



Synthetische Biologie

Teil 1:

Synthetische Biologie und künstliches Leben – Eine kritische Analyse

Synthetische Biologie und künstliches Leben – Eine kritische Analyse

**Ein Testbiotech-Report
von
Christoph Then und Sylvia Hamberger**

Mit Unterstützung der

g r a s s r o o t s

f o u n d a t i o n

Impressum
Testbiotech e.V.
Frohschammerstr. 14
80807 München
Tel.: +49 (0) 89 358 992 76
Fax: +49 (0) 89 359 66 22
info@testbiotech.org
www.testbiotech.org

Geschäftsführer: Dr. Christoph Then

Eingetragen als gemeinnützig beim
Finanzamt München 2008

Datum der Veröffentlichung
Juni 2010

Foto: ©Testbiotech

Inhaltsverzeichnis

03	Inhalt
04	Zusammenfassung
06	1. Einleitung
08	2. Was ist Synthetische Biologie?
09	<i>Tabelle 1: Paradigmenwechsel der Synthetischen Biologie (Quelle: van Est et al. 2007)</i>
11	3. Technische Methoden
11	3.1 DNA-Synthese
12	3.2 Herstellung ‚minimalisierter‘ Organismen
13	3.3 Modellierung von Stoffwechselwegen
15	4. Potentielle Anwendungen
15	<i>Tabelle 2: Mögliche Einsatzbereiche der Synthetischen Biologie und Beispiele</i>
17	5. Wirtschaftliche Förderung und Entwicklung
17	5.1 Förderung in der EU
18	5.2 Synthetische Biologie in Deutschland
21	6. Die Diskussion über die Risiken
22	6.1 Biosafety
27	6.2 Biosecurity
29	7. Die Diskussion soziokultureller und ethischer Fragen
31	<i>Abb. 1: Figure 4 aus WO 2007047148</i>
33	8. Zur Diskussion: Neue Schutzkonzepte
39	Literatur

Zusammenfassung

*„Durch die Synthetische Biologie verschiebt sich der menschliche Umgang mit der Natur vom Paradigma der Manipulation zu dem der Kreation“
(Boldt et al. 2009)*

Synthetische Biologie folgt der Idee, dass man Lebensformen nicht nur genetisch verändern (manipulieren), sondern vollständig neu konstruieren kann. Dafür werden künstliche Gene im Labor synthetisiert, neue Organismen werden am Reißbrett entworfen. Ziel ist hier nicht, die Grundlagen des Leben zu verstehen, als vielmehr neue Lebensformen zu produzieren, die sich für industrielle Zwecke eignen. Nicht immer ist die Synthetische Biologie dabei von bisherigen Anwendungen der Gentechnologie zu trennen.

Die möglichen Verwertungen der Synthetischen Biologie sind vielfältig. Sie umfassen unter anderem die Re-Synthese natürlicher Gene, die Herstellung neuartiger Gene, die Produktion neuartiger Enzyme bis hin zur Produktion von vermehrungsfähigen Lebensformen, zu denen es in der natürlichen Artenvielfalt bzw. Biodiversität keine Vergleichsformen gibt. Kommerzielle Anwendungsgebiete der Synthetischen Biologie sind unter anderem die Medizin, die Biochemie, die Erzeugung von Energie, die Landwirtschaft und die Herstellung von Biowaffen. Viele der möglichen Anwendungen existieren bislang nur in der Theorie, für andere ist ein ‚proof of concept‘ bereits erbracht. Insbesondere die Synthese von Genen und die Herstellung von Enzymen haben die Stufe der kommerziellen Verwendung erreicht: 2010 wurde ein vermehrungsfähiger Organismus der Öffentlichkeit präsentiert, dessen Erbgut vollständig im Labor synthetisiert wurde.

Die Synthetische Biologie entwickelt sich derzeit ohne ausreichende gesellschaftliche Debatte und ohne spezifische gesetzliche Regelungen und Kontrollen.

Es stellt sich die zentrale Frage, welche gesellschaftliche Legitimation die Betreiber der Synthetischen Biologie für ihre weitreichenden technischen Entwicklungen in Anspruch nehmen können und welche Rechte die Gesellschaft einfordert, um an Entscheidungen über die weitere Entwicklung teilzuhaben. Die Diskussion betrifft unser grundsätzliches Verständnis darüber, was Leben ist und was Lebewesen gegenüber unbelebter Materie auszeichnet.

Im Hinblick auf den Schutz und die künftige Entwicklung der Biodiversität bedeutet die Freisetzung synthetischer Lebensformen einen nicht verantwortbaren Eingriff in die belebte und unbelebte Umwelt, in Ökosysteme und in evolutive Prozesse.

Testbiotech empfiehlt deshalb die Entwicklung eines Konzeptes der ‚Evolutionären Integrität‘, das über die Integrität von Arten und Individuen hinausgeht.

Nach Ansicht von Testbiotech erfordert der Umgang mit der Synthetischen Biologie ein neues Sicherheitskonzept, dessen zentrale Forderung die räumliche

und zeitliche Kontrollierbarkeit des Einsatzes synthetischer Organismen ist.

Aktivitäten von Firmen und Forschungseinrichtungen, die Gene künstlich synthetisieren, sollten daher möglichst lückenlos überwacht werden. Hier müssen auch Regelungen gefunden werden, um die Entwicklung von Biowaffen und Krankheitserregern wirksam zu kontrollieren.

Die weitere Entwicklung und Anwendung der Synthetischen Biologie sollten von der Möglichkeit wirksamer Kontrollen abhängig gemacht werden. Testbiotech fordert deswegen nicht nur spezifische gesetzliche Regelungen für die Synthetische Biologie, sondern auch ein Moratorium für ihre staatliche Förderung, um einer breiten gesellschaftlichen Debatte ausreichend Zeit zu geben.

1. Einleitung

Im Juni 2004 fand am Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA (MIT) die erste große Konferenz zum Thema Synthetische Biologie statt, die „Synthetic Biology 1.0“. Thomas F. Knight, vom MIT „Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory“ (CSAIL), hielt auf dieser Konferenz eine programmatische Rede: Während Biologen die Komplexität des Lebendigen bewundern, würden sich Ingenieure an der Einfachheit von Systemen erfreuen. Die Synthetische Biologie sollte sich nach seiner Ansicht für diesen zweiten Weg entscheiden:

„An alternative to understanding complexity is to remove it.“¹

Verstehe man es erst einmal, einzelne kleine funktionierende Einheiten zu schaffen, will man diese wie Schaltkreise in einem Computer koppeln und sich so der Komplexität des Lebens nicht über die Analyse der bestehenden biologischen Vielfalt, sondern über die Konstruktion neuer ‚Lebensformen‘ nähern.

Seit diesem ersten Kongress im Jahr 2004 hat sich die Synthetische Biologie weiter entwickelt. Sie wird inzwischen unter anderem als potente Technologie zur Erzeugung von Arzneimitteln und neuen synthetischen Treibstoffen (Biofuels) gesehen. Craig Venter, der nicht nur bei der Entschlüsselung des menschlichen Erbgutes, sondern auch bei der Entwicklung der Synthetischen Biologie eine wichtige Rolle spielt, äußerte in einem Interview mit der Süddeutschen Zeitung (14.10.2009) die Auffassung, die Zeit sei gekommen, dass der Mensch die Evolution mit technischen Mitteln weiter voran treibe. Als wichtigste Begründung für diese sich selbst zuerkannte Rolle wird unter anderem der Klimawandel genannt:

„Wir werden neue Organismen schaffen, um die drängenden Probleme der Welt zu lösen.“

2010 präsentierte Craig Venter einen Mikroorganismus, dessen Gene vollständig im Labor synthetisiert wurden. Dabei verwendete er als Vorlage die Gene einer existierenden Mikrobe mit relativ kleinem Genom. Sein Team baute das Erbgut aus den einzelnen chemischen Grundbausteinen Schritt für Schritt nach und veränderte es an einigen Stellen. Anschließend wurde das Genom auf einen verwandten Mikroorganismus übertragen. Nachdem dieser sich über einige Generationen vermehrt hatte, bestand sein Erbgut vollständig aus den im Labor synthetisierten Genen (Gibson et al. 2010). Das Craig Venter Institute präsentierte dies in einer Presseerklärung² als Beweis dafür, dass man auf diese Weise lebens- und vermehrungsfähige Organismen erzeugen kann:

„The synthesis (...) is the proof of principle that genomes can be designed in the computer, chemically made in the laboratory and transplanted into a reci-

¹ Zitiert nach Then, 2008

² <http://www.jcvi.org/cms/press/press-releases/full-text/article/first-self-replicating-synthetic-bacterial-cell-constructed-by-j-craig-venter-institute-researcher/>

piant cell to produce a new self-replicating cell controlled only by the synthetic genome.“

Bisher hat sich die Öffentlichkeit kaum mit den Ansprüchen und Anwendungen der Synthetischen Biologie auseinandergesetzt. Kritische Stellungnahmen wie die der ETC Group, die die Synthetische Biologie als „extreme engineering“ bezeichnet (ETC 2007), sind eine seltene Ausnahme und haben kaum öffentliche Resonanz gefunden. Immerhin haben 2006 verschiedene Nichtregierungsorganisationen (NGOs) wie Greenpeace und Friends of the Earth zusammen mit mehr als 35 anderen NGOs dazu aufgerufen, die Synthetische Biologie stärker zu regulieren und die Gesellschaft mehr in die Debatte einzubeziehen.³

³ <http://www.etcgroup.org/en/node/11>

2. Was ist Synthetische Biologie?

Was genau unter „Synthetischer Biologie“ zu verstehen ist, wird gegenwärtig unterschiedlich beantwortet. Eine allgemein gültige Definition existiert bisher nicht. Umfang und Grenzen des neuen Forschungsgebietes werden noch debattiert. Das Wort „synthetisch“ beinhaltet sowohl die Bedeutungen „konstruiert“ (constructed) als auch „künstlich“ (artificial) (Balmer&Martin, 2008)⁴, wodurch im Vergleich zur Gentechnologie der Aspekt einer ‚Unnatürlichkeit‘ deutlicher betont wird.

Die Expertengruppe ETC (2007), die sich seit Jahren kritisch mit dem Thema auseinandersetzt, definiert Synthetische Biologie wie folgt:

„The design and construction of new biological parts, devices and systems that do not exist in the natural world and also the redesign of existing biological systems to perform specific tasks. Advances in nanoscale technologies – manipulation of matter at the level of atoms and molecules – are contributing to advances in synthetic biology.“

Die Beratergruppe der Europäischen Kommission „European Group on Ethics in Science and New Technologies“ (EGE, 2009) stellt klar, dass es derzeit keine einheitliche Definition für den Begriff der Synthetischen Biologie gibt, nennt aber drei Bereiche, die für eine Definition und Begriffsfassung zentral seien:

- „1. The design of minimal cells/organisms (including minimal genomes);*
- 2. The identification and use of biological ‚parts‘ (toolkit);*
- 3. The construction of totally or partially artificial biological systems.“*

Synthetische Biologie ist keine isolierte wissenschaftliche Disziplin. Ein Blick auf die Tätigkeiten, die ihr zugerechnet werden, zeigt vielmehr, dass sie auf den Resultaten anderer Disziplinen aufbaut und diese synergistisch nutzt. Zu diesen Disziplinen gehören Molekularbiologie, Proteindesign und Nanobiotechnologie. Viele der Forschungstätigkeiten der Synthetischen Biologie können auch der klassischen Gentechnik oder dem Metabolic Engineering (die gezielte Veränderung von Stoffwechselfvorgängen in der Zelle) zugerechnet werden, eine klare Trennung ist nicht immer möglich.

In der Entwicklung der Synthetischen Biologie kann man sowohl einen Paradigmenwechsel sehen (siehe Tabelle 1), als auch eine extreme Zuspitzung der Gentechnik.

⁴ Zitiert nach EGE, 2009

Tabelle 1: Paradigmenwechsel der Synthetischen Biologie
(Quelle: van Est et al. 2007)

	Gentechnik	Synthetische Biologie
Technologie	Lesen und Analysieren von DNA	Schreiben und Synthetisieren von DNA
	Versuch und Irrtum	Softwareprogrammierung
Anwendung	Adaption/Modifikation von existierenden biologischen Systemen	Design und Konstruktion/Modulation von neuen biologischen Systemen

Tatsächlich bedienen sich Gentechnik und Synthetische Biologie sehr ähnlicher Methoden und verfolgen auch ähnliche Ziele. Sowohl Gentechnik als auch Synthetische Biologie können zur Herstellung von neuen Enzymen, der Veränderung oder Neuschaffung von Stoffwechselwegen (metabolic pathways) in der Zelle oder der Fabrikation zusätzlicher Chromosomen genutzt werden. Die Synthetische Biologie erweitert die technischen Möglichkeiten der Gentechnik, indem sie sowohl bereits existierende Gene re-synthetisieren und leichter verfügbar machen als auch künstliche Gene neu konstruieren kann, die dann mit gentechnischen Methoden in verschiedene Lebensformen übertragen werden können.

Schon früh wurde die gesellschaftliche Gentechnik-Debatte mit dem Hintergrund geführt, inwieweit ein Anspruch besteht, Leben vollständig künstlich und „maschinengleich“ herzustellen. Der Gedanke der Biologie als einer Ingenieurswissenschaft lässt sich zumindest bis in 19. Jahrhundert zurückverfolgen. Schon Jaques Loeb (1859 - 1924) entwickelte ein „Mechanistic Conception of Life“, versuchte sich in Klontechniken, Jungfernzeugung und Abiogenese, der Erschaffung von Leben aus unbelebter Natur (Then, 2008a). Man kann die Synthetische Biologie als eine konsequente Umsetzung dieser Strategie begreifen, in der die Gentechnik nur eine Zwischenstufe darstellt:

„Die ‚bessere Konstruktion‘ und das ‚wunderbare Getriebe‘, von denen schon Descartes schwärmte, bestimmen noch immer das Ziel der maschinellen Träume. Bio-Design, Synthetik-Moleküle und Bio-Maschinen, die sich nach den Bauplänen des Lebens selbst konstruieren, sind die bereits anvisierten nächsten Schritte zur vollkommenen Maschinennatur. Denn die Reste des (Eigen) Lebens sind noch zu unberechenbar. In Veröffentlichungen wird schon jetzt die Gentechnologie als ‚Übergangslösung‘ beschrieben.“ (Hamberger, 1990)

Hinter der Debatte um die Synthetische Biologie steht also auch die viel ältere Debatte darüber, ob der Mensch künstliches Leben schaffen kann und darf. An diese Debatte wird auch von Seiten der Lebensingenieure bewusst angeknüpft, etwa wenn Forscher davon sprechen, mit Hilfe einer Omega-Maschine

neues Leben zu schaffen (Zeitschrift GEO, August 2009). Mit der Synthetischen Biologie wird die Schaffung ‚künstlichen Lebens‘ erstmals salonfähig. Statt der Geschichte von Frankenstein werden jetzt Analogien zu Kunstformen bemüht. So heißt es in ‚Der Spiegel‘ (1/2010):

„Das Design von Genomen könnte zur neuen Kunstform heranwachsen, nicht weniger kreativ als die Malerei oder die Bildhauerei.“

Doch die ethischen, soziokulturellen, ökologischen und naturwissenschaftlichen Fragen, die sich im Kontext der Debatte um ‚künstliches Leben‘ stellen, sind nicht einmal im Ansatz beantwortet, auch wenn die genetischen Schaltkreise der Synthetischen Biologie als ästhetisch reizvolle Leucht Bakterien und nicht als mittelalterliche Homunculi präsentiert werden.

3. Technische Methoden

Das Spektrum angewandter Methoden, technologischer Strategien und möglicher Kombinationen mit anderen Technikfeldern ist vielfältig. Zentral für die Entwicklung und Anwendung der Synthetischen Biologie ist die Möglichkeit der Synthese von Genen und die modellhafte Entwicklung von biologischen, sich selbst reproduzierenden Funktionseinheiten.

3.1 DNA-Synthese

Die synthetische Herstellung von DNA-Molekülen, die nach Kundenwünschen angefertigt werden, hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Czar et al. (2008) gehen davon aus, dass diese DNA-Synthese-Techniken die Biotechnologie-Industrie radikal beeinflussen werden.

Der Grund für die Bedeutung von DNA-Synthese-Techniken liegt darin, dass das Arbeiten mit synthetischen Genen im Vergleich zu den Standardmethoden der Gentechnik wesentliche technische Vorteile bringt: Die Wissenschaftler brauchen keine materielle Vorlage mehr, keine aus Organismen isolierte Gene. Sie können Gene nun aus der Beschreibung der Sequenzen (Abfolge der Basen) Schritt für Schritt nachbauen und damit mit Genmaterial arbeiten, für das es in der Natur keine Vorlage gibt (Czar et al. 2009, Xiong et al. 2008, Garfinkel et al. 2007). Des Weiteren können sie natürlich vorkommende Gene leichter und umfassender verändern.

Kosten und technische Möglichkeiten der DNA-Synthese bestimmen den Handlungsspielraum der Synthetischen Biologie, da sie die Komplexität der herstellbaren genetischen Schaltkreise und Gen-Netzwerke sowie die Größe der de novo synthetisierbaren Genome beeinflussen.

In den letzten Jahren sind Geschwindigkeit und Präzision der DNA-Synthese kontinuierlich verbessert worden. Gleichzeitig sanken deren Kosten. Die Länge de novo herstellbarer DNA-Stränge stieg kontinuierlich an: 2004 war der größte hergestellte DNA-Strang 32'000 Basenpaare lang, 2007 betrug die Länge 52'000 Basenpaare und 2008 waren es 582'970 Basenpaare (Gibson et al. 2008). Mit diesen derzeit de novo herstellbaren Gensequenzen bewegt man sich in der Größenordnung von genetischen Netzwerken und den Genomgrößen von Viren und einfachen Bakterien. Beispiele von Viren und Bakterien, deren Erbgut bereits mit Hilfe von DNA-Synthese-Techniken hergestellt worden ist, sind: *Poliovirus* (Cello et al. 2002), *Spanischer Grippevirus* (Tumpey et al. 2005) und *Mycoplasma genitalium* (Gibson et al. 2008). Lebewesen, deren Genom künstlich resynthetisiert wurde, lassen sich von den natürlichen Lebensformen nicht unbedingt unterscheiden. Diese Lebewesen werden sozusagen als ‚naturidentisch‘ angesehen. Ob sich die jeweiligen so synthetisierten Mikroorganismen in unterschiedlichen Umwelten auch tatsächlich wie ihre Originale verhalten, weiß man nicht. Es ist auch nicht klar, wie und ob sie von ihren ‚Originalen‘ bei Bedarf unterschieden werden können.

Das Team von Craig Venter hat deswegen in ihrem 2010 vorgestellten Organismus zusätzlich künstliche Gene eingebaut, die eine Identifizierung erlauben sollen. (Gibson et al., 2010)

Der Einsatz von synthetisierten Genen ist längst nicht mehr auf Mikroorganismen beschränkt. So berichtet ‚Der Spiegel‘ (2010/1), die Gene des Nacktmull sollen Schritt für Schritt resynthetisiert und in Mäuse eingefügt werden, um so das Erbgut einer Spezies nach und nach vollständig durch das einer anderen zu ersetzen. Auch höhere Lebewesen sind also längst Versuchsobjekte des ‚Extreme Engineering‘.

Da die Länge der synthetisierbaren DNA-Stränge weiter zunehmen und die Kosten weiter sinken dürften, wird davon ausgegangen, dass die DNA-Synthesetechniken die klassischen rekombinanten Techniken in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren in vielen Bereichen ersetzen werden (Stähler et al. 2006). Die Herstellung synthetischer Gene erfolgt heute weitgehend in privaten Betrieben. Weltweit soll es zwischen 40 und 50 Gensynthese-Firmen geben⁵; wichtige Firmen wie GeneArt befinden sich in Deutschland.

3.2 Herstellung ‚minimalisierter‘ Organismen

Da die Komplexität der Stoffwechselwege in natürlichen Organismen den Zielen der Synthetischen Biologie oft entgegen wirkt (Heinemann & Panke 2006), wollen die Wissenschaftler Zellen kreieren, die möglichst „einfach“ ausgestattet sind. So ist es eines der Hauptziele der Synthetischen Biologie, lebende Zellen mit minimalen Genomen zu fabrizieren (Moya et al. 2009). Um dieses Ziel zu erreichen, werden zwei verschiedene Verfahrenswege eingeschlagen: *top-down* oder *bottom-up*.

Der *top-down*-Ansatz besteht darin, das Erbgut von einfachen, natürlich vorkommenden Organismen zu verringern. Projekte dazu existieren vor allem bei Organismen, die bereits bisher in der Biotechnologie eingesetzt werden. Ein Beispiel ist das Bakterium *Escherichia coli*, dessen Erbgut um 22 Prozent verkleinert wurde. Weitere Vorhaben zur Reduktion des Erbguts gibt es unter anderem bei den Bakterien *Bacillus subtilis* (Westers et al. 2003) und *Corynebacterium glutamicum* (Suzuki et al. 2005) sowie mit der Back-Hefe *Saccharomyces cerevisiae* (Murakami et al. 2007). Ob sich derartige Lebensformen in unterschiedlichen Umwelten und ggf. in Ökosystemen tatsächlich auch so wie ihre ‚Originale‘ Verhalten, ist nicht bekannt.

Beim *bottom-up*-Ansatz wird entweder versucht, synthetisch hergestellte, minimale Genome in bestehende Zellen zu transferieren, oder gänzlich künstliche Zellen zu schaffen. Einzelne Schritte zur Herstellung synthetischer Zellen

⁵ <http://www.genengnews.com/news/bnitem.aspx?name=68850005>

sind bereits gelungen. Dazu gehören die Synthese des kompletten Erbguts von *Mycoplasma genitalium* (Gibson et al. 2008a/b), der Transfer des natürlichen Erbguts von *M. mycoides* in *M. capri* (Lartigue et al. 2007) sowie die Übertragung des genetisch veränderten, in Hefe klonierten Erbguts von *M. mycoides* in *M. capricolum* (Lartigue et al. 2009). Auch wenn diese Schritte den Beginn von synthetischem Leben näher rücken lassen, so steckt dieser Forschungszweig noch in seinen Anfängen, weshalb Anwendungen in naher Zukunft wohl nicht zu erwarten sind (Koide et al. 2009, Alper & Stephanopoulos 2009). Auch das Team von Craig Venter (Gibson et al., 2010) hat nicht ein gänzlich neues Lebewesen geschaffen, sondern natürlicherweise vorkommende Gene künstlich neu synthetisiert und auf einen bereits existierenden ähnlichen Organismus übertragen.

Neben der Herstellung synthetischer Organismen wird auch versucht, gänzlich künstliche Zellen zu erschaffen. Dabei wird ein Ensemble von Genen und Enzymen in ein Gebilde aus Lipiden eingefügt, die Komplexität dieses Ensembles Schritt für Schritt erhöht, bis das Konstrukt beginnt, Formen zellulären Lebens zu bilden (Luisi 2007, Luisi et al. 2006). Auch hier dürften in nächster Zeit keine Anwendungen zu erwarten sein.

3.3 Modellierung von Stoffwechselwegen

Ein Bereich, in dem die Synthetische Biologie schon in der Praxis angekommen ist, ist die Veränderung von Stoffwechselwegen, das Design von genetischen Netzwerken und regelrechten „Schaltkreisen“. Hier zeigt sich nicht nur der Unterschied zur klassischen Gentechnik deutlich, widerspiegelt der Einsatz von genetischen Schaltkreisen doch den Übergang von der Molekularbiologie zur Modularbiologie.

Dabei kommen Prinzipien der Ingenieurwissenschaften wie Hierarchisierung, Standardisierung sowie das Trennen von Design und Fabrikation zu Anwendung (Heinemann & Panke 2006, Endy 2005).

Der Zweck der Hierarchisierung besteht darin, verschiedene Abstraktionsebenen einzuführen, um so die Komplexität biologischer Systeme zu reduzieren und damit besser handhaben zu können. Diese Abstraktionsebenen bestehen aus Bauteilen, Baugruppen, und Systemen (Endy 2005).

Um aus den Bauteilen und Baugruppen funktionierende Systeme erstellen zu können, wird eine Standardisierung angestrebt. Sie soll sicherstellen, dass ein *plug-and-play* der verschiedenen Bauteile und -gruppen möglich wird, unabhängig davon, in welchen Laboren oder Firmen sie gestaltet und fabriziert wurden (Heinemann & Panke 2006). Einen ersten Schritt zur Standardisierung haben US-amerikanische Forscher mit der Lancierung des *Registry of Standard Biological Parts* gemacht. Das Register enthielt 2008 bereits über 2000 standardi-

sierte *biobricks* („Biobausteine“) (Shetty et al. 2008).

Das dritte Prinzip schließlich, die Trennung von Design und Fabrikation, soll eine Arbeitsteilung erlauben: einige Bio-Ingenieure haben sich auf das Design von Bauteilen spezialisiert, andere konzentrieren sich auf Baugruppen und dritte wiederum sind für die Synthese der entsprechenden DNA verantwortlich.

Hierarchisierung, Standardisierung und Design – mit diesen Prinzipien wollen die ‚Ingenieure‘ der Synthetischen Biologie aus standardisierten Biobausteinen komplexe Funktionen in Zellen zusammenbauen.

Die Modellierung von Stoffwechselwegen wird mit Unterstützung der Bioinformatik auch zu Vorhersagen über Abläufe, Interaktionen und Veränderungen in biologischen Zellen verwendet. Diese repräsentieren verschiedene Ebenen der Zell- und Genregulation. Deren Vorgänge will man besser verstehen lernen, um sie dann möglichst gezielt verändern zu können. Dabei können auch neue Stoffwechselwege sukzessiv in mehreren Schritten kombiniert werden. Bekanntestes Beispiel ist die Synthese eines Anti-Malaria Mittels (Artemesin) in Bakterien (Martin et al. 2003).

4. Potentielle Anwendungen

Obwohl die Synthetische Biologie noch eine relative junge Disziplin ist, sind die Erwartungen in sie enorm. Ihr möglicher Einfluss auf Gesellschaft und Wirtschaft wird oft verglichen mit den Einflüssen der chemischen oder elektronischen „Revolution“. Stellvertretend sei hier die Einschätzung einer hochrangigen Expertengruppe der EU-Kommission wiedergegeben:

„Die Art und Weise, wie die Synthetische Biologie Industrie, Forschung, Ausbildung und Beschäftigung im Life-Science-Sektor vorantreiben wird, kommt den Entwicklungen der Computerindustrie zwischen den 1970er und 1990er gleich.“ (European Commission 2005b)

Die Expertengruppe geht davon aus, dass viele der Versprechungen, welche die traditionelle Bio- und Gentechnologie bisher nicht einlösen, durch die Synthetische Biologie erfüllt werden könnten. Als wichtige Einsatzgebiete nennt sie Biomedizin, Herstellung von Biopharmazeutika, Chemische Industrie, Umwelt, Energie und Produktion von Nano- und Biomaterialien. In Tabelle 2 sind hierzu Beispiele aufgeführt.

Tabelle 2: Mögliche Einsatzbereiche der Synthetischen Biologie und Beispiele

Bereich	Beispiel
Biomedizin	<i>Geneherapie</i> : Design und Veränderung von Viren, die Gene ins Zielgewebe bringen.
	<i>Personalisierte Medizin</i> : Produktion von «persönlichen» Medikamenten.
	<i>Verbesserung des Immunsystems</i> : Herstellung von künstlichen menschlichen Zellen, die Viren und Bakterien besser bekämpfen als das natürliche Immunsystem.
	<i>Geweberparatur</i> : Entwicklung von makromolekularen Aggregaten, die Schäden in Blutbahnen erkennen und reparieren können.
Biopharmazeutika	Mikroorganismen mit neuen Stoffwechselwegen zur Produktion von natürlichen oder künstlichen pharmazeutisch wirksamen Substanzen.
Umwelt	<i>Bioremediation</i> : Entwicklung von Bakterien und Pilzen, die toxische Abfälle abbauen können.
	<i>Biosicherheit</i> : Herstellung sicherer GVO durch den Einbau von nicht-natürlichen Nukleinsäuren.
Energie	Mikroorganismen, die Abfälle oder Solarenergie in Biotreibstoffe umwandeln.
Chemische Industrie	Mikroorganismen, die komplexe Chemikalien herstellen.
Biomaterialien	<i>Synthese</i> : Zellen, die aus nicht natürlich vorkommenden Aminosäuren Polypeptide mit neuen Materialeigenschaften herstellen.

Eine Anwendung der Synthetischen Biologie, die besonders problematisch ist, ist die Gen-Synthese von Krankheitserregern. Hier eröffnen sich enorme Möglichkeiten zum gezielten Mißbrauch. Im Jahr 2002 wurde berichtet, dass es Forschern an der Universität von New York gelungen sei, ein *Poliovirus* aus verschiedenen Bestandteilen im Labor zusammensetzen, die man einfach im Internet bestellen konnte (Cello et al. 2002). Mit Hilfe der Synthetischen Biologie können alle Daten, die über das Genom von Krankheitserregern publiziert werden, zu potentiellen Blaupausen für Bioterroristen werden. Kontrovers diskutiert wurde in diesem Zusammenhang die Publikation von Details des Krankheitserregers der *Spanischen Grippe*: 1918 und 1919 starben daran über 20 Millionen Menschen, seitdem galt er als ausgestorben. Doch 2005 wurden seine Genomdaten in „Nature“ veröffentlicht (Tumpey et al. 2005). Die Synthetische Biologie macht den Nachbau dieser Sequenzdaten theoretisch möglich. Unter dem Stichwort „Biosecurity“ wird unter anderem davor gewarnt, dass Biohacker das Risikopotential der neuen Lebensformen gezielt könnten, um künstliche Krankheitserreger zu schaffen.

5. Wirtschaftliche Förderung und Entwicklung

Die Synthetische Biologie wird in der EU mit erheblichen Mitteln gefördert. Hier sitzen auch einige der Firmen, die weltweit führend im Bereich der Gen-Synthese sind, wobei dem Standort Deutschland eine besondere Bedeutung zukommt.

5.1 Förderung in der EU

In der EU werden verschiedene Forschungsprojekte in Zusammenhang mit der Synthetischen Biologie gefördert. Im Rahmen des 6. Rahmenforschungsprogramms (bis Ende 2008) wurde beispielsweise TESSY finanziert, ein Programm, das der Zusammenführung und dem systematischen Aufbau der Synthetischen Biologie in der EU dienen soll⁶. Über dem Projekt EMERGENCE⁷ (das an der ETH Zürich angesiedelt ist) wurden die NEST (New and emerging scientific and technology) Aktivitäten der EU im Rahmen des FP6 Pathfinder Programms koordiniert:

„The objective of this coordination action (CA) EMERGENCE is to provide a communication and working platform for the emerging European synthetic biology community in order to strengthen the organizational and conceptual basis of the synthetic biology as a true engineering discipline in biological engineering.“

Im Rahmen des Projektes SynBioSafe⁸ wurden verschiedene Fragen der Risiken, der Ethik und sozioökonomischer Auswirkungen bearbeitet.

Die Europäische Union hält die Synthetische Biologie für eine Technologie von hoher strategischer und ökonomischer Bedeutung. So heißt es in einer Publikation der Generaldirektion für Forschung aus dem Jahr 2007⁹, in der ein Überblick über die geförderten Projekte gegeben wird:

„Only a small number of research centres explicitly use the term ‘synthetic biology’ to describe their work. However, this area is of enormous strategic and economic significance, representing an arena in which scientific knowledge will be progressively embedded in technological solutions. Europe must invest in this development in order to build up the necessary intellectual and physical structures to capture a share of the valuable intellectual property that is at stake.“

Auch im derzeitigen 7. Forschungsrahmenprogramm der EU gibt es erhebliche Fördermittel, die sich unter anderem auf die Erzeugung von Kraftstoff, also Biofuels erstrecken.¹⁰

6 www.tessy-europe.eu

7 <http://www.emergence.ethz.ch/home.htm>

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

9 Directorate-General for Research, 2007, Synthetic Biology, a NEST pathfinder Initiative <ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nect/docs/5-nest-synthetic-080507.pdf>

10 siehe z. B.: www.hse.ru/temp/2007/files/02_22_konf/Patermann.pdf

5.2 Synthetische Biologie in Deutschland

In Deutschland sitzt ein großer Teil der Firmen, die die Gensynthese auf Bestellung betreiben. Nach Angaben des Geschäftsführers von Febit Synbio, Stähler, sitzen sogar etwa 80 Prozent der Firmen, die sich auf die Synthese von Genen spezialisiert haben, in Deutschland und den USA. Auch die International Association Synthetic Biology hat ihren Sitz in Deutschland mit hauptsächlich deutschen Mitgliedern¹¹. In Marburg soll das derzeit größte Zentrum für Synthetische Biologie in Europa entstehen.

In Europa gehört Deutschland zusammen mit der Schweiz, Frankreich und Großbritannien zu den führenden Ländern in der Synthetischen Biologie (European Commission, 2006). Was die Anzahl der Publikationen betrifft, die man in der Literaturdatenbank Web of Science mit dem Stichwort «synthetic biology» findet, nimmt Deutschland hinter den USA und Großbritannien den dritten Platz ein. Die Zahl der Veröffentlichungen mit deutscher Beteiligung hat sich dabei in den letzten vier Jahren stetig erhöht: 2005 waren es noch insgesamt vier Veröffentlichungen, Ende 2009 bereits 39 Publikationen in der Literaturdatenbank. Betrachtet man die Herkunft der an den Publikationen beteiligten Wissenschaftler, können rund 25 deutsche Forschungseinrichtungen ausfindig gemacht werden, die in unterschiedlicher Form mit Synthetischer Biologie zu tun haben. Zahlreiche dieser Projekte werden von verschiedenen Institutionen gefördert. Dazu gehören die Deutsche Forschungsgemeinschaft, der Fond der Chemischen Industrie, die Alexander von Humboldt-Stiftung, das EMBL in Heidelberg sowie die Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren, die Max-Planck-Gesellschaft und die Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften¹². Stellvertretend für die zahlreichen Projekte werden im Folgenden einzelne Akteure und ihre Vorhaben kurz vorgestellt.

5.2.1 LOEWE-Zentrum SYNMIKRO

Im Rahmen der Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz (LOEWE) fördert das Land Hessen den Aufbau eines Zentrums für Synthetische Mikrobiologie (Synmikro). Der Aufbau des Zentrums ist ein gemeinsames Projekt der Philipps-Universität Marburg und des Marburger Max-Planck-Instituts für terrestrische Mikrobiologie. Die beiden Projektpartner erhalten von 2010 bis 2012 rund 21 Millionen Euro¹³. Hier soll Europas aktuell größtes Zentrum für die Synthetische Biologie entstehen. Allein in den nächsten drei Jahren sollen mehr als 100 Wissenschaftler an das Synmikro-Zentrum geholt werden. Ihr Ziel ist, Mikroorganismen mit am Reißbrett entworfenen Enzymen, Stoffwechselwegen, Genomen und regulatorischen Netzwerken in Kooperation mit der Industrie zu entwickeln. Bis 2016 soll sich der jetzt gestartete Forschungscluster selbst tragen.

11 <http://www.ia-sb.eu/go/synthetic-biology/>

12 <http://www.synthetic-biology.info/institutions.html>

13 <http://idw-online.de/pages/de/news342927>

5.2.2 Zentrum für biologische Signalstudien

An der Universität Freiburg im Breisgau ist das Exzellenzcluster ‚Zentrum für biologische Signalstudien‘ (bioss) angesiedelt. Im Rahmen dieses Projektes werden biologische Signalprozesse analysiert und synthetisiert. Das Projekt wird vom DFG unterstützt und erhält zwischen 2007 und 2012 insgesamt 32,5 Millionen Euro an Forschungsmitteln. An der Universität Freiburg ist Synthetische Biologie als Lehr- und Forschungsfach eingeführt worden.

5.2.3 Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung

Eine der Einrichtungen der Fraunhofer-Gesellschaft, die sich mit Synthetischer Biologie beschäftigt, ist das Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung. In dem von der EU geförderten Projekt TESSY (Towards a European Strategy for Synthetic Biology) hat das Institut die Synthetische Biologie unter strategischen Gesichtspunkten untersucht¹⁴. Um die Wettbewerbsfähigkeit Europas bei der Synthetischen Biologie zu stärken, wurde ein Fahrplan für die nächsten Jahre entwickelt (Gaisser et al. 2009).

5.2.4 Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) hat im Juli 2009 zusammen mit acatech, der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften und der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina ein Positionspapier zu Chancen und Risiken der Synthetischen Biologie veröffentlicht (DFG, 2009)¹⁵. Das Positionspapier betont die Chancen, stuft die Risiken als handhabbar ein und will die Synthetische Biologie zum Erfolg bringen, indem ein frühzeitiger Dialog mit der Öffentlichkeit geführt und somit Akzeptanz geschaffen wird. An der Ausarbeitung des Positionspapiers waren auch Vertreter des Bundesamts für Verbraucherschutz und des Robert Koch-Instituts beteiligt.

5.2.5 Dechema

Die DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie hat eine Arbeitsgruppe eingerichtet, die sich mit Systembiologie und Synthetischer Biologie befasst. Die Arbeitsgruppe will den Akteuren im Bereich der Synthetischen Biologie eine Plattform bieten, um strategische Fragen zu behandeln, zum Beispiel zur Ausbildung, zu Fördermaßnahmen oder zu Industriekooperationen¹⁶.

5.2.6 Netzwerkinitiative Industrielle Biotechnologie Nord (IBN)

Die IBN, die sich auch mit erneuerbaren Energien beschäftigt, hat eine Expertengruppe zur Synthetischen Biologie eingesetzt. Ziel der Gruppe ist, Potenziale

¹⁴ http://cms.isi.fraunhofer.de/wDefault_1/OrgEinh-2/beitraege/Presseinfos/2009/pri09-16.php

¹⁵ http://www.dfg.de/aktuelles_presse/reden_stellungnahmen/2009/synthetische_biologie.html

¹⁶ http://biotech.dechema.de/Fachgemeinschaft/Arbeitsausschuesse/Systembiologie_u__Synthetische_Biologie.html

auszuloten, um die industrielle Biotechnologie mit Hilfe der Synthetischen Biologie weiterzuentwickeln.¹⁷

5.2.7 Gensynthese-Firmen

In Deutschland gibt es mehrere Firmen, welche synthetisch hergestellte Gene anbieten. Dazu gehören Febit, Sloning, Eurofins MWG Operon, Geneart, Entelchon und ATG-Biosynthetics. Einige dieser Firmen sind international aufgestellt und liefern synthetische Gene auch in die USA oder in Länder Asiens. Eine der führenden Firmen ist Geneart. Sie ist Mitglied des International Gene Synthesis Consortium (IGSC) und soll zusammen mit den anderen vier Mitgliedern dieses Konsortiums 80 Prozent der weltweiten Synthesekapazität repräsentieren (Check Hayden 2009).

5.2.8 Industrieverband Synthetische Biologie (IASB)

Die International Association Synthetic Biology (IASB) mit Sitz in Heidelberg ist ein Verband von Firmen, die DNA/Gene synthetisch herstellen. Der Verband hat unter anderem einen Verhaltenskodex für Firmen entwickelt, mit dem die Biosicherheit im Umgang und Handel mit synthetischen Genen gewährleistet werden soll (Bernauer et al. 2008; siehe dazu auch Check Hayden 2009, Kelle 2009, Stähler 2009).

¹⁷ http://ibnord.de/cms/?page=Syntetische_Biologie

6. Die Diskussion über die Risiken

Bisher ist die öffentliche Wahrnehmung der Synthetischen Biologie kaum erfolgt und weder von Kontroversen noch von Risikodebatten geprägt. Aber schon 2004 forderte das Magazin Nature eine breite Debatte der Risiken ein:

„Hier werden nicht mehr nur Gene ausgetauscht. Jetzt wird Leben wie Ton geformt. (...) Die Reichweite derartiger Instrumente ist viel größer als die der gentechnischen Veränderung und es ist sicherlich viel schwerer die tatsächlichen Risiken vorher zu sehen.“¹⁸

Philipp Ball (2004) zitiert in der selben Ausgabe von Nature einen Bericht der CIA über neue Biowaffen¹⁹, in dem davor gewarnt wird, dass mit Hilfe der synthetischen Biologie völlig neue Erreger und andere Organismen hergestellt werden könnten, „schlimmer als jede bisher der Menschheit bekannte Krankheit“. Bisher haben diese Bedenken jedoch nicht zu einer breiten öffentlichen Diskussion geführt.

Auch den beteiligten Wissenschaftlern und Firmen gelang es bis heute nicht, sich auf Maßnahmen zur Begrenzung der Risiken der Synthetischen Biologie zu verständigen. Eine Konferenz in Berkeley, bei der auch die in Nature formulierten Bedenken diskutiert werden sollten, ging im Mai 2006 ohne konkretes Ergebnis zu Ende. Man wolle die Produktion billiger Medikamente und Treibstoffe nicht durch restriktive Sicherheitsmaßnahmen behindern, meinte ein Teilnehmer.²⁰

Diese Konferenz von 2006 gab Anlass, von Seiten der Zivilgesellschaft Einfluss auf die Entwicklung der Synthetischen Biologie zu nehmen. Damals gab es einen gemeinsamen Brief von über 35 NGOs,²¹ der bisher aber ohne große Wirkung blieb.

Generell werden im Zusammenhang mit den Risiken der Synthetischen Biologie die beiden Bereiche Biosafety und Biosecurity diskutiert (siehe u.a. Boldt 2009, De Vriend 2006, IRGC 2008). In einem Perspektivenpapier für den Deutschen Ethikrat (Schultz 2009) heißt es dazu:

„Biosafety deckt alle unbeabsichtigten „Risiken und Nebenwirkungen“ ab, die durch unbeabsichtigte Interaktionen der künstlichen Lebewesen mit der natürlichen Umwelt verursacht werden mögen. Die hierzu stattfindende Debatte wiederholt im Prinzip die gleichen Argumente, die auch schon rund um die etablierte Gentechnik geführt worden sind bzw. noch geführt werden. Es geht also vor allem um das Risiko, dass ein vom Menschen veränderter oder ganz neu geschaffener Organismus die natürliche Umwelt oder den Menschen schadet, wenn er ins Freiland gelangt.“

¹⁸ Futures of artificial life, Editorial Nature 2004, Vol 431, Seite 613

¹⁹ CIA, 2003, The Darker Bioweapons Future, <http://www.fas.org/irp/cia/product/bw1103.pdf>, zitiert nach Then, 2008a

²⁰ Sueddeutsche Zeitung, Nr 300, 30./31 Dezember 2006 / 1. Januar 2007, Seite 24

²¹ <http://www.etcgroup.org/en/node/11>

Biosecurity hingegen beschäftigt sich mit dem gezielten Missbrauch biologischer Systeme, insbesondere für terroristische Zwecke. Auf diesem Gebiet hat die Synthetische Biologie besondere Sorgen ausgelöst, weil gerade ihr Markenzeichen, die einfache und kostengünstige Synthese langer Gensequenzen und komplexer biologischer Funktionen, auch den möglichen Missbrauch erleichtert. Zum Beispiel haben mehrere Forschergruppen es geschafft, bekannte Krankheitserreger wie den Poliovirus und den Erreger der Spanischen Grippe künstlich herzustellen. Einem Journalisten der britischen Tageszeitung The Guardian gelang es im Jahr 2006 zudem, als Privatperson bei einer Gensynthese-Firma ein Fragment des Pockenvirus zu bestellen.“

6.1 Biosafety

Die Risiken neuer Lebensformen sind komplex - unabhängig davon, wie einfach ihre Bestandteile selbst sind. Es geht nicht nur um Wechselwirkungen mit der Umwelt, auch die Genregulation der Lebewesen lässt Spielraum für Effekte, die über additive Einzelwirkungen der Bausteine weit hinausgehen. Ob die „Schöpfungen“ der Synthetischen Biologie tatsächlich den Regeln kontrollierbarer Maschinen entsprechen, darf bezweifelt werden. Komplizierte Maschinen sind >nur< fehleranfällig. Komplexe Lebewesen aber sind in letzter Konsequenz selbst vermehrend, interagierend und damit weder rückholbar noch kontrollierbar.

Laut De Vriend (2006) lassen sich verschiedene Szenarien darstellen, bei denen es zu einer nicht mal im Ansatz abschätzbaren Gefährdung der Umwelt kommen kann: Synthetische Organismen können an der Kleidung von Laborarbeitern oder durch Infektion von Wissenschaftlern ungewollt nach draußen gelangen. Sie könnten zu bestimmten Zwecken freigesetzt werden (z.B. um Umweltgifte zu beseitigen), sich dann aber weiter vermehren und ggf weiter entwickeln. Damit können sie zunächst ihre unmittelbare Umwelt, im weiteren Verlauf aber auch Ökosysteme empfindlich stören. Bei diesen Szenarien kann es zu einem Austausch der Gene mit anderen Organismen kommen, in Wechselwirkung mit der Umwelt können Organismen mit neuen, nicht vorhersagbaren Eigenschaften entstehen.

Generell besteht das Problem darin, dass bei einer Risikobewertung synthetischer Organismen nur begrenzt bzw. gar nicht auf die Erfahrungen mit bereits existierenden Lebensformen zurückgegriffen werden kann. So wird beispielsweise bezweifelt, dass synthetische Organismen überleben können, weil ihre neuen Eigenschaften nicht an die Umwelt angepasst sind, was ihnen ein Überleben unter natürlichen Bedingungen unmöglich machen könnte. Auf der anderen Seite wird aber auch erörtert, dass sich die Organismen gerade deswegen in der Umwelt sehr schnell ausbreiten können, da Ökosysteme auf ihre neuen Eigenschaften nicht vorbereitet sind (IRGC 2008).

Als Analogie, die allerdings nicht hinreichend ist, kann man sich der möglichen Ausbreitung von Organismen mit synthetischen Genen allenfalls über die Ausbreitung invasiver Arten nähern. Auch eine einzelne Art kann sich invasiv und damit verhängnisvoll auf ganze Ökosysteme auswirken. Letztlich kann aber nicht vorhergesagt werden, welche Organismen sich invasiv verhalten werden. So heißt es auf der Homepage des Bundesamtes für Naturschutz, BfN²²:

„10 % der eingeführten oder eingeschleppten Arten halten sich unbeständig, 10 % davon etablieren sich dauerhaft in naturnahen Lebensräumen, wiederum ca. 10% dieser eingebürgerten Arten können unerwünschte Auswirkungen und damit invasiven Charakter haben. Von 1.000 eingeführten oder eingeschleppten Arten kommen demnach 100 unbeständig vor, 10 etablieren sich dauerhaft und nur eine (= 0,1%) wird invasiv. Dabei scheinen einige Arteigenschaften einen besonderen Konkurrenzvorteil darzustellen. Dazu gehören beispielsweise eine hohe Samenproduktion, eine starke Wuchskraft oder Toleranz gegenüber Störungen bzw. Bevorzugung von Nährstoffreichtum. Auch eine gewisse Plastizität des Genoms ermöglicht offensichtlich eine schnellere Anpassung an die neue Umwelt und begünstigt damit die Invasivität von Arten. Folglich spielen auch die Standorteigenschaften wie z. B. der Nährstoffhaushalt oder die Störungsintensität der neu besiedelten Lebensräume eine entscheidende Rolle für den Ansiedlungserfolg. (...) Anders verhält es sich allerdings in lange isolierten Ökosystemen wie auf Inseln, wo sich die Arten „ungestört von außen“ über einen sehr langen Zeitraum entwickelt haben. Diese besonders stark aufeinander eingespielten Artengemeinschaften können durch neue Arten sehr leicht in ihrem Gleichgewicht gestört werden, so dass z. B. in Hawaii die Biomasse der Neophyten bereits die der heimischen Arten übersteigt und schon 10% der heimischen Pflanzenarten durch Neophyten verdrängt wurden und damit ausgestorben sind. Jedoch ist es nicht sicher vorhersehbar, ob sich Arten in einem neuen Gebiet etablieren oder dort gar invasiv werden können, selbst wenn Ansprüche und Eigenschaften der Art bekannt sein sollten. Zudem etablieren sich Neophyten oft zuerst nur lokal und breiten sich über lange Zeit nicht nennenswert aus (sog. lag-Phase), können dann aber nach Jahren mehr oder weniger unvermittelt und rasant ihr Areal erweitern (...) Damit kommt der frühzeitigen und dauerhaften Beobachtung von Neophyten eine entscheidende Rolle zu. Auch die Auswirkungen von Invasionen sind artspezifisch und können in den meisten Fällen nicht präzise im Voraus abgeschätzt werden.“

Ähnlich beschreiben Tucker & Zilinskas (2006) das grundsätzliche Problem einer Freisetzung synthetischer Organismen, deren Auswirkungen nicht im Voraus abgeschätzt werden kann, da in Wechselwirkung mit der Umwelt völlig unvorhergesehene Eigenschaften auftreten können:

22 <http://www.floraweb.de/neoflora/oekologie.html>

„If a synthetic microorganism is built by combining these genetic elements in a new way, it will lack a clear genetic pedigree and could have “emergent properties” arising from the complex interactions of its constituent genes. Accordingly, the risks attending the accidental release of such an organism from the laboratory would be extremely difficult to assess in advance, including its possible spread into new ecological niches and the evolution of novel and potentially harmful characteristics.“

Ähnliche Risiken sieht auch die EGE:

„Synthetic microorganisms released into the environment could initiate processes of horizontal gene transfer and affect biotic balances, or evolve beyond their functionality and elicit unprecedented side-effects on the environment and other organisms.“

Auch Institutionen, die den Einsatz der Synthetischen Biologie befürworten wie die Deutsche Forschungsgemeinschaft und die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (DFG, 2009)²³ erkennen in ihrer Stellungnahme zur Synthetischen Biologie diese Risiken an:

„Über unvermutete und neue Wechselwirkungen könnten bei künstlichen biologischen Systemen unerwartete Eigenschaften auftreten und zu unkalkulierbaren Risiken bei einer absichtlichen oder unabsichtlichen Freisetzung von solchen Systemen führen.“

Jedoch hält die DFG (2009) die Risiken für grundsätzlich beherrschbar. Man könne wie bei gentechnisch veränderten Pflanzen nach einer Risikoabschätzung sehr wohl auch Freisetzungen zustimmen, einen Regelungsbedarf gäbe es bislang nicht:

„Das Ziel der Synthetischen Biologie, Genome in vitro zu synthetisieren und neuartige Organismen ohne Referenz in der Umwelt zu kreieren, stellt an die biologische Sicherheit in Laboratorien oder bei Freisetzungen (Biosafety) bisher keine zusätzlichen Anforderungen und birgt hinsichtlich der Missbrauchsmöglichkeiten (Biosecurity) dieser Technologie aus heutiger Sicht keine andersartigen Risiken als die Gentechnik. Eine gesetzliche Regulierung speziell für die Synthetische Biologie ist derzeit aus diesen Gründen nicht erforderlich.“

Insbesondere Organismen mit reduziertem Genom könnten sich nach Ansicht der DFG (2009) für Freisetzungen eignen, da deren Möglichkeiten für eine Vermehrung und die Anpassung an die Umwelt stark reduziert seien:

„Darüber hinaus ist von großer Bedeutung, dass die Vermehrungsfähigkeit von Minimalzellen in der natürlichen Umwelt stark reduziert ist, da dem

²³ Synthetische Biologie Stellungnahme www.dfg.de/aktuelles_presse/reden_stellungnahmen/2009/synthetische_biologie.html

Minimalgenom ja gerade all die Gene fehlen, die eine Anpassung an komplexe und variable Umweltbedingungen ermöglichen. Damit hat eine Minimalzelle grundsätzlich eine reduzierte Fitness gegenüber Wildtypzellen und eignet sich aus Sicherheitsaspekten besonders für biotechnologische Prozesse und für eine gezielte Freisetzung.“

Was zunächst logisch und biologisch schlüssig klingt, erscheint bei näherem Hinsehen in höchstem Maße riskant.

So sind Lebewesen mit relativ kleinen Genomen wie Viren, Pilze und Bakterien gerade diejenigen, die im Hinblick auf ihre Anpassungsfähigkeit alle anderen Lebensformen übertreffen. Organismen mit sehr kleinen Genom sind deswegen nicht nur für die Synthetische Biologie von Interesse, sondern auch für die Systembiologie, die sich nicht damit befasst, wie man die Komplexität der Biologie reduzieren kann, sondern umgekehrt untersucht, wie aus einfachen Strukturen hochkomplexe Systeme entstehen.

2009 wurde in diesem Zusammenhang in Science eine interessante Forschungsarbeit veröffentlicht (Yus et al. 2009). Sie handelt von *Mycoplasma pneumoniae*, einem der kleinsten Lebewesen, die im Labor gezüchtet werden können. Das Bakterium hat nicht mehr als 700 Gene, eine Art Minimalausstattung für Lebensprozesse. *E. coli* hat dagegen schon mehr als 4000 Gene, Hefe über 6000. Trotz der geringen Anzahl an Genen erwies sich die Regulation bei *Mycoplasma pneumoniae* als höchst komplex, seine Genregulation arbeitet nach den gleichen Prinzipien wie die höherer Lebewesen. Die Anpassungsfähigkeit des Organismus ist erstaunlich, ähnlich wie wesentlich komplexere Lebewesen kann er schnell und flexibel auf Änderungen in der Umgebung reagieren:

„Compared with more complex bacteria, the M. pneumoniae metabolic network has a more linear topology and contains a higher fraction of multifunctional enzymes; general features such as metabolite concentrations, cellular energetics, adaptability, and global gene expression responses are similar, however.“

Die einfache Überlegung, dass Organismen mit einem Minimalgenom grundsätzlich weniger anpassungsfähig sind als andere, ist also wissenschaftlich nicht haltbar. Dass sich biologische Re/Aktionen und Interaktionen auch bei einfachsten Organismen nur begrenzt vorhersagen lassen, ist auch den Protagonisten der Synthetischen Biologie wohl bekannt. So untersucht eine Forschungsgruppe am MIT (Massachusetts Institute of Technology) einen Bakteriophagen, genannt T7. Er besteht aus 40 Kilobasenpaaren, die 56 Gene konstituieren. Das Erbgut des Organismus wurde Schritt für Schritt nachgebaut und sollte auch gleichzeitig »optimiert« werden: Stücke der DNA, die keine Funktion zu haben schienen oder als redundant galten, wurden entfernt, um so einen ‚redesignten‘ Phagen zu schaffen. Versuche, veränderte Stämme des

natürlichen T7 herzustellen, die die Eiweiße lediglich in einer anderen Reihenfolge synthetisieren sollten, endeten mit einer Überraschung. Der Forscher Drew Endy versuchte modellhaft daraus Vorhersagen abzuleiten, was passieren würde, wenn die veränderten Stämme von T7 mit Bakterien (*E.coli*) in Kontakt gebracht werden. Dabei zeigte sich, dass keine der Annahmen und Vorhersagen über das Verhalten der Viren wirklich zutraf: „*Bei allen interessanten Vorhersagen trat immer das Gegenteil ein, wenn ich ins Labor ging,*“ wird Endy zitiert. „*Es war wirklich enttäuschend.*“²⁴

Ein Szenario, das im Zusammenhang mit ‚Biosafety‘ diskutiert wird, ist das des ‚Green Goo‘ (Grüner Schleim). Der Begriff wurde ursprünglich von der Expertengruppe ETC geprägt, die ihn in Analogie zum ‚Grey Goo‘-Szenario einführten, das in der Nanotechnologie diskutiert wird²⁵:

The first and greatest impact of nano-scale technologies may come with the merger of nanotech and biotech – a newly recognized discipline called nanobiotechnology. While Gray Goo has grabbed the headlines, self-replicating nanobots are not yet possible. The more likely future scenario is that the merger of living and non-living matter will result in hybrid organisms and products that end up behaving in unpredictable and uncontrollable ways – get ready for ‚Green Goo!‘“

Hinter dieser drastischen Wortwahl stehen Risiken, wie sie unter anderem von Tucker und Zilinskas (2006) beschrieben werden. Wenn synthetische Organismen aus dem Labor entkommen, können sie sich unkontrolliert ausbreiten und Barrieren innerhalb bestehender Ökosysteme überwinden. Einmal freigesetzt, kann die Kontrollierbarkeit Synthetischer Organismen nicht gewährleistet werden. Auch Van Est et al. (2007) greifen diesen Ansatz auf:

„If synthetic biological systems are used outside of the laboratory for a specific task and time period under specific circumstances, for example to clean up an environmental contamination, such organisms might have a disruptive effect on the ecological balance. In the worst possible scenario, the situation gets out of control and there is a presence of ‘Green goo’ (unidentifiable material), comparable with the ‘Grey goo’ from nanotechnology. Also new organisms, which have escaped or have been deliberately introduced to the environment, can lead to a contamination of natural genetic sources. The exchange of genetic material between synthetic and natural biological systems leads, in principle, to the contamination of the natural genetic pool.“

Falls es zu einer ‚Kontamination des natürlichen Genpools‘ (wie van Est et al. dies nennen) kommen sollte, reicht es zur Beurteilung der Risiken nicht aus, die spezifischen Eigenschaften der synthetischen Organismen zu bewerten,

24 <http://www.wired.com/wired/archive/13.01/mit.html?pg=1>, zitiert nach Then, 2008a

25 ETC Group, 2003, Green Goo: Nanobiotechnology comes alive!, ETC Communique Issue # 77.

die freigesetzt wurden. Die langfristigen Folgen einer zeitlich und regional unbegrenzten Persistenz einer künstlichen genetischen Information sind per se wissenschaftlich nicht abschätzbar, so wenig wie sich der weitere Fortgang der Evolution vorhersagen lässt.

6.2 Biosecurity

Die Ethik-Experten der Europäischen Kommission warnen ausdrücklich vor den Risiken des Mißbrauchs der Synthetischen Biologie zur Herstellung von Kampfstoffen oder zu terroristischen Anschlägen:

„Given the present state of knowledge, the design and production of entirely novel pathogens for terrorist and/or maleficent uses may seem unlikely. There are technological difficulties and resources involved in producing existing and novel pathogens, and developing them into weapons. But states can mobilise resources and dangerous material can be obtained easily over the Internet or in other ways. The ability to carry out DNA synthesis is no longer confined to an elite group of scientists, as was the case for the first several decades of research using recombinant DNA. Now, anyone with a laptop computer can access public DNA sequence databases via the Internet, access free DNA design software, and place an order for synthesised DNA for delivery. Therefore there are valid reasons for taking the bio-security of synthetic biology seriously.“

Ähnliche Befürchtungen werden auch von der DFG (2009) formuliert:

„Es besteht die Befürchtung, dass Einzelpersonen, terroristische Organisationen oder Staaten damit die Möglichkeit haben, pathogene Organismen oder Toxine zu rekonstruieren und für feindliche oder kriegerische Handlungen einzusetzen. Einen ähnlich bedenklichen Ansatz könnten Personen verfolgen, die wie Computer-Hacker und Computer-Virenkonstrukteure als interessierte Laien Zugang zu einzelnen synthetischen Elementen oder den notwendigen Ausgangsstoffen bekommen und in einer unkontrollierten Umgebung synthetische Systeme bis hin zu Mikroorganismen herstellen.“

Auch von den Betreibern der Synthetischen Biologie wird der mögliche Mißbrauch der Gensynthese zu Schaffung neuer biologischer Waffen offen diskutiert. In einem Report des Craig Venter Institutes (Garfinkel et al. 2007) werden Maßnahmen vorgeschlagen, durch die man verhindern will, dass Genabschnitte aus gefährlichen Mikroorganismen synthetisiert und gehandelt werden: Labore sollen gesichert, (z .B. durch Zertifizierung), Gen-Synthese-Maschinen erfasst, und die Bestellung von Gensequenzen kontrolliert werden. Nouri & Chyba (2009) schlagen vor, die Synthese-Maschinen mit Blockademechanismen auszustatten, welche die Synthese bestimmter Gene unmöglich machen. Diese Vorschläge wehren Vertreter der zwei größten Gen-Synthese Firmen (DNA2.0

und GeneArt) ab (Minshull & Wagner 2009), da diese Maßnahmen ihrer Ansicht nach kaum greifen würden:

„First, the cat is already out of the bag. (...) Using web-based protocols, gene synthesis can already be practised in any lab, or even a start up garage if time and money are not an object. Anyone who is sufficiently motivated could synthesize the gene for a toxin or even an entire viral genome using readily available reagents and without ever going near a specialized computer.“

Minshull & Wagner (2009) schlagen andere Maßnahmen vor, wie die Erstellung von Listen der Gen-Sequenzen die nicht hergestellt oder gehandelt werden sollen. Dies wäre letztlich weniger auf Kontrollen ausgerichtet, als darauf, in einer Art Selbstverpflichtung der Labore einen bestimmten Verhaltenscodex zu etablieren.

Insgesamt bietet sich das Bild einer Risikotechnologie, die in die Anwendung gelangt ist, bevor die Öffentlichkeit über mögliche Risiken ausreichend informiert wurde und diese Risiken diskutiert hat. Auch der Gesetzgeber hat sich bisher nicht ausreichend mit notwendigen Maßnahmen befasst. Wie brisant und aktuell das Thema ist, zeigt sich u. a. darin, dass sich im Februar 2009 die Regierungen Deutschlands und der USA unter Beteiligung von Geheimdiensten (FBI, BKA) mit Firmen getroffen haben, um die weitere Entwicklung und deren Folgen zu diskutieren.²⁶

²⁶ Lab Times 3-2009, Seite 24

7. Die Diskussion soziokultureller und ethischer Fragen

Grundsätzliche ethische und soziokulturelle Fragen, wie die, ob künstliches Leben überhaupt geschaffen werden darf, welche Grenzen es hier geben muss und wie die Gesellschaft an der Entwicklung teilhaben bzw. auf sie Einfluss nehmen kann, wurden bisher nur in kleinen Zirkeln diskutiert. Die Stellungnahme von über 35 Nichtregierungsorganisationen im Jahr 2006 mahnt genau diesen Prozess an.²⁷ Die Organisationen warnen insbesondere vor einer rein technischen Betrachtung der neuen Biologie und fordern eine breite gesellschaftliche Debatte:

„The development of synthetic biology technologies must be evaluated for their broader socio-economic, cultural, health and environmental implications not simply for their misuse in the hands of ‚evildoers‘.“

Verschiedene Gremien wie die Ethikberater der Europäischen Kommission (EGE, 2009), die Eidgenössische Ethikkommission für die Biotechnologie im Ausserhumanbereich (EKAH 2009) und der Deutsche Ethikrat haben sich mit der Thematik auseinandergesetzt. Im Perspektivenpapier des Deutschen Ethikrates heißt es dazu (Schultz, 2009):

„Die dritte Gruppe ethischer Bedenken beschäftigt sich mit dem Anspruch der Synthetischen Biologie, völlig neuartiges künstliches Leben zu erschaffen. Pioniere der jungen Disziplin haben hier sicherlich selbst zu einem gewissen Unbehagen in der Bevölkerung beigetragen, wenn sie plakativ von ‚lebender Maschine‘ und ‚künstlichen Zellen‘ sprechen. Beispielhaft ist hier Tom Knight, Professor am MIT Artificial Intelligence Lab zu nennen, der mit folgender Aussage Schlagzeilen machte: ‚The genetic code is 3.6 billion years old. It’s time for a rewrite.‘“

Auch der in diesem Zusammenhang häufige Vorwurf, der Mensch überschreite mit bestimmten Eingriffen in die Natur ethische Grenzen und würde ‚Gott spielen‘, ist nicht neu mit der Synthetischen Biologie aufgetaucht, sondern schon vielfach zuvor bei anderen biotechnologischen Anwendungen genannt worden.

Dennoch lässt sich nicht bestreiten, dass die Synthetische Biologie durch das schiere Ausmaß der angestrebten Veränderungen nicht nur als ‚Extreme Genetic Engineering‘ (ETC Group) bezeichnet werden kann, sondern besonders aggressiv infrage stellt, was Leben eigentlich ist und wie wir damit umgehen wollen.

Boldt et al. (2009) bringen dies in ihrer ‚ethisch-philosophischen Analyse‘ wie folgt auf den Punkt:

- *Der für die Versuchsanordnung methodisch reduzierte Lebensbegriff, den die Synthetische Biologie verwendet, kann dazu führen, „Leben“ an sich zu*

²⁷ <http://www.etcgroup.org/en/node/11>

unterschätzen und suggeriert daher möglicherweise eine Kontrollierbarkeit von Lebensprozessen, die so nicht gegeben ist.

- *Zentrale Begriffe und Metaphern der Synthetischen Biologie – „living machine“, „artificial cell“ – sind rein semantisch höchst problematisch und implizieren ontologisch ein Bild des Lebendigen als Artefakt. Dieses Verwischen der Grenze zwischen Lebendigem und Technischem kann weit reichende Folgen haben für Einschätzung und Umgang mit Lebendigem.*
- *Dies wiederum kann zu einer Änderung des menschlichen Selbstverständnisses führen. Die Vorstellung des Menschen als eines Technikers, als Homo faber, scheint durch die Synthetische Biologie erweitert zu werden; der Mensch scheint hier zum Homo creator zu werden, scheint also nicht nur ein Produzent von Artefakten oder ein Manipulator natürlicher Prozesse, sondern ein veritabler „Schöpfer“ von Leben zu sein.“*

Es überrascht, dass bisher keine gesellschaftliche Debatte über diese ethischen Fragen geführt werden, während gleichzeitig die Betreiber der Synthetischen Biologie ihre Visionen schon seit einigen Jahren offensiv propagieren.

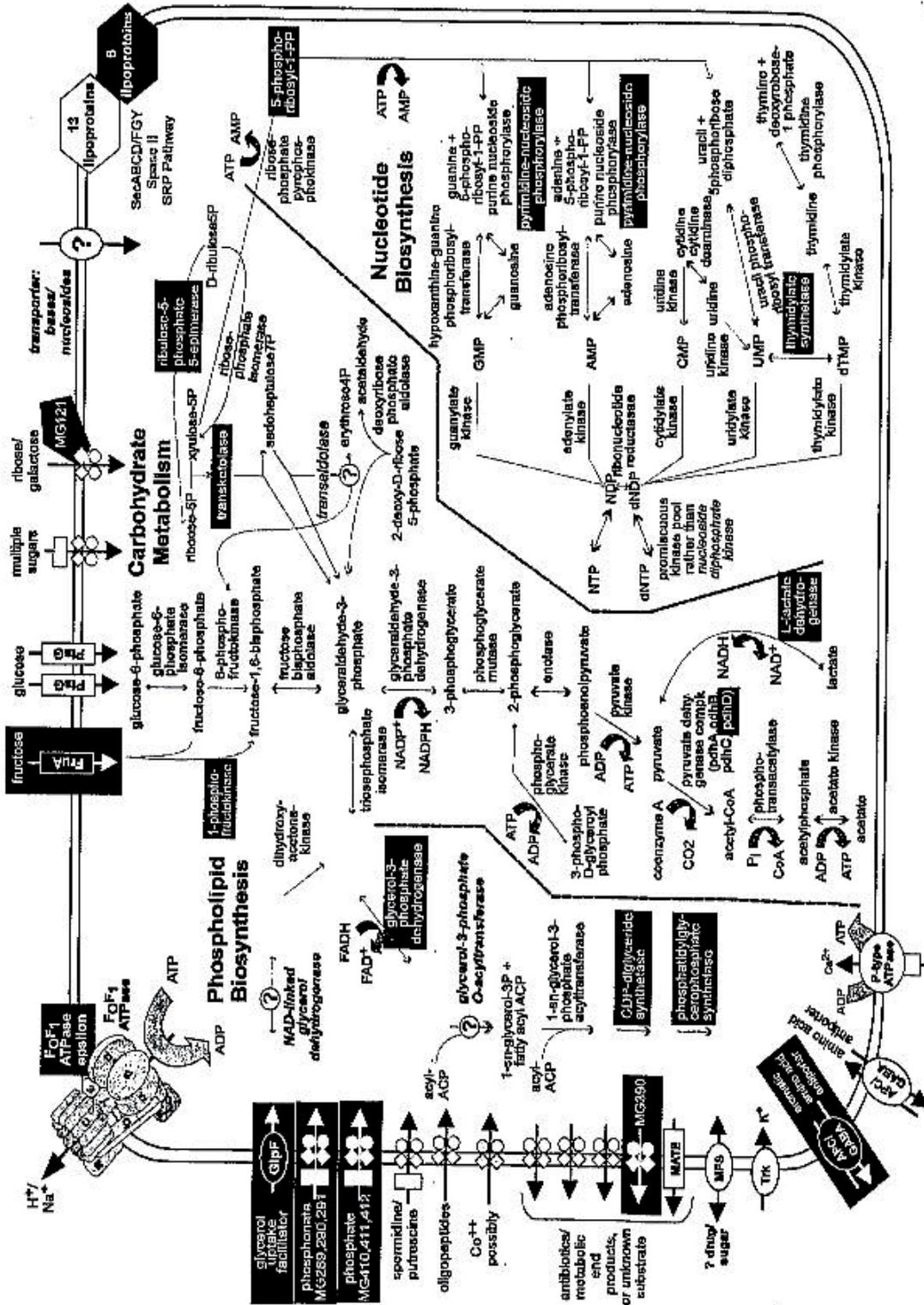
Die Diskussion betrifft letztlich unser grundsätzliches Verständnis darüber, was Leben ist und was Lebewesen gegenüber unbelebter Materie auszeichnet. Sollen Lebewesen patentiert und ohne ethische Grenzen zu rein ökonomischen Zwecken manipuliert werden dürfen? Hier offenbart sich eine Allianz zwischen Wissenschaft und Wirtschaft mit einem zentralen Ziel: Verwertung von Leben. Tatsächlich hat beispielsweise Craig Venter seine Konstruktionspläne für künstliche Lebewesen längst zum Patent angemeldet. In Patentanträgen wie WO 2007047148 beansprucht er ein Monopol auf die wirtschaftliche Verwertung seiner künstlichen Lebensformen. (siehe auch Abb. 1: Figure 4 aus WO 2007047148)

WO 2007/047148

PC1/US2006/039047

12/12

Fig. 4.



8. Zur Diskussion: Neue Schutzkonzepte

Das Wissen um die Komplexität des Genoms und dessen Wechselwirkungen mit der Umwelt (auf der Ebene der Gene, der Epigenetik, des Metaboloms) hat in den letzten Jahren erheblich zugenommen. Die Ansichten darüber, was ein Gen ist bzw. nicht ist, haben sich ganz entscheidend gewandelt: Diese neuen Erkenntnisse stehen dem Ansatz der Synthetischen Biologie diametral gegenüber, denn Gene sind eben keine austauschbaren DNA-Bausteine, ihre Funktion ist in hohem Maße von ihrem Umfeld abhängig. Während die Funktionsweise des Genoms früher als im Wesentlichen durch die DNA determiniert angesehen wurde, zeigen Forschungsergebnisse der letzten Jahre, dass Vererbung und Genregulierung vor allem durch *Nichtlinearität*, *Komplexität* und *Wechselwirkungen* im Bereich der Epigenetik gekennzeichnet sind. Die Epigenetik steuert die Entwicklung höherer Lebensformen und ist auch für die Vererbung und die Wechselwirkung zwischen Genom und Umwelt entscheidend (Jablonka & Raz, 2009).

Vor diesem Hintergrund stellen sich grundlegende Fragen an Gentechnik und Synthetische Biologie: Die Auswahl von Mutationen, die Mechanismen der Epigenetik, die Wechselwirkungen zwischen den Genen (u. a. Epistasie) implizieren eine stete Wandlung des Genoms der Lebewesen. Diese Wandlung hat jedoch keine determinierten Ziele, keinen Zweck, sondern beruht zum großen Teil auf Zufall und wechselseitiger Anpassung. Die Mechanismen der Evolution und Vererbung bieten hier ein System mit einem einzigartigen Potential zur Wandlung und Anpassung.

Die Gentechnik und noch viel mehr die Synthetische Biologie versucht dagegen Lebewesen ein bestimmtes Programm, einen technischen Zweck zu implantieren. Dieser kann beispielsweise in gentechnisch veränderten Pflanzen der heutigen Generation nur verwirklicht werden, wenn das natürliche System der Genregulation (teilweise) ausgeschaltet wird (siehe dazu z. B. Diehn et al. 1996). Es stellt sich hier sowohl in der Gentechnik (Then 2008b) als auch in der Synthetischen Biologie die Frage nach der ‚Integrität des Genoms‘ bzw. den Schutz der natürlichen Dynamik evolutionärer Prozesse und damit die Funktionsfähigkeit der Ökosysteme.

Was passiert, wenn künstlich konstruierte Organismen oder ihr Erbgut in die Umwelt gelangen und Teil evolutiver Prozesse werden? Können synthetische Organismen sich in der Umwelt ausbreiten und die Ökosysteme nachhaltig zerstören? Können Ökosysteme und künftige evolutive Prozesse, deren natürliche Dynamik, ihre Anpassungsprozesse und Weiterentwicklung dadurch latent oder massiv beeinflusst werden? Tucker und Zilinskas (2006) beschreiben drei mögliche Risikoszenarien: die Verdrängung von anderen Arten, eine irreversible Persistenz und die Störung des ökologischen Gleichgewichts:

„Theoretically, three types of negative effects could result from releasing a synthetic microorganism into the environment. First, the organism could

disrupt local biota or fauna through competition or infection that, in the worst case, could lead to the extinction of one or more wild species. Second, once a synthetic organism has successfully colonized a locale, it might become endemic and thus impossible to eliminate. Third, the synthetic organism might damage or disrupt some aspect of the habitat into which it was introduced, upsetting the natural balance and leading to the degradation or destruction of the local environment.“

Die ökologischen Risiken synthetischer Organismen lassen sich nicht aus ihren spezifischen und technischen Eigenschaften abschätzen. So können Lebewesen, die über hoch effektive Enzyme zur Zersetzung von Biomasse (wie Holz und Gräser) verfügen, unter Umständen einen Überlebensvorteil gegenüber Mitbewerbern erringen oder Ökosysteme durch diese Eigenschaften zum einseitigen Vorteil oder zum Schaden anderer Organismen und Organismengruppen nachhaltig verändern oder sogar zerstören.

Aber wie ist es mit Organismen oder Genen, die ihre Wechselwirkungen mit den Ökosystemen erst dann zeigen, wenn sie über einen Zeitraum von einigen Jahrzehnten, Jahrhunderten oder Jahrtausenden in der Umwelt überdauert haben? Szenarien über derartige lange Zeiträume sind hoch spekulativ, eine wissenschaftlich tragfähige Risikoabschätzung scheint nicht möglich.

Welche Verantwortung ergibt sich daraus für Politik und Wissenschaft? Dürfen Freisetzungen in Kauf genommen werden, bei denen es nicht auszuschließen ist, dass sich synthetische Lebensformen oder ihre Gene zeitlich und räumlich unkontrolliert ausbreiten, vermehren und interagieren?

Wie die bereits zitierten Stellungnahmen zeigen, stimmen Befürworter der Synthetischen Biologie (DFG 2009) ebenso wie Kritiker (ETC, 2007) und die Ethikberater der Europäischen Kommission (EGE 2009) in wesentlichen Punkten überein.

Allerdings sind Befürworter wie die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, 2009) der Ansicht, dass diese Risiken durch die bestehenden gesetzlichen Regelungen ausreichen und Freisetzungen von synthetisch hergestellten Organismen im Einzelfall durchaus kontrolliert werden könnten. Dafür müssten eventuell neue Methoden zur Risikoabschätzung entwickelt werden, es bestehe aber keine Notwendigkeit, auf Freisetzungen ganz zu verzichten:

„Für absichtliche Freisetzungen von Organismen der Synthetischen Biologie, für die kein charakterisierter Referenzorganismus in der Natur existiert, ist vor der Genehmigung einer Freisetzung in die Umwelt die Etablierung neuer Evaluationssysteme (Modellökosysteme wie Mikro- und Mesokosmen) zur Risikoabschätzung zu erwägen. Hier bietet das Gentechnikgesetz die Grundlagen für die Charakterisierung dieser Organismen, damit eine sinnvolle Risiko-beurteilung durchgeführt werden kann.“

Ähnlich argumentiert die Ethik-Beratergruppe der Europäischen Kommission (EGE 2009), wenn ihre Empfehlung auch sehr viel vorsichtiger klingt:

„Die Gruppe empfiehlt, dass vor der Freisetzung eines im Rahmen der synthetischen Biologie hergestellten oder modifizierten Organismus in die Umwelt Langzeitstudien zur Umweltverträglichkeit durchgeführt werden müssen. Die Daten aus diesen Studien sollten dann unter Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips und der in der EU-Rechtsprechung vorgesehenen Maßnahmen (Richtlinie über die absichtliche Freisetzung genetisch veränderter Organismen in die Umwelt) bewertet werden. Fällt die Bewertung negativ aus, sollte keine Genehmigung zur Freisetzung von hergestellten oder modifizierten Organismen erteilt werden.“

Angesichts der Komplexität und Langfristigkeit der Lebensvorgänge reicht es nach Ansicht von Testbiotech nicht, nur Vorsorge gegenüber bereits absehbaren Risiken zu betreiben. Wenn man lebende Organismen (gleich ob gentechnisch veränderte oder synthetische Organismen) mit neuen Eigenschaften produziert, müssen die Folgen dieses Eingriffes grundsätzlich sowohl räumlich als auch zeitlich klar begrenzt, das heißt ‚rückholbar‘ sein. Diese Forderung, die schon früh gegenüber dem Einsatz der Gentechnik und der Freisetzung gentechnisch veränderter Organismen erhoben wurde, hat in diesem Zusammenhang eine neue Aktualität und Dringlichkeit erhalten.

Testbiotech ist der Ansicht, dass dieses Schutzziel jeder Risikoabschätzung im Einzelfall voran gestellt und unabhängig von wirtschaftlichen Zielen oder den spezifischen neuen Eigenschaften der Organismen als vorrangig behandelt werden muss. Es geht demnach nicht nur darum, im Einzelfall spezifische Risiken der Organismen zu prüfen und auf dieser Grundlage eine Entscheidung zu treffen, sondern vielmehr darum, einen Eintrag von synthetischen Lebensformen in offene Ökosysteme grundsätzlich zu verhindern.

Gerade das Internationale Jahr der biologischen Vielfalt 2010 sollte Anlass sein, in diesem Zusammenhang über neue Schutzkonzepte nachzudenken, die der heutigen (und absehbar zukünftigen) naturwissenschaftlichen und technischen Entwicklung auf diesem Gebiet angemessener gegenüber treten als die derzeitigen Regelungen. Eine Risikoabschätzung, die case by case vorgeht, aber keine Frage an die langfristigen systembezogenen Folgen für Evolution und Biodiversität stellt, erscheint nicht ausreichend.

Wenn man eine Vorsorge treffen will, die nicht nur auf die Vermeidung bereits absehbarer Risiken angelegt ist, bietet sich beispielsweise das Konzept der ‚Integrität‘ an. Die Möglichkeit von Lebewesen, sich im Rahmen von evolutionären Mechanismen durch Selbstorganisation und wechselseitiger Anpassung zu entwickeln, kann als ein wesentlicher Aspekt ihrer ‚biologischen Integrität‘ angesehen werden. Diese biologische Integrität muss im Hinblick auf die zukünftige Evolution und den Schutz der Biodiversität erhalten werden. So wie man

versucht, Ökosysteme grundsätzlich vor dem Eintrag langlebiger chemischer Stoffe (die akkumulieren) zu schützen, kann man aus dem Konzept der biologischen Integrität ableiten, dass ein Eintrag von synthetischen und technisch umgebauten (nicht von der Evolution „geprüften“) Organismen und Genen in die Umwelt grundsätzlich vermieden werden sollte. David Pimentel et al. (2000) definieren ökologische Integrität wie folgt²⁸:

„Ecological integrity should be defined as an ecosystem’s undiminished ability to continue its natural path of evolution, its normal transition over time, and its successional recovery from perturbations.“

Demnach ist die Anpassungsfähigkeit der Ökosysteme und ihre Fähigkeit, auf Störungen zu reagieren ein wichtiges Kriterium, nicht aber der Erhalt eines bestimmten momentanen Zustands. Das Ökosystem wird in seiner Eigendynamik geschützt, dies dient sowohl dem Schutz der bestehenden Artenvielfalt und als auch ihrer weiteren Entwicklung.

In ähnlichem Kontext verwendet auch die Forschergruppe „The Jena Experiment“ den Begriff der biologischen Integrität und der Evolutionsfähigkeit der Biodiversität²⁹:

„Biodiversität zeichnet sich aus durch eine eigene Dynamik und Entwicklungsfähigkeit. Menschliche Eingriffe und Nutzungen sollten im Einklang mit den natürlichen zeitlichen und räumlichen Skalen der Biodiversität erfolgen. (...)

Biodiversität ist heute ein Schlagwort, das in vielen Zusammenhängen auftaucht, ohne dass es genau verstanden wird. Zum Teil wird es so oft strapaziert, dass einige Fachleute bereits andere Begriffe wie biologische Integrität oder Komplexität vorschlagen, um das zu erfassen, worum es eigentlich geht: das komplexe Netz von Beziehungen und gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Lebewesen der Natur und ihrer Umwelt. (...)

Das Besondere an der lebenden Natur ist gerade die Fähigkeit, stets neue Formen hervorzubringen, mehr oder weniger erfolgreiche, je nach vorherrschenden Umweltbedingungen und dem Vorhandensein früher entstandener Formen. Dadurch ist Biodiversität gleichzeitig die lebende Natur selbst und Voraussetzung für ihre eigene Weiterentwicklung und Anpassungs- und Evolutionsfähigkeit. Die Eigenschaft der Eigendynamik macht es uns nicht leicht, Ziele für die Erhaltung von Biodiversität zu definieren. Den gegenwärtigen Zustand „einzufrieren“ (was teilweise im wörtlichen Sinne versucht wird) wäre ebenso unzureichend wie eine übermäßige Strapazierung der Dynamik durch zu rasche Veränderungen (heute daran erkennbar, dass pro Jahr viel mehr Arten verschwinden als neue entstehen). Das eigentliche Ziel könnte wohl nur

28 Seite 387

29 <http://www2.uni-jena.de/biologie/ecology/biodiv/einfuehrung.html>, Verfasser: Prof. Dr. Bernhard Schmid, Institut für Umweltwissenschaften, Universität Zürich, <http://www.unizh.ch/uwinst>.

sein, die Eigendynamik und Evolutionsfähigkeit der Biodiversität zu erhalten.“

Die DFG (2009) erörtert in ihrer Stellungnahme das Konzept der Integrität, verwirft es aber. Einwände, „*dass sie durch die Herstellung neuartiger Lebewesen die Integrität der Natur zerstöre bzw. die Ordnung der Lebewesen und Arten beschädige,*“ weist sie zurück:

„Auch Argumente, denen zufolge es ethisch problematisch ist, neuartige, also in der bisherigen Natur nicht vorkommende Lebewesen herzustellen, können in dieser Grundsätzlichkeit nicht überzeugen. So lässt sich die Vorstellung von einer an sich integren Natur, die lediglich durch den Menschen gestört wird, kaum mit elementaren Erfahrungen von Selbstzerstörung der Natur, natürlicher Aggression, dem Vorkommen von Seuchen und schweren Krankheiten usw. in Einklang bringen. Überdies widerspricht die Idee einer fixen und sakrosankten Ordnung der Lebewesen und Arten bereits den natürlichen biologischen Phänomenen der Veränderung, der Durchmischung oder dem Aussterben von Arten.“

Diese Überlegungen gehen am Kern des hier vorgeschlagenen Konzeptes vorbei, ebenso wie an der internationalen Arten- und Naturschutzdebatte. Der Schutz eines Ökosystems (der natürlichen evolutiven Dynamik, der Biodiversität) mit dem Ziel, dessen Funktionsfähigkeit und „Integrität“ für die Zukunft zu bewahren, setzt gerade nicht voraus, dass ein bestimmter Zustand des Ökosystems für ‚sakrosankt‘ und statisch erklärt wird (mit wenigen begründeten Ausnahmen). Es geht darum, Ökosystemen die Möglichkeit zu geben, sich an Veränderungen anpassen zu können, ohne durch menschliche Fremdeinwirkungen dabei zu ‚entgleisen‘.

Breckling (2009) schlägt ein Konzept der „evolutionary integrity“ vor, das in Analogie zum Schutz der Ökosysteme bei der Risikobewertung gentechnisch veränderter Organismen berücksichtigt werden soll:

„The concept of evolutionary integrity is relevant when transgenic DNA persists in gene pools of natural populations. It points to uncertainties how transgenes might interfere with the self-organisation of organisms and population dynamic implications.“

Testbiotech fordert, dass derartige Konzepte die Grundlage gesetzlicher Regelungen für die Synthetische Biologie (und auch der Gentechnik) im Bereich ‚Biosafety‘ werden müssen. Da wir nicht wissen, welchen Einfluss künstliche Lebensformen haben werden, wenn sie sich unkontrolliert zeitlich und räumlich vermehren und verbreiten können, müssen wir generelle Vorsorge treffen, die über die Abwägung im Einzelfall hinaus geht und aus Ansätzen wie der ‚Integrität der Evolutionsprozesse‘ gesetzlich verankerte übergeordnete Schutzziele entwickeln.

Neue gesetzliche Regelungen im Bereich der Synthetischen Biologie müssen auch den Bereich der ‚Biosecurity‘ berücksichtigen. Testbiotech ist der Ansicht, dass Firmen oder Forschungseinrichtungen, die Gene oder ganze Organismen synthetisieren, wirksam überwacht und kontrolliert werden müssen. Einen möglichen Ansatz schlägt die Ethik-Beratergruppe der Europäischen Kommission (EGE, 2009) vor:

„Als Beispiel für mögliche Maßnahmen zur Verhinderung nicht hinnehmbarer militärischer Aktionen oder Terrorakte können u. a. angeführt werden: 1) eine zentrale Datenbank, die zumindest auf EU-Ebene oder nach Möglichkeit sogar auf internationaler Ebene eingerichtet wird, in der alle DNA-Synthesizer von den zuständigen Behörden registriert werden; 2) Forschungsabteilungen oder Forschergruppen, die die synthetische Biologie im Bereich der Biosicherheit und Bioverteidigung anwenden, sollten in dem genannten Register erfasst werden; 3) auf Ebene der Mitgliedstaaten und der EU sollten Kriterien für die Veröffentlichung von Daten über hochgradig pathogene Viren oder toxische Stoffe definiert werden.“

Testbiotech schlägt vor, darüber hinaus eine geeignete Datenerfassung aufzubauen, in denen die Gen-Synthese Aktivitäten der registrierten Einrichtungen automatisch erfasst, gespeichert und bei Bedarf abgerufen werden können, falls sicherheitsrelevante Fragen geklärt werden sollen.

Testbiotech sieht ähnlich wie die Ethik-Beratergruppe (EGE 2009) die grundsätzliche Notwendigkeit, die weitere technische Entwicklung im Bereich der Synthetischen Biologie unabdingbar mit der Etablierung entsprechender gesetzlicher Regelungen zu verknüpfen:

„Die Gruppe ist der Auffassung, dass Überlegungen zur Biosicherheit unabdingbare Voraussetzungen für die Förderung und Umsetzung eines EU-Forschungsprogramms im Bereich der synthetischen Biologie auf nationaler wie internationaler Ebene sind.“

Dabei teilt Testbiotech auch die Sorge, dass die derzeitigen Regelungen zu zersplittert und nicht ausreichend spezifisch sind (EGE 2009):

„Die Gruppe äußert Bedenken hinsichtlich des bestehenden bruchstückhaften Regelungsrahmens, der möglicherweise für eine entsprechende Regulierung der derzeitigen und sich neu herausbildenden Aspekte der synthetischen Biologie nicht ausreichend ist.“

Um sicherzustellen, dass entsprechende gesetzliche Regelungen mit ausreichend hoher Priorität verfolgt werden, schlägt Testbiotech vor diesem Hintergrund ein Moratorium für staatliche Fördermaßnahmen im Bereich der Synthetischen Biologie vor. Gesellschaft, Wissenschaft, Industrie und Politik sollten sich ausreichend Zeit einräumen, über den künftigen Kurs in diesem Bereich der Biotechnologie zu entscheiden.

Letztlich stellt sich hier die zentrale Frage, welche gesellschaftliche Legitimation die Betreiber der Synthetischen Biologie für ihre weitreichenden technischen Entwicklung in Anspruch nehmen können und welche Rechte die Gesellschaft einfordert, um an Entscheidungen über die weitere Entwicklung teilzuhaben.

Literatur

- Alper, H. & Stephanopoulos, G. (2009). Engineering for biofuels: exploiting innate microbial capacity or importing biosynthetic potential? *Nature Reviews Microbiology* 7: 715 - 723.
- Ball, P. (2004): Starting from Scratch. 2004, *Nature* Vol 431, Seite 624-626
- Balmer, A., Martin, P., (2008). *Synthetic Biology: Social and Ethical Challenges*, Institute for Science and Society, University of Nottingham.
- Bernauer, H., Christopher, J., Deininger, W., Fischer, M., Habermeier, P., Heumann, K., Maurer, S., Schwer, H., Stähler, P. & Wagner, T. (2008). Technical solutions for biosecurity in synthetic biology. Industry Association Synthetic Biology, Munich. http://www.synbiosafe.eu/uploads///pdf/iasb_report_biosecurity_syntheticbiology.pdf
- Boldt, J., Müller, O. & Maio, G. (2009). Synthetische Biologie. Eine ethisch-philosophische Analyse. Beiträge zur Ethik und Biotechnologie 5, Eidgenössische Ethikkommission für die Biotechnologie, Bern 2009. http://www.ekah.admin.ch/fileadmin/ekah-dateien/dokumentation/publikationen/EKAH_Synthetische_Biologie_Inhalt_V.pdf
- Breckling, B. (2009). Evolutionary integrity - an issue to be considered in the long-term and large-scale assessment of genetically modified organisms in: Breckling, B., Reuter, H. & Verhoeven, R. (2008) *Implications of GM-Crop Cultivation at Large Spatial Scales*. *Theorie in der Ökologie* 14. Frankfurt, Peter Lang.
- Cello, J., Paul, A. V. & Wimmer, E. (2002). Chemical synthesis of poliovirus cDNA: generation of infectious virus in the absence of natural template. *Science* 297: 1016 - 1018.
- Check Hayden, E. (2009). Gene-makers form security coalition. *NatureNews* doi:10.1038/news.2009.1095
- Czar, M. J., Anderson, J. C., Bader, J. S. & Peccoud, J. (2009). Gene synthesis demystified. *Trends in Biotechnology* 27(2): 63 - 72.
- De Vriend, H. (2006). *Constructing life. Early social reflections on the emerging field of Synthetic Biology*. The Hague: Rathenau Institute; Working Document 97.
- DFG, Deutsche Forschungsgemeinschaft (2009). *Synthetische Biologie, Stellungnahme, gemeinsame Veröffentlichung mit acatech, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Nationalen Akademie der Wissenschaften*, WILEY-VCH Verlag
- Diehn, S. H., De Rocher, E. J., Green, P. J. (1996) Problems that can limit the expression of foreign genes in plants: Lessons to be learned from B.t. toxin genes. *Genetic Engineering, Principles and Methods* 18: 83-99
- EGE, European Group on Ethics in Science and New Technologies to the European Commission (2009): *Ethics of synthetic biology*, Opinion No 25, http://ec.europa.eu/european_group_ethics/index_en.htm
- EKAH, Eidgenössische Ethikkommission für die Biotechnologie im Ausserhumanbereich, 2009, *Synthetische Biologie - Ethische Überlegungen*
- EU Commission C (2005). *Synthetic Biology: Applying Engineering to Biology*. Report of a NEST-High-Level Expert Group. European Commission, Directorate-General for Research, Brussels.

EU Commission (2006). Synbiology: An analysis of Synthetic Biology research in Europe and North America. Final report on analysis of synthetic biology sector. Deliverable D11.

Endy, D. (2005). Foundations for engineering biology. *Nature* 438: 449 - 453.

ETC (2007). Extreme genetic engineering. An introduction to Synthetic Biology. ETC Group, Ottawa, Canada. www.etcgroup.org/upload/publication/602/01/synbioreport-web.pdf

Garfinkel, M. S., Endy, D., Epstein, G. L. & Friedman, R. M. (2007). Synthetic genomics: Options for governance. Report of Policy experts from J.Craig Venter Institute, Center for Strategic & International Studies and Massachusetts Institute of Technology.

Gaisser, S., Reiss, T., Lunkes, A., Müller, K., Bernauer, H. (2008), TESSY Achievements and Future Perspectives in Synthetic Biology, Fraunhofer Institute, Systems and Innovation Research, Karlsruhe, Germany

GEO, 8/2009 Seite 120 ff

Gibson, D. G., Glass, J. I., Lartigue, C., Noskov, V. N., Chuang, R. Y., Algire, M. A., Benders, G. A., Montague, M. G., Ma, L., Moodie, M. M., Merryman, C., Vashee, S., Krishnakumar, R., Garcia, N. A., Pfannkoch, C. A., Denisova, E. A., Young, L., Qi, Z. Q., Segall-Shapiro, T. H., Calvey, C. H., Parmar, P. P., Hutchison, C. A., Smith, H. O., Venter, J. C. (2010). Creation of a Bacterial Cell Controlled by a Chemically Synthesized Genome, *Science* DOI: 10.1126/science.1190719, Published Online May 20, 2010

Gibson, D. G., Benders, G. A., Andrews-Pfannkoch, C., Denisova, E. A., Baden-Tillson, H., Zaveri, J., Stockwell, T. B., Brownley, A., Thomas, D. W., Algire, M. A., Merryman, C., Young, L., Noskov, V. N., Glass, J. I., Venter, J. C., Hutchison, C. A., Smith, H.O. (2008a), Complete chemical synthesis, assembly, and cloning of a *Mycoplasma genitalium* genome. *Science* 319: 1215-1220.

Gibson, D. G., Benders, G. A., Axelrod, K. C., Zaveri, J., Algire, M. A., Moodie, M., Montague, M. G., Venter, J. C., Smith, H.O., Hutchison, C.A. (2008b). One-step assembly in yeast of 25 overlapping fragments to form a complete synthetic *Mycoplasma genitalium* genome. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 105: 20404 - 20409.

Hamberger, S., (1990). *Maschinen-Mensch und Industrie-Natur in: Sein oder Nichtsein*, Raben Verlag, München

Heinemann, M. & Panke, S. (2006). Synthetic biology - putting engineering into biology. *Bioinformatics* 22: 2790 - 2799.

IRGC (2008). Synthetic Biology, concept note, risk and opportunities in an emerging field. International Risk Government Council, http://www.irgc.org/IMG/pdf/IRGC_ConceptNote_SyntheticBiology_Final_30April.pdf

Jablunka, E. & Raz, G., (2009). Transgenerational epigenetic inheritance: Prevalence, mechanisms and implications for the study of heredity and evolution, *The Quarterly review of Biology*, Vol 84, No2, PP 131-176

Kelle, A. (2009). Synthetic biology and biosecurity. *EMBO Reports* 10 (spezial issue):

S23 - S27.

Koide, T., Pang, W. L. & Baliga, N. S. (2009). The role of predictive modelling in rationally re-engineering biological systems. *Nature Reviews Microbiology* 7: 297 - 305.

Lartigue, C., Glass, J. I., Alperovich, N., Pieper, R., Parmar, P. P., Hutchison, III C. A., Smith, H. O. & Venter, J. C. (2007). Genome transplantation in bacteria: changing one species to another. *Science* 317: 632 - 638.

Lartigue, C., Vashee, S., Algire, M. A., Chuang, R.Y., Benders, G. A., Ma, L., Noskov, V. N., Denisova, E. A., Gibson, D. G., Assad-Garcia, N., Alperovich, N., Thomas, D. W., Merryman, C., Hutchison, C. A. 3rd, Smith, H. O., Venter, J. C. & Glass, J. I. (2009). Creating bacterial strains from genomes that have been cloned and engineered in yeast. *Science* 325: 1693 - 1696.

Luisi, P. L. (2007). Chemical aspects of Synthetic Biology. *Chemistry & Biodiversity* 4: 603 - 621.

Luisi, P. L., Chiarabelli, C. & Stano, P. (2006). From never born proteins to minimal living cells: two projects in Synthetic Biology. *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 36: 605 - 616.

Martin, V. J., Pitera, D. J., Withers, S. T., Newman, J. D., Keasling, J. D. (2003). Engineering a mevalonate pathway in *Escherichia coli* for production of terpenoids. *Nat. Biotechnol* 21, 796-802.

Mattick, J. S. (2003). Challenging the dogma: the hidden layer of non-protein-coding RNAs in complex organisms, *BioEssays* 25:930-939

Minshull, J., & Wagner, R. (2009). Preventing the misuse of gene synthesis, *Nature Biotechnology* 27: 800 - 810.

Moya, A., Gil, R., Latorre, A., Peretó, J., Garcillán-Barcia, M. P. & de la Cruz, F. (2009). Toward minimal bacterial cells: evolution vs. design. *FEMS Microbiology Reviews* 33: 225 - 235.

Murakami, K., Tao, E., Ito, Y., Sugiyama, M., Kaneko, Y., Harashima, S., Sumiya, T., Nakamura, A. & Nishizawa, M. (2007). Large scale deletions in the *Saccharomyces cerevisiae* genome create strains with altered regulation of carbon metabolism. *Applied Genetics and Molecular Biotechnology* 75: 589 - 597.

Nouri, A. & Chyba, C. F. (2009). Proliferation-resistant biotechnology: an approach to improve biological security, *Nature Biotechnology* 27: 234 - 236.

Pimentel, D., Westra, L. & Noss, R. F., (ed.) (2000). *Ecological Integrity. Integrating Environment, Conservation, and Health*, Washington, D.C.: Island Press

Schultz, N. (2009). *Perspektivenpapier Synthetische Biologie*. Deutscher Ethikrat, Berlin. http://www.ethikrat.org/der_files/Perspektivenpapier_Synthetische_Biologie_2009-04-23.pdf

Shetty, R., Endy, D. & Knight, T. (2008). Engineering BioBrick vectors from BioBrick parts. *Journal of Biological Engineering* 5: 5 - 17.

Stähler, P. (2009). Synthetische Biologie? Aber sicher! *BioSpektrum* 15: 119.

Stähler, P., Beier, M., Gao, X. & Hoheisel, J. D. (2006). Another side of genomics: synthetic biology as a means for the exploitation of whole-genome sequence information. *Journal of Biotechnology* 124: 206 - 212.

Suzuki, N., Nonaka, H., Tsuge, Y., Inui, M. & Yukawa, H. (2005). New multiple-deletion method for the *Corynebacterium glutamicum* genome, using a mutant lox sequence. *Applied Environmental Microbiology* 71: 8472 - 8480.

Then, C. & Potthof, C., (2009). Risk Reloaded. Bericht zum Umgang mit den Risiken gentechnisch veränderter Pflanzen in der EU. Testbiotech Report, www.testbiotech.org

Then, C. (2008a). Dolly ist tot. Rotpunktverlag, Schweiz

Then, C., (2008b). The industrial gene paradigm and its (ethical) implications, in: Ethics of modern developments in agriculture technologies Proceedings of the round-table debate, Brussels, 18 June 2008, European Group on Ethics (EGE), http://ec.europa.eu/european_group_ethics/index_en.htm

Tucker, J.B., Zilinskas, R. A. (2006). The promise and perils of synthetic biology, *New Atlantis* 12: 25-45 <http://www.thenewatlantis.com/publications/the-promise-and-perils-of-synthetic-biology>

Tumpey, T. M., Basler, C. F., Aguilar, P. V., Zeng, H., Solorzano, A., Swayne, D. E., Cox, N. J., Katz, J. M., Taubenberger, J. K., Palese, P. & Garcia-Sastre, A. (2005). Characterization of the reconstructed 1918 Spanish influenza pandemic virus. *Science* 310: 77 - 80.

Van Est, R., de Vriend, H. & Walhout, B. (2007). *Constructing Life - The world of Synthetic Biology*. Rathenau Instituut, The Hague.

Westers, H., Dorenbos, R., van Dijlm, J. M., Kable, J., Flanagan, T., Devine, K. M., Jude, F., Séror, S. J., Beekman, A. C., Darmon, E. et al. (2003). Genome engineering reveals large dispensable regions in *Bacillus subtilis*. *Molecular Biology and Evolution* 20(12): 2076 - 2090.

Xiong, A. S., Peng, R. H., Zhuang, J., Gao, F., Li, Y., Cheng, Z. M. & Yao, Q. H. (2008). Chemical gene synthesis: strategies, softwares, error corrections, and applications. *FEMS Microbiology Reviews* 32: 522 - 540.

Yus, E., Maier, T., Michalodimitrakis, K., van Noort, V., Yamada, T., Chen, W., Wodke, J., Guell, M., Martinez, S., Bourgeois, R., Kuhner, S., Raineri, E., Letunic, I., Kalinina, O., Rode, M., Herrmann, R., Gutierrez-Gallego, R., Russell, R., Gavin, A., Bork, P., & Serrano, L. (2009). Impact of Genome Reduction on Bacterial Metabolism and Its Regulation *Science*, 326 (5957), 1263-1268 DOI: 10.1126/science.1177263

TEST BIOTECH

Testbiotech e. V.
Institut für unabhängige
Folgenabschätzung in
der Biotechnologie

Synthetische Biologie und künstliches Leben – Eine kritische Analyse

Ein Testbiotech-Report, unterstützt von der

g r a s s r o o t s
f o u n d a t i o n

Juni 2010

Autoren: Christoph Then, Sylvia Hamberger