stehen die Nutzen- und Risikoerwartungen an erster Stelle, weniger wichtig sind den Befragten die wissenschaftlichen und technischen Prozesse und nur in sehr geringem Maße interessieren Fragen der sozialen Einbindung. Entgegen der häufig geäußerten Vermutung, dass gerade die deutsche Gesellschaft besonders risikoaversiv ist, interessieren sich geringfügig mehr Deutsche für den erwarteten Nutzen (62%) als für die erwarteten Risiken (58,8%). Auf der europäischen Ebene sieht es anders aus. Hier sind die erwarteten Risiken von

7 Die Bezeichnung Defizit-Modell wurde von dem diesem Modell und seinen Annahmen kritisch gegenüberstehenden britischen Wissenschaftsforscher Brian Wynne (1991) eingeführt. Er bezeichnet damit die seiner Auffassung nach unter Natur- und Technikwissenschaftlern verbreitete Annahme, dass fehlende Akzeptanz von technischen und wissenschaftlichen Innovationen die Folge von Wissensdefiziten in der Öffentlichkeit sei.

größerer Bedeutung als die Nutzenerwartungen. Wissenschaftliche und technische Informationen – die Inhalte, die dem Defizit-Modell folgend, die Wissenschaftskommunikation beherrschen – sind dagegen nur für weniger als ein Drittel der Befragten von Interesse. Wichtiger als wissenschaftliche Information ist die Verteilung von Risiken und Nutzen. Geringer als erwartet ist die Bedeutung der sozialen Einbindung der Technik. Weder Informationen über die Art und Quelle der Finanzierung noch Informationen über die Anstrengungen, die Synthetische Biologie zu regulieren und zu kontrollieren, sind für größere Teile der Öffentlichkeit von Interesse. Der Anteil derjenigen, die sich für diese Themen interessieren, liegt zwischen 20% und 30%. Deutliche Unterschiede zwischen den Deutschen und den Europäern gibt es beim Interesse an Informationen über Aktivitäten zur Bewältigung von sozialen und ethischen Folgen der Synthetischen Biologie. Während nur wenig mehr als 15% der Europäer Informationen über diese Themen für wichtig halten, sind es immerhin fast 30% der Deutschen.

Abbildung 1: Gewünschte Informationen zur Synthetischen Biologie, an erster, zweiter oder dritter Stelle genannt (in Prozent)

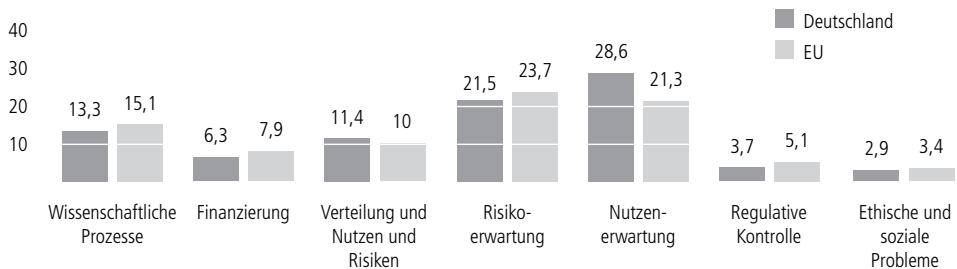


Datenbasis: Eurobarometer 73.1, 2010.

Ein etwas anderes Bild ergibt sich, wenn man nur betrachtet, welche Informationen an erster Stelle genannt werden (Abbildung 2). Nutzen und Risikoerwartungen behalten in diesem Fall ihre dominante Wirkung. Während in Europa Informationen über Nutzen- und Risikoerwartungen von ähnlicher Bedeutung sind, sind in Deutschland – entgegen dem verbreiteten Stereotyp

einer risikofixierten deutschen Öffentlichkeit – Nutzenerwartungen von größerer Bedeutung als Risikoerwartungen. Deutlich geringer ist der Bedarf an Auskünften über die wissenschaftlichen Prozesse, die von 15% der Europäer und 13% der Deutschen an erster Stelle genannt werden. Die Bedeutung von regulativen und ethischen Fragen ist noch einmal geringer. Jeweils weniger als 5% nennen diese Themen an erster Stelle, wenn es darum geht, sich eine Meinung bei einem Referendum zu bilden.

Abbildung 2: Gewünschte Informationen zur Synthetischen Biologie, an erster Stelle genannt (in Prozent)



Datenbasis: Eurobarometer 73.1, 2010.

Dabei gibt es Unterschiede zwischen den Bildungsgruppen. Während ein Fünftel der Befragten in der höchsten Bildungsgruppe (19,5%) primär an wissenschaftlichen Informationen interessiert ist, sind es in der niedrigsten Bildungsgruppe deutlich weniger (7,9%). Unterschiede zwischen den Bildungsgruppen gibt es auch hinsichtlich der Bedeutung von Nutzen- und Risikoerwartungen. Während Nutzenerwartungen mit zunehmender Bildung wichtiger werden (24,5% in der untersten, 27,9% in der mittleren und 31,4% in der höchsten Bildungsgruppe), nimmt die Bedeutung von Risikoerwartungen geringfügig mit zunehmender Bildung ab.

10.3 Governance-Präferenzen

Entscheidungen über den Umgang mit neuen Technologien können auf verschiedene Weise getroffen werden. Soll der Staat durch regulative Eingriffe bestimmen, ob eine neue Technologie entwickelt oder angewendet werden darf oder soll man diese Entscheidung dem Markt über-

lassen? Wenn man diese Frage in Hinblick auf die Synthetische Biologie stellt, erhält man ein eindeutiges Bild. Acht von zehn Befragten⁸ befürworten, dass Entscheidungen über den Umgang mit dieser Technologie der Staat treffen sollte, nicht der Markt. Dabei steigt der Anteil derer, die die Aufgabe der Regulierung der Synthetischen Biologie der Politik zuweisen, mit zunehmendem Bildungsniveau. Befürworten in der niedrigsten Bildungsgruppe in Deutschland 71,6% eine strenge Regulierung durch die Regierung und nicht eine Selbstregulierung durch den Markt, sind es in der höchsten Bildungsgruppe 84,8%.

Wenn die Deutschen wie auch die anderen Europäer dafür plädieren, die Verantwortung für den Umgang mit der Synthetischen Biologie dem Staat zuzuweisen, stellt sich die Frage, nach welchen Kriterien diese Entscheidung getroffen werden sollen. Waren technologiepolitische Entscheidungen in der Vergangenheit primär durch technisch-wissenschaftliche Entscheidungskriterien geprägt, sind technologiepolitische Entscheidungsprozesse in der Gegenwart durch zwei Herausforderungen gekennzeichnet:

- (1) Seit der ersten Konsensuskonferenz⁹ in Dänemark im Jahr 1987 hat die Beteiligung der Öffentlichkeit an Entscheidungsprozessen in zahlreichen Ländern Schule gemacht (Einsiedel/Eastlick, 2000; Einsiedel et al., 2001; Einsiedel/Kamara, 2006). Auch in Deutschland wurden entsprechende Versuche, die Öffentlichkeit in Entscheidungsprozesse einzubeziehen, durchgeführt.¹⁰
- (2) An ökonomischen beziehungsweise technisch-naturwissenschaftlichen Kriterien orientierte Entscheidungsprozesse wurden durch die Forderung, auch ethische Gesichtspunkte bei technologiepolitischen Entscheidungsfindungsprozessen zu berücksichtigen, in Frage gestellt. Die zunehmende Bedeutung ethischer Gesichtspunkte bei technologiepolitischen Entscheidungsprozessen ist nicht zuletzt erkennbar an der vermehrten Gründung von Institutionen zur ethischen Bewertung neuer Technologien (Galloux et al., 2002). In Deutschland ist in

8 82% in Deutschland, 77% in der EU.

9 Konsensuskonferenzen sind Verfahren der Öffentlichkeitsbeteiligung, die zum ersten Mal im Jahr 1987 vom Danish Board of Technology durchgeführt wurden. Bei Konsensuskonferenzen diskutieren ca. 20 zufällig ausgewählte Bürgerinnen und Bürger die zu behandelnden Themen und formulieren ein gemeinsames Votum. Sachverständige sind als Informationsgeber zugelassen, nicht aber als Diskussionsteilnehmende (vgl. Einsiedel/Eastlick 2000; Einsiedel et al. 2001; Porsborg Nielsen et al., 2007).

10 Einen aktuellen international vergleichenden Überblick über die Entwicklung von Verfahren der Öffentlichkeitsbeteiligung gibt das von der EU geförderte Projekt MASIS. Unter: www.masis.eu [01.08.2012].

diesem Zusammenhang der Deutsche (ursprünglich Nationale) Ethikrat zu nennen, der beispielhaft zur Diskussion um die Forschung mit menschlichen embryonalen Stammzellen beigetragen hat.¹¹

Im Rahmen des Eurobarometers 73.1 wird daher auch gefragt, auf welcher Grundlage Entscheidungen über die Synthetische Biologie getroffen werden sollten. Dabei wird zum einen gefragt, ob Entscheidungen über die Synthetische Biologie hauptsächlich auf der Grundlage wissenschaftlicher Evidenz getroffen werden sollten oder auf der Grundlage von ethisch-moralischen Überlegungen. Zum anderen wird gefragt, ob Entscheidungen über die Synthetische Biologie primär auf dem Ratschlag von ausgewiesenen Fachleuten basieren sollen oder auf der Mehrheitsmeinung in einem Land.

Bei den Ergebnissen gibt es hinsichtlich der Rolle ethisch-moralischer Überlegungen beträchtliche Unterschiede zwischen Europa und Deutschland. Während die Europäer mehrheitlich (52,4%) der Auffassung sind, dass Entscheidungen vor allem auf wissenschaftlicher Evidenz basieren sollen und nur ein Drittel (33,7%) ethisch-moralischen Gesichtspunkten den Vorzug gibt, ist in Deutschland die Situation umgekehrt. Mehr als die Hälfte der Deutschen (52,3%) präferiert ethisch-moralische Gesichtspunkte gegenüber wissenschaftlicher Evidenz (34,5%) als primäres Entscheidungskriterium.

Nicht ganz so stark sind die Unterschiede zwischen Deutschland und Europa, wenn gefragt wird, ob Entscheidungen eher auf dem Rat von Fachleuten oder auf der Mehrheitsmeinung der Bevölkerung basieren sollten. Während die Europäer eindeutig für Entscheidungen auf der Basis von wissenschaftlicher Evidenz plädieren (58,8%) und weniger als ein Drittel (29%) Entscheidungen auf der Basis von Mehrheitsmeinungen präferiert, sind in Deutschland die Unterschiede wesentlich kleiner. Hier präferieren 46% Entscheidungen, die auf dem Rat von Fachleuten beruhen und mit immerhin 41,1% deutlich mehr als sonst in Europa Entscheidungen auf der Grundlage der öffentlichen Meinung. Wenn man beide Prinzipien kombiniert, erhält man folgende Vier-Felder Tafel mit vier möglichen Governance-Typen:

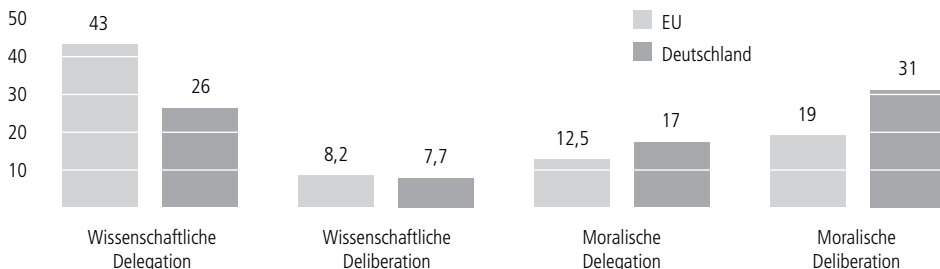
11 Unter: www.ethikrat.org/themen/forschung-und-technik/stammzellforschung [20.06.2012].

Tabelle 1: Präferenzen für Bewertungskriterien für gentechnologische Anwendungen

▼ Kriterium	Basis ▶	Expertenmeinung	Mehrheitsmeinung
Wissenschaftliche Evidenz		(1) Wissenschaftliche Delegation	(2) Wissenschaftliche Deliberation
Ethisch-Moralische Bewertung		(3) Moralische Delegation	(4) Moralische Deliberation

Den ersten Typ (Wissenschaftliche Delegation) bilden diejenigen Befragten, die Entscheidungen auf der Grundlage von wissenschaftlichen Kriterien und dem Rat von ausgewiesenen Fachleuten favorisieren. Den zweiten Typ (Wissenschaftliche Deliberation) bilden diejenigen Befragten, die ebenfalls Entscheidungen auf der Grundlage wissenschaftlicher Evidenz bevorzugen, aber hier die Mehrheitsmeinung in der Bevölkerung berücksichtigt sehen wollen. Den dritten Typ (Moralische Delegation) bilden diejenigen Befragten, die für die Dominanz ethisch-moralischer Kriterien bei der Entscheidungsfindung plädieren und hier die Meinung von Sachverständigen höher einschätzen als die Mehrheitsmeinung in der Öffentlichkeit. Der vierte Typ (Moralische Deliberation) plädiert für Entscheidungen auf der Grundlage ethisch-moralischer Bewertungen und der Mehrheitsmeinung in der Bevölkerung. Der erste und der vierte Typ stellen gewissermaßen ein Gegensatzpaar dar, an wissenschaftlichen Kriterien orientierte Expertokratie auf der einen und auf ethisch-moralische Deliberation auf der anderen Seite. Vergleicht man, wie sich diese Governance-Typen auf Deutschland und Europa verteilen, fallen deutliche Unterschiede auf:

Abbildung 3: Governance-Präferenzen für die Synthetische Biologie in Deutschland und Europa (in Prozent)



Datenbasis: Eurobarometer 73.1, 2010.

Die Unterschiede zwischen Europa und Deutschland sind eklatant. Während in Europa¹² das Modell der Wissenschaftlichen Delegation die größte Zustimmung findet, ist es in Deutschland das Modell der Moralischen Deliberation, das immerhin ein Drittel der Befragten auf sich vereinigt. Es ist wenig überraschend, dass Wissenschaftliche Deliberation auf wenig Zustimmung stößt. Überraschend ist aber auch, dass das politisch erfolgreiche Modell der moralischen Delegation, das etwa der Gründung von Ethikräten zugrunde liegt (vgl. Galloux et al., 2002), in der Öffentlichkeit nur auf geringe Zustimmung stößt.

Dabei plädieren religiöse Menschen stärker für moralische Urteilkriterien, während die weniger religiösen Personen eher für wissenschaftliche Urteilkriterien eintreten. Während die Äußerung einer Präferenz für deliberative Verfahren (wissenschaftliche oder moralische Deliberation) nur vergleichsweise wenig von der Religiosität abhängt, finden wir deutliche Unterschiede bei der Präferenz für Wissenschaftliche oder Moralische Delegation: für Moralische Delegation plädieren nur 11,3% derjenigen, die nie Gottesdienste besuchen, aber mehr als ein Viertel (29%) derjenigen, die mindestens einmal wöchentlich einen Gottesdienst besuchen. Umgekehrt plädieren 31,4% derer, die angeben, nie einen Gottesdienst zu besuchen und 31%, die dieses höchstens einmal jährlich tun, für Wissenschaftliche Delegation, während dies weniger als 20% derjenigen tun, die öfter als einmal im Monat an einem Gottesdienst teilnehmen.

Ein überraschendes Ergebnis erhalten wir, wenn wir die Präferenz für einen der vier Governance-Modi in Abhängigkeit vom Bildungsniveau betrachten. Anders als erwartet plädieren Befragte in der niedrigsten Bildungskategorie zu 43,5% für Moralische Deliberation, während in der höchsten Bildungsgruppe nur 16,9% dieses Governance-Prinzip vorziehen.¹³ Besser Gebildete plädieren dagegen für wissenschaftliche Delegation als Governance-Prinzip (31,7%), während nur halb so viele (16,5%) in der niedrigsten Bildungsgruppe für wissenschaftliche Delegation plädieren.

12 Die Unterschiede zwischen Deutschland und Europa wären noch größer, wenn aus den europäischen Zahlen die Deutschen herausgerechnet würden. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit anderen Zahlen wurde hier darauf verzichtet.

13 Einen umgekehrten Effekt gibt es bei der moralischen Delegation. Hier ist die Zustimmung in der höchsten Bildungsgruppe doppelt so hoch wie in der niedrigsten Bildungsgruppe (21,7% gegenüber 10,7%).

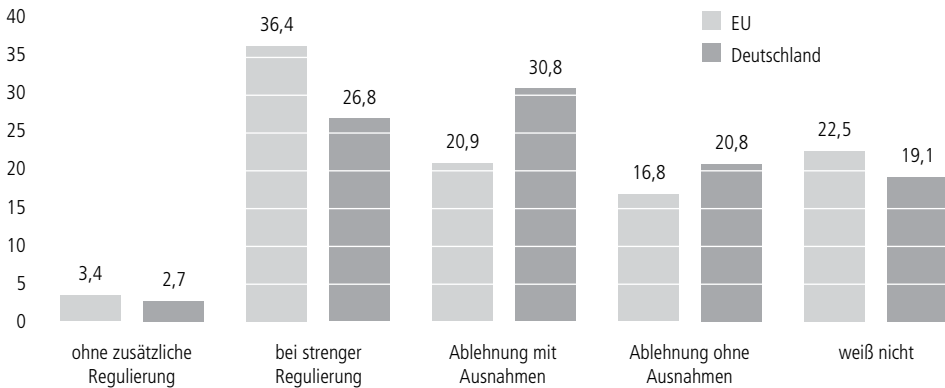
10.4 Bewertung der Synthetischen Biologie

Wie stehen die Europäer der Synthetischen Biologie gegenüber? In der Eurobarometer-Befragung 2010 wurde der Erkenntnis Rechnung getragen, dass die Befürwortung oder Ablehnung einer Technologie kontextuell variiert. Es wurde daher indirekt nach der Regulierung der Synthetischen Biologie gefragt. Dabei bestand die Wahl zwischen vier verschiedenen Alternativen:

- (1) Befürwortung der Synthetischen Biologie – weitergehende Regulierungen werden nicht für erforderlich gehalten
- (2) Befürwortung der Synthetischen Biologie – unter der Bedingung einer strengen Regulierung
- (3) Ablehnung der Synthetischen Biologie – mit der Bereitschaft zur Zustimmung in begründeten Einzelfällen
- (4) Ausnahmslose Ablehnung der Synthetischen Biologie

Betrachtet man die Zustimmung zur Synthetischen Biologie auf der europäischen Ebene (EU 27), findet sich ein ambivalentes, leicht positives Meinungsbild (siehe Abbildung 4). Zwar unterstützen nur 3,4% der Europäer die Synthetische Biologie uneingeschränkt, aber ein weiteres Drittel unterstützt die Synthetische Biologie, wenn sie strenger reguliert wird. Ungefähr genauso viele wenden sich gegen die Synthetische Biologie, wobei die moderate Ablehnung, die Ausnahmen zulässt, mit 21% verbreiteter ist als die konsequente Ablehnung, die keine Ausnahme zulässt (17%). In Anbetracht der verbreiteten Unbekanntheit der Synthetischen Biologie in der Öffentlichkeit ist es nicht überraschend, dass sich beinahe ein Viertel der Befragten außerstande sieht, hier ein Urteil abzugeben.

In Deutschland wird die Synthetische Biologie weniger positiv gesehen. Zwar ist der Anteil derer, die die Synthetische Biologie ohne Einschränkung unterstützen, mit 2,7% nur geringfügig niedriger als im EU-Durchschnitt, aber nur jeder Vierte (26,8%) – und damit 10% weniger als im EU-Durchschnitt – äußert sich eingeschränkt positiv zur Synthetischen Biologie. Die Mehrheit der Befragten äußert sich ablehnend zur Synthetischen Biologie, 30,8% halten Ausnahmen für möglich, während ein Fünftel der Deutschen die Synthetische Biologie ohne Einschränkung ablehnt. Geringer als im europäischen Durchschnitt, aber immer noch relativ hoch, ist mit einem weiteren Fünftel der Anteil derjenigen, die sich außerstande sehen, ein Urteil abzugeben.

Abbildung 4: Einstellungen zur Synthetischen Biologie in Deutschland und Europa (in Prozent)

Datenbasis: Eurobarometer 73.1, 2010.

Betrachtet man die anderen europäischen Länder, sind die Unterschiede bei der unbedingten Zustimmung nicht sehr groß. Nur in einem Land, in Estland, befürworten mehr als 5% (5,9%) der Befragten uneingeschränkt die Synthetische Biologie. Dagegen finden wir erhebliche Unterschiede in der eingeschränkten Befürwortung beziehungsweise der eingeschränkten Ablehnung der Synthetischen Biologie. Die eingeschränkte Zustimmung ist in keinem EU-Land seltener als in Deutschland. Nur 26,8% der Deutschen, aber 48% der Portugiesen, 47,3% der Belgier, 44,8% der Ungarn, 44,3% der Dänen, 44% der Franzosen und 41,7% der Briten befürworten die Synthetische Biologie, sofern sie strenger reguliert wird. Ähnlich niedrig wie in Deutschland ist der Anteil der moderaten Befürworter nur noch in Polen (28,5%), wobei aber festzuhalten ist, dass in Polen der Anteil Meinungsloser mit fast einem Drittel (31,4%) deutlich größer ist als in Deutschland.

Erhebliche Unterschiede gibt es auch in der ausnahmslosen Ablehnung der Synthetischen Biologie. Während, wie bereits erwähnt wurde, in Deutschland jeder Fünfte prinzipiell die Synthetische Biologie ablehnt, ist es auf der iberischen Halbinsel nur jeder Zehnte (Portugal 9,8%, Spanien 11,4%). Ähnliche Ablehnungsquoten finden wir in einigen osteuropäischen Ländern wie Ungarn (8,8%), Rumänien (11,4%) und der Slowakei (12,8%). Besonders verbreitet ist die generelle Ablehnung der Synthetischen Biologie in so unterschiedlichen Ländern wie Slowenien

(36,9%), Zypern (33,6%) und Griechenland (26,8%). Ähnlich wie in Deutschland ist die Ablehnung in Dänemark (21,4%), Italien (18,8%), den Niederlanden (20,7%) und Polen (18,2%). In Frankreich (16,5%), Belgien (15,2%) und dem Vereinigten Königreich (14,7%) ist die Ablehnung dagegen weniger verbreitet.

Bilanziert man Zustimmung und Ablehnung, erhalten wir aufgrund der geringen Zustimmung zur Synthetischen Biologie das Ergebnis, dass in keinem europäischen Land die Synthetische Biologie kritischer bewertet wird als in Deutschland, mit einer Negativbilanz von minus 22¹⁴ (vgl. Gaskell et al., 2010:34). Am höchsten ist die Zustimmung mit einer Positivbilanz von plus 27 in Portugal, während in der EU insgesamt ein ausbalanciertes Meinungsbild dominiert.

Wie oben gezeigt wurde, haben religiös orientierte Menschen gegenüber weniger religiös Eingestellten eine stärkere Präferenz für ethisch-moralische Bewertungskriterien. Wirkt sich dies auch auf die Bewertung der Synthetischen Biologie aus? Insgesamt ist festzuhalten, dass eine kategorische Ablehnung der Synthetischen Biologie auch bei sehr religiösen Menschen nur eine Minderheitenposition ist. Ein knappes Viertel derjenigen, die mindestens einmal in der Woche an Gottesdiensten teilnehmen (22,8%), ist grundsätzlich gegen die Synthetische Biologie eingestellt, aber der Anteil derer, die sie mehr oder weniger stark unterstützen, ist etwas größer (25,7%).¹⁵ Fasst man jeweils zustimmende und ablehnende Kategorien¹⁶ zusammen, zeigt sich das überraschende Bild, dass die religiöseste Gruppe mit 43,8% die Synthetische Biologie seltener ablehnt als die weniger religiös Orientierten (zwischen 50,6% und 51,4%). Die stärkste Ablehnung zeigen dagegen diejenigen, die nach eigener Aussage nie an Gottesdiensten teilnehmen (55,6%). Das gleiche Bild zeigt sich, wenn man die Zustimmung zur Synthetischen Biologie betrachtet. Auch hier sind die sehr Religiösen und die gar nicht Religiösen die kritischsten (26,1% Zustimmung bei den gar nicht Religiösen; 28,3% bei denjenigen, die mindestens einmal in der Woche und 28,3% Zustimmung bei denjenigen, die mindestens einmal im Quartal an Gottesdiensten teilnehmen). Dagegen befürwortet rund ein Drittel derjenigen, die weniger

14 Berechnung: Zustimmung minus Ablehnung.

15 Die beiden positiven Statements (Zustimmung bei strenger Regulierung, Zustimmung ohne spezielle Regulierungserfordernis) wurden hier zusammengefasst.

16 Dazu wurden die Antwortkategorien „Befürwortung ohne zusätzliche Regulierung“ und „Befürwortung bei strengerer Regulierung“ zu einer Kategorie „Befürwortung“ sowie die Kategorien „Ablehnung mit Ausnahmen“ und Ablehnung ohne Ausnahmen“ zu einer Kategorie „Ablehnung“ zusammengefasst.

als einmal im Jahr (34,1%) oder nur an Festtagen (32,1%) an Gottesdiensten teilnimmt, die Synthetische Biologie.

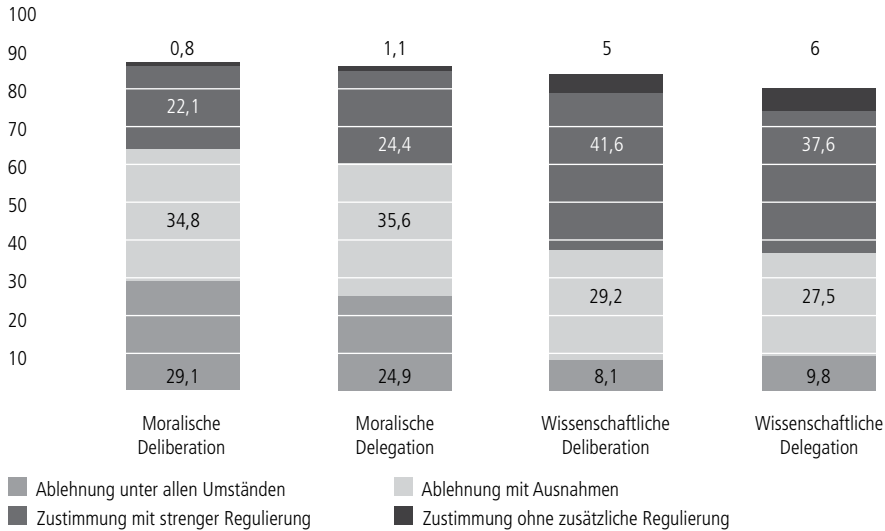
Wie bei vielen anderen Untersuchungen zu Technikeinstellungen sind Männer positiver eingestellt als Frauen, was nicht an einer gegenüber Männern höheren Ablehnung bei Frauen liegt, sondern an einem höheren Anteil Unentschiedener bei Frauen (22,3% gegenüber 16%) und einem höheren Anteil Befürworter bei Männern (33,7% gegenüber 24,5%).

Höher Gebildete stehen der Synthetischen Biologie positiver gegenüber als weniger gut Gebildete, was aber nicht bedeutet, dass weniger Gebildete die Synthetische Biologie in höherem Maße ablehnen als höher Gebildete. Der Anteil derer, die die Synthetische Biologie ohne Einschränkung ablehnen, ist in der niedrigsten Bildungsgruppe mit 23,3% zwar höher als in der höchsten Bildungsgruppe (17,9%), dafür ist die bedingte Ablehnung, die auch Ausnahmen toleriert, in der höchsten Bildungsgruppe deutlich verbreiteter (33,3%) als in der niedrigsten Bildungsgruppe (26,9%), sodass der Anteil derjenigen, die der Synthetischen Biologie ablehnend gegenüberstehen,¹⁷ mit rund 50% unabhängig vom Bildungsniveau ist. Dagegen ist bei höher Gebildeten die Zustimmung insgesamt höher als bei den weniger Gebildeten (35,8% Zustimmung gegenüber 25,4%). Das gleiche Muster – keine Bildungsunterschiede bei der Ablehnung, geringere Zustimmung bei den weniger Gebildeten – zeigt sich auch auf der europäischen Ebene.

Haben wir in Deutschland eine kurvilineare Beziehung zwischen der Religiosität und der Bewertung der Synthetischen Biologie, bei der die Religiösen ebenso wie die Nicht-Religiösen am kritischsten sind und die wenig Religiösen der Synthetischen Biologie am positivsten gegenüberstehen, gibt es in Europa insgesamt eine einfache lineare Beziehung zwischen der Ablehnung der Synthetischen Biologie und der Religiosität. Anders als in Deutschland, wo die Nicht-religiösen besonders kritisch eingestellt sind, sind in Europa die gar nicht Religiösen die der Synthetischen Biologie gegenüber am positivsten eingestellte Gruppe (42,7%), während diejenigen, die öfter als einmal im Vierteljahr an Gottesdiensten teilnehmen, am seltensten eine positive Einstellung zur Synthetischen Biologie haben (35%).

17 Die beiden ablehnenden Statements (Ablehnung unter allen Umständen, Ablehnung mit Ausnahmen) wurden dabei zusammengefasst.

Abbildung 5: Zustimmung zur Synthetischen Biologie in Deutschland nach Governance-Präferenzen (in Prozent)



Datenbasis: Eurobarometer 73.1, 2010.

Gibt es eine Beziehung zwischen den Governance-Präferenzen und der Zustimmung zur Synthetischen Biologie? In Deutschland, das sich hier nur wenig vom europäischen Muster unterscheidet, erhalten wir ein relativ einheitliches Bild. Wie Abbildung 5 zeigt, ist der Unterschied zwischen den beiden Varianten Deliberation und Delegation nur gering. Wichtig ist dagegen, welches Urteilkriterium präferiert wird. Eine Präferenz für ethisch-moralische Urteilkriterien führt zu ablehnenden Urteilen, wenn auch die moderate Ablehnung dominiert, während eine Präferenz für wissenschaftliche Urteilkriterien mit zustimmenden Urteilen verbunden ist. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine unbedingte Zulassung der Synthetischen Biologie selbst bei ihren Befürwortern eine Minderheitenposition ist.

Betrachten wir statt Deutschland die Europäische Union, finden wir ein ähnliches Bild, aber einige interessante Unterschiede. Während sich die Anteile derer, die ohne weitere Einschränkungen der Synthetischen Biologie zustimmen, kaum unterscheiden, finden wir deutlichere Unterschiede bei der bedingten Zustimmung, und hier vor allem bei denjenigen, die sich

für die Governance-Prinzipien moralische und wissenschaftliche Delegation entschieden haben. Während der Anteil derjenigen, die für der synthetischen Biologie eingeschränkt zustimmen, bei den Befürworter des Governance-Prinzips moralische Delegation in der EU mit 33,9% deutlich höher ist als in Deutschland (24,4%), ist die eingeschränkte Zustimmung zur Synthetischen Biologie in Europa bei den Befürwortern des Governance-Prinzips „wissenschaftliche Delegation“ mit 48,7% deutlich größer als in Deutschland (37,6%). Demgegenüber ist bei dieser Gruppe die eingeschränkte Ablehnung mit 17,5% deutlich niedriger als in Deutschland (27,5%). Das heißt, die Zustimmung zu einem wissenschaftlich dominierten Governance-Prozess ist in Europa wesentlich stärker mit einer Zustimmung zur Synthetischen Biologie verbunden als in Deutschland.

10.5 Diskussion

Ob sich die Synthetische Biologie entwickeln wird wie die grüne Gentechnologie, bei der gesellschaftlicher Widerstand zu einer Blockade geführt hat, oder wie die Anwendung der Gentechnik in der Pharmaforschung, die von einer breiten Mehrheit getragen wird, ist auch abhängig von der Entwicklung, die die Synthetische Biologie in Zukunft nehmen wird. Auch wenn derzeit noch offen ist, wie sich die gesellschaftlichen Reaktionen auf die Synthetische Biologie in Zukunft entwickeln werden, gibt es doch bereits jetzt Hinweise auf einige Rahmenbedingungen.

Die Synthetische Biologie wird nicht vorbehaltlos unterstützt. Es gibt eine eindeutige Forderung an die Politik, die Regulierung der Synthetischen Biologie in die Hand zu nehmen. Selbstregulierung dieser Technologie durch den Markt wird von einer deutlichen Mehrheit der Deutschen wie der Europäer insgesamt abgelehnt. Der Wunsch nach einer gesetzlichen Regulierung der Synthetischen Biologie zeigt sich eindeutig auch an der Bewertung dieser Technologie. Bedingungslose Befürwortung oder Ablehnung sind Minderheitenpositionen, während die Mehrheit entweder eine positive Einstellung zur Synthetischen Biologie hat, wenn diese streng reguliert ist, oder eine ablehnende Haltung zu dieser Technologie hat, aber Ausnahmen zulässt. Das heißt, dass sich die Synthetische Biologie gesellschaftlich legitimieren muss, wenn sie in Zukunft akzeptiert werden will. Gesellschaftliche Diskussion und die diese berücksichtigende Regulierung sind kein Hemmnis, sondern Voraussetzung für Innovation.

Bei der Kommunikation über die Synthetische Biologie geht es nicht primär um die Vermittlung der wissenschaftlichen Grundlagen der Synthetischen Biologie. Erwartet werden eher

Informationen über Nutzen und Risiken der Synthetischen Biologie. Es wäre voreilig, aus der geringen Bedeutung ethischer Aspekte bei den direkten Informationsbedürfnissen zu schließen, dass ethische Gesichtspunkte bei der Beurteilung der Synthetischen Biologie keine Rolle spielen (vgl. zu ethischen Aspekten Kapitel 7 in diesem Band).

Gegen die Vernachlässigung ethischer Aspekte gerade in Deutschland spricht eindeutig der signifikant höhere Anteil derer, die ethischen Gesichtspunkten für die Regulierung der Synthetischen Biologie eine große Bedeutung beigemessen. Anders als in Europa, wo es eine klare Präferenz für eine an wissenschaftlichen Kriterien orientierte Regulierung gibt, sind in Deutschland ethische und wissenschaftliche Kriterien als Entscheidungsgrundlage für Regulierungen für jeweils annähernd gleich große Bevölkerungsgruppen von zentraler Bedeutung. Wie die gesellschaftliche Zukunft der Synthetischen Biologie aussehen wird, ist daher wesentlich davon abhängig, dass es der Wissenschaft gelingt, im öffentlichen Diskurs nicht nur die wissenschaftlichen Fragen zu klären, sondern auch ethische Bedenken aufzugreifen und darauf angemessen zu reagieren (vgl. Torgersen/Hampel, 2012).

10.6 Literatur

DFG et al. (2009): Synthetische Biologie. Stellungnahme. Weinheim.

Einsiedel, E. et al. (2001): Publics at the technology table: the consensus conference in Denmark, Canada, and Australia. In: *Public Underst Sci* 10(1):83–98.

Einsiedel, E./ Eastlick, D. L. (2000): Consensus Conferences as Deliberative Democracy. A Communication Perspective. In: *Science Communication* 21(4):323–343.

Einsiedel, E./Kamara, W. M. (2006): Coming of Age of Public Participation. In: Gaskell, G./Bauer, M. W. (eds.): *Genomics & Society. Legal, Ethical and Social Dimensions*. London:95–112.

Galloux, J.-C. et al. (2002): The institutions of bioethics. In: Bauer, M.W./Gaskell, G. (eds.): *Biotechnology. The making of a global controversy*. Cambridge:129–148.

Gaskell, G. et al. (1997): Europe's ambivalent on biotechnology. In: *Nature* 387(6636):845–848.

Gaskell, G. et al. (2010): Europeans and biotechnology in 2010. Winds of change? A report to the European Commission's Directorate-General for Research. Luxembourg.

Gschmeidler, B./Seiringer, A. (2012): „Knight in shining armour“ or „Frankenstein's creation“? The coverage of synthetic in German-language media. In: *Public Underst Sci* 21(2):163–173.

Hampel, J./Pfenning, U. (1999): Einstellungen zur Gentechnik. In: Hampel, J./Renn, O. (Hrsg.): *Gentechnik in der Öffentlichkeit. Wahrnehmung und Bewertung einer umstrittenen Technologie*. Frankfurt/New York: 28–55.

Nielsen, A. P. et al. (2007): Democracy at its best? The consensus conference in a cross-national perspective. In: *J Agr Environ Ethics* (20):13–35.

Pei, L. et al. (2012): Synthetic biology in the view of European public funding organisations. In: *Public Underst Sci* 21(2):149–162.

Torgersen, H. (2009): Synthetic Biology in Society: Learning from Past Experience? In: *Syst Synth Biol* 3(1):9–17.

Torgersen, H./Hampel, J. (2012): Calling controversy. Assessing synthetic biology's conflict potential using the Gate Resonance model of technology controversies. In: *Public Underst Sci* 21(2):134–158.

Wynne, B. (1991): Knowledges in Context. In: *Sci technol Hum Val* 16(1):111–121.

Anja Hümpel, Julia Diekämper

11. Daten zu ausgewählten Indikatoren

11.1 Einführung und Übersicht

Die besondere Aufgabe des „Gentechnologieberichts“ besteht darin, das komplexe Feld der Gentechnologie in Deutschland in einer messbaren und repräsentativen Form für fachlich Interessierte aufzuschließen. Qualitative Beschreibungen von einschlägigen Sachverständigen werden deshalb in der Publikationsreihe der Arbeitsgruppe mit einem sozialwissenschaftlich motivierten Langzeit-Monitoring verknüpft. Aktuelle Problemfelder der Synthetischen Biologie wurden ermittelt und werden in einem zweiten Schritt mithilfe relevanter Indikatoren ausgeleuchtet (siehe Kapitel 2 in diesem Band).

Die Beschreibung eines Problemfeldes mittels Indikatoren ist dabei das erklärte Ziel und die besondere Leistung des „Gentechnologieberichts“. Allerdings lassen sich generell nicht allen Problemfeldern in gleichem Ausmaß geeignete Indikatoren zuordnen oder es fehlen verlässliche empirische Daten. Für die Synthetische Biologie im Besonderen erweist sich die relative „Neuheit“ des Fachgebietes und die noch nicht beendete Debatte um dessen eigentlichen Charakter als problematisch. Verfügbare empirische Daten werden (noch) nicht dezidiert dem Themenbereich der Synthetischen Biologie zugeordnet. Hier wird nur ein langfristiges Monitoring die Entwicklungen der Disziplin abbilden können. Die Zuordnung der einzelnen Indikatoren zu Problemfeldern wird durch nachfolgende tabellarische Übersicht vorgestellt (Tabelle 1). Diese bildet die inhaltliche Sortierung der Problemfelder ab, wie sie in Kapitel 2 vorgestellt wurden. Des Weiteren werden die einzelnen Problemfelder beschrieben und mit möglichen Indikatoren verknüpft.

Tabelle 1: Problemfelder der Synthetischen Biologie und Indikatoren zu ihrer Beschreibung

Problemfeld	Beschreibung	Indikatoren
	Beschreibung und Eingrenzung des Problemfeldes	Nicht für alle Problemfelder lassen sich Indikatoren finden, die eine quantitative Erfassung erlauben. Falls ein Ausmessen eines der Problemfelder mittels Indikatoren nicht möglich ist oder nicht die zu erfordernde Präzisierung erbringt, muss auf qualitative Beschreibungen zurückgegriffen werden. Verfügbare Indikatoren sind fett unterlegt und werden in den nachfolgenden Indikatorenblättern detailliert vorgestellt.
Ökonomische Dimension <-> Wissenschaftliche Dimension		
Deutschland als Biotech- nologiestandort	Die Synthetische Biologie wird gegenwärtig als wichtige Komponente einer zukünftigen wissensbasierten Bioökonomie in Deutschland beworben.	Gewinne von Firmen in Deutschland Anzahl offener Stellen im Bereich Forschung und Entwicklung in Deutschland Anzahl kommerziell Beschäftigter in Deutschland
Open Access	Die Synthetische Biologie strebt ein Höchstmaß an Transparenz ebenso an wie freien Zugang zu Daten, Materialien und Methoden.	Größe der „Registry of biological parts“ bzw. ihr deutscher Anteil
Patentproblematik	Patente sind Ausdruck eines wirtschaftlichen und innovativen Forschungsgeschehens.	Anzahl an deutschen Patenten im internationalen Vergleich
Forschungsstandort Deutschland	Das noch junge Forschungsgebiet der Synthetischen Biologie benötigt in Deutschland eine gesicherte Förderung von Forschung und Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses, um im internationalen Vergleich erfolgreich zu sein.	Anzahl der Studierenden/ Professuren Anzahl einschlägiger Forschungseinrichtungen Höhe der Förderungen durch Stiftungen Anzahl internationaler Fachpublikationen zur Synthetischen Biologie (01) Anzahl an Teams im internationalen studentischen iGEM-Wettbewerb (04) EU-Fördermaßnahmen für Forschungsprojekte mit deutscher Beteiligung zum Thema Synthetische Biologie (05)

Anwendungshorizonte	Die Anwendungsmöglichkeiten der Synthetischen Biologie versprechen sehr weitgefächert zu sein. Bislang allerdings findet Grundlagenforschung statt.	Anzahl bzw. Umsatz an vermarkteten Produkten Medikamentenzulassungen Anwendung von synthetischen Alternativen im Vergleich mit herkömmlichen Arzneimitteln Umsatz an alternativen Biokraftstoffen im Vergleich zu herkömmlichen fossilen Kraftstoffen
Soziale Dimension ↔ Wissenschaftliche Dimension		
Dialogverpflichtung der Forschung	Vertreter der Synthetischen Biologie legen sich fest auf die Notwendigkeit, ethische und gesellschaftliche Aspekte der neuen Technologien frühzeitig in einem wechselseitigen Austausch zwischen Gesellschaft, Politik und Wissenschaft mitzutragen.	Öffentliche Veranstaltungen zur Synthetischen Biologie in Deutschland (07) Selbstverpflichtungen von Seiten der Forschung
Öffentliche Wahrnehmung und Bewertung	Der Einsatz und die Etablierung neuer technologischer Verfahren hängen zentral von deren gesellschaftlicher Wahrnehmung ab. Sie zeigen zudem, welche Hoffnungen und Befürchtungen diesbezüglich in der Bevölkerung kursieren.	Anzahl an deutschen Presseartikeln zur Synthetischen Biologie (02) Anzahl an deutschen Buchveröffentlichungen zur Synthetischen Biologie (03) Bibliotheksbestände Öffentliche Veranstaltungen zur Synthetischen Biologie in Deutschland (07) Durchschnittliche Anzahl an Suchergebnissen bei der Stichwortsuche „Synthetische Biologie“ in populären Internet-Suchmaschinen (09)
Utopie der Lösung globaler Probleme	Gegenwärtig kursieren visionäre Vorstellungen bezüglich zukünftiger Potenziale der Synthetischen Biologie. Diese versprechen globale Problemlagen wie zum Beispiel Nahrungsmittelknappheit lösen zu können.	Medienanalyse der präsentierten Zukunftsvisionen und tatsächlich realisierten Anwendungen aus der Synthetischen Biologie über die Jahre Anzahl und Umsatz erfolgreich vermarkteter Ideen deutscher iGEM-Teams im internationalen Vergleich Verringerung des Schadstoffausstoßes durch Verwendung alternativer Biokraftstoffe im Vergleich zu herkömmlichen fossilen Kraftstoffen Kosten und Erfolgsraten von Therapien realisiert durch Anwendungen der Synthetischen Biologie im Verhältnis zu herkömmlichen Therapien

<p>Gesetzlicher Rahmen</p>	<p>Die zurzeit noch unscharfe Abgrenzung der Synthetischen Biologie zur bekannten Gentechnologie verlangt eine Auseinandersetzung mit den gegenwärtigen nationalen wie transnationalen gesetzlichen Rahmenbedingungen, um dauerhaft einen sicheren Umgang mit der noch jungen Forschungsdisziplin gewährleisten zu können.</p>	<p>Stellungnahmen zur Regelungsnotwendigkeit der Synthetischen Biologie (08)</p> <p>Entwicklung der gesetzlichen Regelungen zum wissenschaftlichen Arbeiten bzw. zum Qualitätsmanagement für die Synthetische Biologie in Deutschland</p> <p>Selbstverpflichtungen von Wissenschaft und Forschung in Deutschland</p>
<p>Sicherheitsforschung</p>	<p>Die Synthetische Biologie birgt zum einen das Problem, in ihrer Anwendung un-intendierten Schaden zu verursachen, zum anderen lässt sie sich potenziell zu Missbrauchszwecken verwenden.</p>	<p>Entwicklung der gesetzlichen Regelungen für die Synthetische Biologie in Deutschland</p> <p>Förderung der Sicherheitsforschung im Bereich der Synthetischen Biologie</p>
<p>Forschungsidentität / Forschungsethos</p>	<p>Die Synthetische Biologie fördert ein im Vergleich zur etablierten gentechnologischen Forschung anders gestaltetes Verständnis von Wissenschaft. Dieses bezieht sich auf die Struktur, die Ausrichtung und Organisation des Faches.</p>	<p>Anzahl an interdisziplinären Projekten der Synthetischen Biologie im Vergleich mit anderen Disziplinen der Lebenswissenschaften in Deutschland</p> <p>Vergleich der universitären Ausbildungsstrukturen im Bereich der Lebenswissenschaften in Deutschland mit Fokus auf Synthetische und Systembiologie (Anzahl an Studierenden/Pro-movierenden, beteiligte Fachrichtungen)</p> <p>Analyse der Selbstdarstellung der Synthetischen Biologen in den Medien und eigenen Stellungnahmen über die Jahre</p>
<p>Realisierung wissenschaftlicher Ziele</p>	<p>Wissenschaftliche Zielsetzungen und konkret etablierte Anwendungen sind für Nicht-fachleute schwer zu unterscheiden. Zum Wesen der wissenschaftlichen Forschung gehört es, dass nicht alle Zielsetzungen erreicht werden.</p>	<p>Anzahl an deutschen Patenten im Bereich der Synthetischen Biologie im internationalen Vergleich</p> <p>Anzahl an Freisetzungsexperimenten für die Synthetische Biologie für Deutschland im weltweiten Vergleich</p> <p>Anzahl internationaler Fachpublikationen zur Synthetischen Biologie (01)</p> <p>EU-Fördermaßnahmen für Forschungsprojekte mit deutscher Beteiligung zum Thema Synthetische Biologie (05)</p>

Ethische Dimension <-> Wissenschaftliche Dimension		
Ethischer Umgang mit Leben	Die Bedeutung des Lebensbegriffs für die SB macht es notwendig zu klären, ob und unter welchen Voraussetzung „Leben“ im normativ folgenreichen Sinn zu schützen ist.	Literatur mit Fokus auf ethisch/ moralischen Aspekten der SB Förderung der bioethischen Begleitforschung für die Synthetische Biologie (06)
Lebensbegriff	Die Synthetische Biologie hat sich zum Ziel gesetzt völlig neuartige biologische Systeme im Labor hervorzubringen. Dabei geht es zum einen darum, zu klären, was Leben ist und zum anderen, wie in Folge dessen vom Menschen entwickelte biologische Systeme hier einzuordnen sind.	Anzahl entwickelter synthetischer Lebensformen im internationalen Vergleich in Abgrenzung zu herkömmlichen gentechnisch veränderten Organismen Analyse der einschlägigen Fachliteratur zur Definition des Lebensbegriffs in den Lebenswissenschaften über die Jahre Förderung der bioethischen Begleitforschung für die Synthetische Biologie (06)
Abgrenzung von Natur und Technik/Kultur	Die Herstellung von „Leben“ im Labor eröffnet auch neuen Fragen nach der Trennlinie zwischen dem, was natürlich und dem, was künstlich ist.	Entwicklung der gesetzlichen Regelungen für die Synthetische Biologie in Deutschland und weltweit Analyse der einschlägigen Fachliteratur zur Definition von Organismus und Maschine für die Synthetische Biologie über die Jahre Förderung der bioethischen Begleitforschung für die Synthetische Biologie (06)

11.2 Daten zu Forschungsstandort Deutschland, Realisierung wissenschaftlicher Ziele, Öffentliche Wahrnehmung und Bewertung, gesetzlicher Rahmen, ethischer Umgang mit Leben, Lebensbegriff, Abgrenzung von Natur und Technik/Kultur und Dialogverpflichtung

Mittels standardisierter Datenblätter werden bestimmte Indikatoren nachfolgend vorgestellt. Die Rubriken „Abgrenzung der Berechnungsgrößen“ und „Aussagefähigkeit“ bilden in Analogie zu vorangegangenen Themenbänden der interdisziplinären Arbeitsgruppe „Gentechnologiebericht“ den interpretativen Rahmen. Da einige Problemfelder eng miteinander verwoben sind, können einzelne Indikatoren zur Beschreibung mehrerer Problemfelder herangezogen werden.

Forschungsstandort Deutschland

- ▶ Anzahl internationaler Fachpublikationen zur Synthetischen Biologie (01)
- ▶ Anzahl an Teams im internationalen studentischen iGEM-Wettbewerb (04)
- ▶ EU-Fördermaßnahmen für Forschungsprojekte mit deutscher Beteiligung zum Thema Synthetische Biologie (05)

Realisierung wissenschaftlicher Ziele

- ▶ Anzahl internationaler Fachpublikationen zur Synthetischen Biologie (01)
- ▶ EU-Fördermaßnahmen für Forschungsprojekte mit deutscher Beteiligung zum Thema Synthetische Biologie (05)

Öffentliche Wahrnehmung und Bewertung

- ▶ Anzahl an deutschen Presseartikeln zur Synthetischen Biologie (02)
- ▶ Anzahl an deutschen Buchveröffentlichungen zur Synthetischen Biologie (03)
- ▶ Öffentliche Veranstaltungen zur Synthetischen Biologie in Deutschland (07)
- ▶ Durchschnittliche Anzahl an Suchergebnissen bei der Stichwortsuche „Synthetische Biologie“ in populären Internet-Suchmaschinen (09)

Gesetzlicher Rahmen

- ▶ Stellungnahmen zur Regelungsnotwendigkeit der Synthetischen Biologie (08)

Ethischer Umgang mit Leben

Lebensbegriff

Abgrenzung von Natur und Technik/Kultur

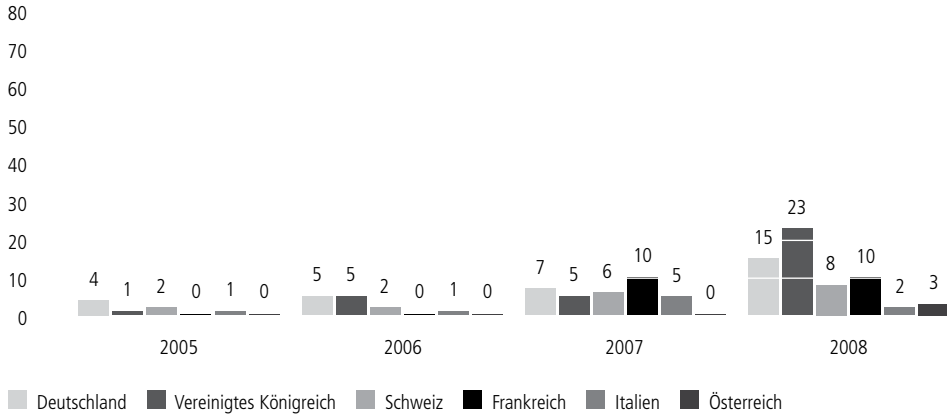
- ▶ Förderung der bioethischen Begleitforschung für die Synthetische Biologie (06)

Dialogverpflichtung

- ▶ Öffentliche Veranstaltungen zur Synthetischen Biologie in Deutschland (07)

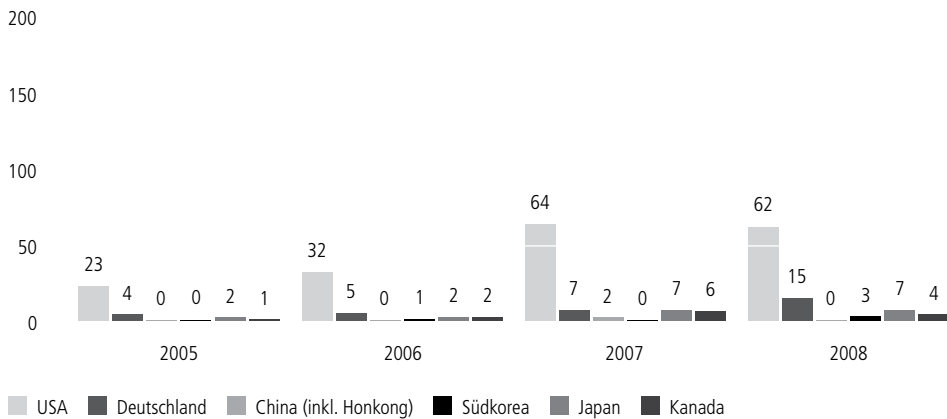
Laufende Nummer	01
Problemfeld	Forschungsstandort Deutschland + Realisierung wissenschaftlicher Ziele
Indikator	Anzahl internationaler Fachpublikationen zur Synthetischen Biologie
Datenquelle	Scopus – Literaturdatenbank. Unter: www.scopus.com/scopus/home.url Zugriff: September 2012, Stand: September 2012.
Verfügbarkeit der Daten	Die Datenbank bietet eine Sammlung an Abstracts, Quellenverweisen und Stichwortverzeichnissen im Bereich der Natur- und Ingenieurwissenschaften, in Medizin und Sozialwissenschaften. Die Nutzung der Datenbank Scopus ist kostenpflichtig und wird nach eigenen Angaben täglich aktualisiert.
Abgrenzung der Berechnungsgrößen	Zur Suche wurde das Stichwort „synthetic biology“ in Titel, Zusammenfassung und/oder angegebenen Schlagwörtern (TITLE-ABS-KEY) für alle Dokumente in der Scopus-Datenbank für Deutschland und weitere Länder (AFFILCOUNTRY) recherchiert. Die Daten werden hier ab 2005 – dem ersten Jahr mit angegebenen deutschen Beiträgen – dargestellt.
Gliederung der Darstellung	a) Deutsche Publikationsleistungen im Vergleich mit ausgewählten europäischen Ländern b) Deutsche Publikationsleistungen im Vergleich mit ausgewählten außereuropäischen Ländern
Berechnungshäufigkeit	jährlich
Aussagefähigkeit	Der Indikator spiegelt die weltweiten naturwissenschaftlich-medizinischen Forschungsaktivitäten im Gebiet der Synthetischen Biologie wider. Anhand der veröffentlichten Publikationen kann beobachtet werden, welche Länder beziehungsweise Regionen eine Vorrangstellung im „internationalen Forschungswettlauf“ einnehmen und ob sich ihre Positionen über die Jahre verändern.

a) Abbildung 1: Deutsche Publikationsleistungen zum Thema Synthetische Biologie im Vergleich mit ausgewählten europäischen Ländern



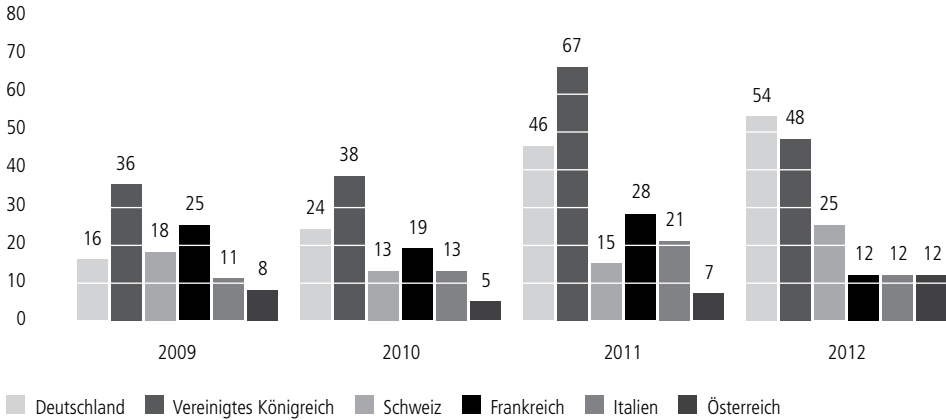
Quelle: siehe Indikatorenblatt 01.

b) Abbildung 2: Deutsche Publikationsleistungen zum Thema Synthetische Biologie im Vergleich mit ausgewählten außereuropäischen Ländern

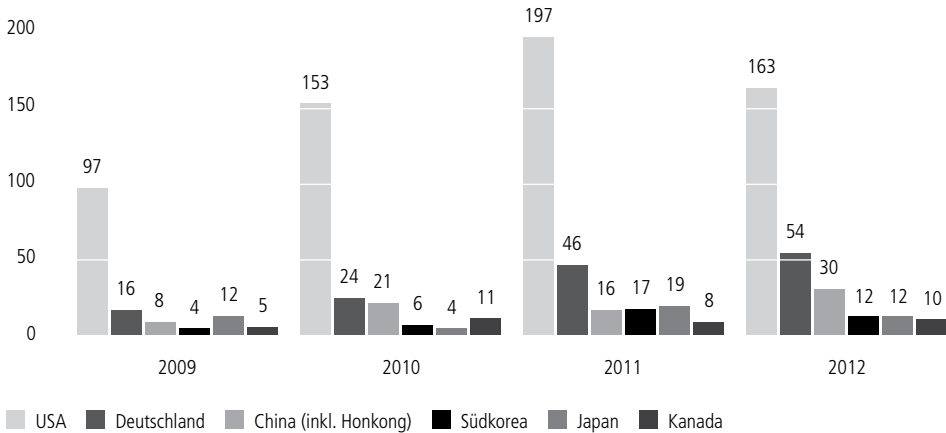


Quelle: siehe Indikatorenblatt 01.

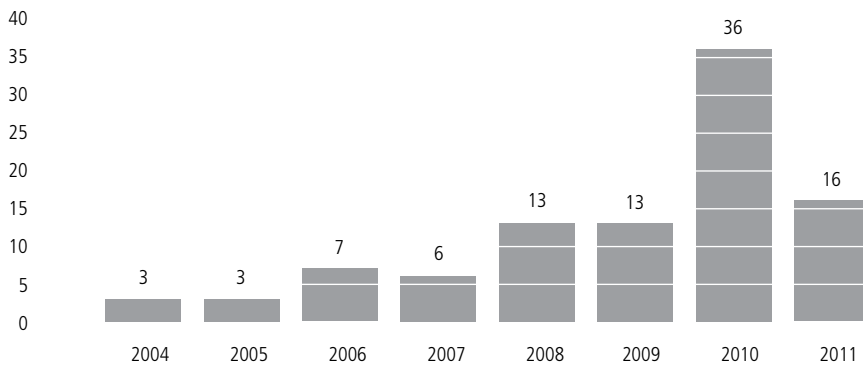
Fortsetzung Abbildung 1



Fortsetzung Abbildung 2



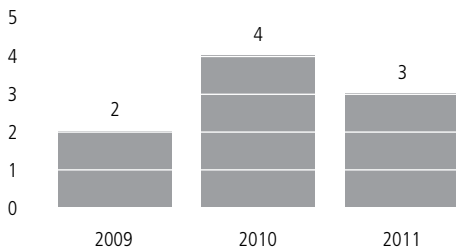
Laufende Nummer	02
Problemfeld	Öffentliche Wahrnehmung und Bewertung
Indikator	Anzahl an deutschen Presseartikeln zur Synthetischen Biologie
Datenquelle	<p>»Frankfurter Allgemeine Zeitung«. Unter: http://fazarchiv.faz.net/ Zugriff: September 2012, Stand: September 2012.</p> <p>»Süddeutsche Zeitung«. Unter: http://archiv.sueddeutsche.apa.at Zugriff: September 2012, Stand: September 2012.</p> <p>»Die Zeit«. Unter: www.zeit.de Zugriff: September 2012, Stand: September 2012.</p> <p>»Der Spiegel«. Unter: www.spiegel.de/suche Zugriff: September 2012, Stand: September 2012.</p>
Verfügbarkeit der Daten	Öffentlich. Die Recherche in den Online-Archiven der ausgewählten Zeitungen und Zeitschriften ist frei zugänglich, tagesaktuell und kostenlos, jedoch können Presseartikel der Süddeutschen Zeitung und der Frankfurter Allgemeinen Zeitung mehrheitlich nur kostenpflichtig eingesehen werden.
Abgrenzung der Berechnungsgrößen	Für die Recherche relevanter Presseartikel wurde das Stichwort „Synthetische Biologie“ in den online verfügbaren Print-Archiven der ausgewählten Zeitungen und Zeitschriften im Volltext gesucht. Ausschließlich online erschienene Presseartikel wurden nicht berücksichtigt. Die Daten werden hier ab 2004 – dem ersten Jahr mit einschlägigen Presseartikeln – dargestellt. Aufgrund der Volltextsuche ist es allerdings möglich, dass die Beiträge sich nicht ausschließlich mit Synthetischer Biologie befassen, sondern, dass die Synthetische Biologie eines unter mehreren Themen ist.
Gliederung der Darstellung	siehe Abbildung
Berechnungshäufigkeit	jährlich
Aussagefähigkeit	Der Indikator dokumentiert die öffentliche Auseinandersetzung mit dem Thema Synthetische Biologie anhand von einschlägigen Artikeln in ausgewählten überregionalen Printmedien. Diese erreichen – das dokumentieren die Auflagezahlen – eine Vielzahl an Menschen in ganz Deutschland. Die Öffentlichkeit wird auf diesem Weg über dieses Forschungsfeld informiert und in ihrer Meinungsbildung beeinflusst.

Abbildung 3: Anzahl an Printartikeln zum Thema Synthetische Biologie in Deutschland

Quelle: siehe Indikatorenblatt 02.

Laufende Nummer	03
Problemfeld	Öffentliche Wahrnehmung und Bewertung
Indikator	Anzahl an deutschen Buchveröffentlichungen zur Synthetischen Biologie
Datenquelle	Deutsche Nationalbibliothek. Unter: https://portal.dnb.de Zugriff: September 2012, Stand: September 2012.
Verfügbarkeit der Daten	Öffentlich.
Abgrenzung der Berechnungsgrößen	Für die Recherche relevanter Buchveröffentlichungen wurde im Online-Katalog der Deutschen Nationalbibliothek (DNB) im erweiterten Suchmodus nach „Synthetische Biologie“ als Titel oder Schlagwort im Gesamtbestand der DNB für die Materialarten Blinddrucke, Bücher, Online-Ressourcen, Elektronische Datenträger und Medienkombinationen ab 2001 nach Jahren gesucht. Die Aufgabe der Nationalbibliothek ist die Archivierung und bibliografische Erfassung deutscher und deutschsprachiger Publikationen. Ihr Gesamtbestand belief sich nach eigenen Angaben Ende 2011 auf rund 27 Millionen Einheiten. Der Online-Katalog ist öffentlich zugänglich. Die Daten werden hier ab 2009 – dem ersten Jahr mit einschlägigen Buchpublikationen – dargestellt. Aufgrund des Suchmodus sind Mehrfachnennungen einzelner Titel in unterschiedlichen Materialarten möglich.
Gliederung der Darstellung	siehe Abbildung
Berechnungshäufigkeit	jährlich
Aussagefähigkeit	Der Indikator dokumentiert die öffentliche Auseinandersetzung mit dem Thema Synthetische Biologie anhand von einschlägigen Buchpublikationen. Die interessierte Öffentlichkeit kann sich auf diesem Weg über das Forschungsfeld weiterführend informieren.

Abbildung 4: Anzahl an Buchpublikationen zum Thema Synthetische Biologie in Deutschland



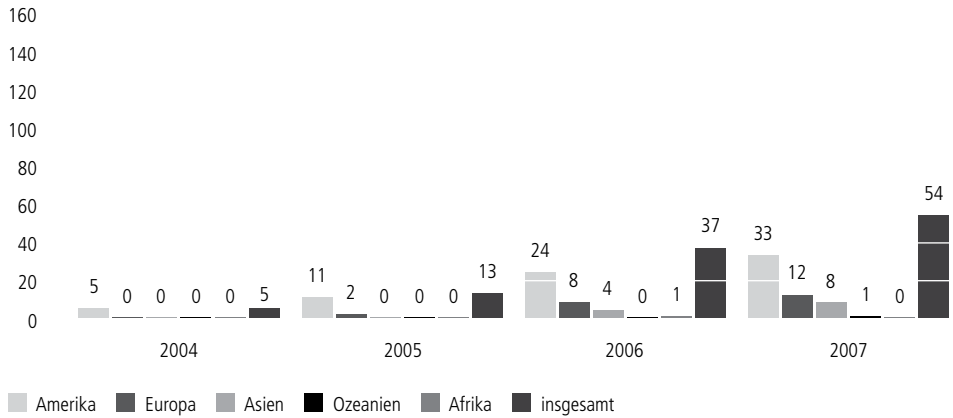
Quelle: siehe Indikatorenblatt 03.

Laufende Nummer	04
Problemfeld	Forschungsstandort Deutschland
Indikator	Anzahl an Teams im internationalen studentischen iGEM-Wettbewerb
Datenquelle	<p>iGEM 2004. Unter: http://2004.igem.org Zugriff: Dezember 2011, Stand: Dezember 2004.</p> <p>iGEM 2005. Unter: http://2005.igem.org Zugriff: Dezember 2011, Stand: Dezember 2005.</p> <p>iGEM 2006. Unter: http://igem.org/Results?year=2006&division=igem Zugriff: Dezember 2011, Stand: Dezember 2006.</p> <p>iGEM 2007. Unter: http://igem.org/Results?year=2007&division=igem Zugriff: Dezember 2011, Stand: Dezember 2007.</p> <p>iGEM 2008. Unter: http://igem.org/Results?year=2008&division=igem Zugriff: Dezember 2011, Stand: Dezember 2008.</p> <p>iGEM 2009. Unter: http://igem.org/Results?year=2009&division=igem Zugriff: Dezember 2011, Stand: Dezember 2009.</p> <p>iGEM 2010. Unter: http://igem.org/Results?year=2010&division=igem Zugriff: Dezember 2011, Stand: Dezember 2010.</p> <p>iGEM 2011. Unter: http://igem.org/Results?year=2011&division=igem; http://igem.org/Results?year=2011&division=high_school Zugriff: Dezember 2011, Stand: Dezember 2011.</p>
Verfügbarkeit der Daten	Der Internetauftritt des iGEM-Wettbewerbs ist online unter http://ung.igem.org frei zugänglich und bietet eine Fülle an Informationen für die teilnehmenden studentischen Teams aus aller Welt. Die Teams haben die Möglichkeit, ihre Projekte ausführlich online vorzustellen. Sowohl der aktuelle als auch die vergangenen Wettbewerbe seit 2004 sind einsehbar.
Abgrenzung der Berechnungsgrößen	Die für den iGEM-Wettbewerb registrierten studentischen Teams wurden nach Ländern unter der Rubrik „jamboree results“ für die einzelnen Jahre recherchiert. Teams, die ihre Teilnahme vor Abschluss des Wettbewerbs zurückgezogen hatten („withdrew“), wurden nicht berücksichtigt. Es muss darauf hingewiesen werden, dass das Wettbewerbsformat sowie der Internetauftritt von den Veranstaltern ständig weiterentwickelt werden. Für 2004 und 2005 gibt es noch keine gesonderte „jamboree“-Auflistung: Hier wurde auf die verfügbaren Daten auf den angegebenen Webseiten zurückgegriffen. 2011 wurden regionale Vorentscheide eingeführt: Der Indikator berücksichtigt weiterhin nur den eigentlichen Wettbewerb („world championship“). Die Daten werden hier ab 2004 – dem Beginn des iGEM-Wettbewerbs – dargestellt.
Gliederung der Darstellung	<p>a) Internationale Teams im iGEM-Wettbewerb</p> <p>b) Anzahl europäischer Teams im iGEM-Wettbewerb</p>
Berechnungshäufigkeit	jährlich

Aussagefähigkeit

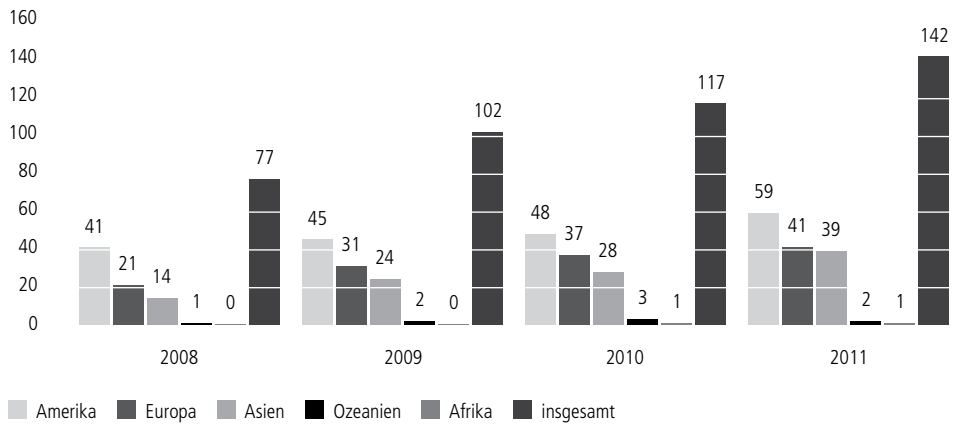
Der Indikator kann als Indiz für das weltweite Interesse der Nachwuchswissenschaftler an der Synthetischen Biologie herangezogen werden. Anhand der Teilnahme an diesem renommierten studentischen Wettbewerb, der für das Fachgebiet einzigartig ist, kann beobachtet werden, wie erfolgreich Deutschland im internationalen Vergleich vertreten ist.

a) **Abbildung 5: Internationale Teams im iGEM-Wettbewerb**

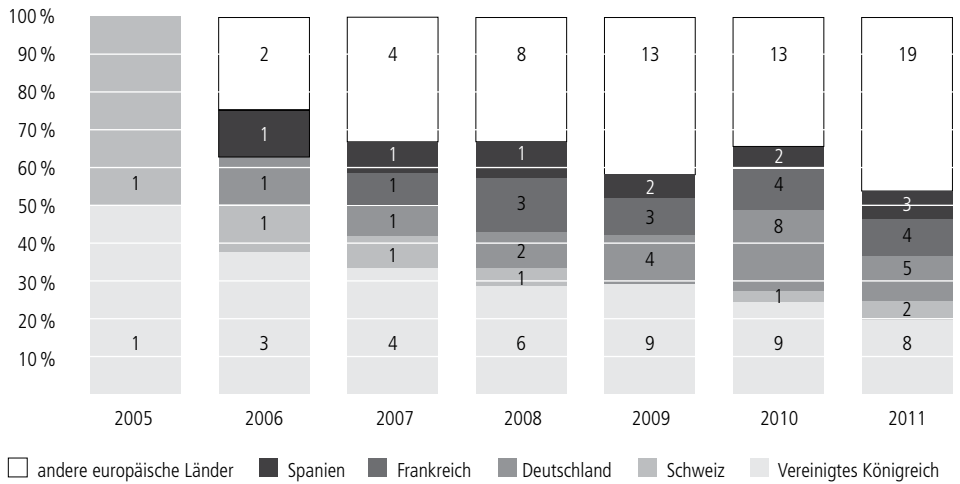


Quelle: siehe Indikatorenblatt 04.

Fortsetzung Abbildung 5



b) Abbildung 6: Anzahl europäischer Teams im iGEM-Wettbewerb



Quelle: siehe Indikatorenblatt 04.

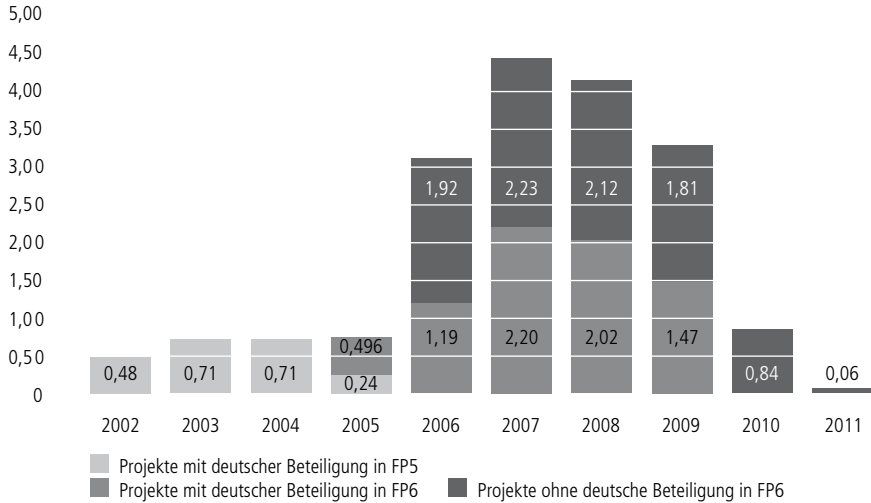
Laufende Nummer	05
Problemfeld	Forschungsstandort Deutschland + Realisierung wissenschaftlicher Ziele
Indikator	EU-Fördermaßnahmen für Forschungsprojekte mit deutscher Beteiligung zum Thema Synthetische Biologie
Datenquelle	<p>CORDIS – Forschungs- und Entwicklungsinformationsdienst der Gemeinschaft. Unter:http://cordis.europa.eu/projects/home_de.html Zugriff: September 2012, Stand: siehe einzelne Projekte.</p> <p>BIOMODULARH2: August 2009. CELLCOMPUT: März 2011. CIRCE: Juni 2005. COBIOS: Juni 2010. COMPBIOMAT: Februar 2012. DNA MACHINES: März 2011. EMERGENCE: August 2010. ERASYNBIO: November 2011. EUROBIOSYN: Juli 2009. FUME: Oktober 2011. NANOMOT: Dezember 2009. ORTHOSOME: Juli 2009. PROBACTYS: Juli 2009. RYSBIPNC: November 2011. SOFI: September 2011. STAMPS: März 2008. SYNAD: Juli 2012. SYNBIOCOMM: Juli 2009. SYNBIOLOGY: Juli 2009. SYNBIOSAFE: Juli 2010. SYNPLEXITY: Juli 2007. SYNTHCELLS: März 2011. TESSY: Juli 2009.</p>
Verfügbarkeit der Daten	CORDIS ist eine Internetplattform, die über die Fördermaßnahmen der Europäischen Union im Bereich Forschung und Entwicklung informiert. Der Zugang ist öffentlich und kostenlos. Über CORDIS werden u. a. die EU-Rahmenprogramme für Forschung und technologische Entwicklung umgesetzt.
Abgrenzung der Berechnungsgrößen	Für die Recherche relevanter EU-geförderter Projekte mit deutscher Beteiligung wurde das Stichwort „synthetic biology“ im einfachen Suchmodus auf der CORDIS-Projektseite gesucht. Die Suchergebnisse wurden gefiltert („Verfeinern durch“) nach jeweils Koordinatorland und Teilnehmerland „GERMANY“. Projekte, die Deutschland als Koordinatorland und als Teilnehmerland aufführen, wurden nur einmal berücksichtigt. Die aufgeführten Detailinformationen der einzelnen Projekte wurden den verlinkten Projektbeschreibungen auf CORDIS entnommen. Es wurden keine externen Webseiten genutzt. Der EU-Beitrag zum jeweiligen Projekt, nicht die Gesamtkosten werden ausgewiesen. Es werden in a) alle relevanten abgeschlossenen und laufenden Projekte 2002–2017 aufgelistet. Für die Darstellung der durchschnittlichen jährlichen Förderung von EU-Projekten wurde in b) auf abgeschlossene Projekte aus den Programmen FP5 und FP6 2002–2011 zurückgegriffen.
Gliederung der Darstellung	<p>a) EU-Förderung von Forschungsprojekten mit deutscher Koordination bzw. Teilnahme zum Thema Synthetische Biologie</p> <p>b) EU-Förderung von Forschungsprojekten zum Thema Synthetische Biologie in FP5 und FP6 (in Mio Euro)</p>
Berechnungshäufigkeit	jährlich
Aussagefähigkeit	Die EU-Forschungsrahmenprogramme können als wichtigstes Instrument der EU zur Förderung von Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen verstanden werden. Die Höhe der Forschungsförderung innerhalb der Programme erlaubt Rückschlüsse auf das wissenschaftliche und wirtschaftliche Potenzial der Synthetischen Biologie, das auf europäischer Ebene angesiedelt ist. Zu einer umfassenden Beurteilung ist eine langfristige Beobachtung angezeigt. Zudem sind in diesem Zusammenhang weitere Quellen der öffentlichen Finanzierung zu berücksichtigen.

a) Tabelle 2: EU-Förderung von Forschungsprojekten mit deutscher Koordination bzw. Teilnahme zum Thema Synthetische Biologie

Projekt	Laufzeit	Koordinatorland	Fördervolumen (EU-Beitrag)
CIRCE	01.05.2002 – 30.04.2005	Belgien	2.142.000 €
EUROBIOSYN	01.01.2005 – 30.06.2008	Schweiz	1.260.300 €
SYNBIOLGY	01.04.2005 – 30.06.2006	Portugal	226.200 €
NANOMOT	01.02.2006 – 30.11.2009	Deutschland	2.250.000 €
PROBACTYS	01.10.2006 – 30.09.2009	Deutschland	1.900.000 €
EMERGENCE	01.12.2006 – 30.11.2009	Schweiz	1.500.000 €
TESSY	01.01.2007 – 31.12.2008	Deutschland	232.208 €
COMPBIOMAT	01.12.2010 – 30.11.2015	Deutschland	1.499.040 €
DNA MACHINES	01.03.2011 – 29.02.2016	Deutschland	2.499.522 €
RYSBIPNC	01.10.2011 – 30.09.2014	Deutschland	2.071.347 €
FUME	01.10.2011 – 30.09.2016	Deutschland	1.499.441 €
ERASYNBIO	01.01.2012 – 31.12.2014	Deutschland	1.997.022 €
SYNAD	01.05.2012 – 30.04.2017	Deutschland	3.499.799 €
SOFI	01.01.2013 – 31.12.2017	Deutschland	1.498.000 €

Quelle: siehe Indikatorenblatt 05.

b) Abbildung 7: EU-Förderung von Forschungsprojekten zum Thema Synthetische Biologie in FP5 und FP6 (in Mio. Euro)



Es wurden keine Projekte ohne deutsche Beteiligung zum Thema Synthetische Biologie in FP5 ausgewiesen. Anzahl N der Projekte pro Jahr: N = 1 für 2002, 2003, 2004, N = 3 für 2005; N = 14 für 2006, 2007, 2008, N = 10 für 2009, N = 4 für 2010, N = 1 für 2011. ► Quelle: siehe Indikatorenblatt 05.

Laufende Nummer	06
Problemfeld	Ethischer Umgang mit Leben + Lebensbegriff + Abgrenzung von Natur und Technik/Kultur
Indikator	Förderung der bioethischen Begleitforschung für die Synthetische Biologie
Datenquelle	Förderkatalog der Bundesregierung. Unter: http://foerderportal.bund.de/foekat Zugriff: September 2012, Stand: k. A.
Verfügbarkeit der Daten	Der Förderkatalog der Bundesregierung stellt eine digitale Datenbank für die Öffentlichkeit dar. Aktuelle sowie abgeschlossene Projekte, die von den Bundesministerien für Bildung und Forschung (BMBF), für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), für Wirtschaft und Technologie (BMWi), für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) und für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) gefördert werden, sind einsehbar.
Abgrenzung der Berechnungsgrößen	Das BMBF fördert seit 1997 interdisziplinäre Vorhaben zu ethischen, rechtlichen und sozialen Aspekten (ELSA) der modernen Lebenswissenschaften und der Biotechnologie. Die Projekte wurden im Förderkatalog mittels der Funktion „Projektsuche“ für die entsprechende Leistungsplansystematik „B09010“ recherchiert. Vorhaben zum Thema Synthetische Biologie wurden anschließend händisch aus den Suchergebnissen gefiltert. Es werden alle relevanten abgeschlossenen und laufenden Projekte aufgelistet. Aufgrund der vorgegebenen Suchparameter ist es allerdings möglich, dass Projekte, die sich mit der Synthetischen Biologie beschäftigen, aber dies nicht explizit betiteln, hier unerwähnt bleiben.
Gliederung der Darstellung	siehe Abbildung
Berechnungshäufigkeit	jährlich
Aussagefähigkeit	Der Indikator erlaubt Rückschlüsse auf den Stellenwert eines sozial verantwortungsvollen Umgangs mit der Synthetischen Biologie, wie sie von Seiten der staatlichen Ebene gefördert bzw. als notwendig betrachtet wird. Bioethische Begleitforschung bietet Raum für die Entwicklung von ethischen Leitlinien für die Forschung und deren wirtschaftliche Anwendungen, für die entsprechende Fortbildung des wissenschaftlichen Personals sowie für öffentliche Aufklärung.

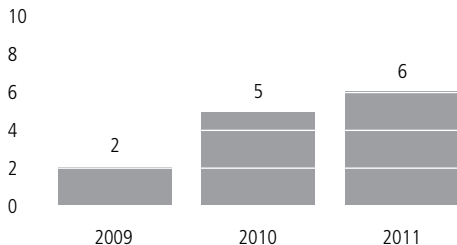
Tabelle 3: BMBF-geförderte ethische Begleitforschung (ELSA) zum Thema Synthetische Biologie

Förderkennzeichen	Thema	
01GP1088	Klausurwochen ELSA: Ethische, rechtliche und soziale Herausforderungen der Synthetischen Biologie	Laufzeit: 01.05.2010–30.04.2011
		Fördersumme: 32.885 €
		Projektleiter*: Prof. Dr. Peter Dabrock
		Ausführende Stelle: Philipps-Universität Marburg
01GP1003	Forschungskooperation ELSA: Synthetische Biologie	
	A: Eine interdisziplinäre Untersuchung zu den ethischen Implikationen der synthetischen Biologie	Laufzeit: 01.10.2010–30.09.2013
		Fördersumme: 289.269 €
		Projektleiter*: Dr. Joachim Boldt
		Ausführende Stelle: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
	B: Leben schaffen - Gott spielen? Eine theologische Analyse der Synthetischen Biologie	Laufzeit: 01.10.2010–30.09.2013
		Fördersumme: 131.425 €
		Projektleiter*: Prof. Dr. Peter Dabrock
		Ausführende Stelle: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
	C: Chancen und Risiken	Laufzeit: 01.10.2010–30.09.2013
		Fördersumme: 112.411 €
		Projektleiter*: Prof. Dr. Armin Grunwald
		Ausführende Stelle*: Karlsruher Institut für Technologie
	D: Eine Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen	Laufzeit: 01.10.2010–30.09.2013
		Fördersumme: 119.770 €
		Projektleiter*: Prof. Dr. Hilmar Stolte
		Ausführende Stelle: Medizinische Hochschule Hannover
* Weiterführende Informationen zu ELSA-Vorhaben unter: http://www.gesundheitsforschung-bmbf.de/de/186.php .		

Quelle: siehe Indikatorenblatt 06.

Laufende Nummer	07
Problemfeld	Öffentliche Wahrnehmung und Bewertung + Dialogverpflichtung
Indikator	Öffentliche Veranstaltungen zur Synthetischen Biologie in Deutschland
Datenquelle	Informationsdienst Wissenschaft e.V. Unter: www.idw-online.de Zugriff: September 2012, Stand: August 2012.
Verfügbarkeit der Daten	Der Informationsdienst Wissenschaft e. V. betreibt ein öffentlich zugängliches Internetportal für Pressemitteilungen und Veranstaltungsankündigungen von mehreren hundert angeschlossenen wissenschaftlichen Einrichtungen, Vereinen und Unternehmen.
Abgrenzung der Berechnungsgrößen	Für die Recherche wurden im idw-Archiv Veranstaltungen zum Suchbegriff „Synthetische Biologie“ recherchiert. Die Trefferliste wurde anschließend für thematisch einschlägige Veranstaltungen händisch gefiltert, die sich gezielt an die Öffentlichkeit („jedermann“) oder die Presse („Journalisten“) richteten. Mehrfache Ankündigungen einer Veranstaltung wurden zusammengefasst. Die Daten werden hier ab 2009 – dem ersten Jahr mit einschlägigen Veranstaltungen – dargestellt. Laut Auskunft des idw werden die Termineinträge in den Wissenschaftskalender seit 1999 geführt.
Gliederung der Darstellung	siehe Abbildung
Berechnungshäufigkeit	a) Anzahl öffentlicher Veranstaltungen zur Synthetischen Biologie in Deutschland b) Öffentliche Veranstaltungen zum Thema Synthetische Biologie in Deutschland
Aussagefähigkeit	Öffentliche Veranstaltungen können als Indiz für die Kommunikationsbereitschaft der Forschungsgemeinschaft gesehen werden. Fachergebnisse der Öffentlichkeit allgemein verständlich vorzustellen und mit ihr über die gesellschaftlichen Chancen und Risiken einer Gentechnologie zu diskutieren, stellt ein wichtiges Mittel der Wissenschaftskommunikation und Akzeptanzbildung innerhalb der Bevölkerung dar. Neben der Wissenschaft werden weitere Interessengruppen aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft sichtbar, die in einem Bereich der Gentechnologien den Dialog mit der Öffentlichkeit suchen.

a) Abbildung 8: Anzahl öffentlicher Veranstaltungen zur Synthetischen Biologie in Deutschland



Quelle: siehe Indikatorenblatt 07.

b) Tabelle 4: Öffentliche Veranstaltungen zum Thema Synthetische Biologie in Deutschland

Veranstalter	Titel	Veranstaltungsrahmen	Datum	Ort
2012				
Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften	Zwischenraum_ Züchtung	BBAW Jahresthema 2011 2012 „ArteFakte. Wissen ist Kunst – Kunst ist Wissen“	03.08.2012	Potsdam
Universitätsklinikum Heidelberg	Erreger aus dem Labor: Fluch oder Segen?	Heidelberger Forum Biowissenschaft und Gesellschaft	09.07.2012	Heidelberg
Goethe-Universität Frankfurt a.M.	Er lässt die Bakterien tanzen		21.05.2012	Frankfurt a. M.
Deutsches Museum und Hochschule für Philosophie	Die künstliche Herstellung von Leben	Wissenschaft für jedermann	25.04.2012	München
ARTE und die Wissenschaftsabteilung der französischen Botschaft	Leben aus dem Labor – die synthetische Biologie	Cinescience	20.04.2012	Berlin
2011				
Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften	Synthetische Biologie. Leben – Kunst	BBAW Jahresthema 2011 2012 „ArteFakte. Wissen ist Kunst – Kunst ist Wissen“	08.12.2011 bis 09.12.2011	Berlin
Deutscher Ethikrat	Werkstatt Leben. Bedeutung der Synthetischen Biologie für Wissenschaft und Gesellschaft		23.11.2011	Mannheim
Deutsches Referenzzentrum für Ethik in den Biowissenschaften (DRZE) und das Institut für Wissenschaft und Ethik (IWE)	Synthetische Biologie: Auf dem Weg zum künstlichen Leben?	Ethik-Forum	04.07.2011	Bonn
Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)	Auf dem Weg zum künstlichen Leben?	EU-Projekt SYNTH-ETHICS	21.06.2011	Karlsruhe
Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften und Der Tagesspiegel	Synthetische Biologie: Wird die Wissenschaft zur Ingenieurskunst?		11.04.2011	Berlin

Veranstalter	Titel	Veranstaltungsrahmen	Datum	Ort
DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.	Künstliches Leben	Frankfurter Sonderkolloquium „Technik und Gesellschaft im Dialog“	27.01.2011	Frankfurt a. M.
2010				
Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften	Forum: Leben 3.0 und die Zukunft der Evolution	BBAW Jahresthema 2009 2010 „Evolution in Natur, Technik und Kultur“	08.12.2010	Berlin
acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften	Journalistenworkshop Synthetische Biologie		14.10.2010 bis 15.10.2010	Frankfurt a. M.
Lehrstuhl für Sozialethik des Fachbereichs Theologie der Philipps-Universität Marburg	Leben aus dem Baukasten? Chancen und Risiken der Synthetischen Biologie	ELSA Klausurwoche "Was ist Leben im Zeitalter seiner technischen Machbarkeit? Ethische, rechtliche und soziale Herausforderungen der Synthetischen Biologie" (27.9.–3.10.2011)	28.09.2010	Marburg
Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften	Interdisziplinäre Tagung: Leben 3.0 und die Zukunft der Evolution	BBAW Jahresthema 2009 2010 „Evolution in Natur, Technik und Kultur“	16.09.2010 bis 17.09.2010	Berlin
Deutscher Ethikrat	Synthetische Biologie – Leben aus dem Baukasten?	Forum Bioethik	24.02.2010	Berlin
2009				
DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.	Synthetische Bio(techn)ologie	Konferenz "Synthetische Bio(techn)ologie" (9–10.11. 2009)	09.11.2009	Frankfurt a. M.
Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und die Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina (Nationale Akademie der Wissenschaften)	Forschungsfeld "Synthetische Biologie" – Pressekonferenz zur gemeinsamen Stellungnahme der DFG, acatech und Leopoldina		27.07.2009	Berlin

Quelle: siehe Indikatorenblatt 07.

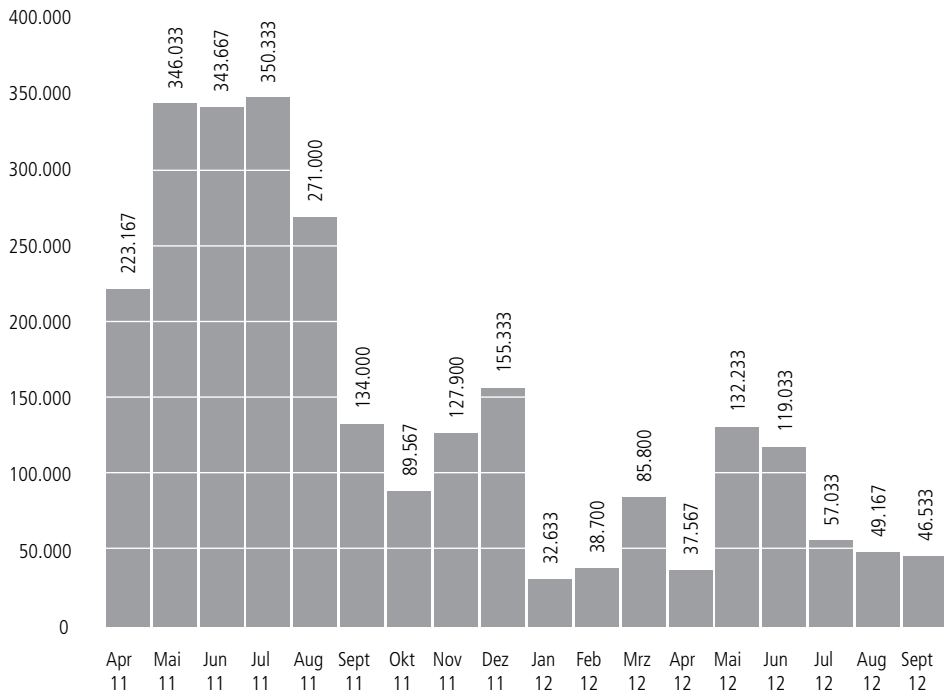
Laufende Nummer	08
Problemfeld	Gesetzlicher Rahmen
Indikator	Stellungnahmen zur Regelungsnotwendigkeit der Synthetischen Biologie
Datenquelle	<p>Deutscher Ethikrat. Unter: www.ethikrat.org/dateien/pdf/Perspektivenpapier_Synthetische_Biologie_2009-04-23.pdf Zugriff: September 2012, Stand: April 2009.</p> <p>Deutscher Bundestag. Wissenschaftliche Dienste. Unter: www.bundestag.de/dokumente/analysen/2009/synthetische_biologie.pdf [21.07.2011] Zugriff: September 2012, Stand: Juli 2009.</p> <p>DFG, acatech und Leopoldina. Unter: www.dfg.de/download/pdf/dfg_im_profil/reden_stellungnahmen/2009/stellungnahme_synthetische_biologie.pdf Zugriff: September 2012, Stand: November 2009.</p> <p>Deutsche Bundesregierung. Unter: http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/051/1705165.pdf Zugriff: September 2012, Stand: März 2011.</p> <p>DEHEMA Arbeitskreis Systembiologie und Synthetische Biologie. Unter: http://biotech.dechema.de/biotech_media/Downloads/Synth_Bio_2011_NEU_3.pdf Zugriff: September 2012, Stand: Juli 2011.</p>
Verfügbarkeit der Daten	Für die Recherche wurde eine Auswahl an Stellungnahmen unterschiedlicher öffentlicher Institutionen in Deutschland herangezogen. Die Stellungnahmen sind online auf den angegebenen Webseiten kostenlos einsehbar.
Abgrenzung der Berechnungsgrößen	Die Angaben beziehen sich auf die von den unterschiedlichen Institutionen getroffenen Aussagen zu den rechtlichen Aspekten zur Synthetischen Biologie.
Gliederung der Darstellung	siehe Abbildung
Berechnungshäufigkeit	einmalig
Aussagefähigkeit	Der Indikator dokumentiert die Einschätzung unterschiedlicher Institutionen und Organe in Bezug auf den rechtlichen Regelungsbedarf der Synthetischen Biologie in Deutschland. Sie ermöglichen eine Perspektive darauf, mit welcher Dringlichkeit eine juristische Konkretisierung gehandelt wird.

Tabelle 5: Einschätzung des gegenwärtigen rechtlichen Handlungsbedarfs für die Synthetische Biologie

Stellungnahme	Aussagen zu rechtlichen Aspekten
Deutscher Ethikrat „Perspektivenpapier Synthetische Biologie“ (April 2009)	„Um das Missbrauchsrisiko gering zu halten, werden sowohl nationale und internationale Gesetze erwogen als auch Selbstverpflichtungen der Industrie, die beispielsweise ein „Wasserzeichen“ in künstlich hergestellten Sequenzen, die sorgfältigen Prüfung aller Aufträge durch Synthesefirmen und die Registrierung aller für die Synthese geeigneter Maschinen erwägt.“
Deutscher Bundestag. Wissenschaftliche Dienste „Aktueller Begriff Synthetische Biologie“ (Juli 2009)	„Bei den Designerorganismen der Synthetischen Biologie handelt es sich um gentechnisch veränderte Organismen, auf die die Regelungen des deutschen Gentechnikrechts anwendbar sind. Es ergeben sich auch vergleichbare Fragen nach der biologischen Sicherheit (biosafety) wie bei der Gentechnik, z. B. bei einer unbeabsichtigten Freisetzung. Es ist aber nicht auszuschließen, dass Vorschriften und Begriffsbestimmungen angepasst werden müssen.“
DFG, acatech und Leopoldina „Gemeinsame Stellungnahme Synthetische Biologie“ (November 2009)	„Es ist noch eine offene Frage, ob die Risiken der Synthetischen Biologie anders gelagert oder in ihrer Größenordnung anders einzuschätzen sind als die Risiken der bisherigen Genforschung. Zunächst ist davon auszugehen, dass die bestehenden Regelungen und Regulierungen ausreichen, um diese Risiken zu vermeiden oder abzumildern. Wichtig ist aber eine gesellschaftliche Begleitforschung, die frühzeitig neue Risiken erkennen hilft, damit mögliche Fehlentwicklungen von vornherein vermieden werden können. In Bezug auf die biologische Sicherheit sind die Risiken der gegenwärtigen Forschung innerhalb der Synthetischen Biologie durch gesetzliche Regelungen angemessen erfasst und reguliert.“ Unter Berücksichtigung der Dynamik und Heterogenität der Forschungsdisziplin wird zusätzlich ein unabhängiges Monitoring durch die Zentrale Kommission für die Biologische Sicherheit (ZKBS) sowie die Festsetzung eines Kriterienkatalogs für den Umgang und die Freisetzung von neuartigen synthetischen Organismen empfohlen.
Deutsche Bundesregierung „Stand und Perspektiven der Synthetischen Biologie“ (März 2011)	„Die Bundesregierung sieht derzeit in Übereinstimmung mit den Empfehlungen führender Wissenschaftsorganisationen [...] keinen gesetzlichen oder regulatorischen Handlungsbedarf, da die Sicherheitsrisiken der Synthetischen Biologie denen der bekannten biotechnologischen Methoden ähneln und durch bestehende gesetzliche Regelungen, wie insbesondere das Gentechnikgesetz, das Außenwirtschaftsgesetz und das Kriegswaffenkontrollgesetz angemessen erfasst sind. Diese gesetzlichen Regularien werden durch freiwillige Selbstverpflichtungen der Industrie unterstützt, um zu gewährleisten, dass nur vertrauenswürdige Empfänger Zugang zu potenziell zu missbrauchenden Nukleinsäuren bekommen [...]. Die Bundesregierung teilt weiterhin die in der Stellungnahme Synthetische Biologie von acatech, Leopoldina und DFG dargelegte Einschätzung, dass ein kontinuierliches wissenschaftliches Monitoring bezüglich der Chancen und Risiken der Synthetischen Biologie benötigt wird, um die schnellen Entwicklungen in diesem Forschungsfeld verantwortungsbewusst zu begleiten. Die Bundesregierung wird dahingehend von der Zentralen Kommission für die biologische Sicherheit (ZKBS), die die Bundesregierung und die Länder seit 1978 in Fragen zur Sicherheit der Gentechnik berät, unterstützt.“
DEHEMA Arbeitskreis Systembiologie und Synthetische Biologie, „Thesenpapier zum Status der Synthetischen Biologie in Deutschland“ (Juli 2011)	„Das Sicherheitsrisiko der Synthetischen Biologie ist durch das Gentechnik-Gesetz abgedeckt, sollte aber durch erweiterte Kontrollmaßnahmen noch weiter verringert werden. [...] Eine begleitende Ethik- und Technologiefolge-Diskussion ist wie bei jeder neuen Technologie erforderlich. Sie sollte begleitend zur wissenschaftlichen Entwicklung aufgrund konkreter Anwendungsszenarien erfolgen, ohne die Entwicklung neuer Methoden im Ansatz zu verhindern.“

Quelle: siehe Indikatorenblatt 08.

Laufende Nummer	09
Problemfeld	Öffentliche Wahrnehmung und Bewertung
Indikator	Durchschnittliche Anzahl an Suchergebnissen bei der Stichwortsuche "Synthetische Biologie" in populären Internet-Suchmaschinen
Datenquelle	<p>Google. Unter: www.google.de Zugriff: September 2012, Stand: September 2012.</p> <p>YAHOO! Unter: http://de.yahoo.com Zugriff: September 2012, Stand: September 2012.</p> <p>Bing. Unter: www.bing.com/?cc=de Zugriff: September 2012, Stand: September 2012.</p>
Verfügbarkeit der Daten	Öffentlich. Die Recherche mit den Internet-Suchmaschinen ist kostenlos und wurde jeweils über die deutschen Portale durchgeführt.
Abgrenzung der Berechnungsgrößen	Für die Recherche wurde das Stichwort „Synthetische Biologie“ mit den ausgewählten Suchmaschinen gesucht und die Anzahl an gefundenen Suchergebnissen gemittelt. Es erfolgte keine qualitative Auswertung der angezeigten Webseiten. Die Daten werden ab April 2011 erhoben. Es muss darauf hingewiesen werden, dass der Internetauftritt der Suchmaschinen ständig weiterentwickelt wird und dadurch bedingte Abweichungen zwischen den einzelnen Monaten möglich sind.
Gliederung der Darstellung	siehe Abbildung
Berechnungshäufigkeit	monatlich
Aussagefähigkeit	Der Indikator dokumentiert die öffentliche Auseinandersetzung mit dem Thema Synthetische Biologie anhand von online verfügbaren Webseiten. Diese ausgewählten Suchmaschinen stellen die am häufigsten in Deutschland genutzten Portale für die Websuche dar. Die interessierte Öffentlichkeit kann sich auf diesem Weg weiterführend über das Forschungsfeld informieren.

Abbildung 9: Internetpräsenz der Synthetischen Biologie

Quelle: siehe Indikatorenblatt 09.

11.3 Zusammenfassung

Das besondere Anliegen des „Gentechnologieberichts“ ist Gentechnologie langfristig, indikatorenbasiert und interdisziplinär für die interessierte Öffentlichkeit abzubilden. Dafür wurden die aktuellen Problemfelder der Synthetischen Biologie ermittelt und mit relevanten Indikatoren für eine quantitative Beschreibung verknüpft. Für diesen Themenband zeigten sich insbesondere die thematisch zusammenhängenden Problemfelder *Forschungsstandort Deutschland* und *Realisierung wissenschaftlicher Ziele* sowie die *öffentliche Wahrnehmung und Bewertungen* als geeignet, um anhand verfügbaren Datenmaterials einen Einblick in die aktuellen Entwicklungen der

Synthetischen Biologie in Deutschland zu geben. Außerdem ließen sich begrenzt Daten zum *gesetzlichen Rahmen*, zur *Dialogverpflichtung* sowie zur *Abgrenzung von Natur und Technik/Kultur* und zum *Lebensbegriff* finden. In der Zusammenschau der Daten ergibt sich für Deutschland folgendes Bild:

- ▶ Einschlägige Publikationen aus Deutschland lassen sich in der internationalen Fachpresse erst ab 2005 verfolgen, aber steigen seit dem kontinuierlich an. Im globalen Vergleich werden die meisten Fachpublikationen zum Thema Synthetische Biologie von US-amerikanischen Forscherteams veröffentlicht.
- ▶ Im renommierten jährlichen internationalen Studentenwettbewerb der Synthetischen Biologie „iGEM“ sind Teams aus Deutschland seit 2006 vertreten. Der Wettbewerb verzeichnet seit seinem Entstehen 2004 kontinuierlich eine jährlich steigende Beteiligung an Teams aus der ganzen Welt. Die Anzahl der deutschen Teams stieg bis 2010 ebenfalls an, um dann 2011 wieder abzufallen.
- ▶ Es werden aktuell vom BMBF keine dezidierten Forschungsprojekte zum Thema Synthetische Biologie gefördert. Es wird nur im geringen Umfang begleitende Forschung zu gesellschaftlichen und ethischen Aspekten gefördert. Jedoch ist Deutschland seit 2002 in eine steigende Anzahl an EU-geförderten Projekten zur Synthetischen Biologie involviert.
- ▶ Das Thema ist in der öffentlichen Berichterstattung generell unterrepräsentiert. Einschlägige Presseartikel lassen sich erst seit 2004 finden. Ihre Anzahl ist in den letzten Jahren gestiegen mit einem ausgewiesenen Höhepunkt 2010 – dem Jahr, in dem der US-Amerikaner Craig Venter seine Ergebnisse zu einem künstlich synthetisierten bakteriellen Genom publikumswirksam veröffentlichte. Analog lassen sich einschlägige Buchpublikationen erst ab 2009 und nur in geringer Anzahl finden.
- ▶ Die Bundesregierung und unterschiedliche Sachverständigengremien sehen die aktuelle Forschung im Bereich der Synthetischen Biologie übereinstimmend innerhalb des in Deutschland geltenden gesetzlichen Rahmens. Das Forschungsgebiet wird in seinen möglichen Risiken der bisherigen gentechnologischen Forschung gleichgesetzt. Jedoch werden die hohe Dynamik und Heterogenität der Synthetischen Biologie betont und eine unabhängige Beobachtung und gegebenenfalls erweiterte Kontrollmaßnahmen empfohlen.

12. Anhang

12.1 Autorinnen und Autoren

- Johannes Achatz, M. A. – Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Ethikzentrum Jena der Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Dr. Horst Bredekamp* – Professor für Mittlere und Neuere Kunstgeschichte an der Humboldt-Universität zu Berlin und Permanent Fellow des Wissenschaftskolleg zu Berlin
- Prof. Dr. Nedijlko Budisa** – Leiter des Fachgebiets „Biokatalyse“ am Institut für Chemie der Technischen Universität Berlin
- Mila Burghardt, B. F. A. (Medienkunst) – Freiberufliche Künstlerin, Weimar
- Dr. Julia Diekämper – Ehemalige wissenschaftliche Mitarbeiterin der IAG „Gentechnologiebericht“ der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften
- Prof. Dr. Heiner Fangerau – Direktor des Institutes für Geschichte, Theorie und Ethik der Medizin der Universität Ulm
- Prof. Dr. Hille Haker – Professorin für Moralthologie/Sozialethik am Fachbereich Katholische Theologie der Goethe-Universität Frankfurt
- Dr. Jürgen Hampel** – Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Technik- und Umweltsoziologie der Universität Stuttgart
- Natascha Hotz, M. Sc. – Doktorandin am Zentrum für Biologische Signalstudien BIOSS der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- Dr. Anja Hümpel – Wissenschaftliche Mitarbeiterin der IAG „Gentechnologiebericht“ der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften
- Prof. Dr. Dr. Kristian Köchy** – Professor für Philosophie mit dem Schwerpunkt Theoretische Philosophie an der Universität Kassel
- Prof. Dr. Peter Kunzmann – Akademischer Rat und Leiter der Nachwuchsgruppe „Würde in der Gentechnologie“ am Ethikzentrum Jena der Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Volker Morath – Student an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- Susanne Nessler – freischaffende Wissenschaftsjournalistin, Berlin
- Martin O'Malley, Ph. D. (Boston College) – Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Ethikzentrum Jena der Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Hans-Jörg Rheinberger* ** – Direktor der Abteilung „Experimentalsysteme und Räume des Wissens“ am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte

Hanna Wagner – Studentin der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Prof. Dr. Wilfried Weber – Professor für Synthetische Biologie am Zentrum für Biologische Signalstudien BLOSS an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

* Ordentliches Mitglied der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften

** Mitglied der interdisziplinären Arbeitsgruppe „Gentechnologiebericht“

12.2 Abbildungen und Tabellen

Zusammenfassung

Tabelle 1 Klassifikationsmöglichkeiten für die Forschungsansätze der Synthetischen Biologie (Seite 14)

Kapitel 2: Julia Diekämper, Anja Hümpel

Synthetische Biologie in Deutschland. Eine Einführung

Abbildung 1 Aktuelle Problemfelder der Synthetischen Biologie in Deutschland (Seite 56)

Tabelle 1 Printmediale Recherche zum Stichwort „Synthetische Biologie“ (Korpus A) (Seite 52)

Tabelle 2 Internetrecherche zum Stichwort „Synthetische Biologie“ (Korpus B) (Seite 54)

Tabelle 3 Recherche von Texten zum Stichwort „Synthetische Biologie“ (Korpus C) (Seite 55)

Kapitel 4: Nedijlko Budisa

Chemisch-synthetische Biologie

Tabelle 1 Eigenschaften lebender Systeme nach Gánti (Seite 101)

Kapitel 5: Natascha Hotz, Wilfried Weber

Therapeutische Perspektiven der Synthetischen Biologie

Abbildung 1 Funktionsweise synthetischer genetischer Schalter (Seite 118)

Abbildung 2 Entdeckung von Streptogramin-Antibiotika (Seite 121)

Abbildung 3 Überwindung der Resistenz von *Mycobacterium tuberculosis* gegen das Antibiotikum Ethionamid (Seite 123)

Abbildung 4 Ein genetischer Schalter zur Optimierung der künstlichen Befruchtung (Seite 126)

Abbildung 5 Ein genetischer Regelkreis zur Kontrolle der Harnsäurekonzentration (Seite 128)

Abbildung 6 Transfer genetischer Schalter aus der Synthetischen Biologie in die Materialwissenschaften zur Synthese intelligenter Materialien (Seite 131)

Kapitel 7: Johannes Achatz, Martin O'Malley, Peter Kunzmann

Der Stand der ethischen Diskussionen um Synthetische Biologie

Abbildung 1 Personenkreise im Wirkungsbereich Synthetischer Biologie (Seite 176)

Kapitel 10: Jürgen Hampel

Synthetische Biologie – eine unbekannte Technologie

Abbildung 1 Gewünschte Informationen zur Synthetischen Biologie, an erster, zweiter oder dritter Stelle genannt (Seite 242)

Abbildung 2 Gewünschte Informationen zur Synthetischen Biologie, an erster Stelle genannt (Seite 243)

Abbildung 3 Governance-Präferenzen für die Synthetische Biologie in Deutschland und Europa (Seite 246)

Abbildung 4 Einstellungen zur Synthetischen Biologie in Deutschland und Europa (Seite 249)

Abbildung 5 Zustimmung zur Synthetischen Biologie in Deutschland nach Governance-Präferenzen (Seite 252)

Tabelle 1 Präferenzen für Bewertungskriterien für gentechnologische Anwendungen (Seite 246)

Kapitel 11: Anja Hümpel, Julia Diekämper

Daten zu ausgewählten Indikatoren

Abbildung 1 Deutsche Publikationsleistungen zum Thema Synthetische Biologie im Vergleich mit ausgewählten europäischen Ländern (Seite 264–265)

Abbildung 2 Deutsche Publikationsleistungen zum Thema Synthetische Biologie im Vergleich mit ausgewählten außereuropäischen Ländern (Seite 264–265)

Abbildung 3 Anzahl an Printartikeln zum Thema Synthetische Biologie in Deutschland (Seite 267)

Abbildung 4 Anzahl an Buchpublikationen zum Thema Synthetische Biologie in Deutschland (Seite 268)

Abbildung 5 Internationale Teams im iGEM-Wettbewerb (Seite 270–271)

Abbildung 6 Anzahl europäischer Teams im iGEM-Wettbewerb (Seite 272)

Abbildung 7 EU-Förderung von Forschungsprojekten zum Thema Synthetische Biologie in FP5 und FP6 (in Mio. Euro) (Seite 275)

Abbildung 8 Anzahl öffentlicher Veranstaltungen zur Synthetischen Biologie in Deutschland (Seite 278)

Abbildung 9 Internetpräsenz der Synthetischen Biologie (Seite 284)

Tabelle 1 Problemfelder der Synthetischen Biologie und Indikatoren zu ihrer Beschreibung (Seite 258)

Tabelle 2 EU-Förderung von Forschungsprojekten mit deutscher Koordination bzw. Teilnahme zum Thema Synthetische Biologie (Seite 274)

Tabelle 3 BMBF-geförderte ethische Begleitforschung zum Thema Synthetische Biologie (Seite 277)

Tabelle 4 Öffentliche Veranstaltungen zum Thema Synthetische Biologie in Deutschland (Seite 279)

Tabelle 5 Einschätzung des gegenwärtigen rechtlichen Handlungsbedarfs für die Synthetische Biologie (Seite 282)