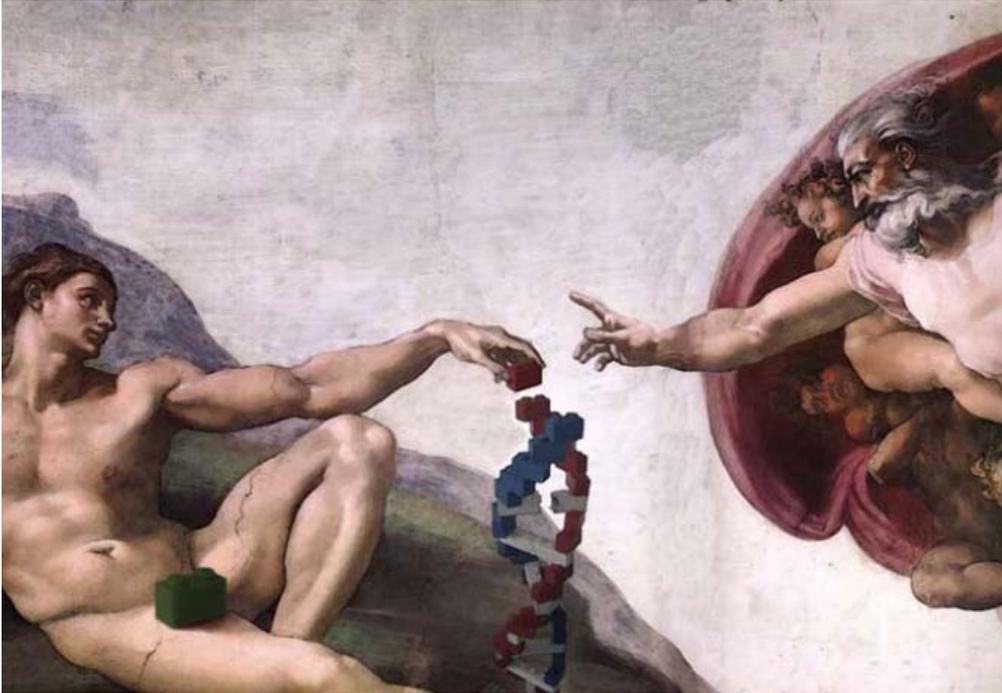


Eidgenössische Ethikkommission für die Biotechnologie

im Ausserhumanbereich EKAH



Synthetische Biologie Organisation und Ziele

Schlussbericht

19. März 2008

risicare

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Auftrag	1
2. Definitionen der Synthetischen Biologie	2
3. Techniken und Stand der Synthetischen Biologie	4
3.1 Techniken	4
3.2 Stand	6
4. Vorgeschichte und Umfeld	7
4.1 Vorgeschichte der Synthetischen Biologie	7
4.2 Umfeld der Synthetischen Biologie	8
4.3 Umstrittener Nutzen, umstrittene Risiken	9
5. Ein Paradigmenwechsel?	10
6. Synthetische Biologie international	12
6.1 Fachgesellschaften und -zeitschriften	12
6.2 Förderungsprogramme	13
6.3 Forschungsaktivitäten an Hochschulen und hochschulnahen Instituten	15
6.4 Nichtregierungsorganisationen	16
7. Synthetische Biologie in der Schweiz	17
8. Kommerzielle Anwendungen	19
8.1 Wirtschaftliches Potenzial	19
8.2 Aktueller Stand	20
8.3 Zulieferfirmen	22
9. Sicherheits- und Sicherheitsaspekte	23
9.1 Regulierungsansätze	23
9.2 Sicherheit	26
9.3 Sicherung	28
10. Schlussfolgerungen	30
10.1 Welchen Status können neue Formen des „Lebens“ beanspruchen?	30
10.2 Welche Risiken gehen mit der Schaffung neuer „lebensähnlicher“ Funktionssysteme einher?	31
11. Quellen	32
11.1 Gespräche	32
11.2 Literatur	32

12. Anhang	1
12.1 Forschungsgruppen in der Schweiz	1
12.2 Europäische Projekte	2
12.3 Unternehmen	3
12.4 Nichtregierungsorganisationen	5

Quelle Titelbild: Bericht "Extreme genetic engineering – An Introduction to Synthetic Biology", ETC Group 2007

Verfasserin des Berichts: Anne Eckhardt, risicare GmbH

Die Autorin dankt Herrn Prof. Sven Panke, Institut für Verfahrenstechnik der ETH Zürich, für das sehr informative Gespräch vom Januar 2008.

Ein herzlicher Dank gilt auch Michèle Marti für ihr kritisches Korreferat.

1. Auftrag

Die Eidgenössische Ethikkommission für die Biotechnologie im Ausserhumanbereich plant, die Entwicklung der Synthetischen Biologie näher zu beobachten und aus ethischer Sicht zu beurteilen. Zu diesem Zweck hat sie risicare damit beauftragt, den aktuellen Stand der Synthetischen Biologie darzustellen. Aus dem Bericht soll hervorgehen, wie das Forschungsgebiet organisiert ist und welche Ziele die unterschiedlichen Akteure verfolgen. Die Darstellung ist als Grundlage für die weitere Diskussion innerhalb der Kommission gedacht.

2. Definitionen der Synthetischen Biologie

Synthetische Biologie bezeichnet die Neukonstruktion oder Rekonstruktion von Funktionssystemen aus nanoskaligen biologischen oder biologieähnlichen Bausteinen.

Aktuelle Definitionen

Der Begriff „Synthetische Biologie“ wurde in seiner heutigen Bedeutung Ende der neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts von einem kleinen Kreis von Forschenden in den USA geprägt (vgl. S. Panke 2008).

In aktuellen Definitionen der Synthetischen Biologie wird der technische Charakter der Disziplin betont:

Quelle	Definition
http://syntheticbiology.org/ , zentrale Plattform für Forscher und Anwender im Bereich der Synthetischen Biologie, Stand 2007	"A) the design and construction of new biological parts, devices, and systems, and B) the re-design of existing, natural biological systems for useful purposes."
Forschungsprogramm Synbiology der Europäischen Kommission (vgl. Synbiology 2006: ii)	"Synthetic Biology is the engineering of biological components and systems that do not exist in nature and the re-engineering of existing biological elements; it is determined on the intentional design of artificial biological systems, rather than on the understanding of natural biology."
Bericht einer Gruppe von hochrangigen Experten aus dem NEST-Programm der europäischen Union (vgl. NEST 2005: 5)	"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."

Synthetische Biologie könnte damit auch treffend als "Bioingenieurwesen" bezeichnet werden (vgl. S. Panke 2008). Sie ist eine technische Disziplin, mit der neue Funktionssysteme geschaffen werden, die aber auch dem besseren Verständnis bestehender biologischer Systeme dient.

Definition, die dem vorliegenden Bericht zugrunde liegt

Im Folgenden verwenden wir eine an (NEST 2005) angelehnte Definition:

„Synthetische Biologie bezeichnet die Neukonstruktion oder Rekonstruktion von Funktionssystemen aus nanoskaligen biologischen oder biologieähnlichen Bausteinen.“ Diese Definition lässt – wie auch die anderen zitierten Begriffsbestimmungen – die wesentliche Frage offen, was unter „biologisch“ zu verstehen ist (vgl. Kapitel 10).

Systemabgrenzung

Die Abgrenzung der Synthetischen Biologie gegenüber anderen Disziplinen ist oft schwierig und nicht immer sinnvoll (vgl. 4.2). Um den Begriff „Synthetische Biologie“ nicht zu weit zu fassen, werden alle Gebiete von der weiteren Betrachtung

ausgeschlossen, bei denen überwiegend künstliche Bausteine zur Anwendung kommen, jedoch „biologieähnliche“ Systeme entstehen können. Dazu gehören vor allem:

- Konstruktion biomimetischer Systeme, d.h. die Nutzung nanotechnischer, chemischer und anderer Verfahren, z.B. aus der Robotik, um Systeme aufzubauen, die ähnliche Eigenschaften wie Lebewesen aufweisen, jedoch keine biologischen Bausteine enthalten
- "Artificial Life", d.h. eine Forschungsrichtung, bei der Lebensprozesse – in zahlreichen Spielarten – technisch, vor allem informationstechnisch, simuliert werden. Ein Produkt von Artificial Life können beispielsweise Gruppen kleiner Maschinen sein, die bestimmte Eigenschaften ihrer Umgebung mit Sensoren erfassen und basierend auf einfachen Regeln mit ihrer Umwelt sowie untereinander in Wechselwirkung treten.

3. Techniken und Stand der Synthetischen Biologie

Synthetische Biologie ist eine junge technische Disziplin. Weltweit existieren bisher nur wenige Forschungsgruppen, die Synthetische Biologie im eigentlichen Sinn betreiben. Dabei greifen sie auf Methoden aus anderen Disziplinen, derzeit vor allem der Gentechnologie, zurück.

Biologische Grundbausteine

3.1 Techniken

In der Synthetischen Biologie werden biologische Bausteine oder Bausteine, die biologischen Bausteinen gleichen, zu Funktionssystemen zusammengesetzt. Solche Bausteine sind beispielsweise DNA-Sequenzen, die ein bestimmtes Protein codieren. Davon abgeleitet können auch DNA-Abschnitte verwendet werden, welche künstliche Nukleotide enthalten.

Als Vorbild für die Verwendung der Bausteine dienen bevorzugt genormte Komponenten, wie sie aus den Ingenieurdisziplinen bekannt sind. Ein Verzeichnis biologischer Grundbausteine ("Registry of Standard Biological Parts") wird unter http://parts.mit.edu/registry/index.php/Main_Page vom Massachusetts Institute of Technology in Boston betrieben. Die zur Verfügung stehenden Typen biologischer Bausteine können dort nach Funktionen klassiert aufgerufen werden.

Funktionssysteme

Die mit Synthetischer Biologie entstehenden Funktionssysteme werden manchmal als "Biomachines" bezeichnet. Damit soll ausgedrückt werden, dass sie nicht alle Eigenschaften lebender Systeme, wie Fortpflanzungsfähigkeit, Stoffwechsel oder Fähigkeit zur Evolution, aufweisen müssen. Bei den Funktionssystemen kann es sich aber durchaus auch um Teile lebender Organismen, beispielsweise spezialisierte Zellen, oder lebende Organismen selbst, beispielsweise Bakterien, handeln. Teilweise wird der Begriff "Funktionssystem" weiter gefasst und schließt dann auch natürliche oder künstliche "Ökosysteme", die aus verschiedenen "Biomachines" bestehen, ein (vgl. SB0.3 2007: 19).

Standardisierte biologische Bausteine

z.B. DNA-Abschnitte

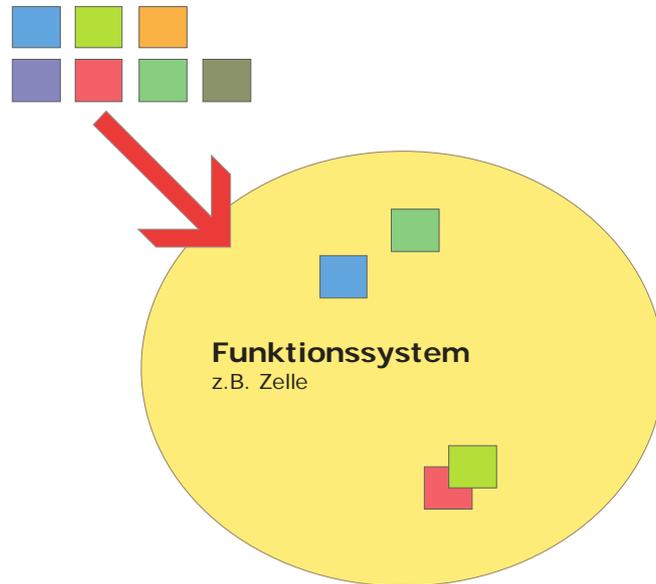


Abb. 1: Grundprinzip der Synthetischen Biologie – schematische Darstellung

Vorgehensweisen

Synthetische Biologie beinhaltet verschiedene Vorgehensweisen:

- *Konstruktion.* Aus biologischen Bausteinen – z.B. Nukleotiden, kurzen DNA-Abschnitten mit definierter Funktion, ggf. aber auch ganzen Genomen, die in einem neuen Kontext verwendet werden (vgl. POST 2008: 1) – werden Systeme konstruiert, die in der Natur nicht existieren. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, die Funktionsweise natürlicher Systeme besser zu verstehen, aber auch neue Funktionssysteme zu gewinnen.
- *Dekonstruktion.* Biologische Systeme werden systematisch zerlegt, um die Funktionsweise der Systeme und ihrer Komponenten besser zu verstehen. Teilweise werden Organismen dabei auf eine minimale biologische Grundausstattung reduziert. Die aus einer Dekonstruktion resultierenden Komponenten können als Bausteine für die Konstruktion eingesetzt werden.
- *Rekonstruktion, Redesign.* Biologische Systeme werden analysiert, dekonstruiert und aus ihren natürlichen Bauteilen wieder so aufgebaut, dass der ursprüngliche Zustand hergestellt wird. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, das Zusammenspiel biologischer Komponenten besser zu verstehen und Grundlagen für die Konstruktion zu erhalten.

Eine Vision der Synthetischen Biologie ist es, eine lebende Zelle aus nanoskaligen Bausteinen neu zu konstruieren.

In der Forschung kann zwischen erklärender und technischer Ausrichtung unterschieden werden. Die technisch ausgerichtete Forschung zielt auf die Lösung

konkreter technischer Probleme ab. Die erklärende Forschung dient dazu, - beobachtend oder intervenierend – Ursachen für Phänomene zu ermitteln (vgl. Irrgang 2003: 168). Die Synthetische Biologie lässt sich damit vor allem der technischen aber auch der erklärend intervenierenden Forschung zurechnen.

3.2 Stand

Synthetische Biologie ist eine junge technische Disziplin, die erst seit etwa zehn Jahren besteht: „Synthetic biology is an immature but rapidly developing area involved with research into novel, engineered purpose-built biological parts, devices and organisms“ (POST 2008: 4). Die Zahl der Forschungsgruppen, die Synthetische Biologie im engeren Sinn betreiben, ist bisher gering.

Synthetische Biologie nutzt Erkenntnisse und Erfahrungen aus weiteren wissenschaftlichen Disziplinen wie Chemie (z.B. Makromolekulare Chemie), Physik (z.B. Biophysik), Informatik (z.B. Bioinformatik) und Ingenieurwissenschaften (z.B. Nanotechnologie, Elektrotechnik, Bioverfahrenstechnik). Forscher und Anwender können daher, obwohl Synthetische Biologie noch keine ausgereifte technische Disziplin ist, bereits auf ein breites Spektrum an Wissen und Methodenkompetenz zurückgreifen.

Aktuelle Projekte zur Synthetischen Biologie sind vor allem Projekte, bei denen die Möglichkeiten der Gentechnologie intensiv ausgeschöpft werden („extreme genetic engineering“, ETC Group 2007b). Solche Projekte sind durch erhebliche technische Fortschritte bei der DNA-Sequenzierung und der DNA-Synthese möglich geworden. Die Produktivität und Zuverlässigkeit hat hier in den letzten zehn Jahren – bei teilweise stark sinkenden Preisen – stark zugenommen (vgl. POST 2008: 1; Marsh 2008).

Da sich Synthetische Biologie derzeit in einem frühen Entwicklungsstadium befindet, ist letztlich ungewiss, inwieweit sich das Konzept einer „modularen“, ingenieurwissenschaftlich ausgerichteten Biologie tatsächlich umsetzen lässt (vgl. S. Panke 2008).

Gesellschaftlich wichtige Fragen, z.B. zur Sicherheit, sollten von Politik und Verwaltung dennoch frühzeitig geklärt werden. Dies einerseits, um auf künftige Entwicklungen vorbereitet zu sein, und andererseits, um die weitere Fortschritte der Synthetischen Biologie aktiv mitgestalten zu können.

4. Vorgeschichte und Umfeld

Mit Synthetischer Biologie werden frühere Entwicklungen der Biologie schlüssig weitergeführt. Synthetische Biologie entfaltet sich gemeinsam mit anderen neueren Forschungs- und Technikgebieten wie Informations- und Nanotechnologie. Viele der gesellschaftlich relevanten Fragen, die sich mit dem Aufkommen der Synthetischen Biologie stellen, wurden bereits in Zusammenhang mit anderen Disziplinen, vor allem der Gentechnologie, diskutiert.

4.1 Vorgeschichte der Synthetischen Biologie

Fortführung früherer Entwicklungen und Diskussionen

Mit Synthetischer Biologie werden frühere Entwicklungen der Biologie weitergeführt, die im Folgenden in stark verkürzter Form und ohne Anspruch auf Vollständigkeit angesprochen werden. Ein Blick auf die Vorgeschichte scheint uns sinnvoll, um die technische Disziplin „Synthetischen Biologie“ besser zu verstehen. Zudem lassen sich aus früheren Diskussionen Themen und Argumente übernehmen, die auch für die Synthetische Biologie von Bedeutung sind.

Zu den Fragen, die mit Synthetischer Biologie in Verbindung gebracht werden und bereits anlässlich früherer Entwicklungen angesprochen wurden, gehören z.B. Veränderungen im gesellschaftlichen Menschenbild, Veränderungen im gesellschaftlichen Verständnis von Natur, der Umgang mit neuen Risiken und Unsicherheiten bei der Risikoabschätzung, die Patentierbarkeit von Lebewesen, das Spannungsfeld zwischen wissenschaftlichen und kommerziellen Interessen, z.B. bei der Publikation neuer Erkenntnisse, oder Probleme der Verteilungsgerechtigkeit zwischen Mitgliedern einer Gesellschaft, Nationen und Generationen.

Insbesondere lassen sich viele der Diskussionen, die um die Schaffung transgener Organismen geführt wurden, auf die Synthetische Biologie übertragen (vgl. Herrera 2005).

Naturwissenschaftliche Biologie und Vitalismus

Organismen werden bereits seit Jahrhunderten technisch genutzt, z.B. zu Herstellung von Lebensmitteln. Die Wurzeln des Forschungsprogramms „molekulare Bioingenieurkunst“ sieht Irrgang bei der Abgrenzung einer naturwissenschaftlichen Biologie gegen den Vitalismus Mitte des 19. Jahrhunderts. In der naturwissenschaftlichen Biologie entwickelte sich damals ein mechanistisches Verständnis dieser Wissenschaft, das den „modernen Vorstellungen einer Bioingenieurkunst schon erstaunlich nahe kam“ (vgl. Irrgang 2003: 135 f.).

Begriff
Synthetische Biologie



Der Begriff "Synthetische Biologie" wurde 1912 von Stéphane Leduc, Professor an der École de Médecine de Nantes, eingeführt. Leduc befasste sich mit den chemischen Vorgängen, die Lebensprozessen zugrunde liegen. Unter Synthetischer Biologie verstand er, Elemente von Lebewesen künstlich herzustellen – ähnlich wie in der synthetischen Chemie Moleküle hergestellt werden (vgl. Leduc 1914: 15). "Das Ideal, nach dem der Physizismus die Menschheit streben lehrt, ist die Beherrschung, das Dirigieren der Naturkräfte durch den Willen, mittels des Verständnisses der Dinge. Es ist der Triumph des Geistes über Materie und Naturkräfte" (Leduc 1914: 218).

Molekularbiologie
und Gentechnik

1938 wurde der Begriff Molekularbiologie geprägt. Seit den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts wurde Lebensfunktionen vermehrt analysiert, indem man sie auf ihre biochemischen Bausteine reduzierte. Mit dem Weg in die Gentechnik gewann die Rekonstruktion einzelner Strukturen des Lebendigen gegenüber der Erforschung allgemeiner naturwissenschaftlicher Gesetzmässigkeiten an Bedeutung. In den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts setzte ein eigentlicher Technologisierungsschub in der Biologie ein (vgl. Irrgang 2003: 147 f.). 1993 erklärte der Biochemiker Ernst-Ludwig Winnacker: „Mit der Gentechnik ist die Biologie in ihre synthetische Phase eingetreten so wie mit Friedrich Wöhlers Synthese des Harnstoffs im Jahr 1828 die synthetische Chemie entstand“ (Ernst-Ludwig Winnacker, zit. in Irrgang 2003: 157).

4.2 Umfeld der Synthetischen Biologie

Überschneidungen mit
anderen Entwicklungen

Synthetische Biologie stellt also eine schlüssige Fortführung von Entwicklungen dar, welche die Biologie der letzten Jahrzehnte bestimmt und zu einer wachsenden „Technisierung“ der Biowissenschaften geführt haben. Dazu zählen insbesondere Biotechnologie, Zellbiologie, Molekular- und Gentechnologie, Nanobiotechnologie und Systembiologie¹.

„Converging
Technologies“

Für das beginnende 21. Jahrhundert wird erwartet, dass vier grosse Forschungs- und Technikbereiche, die sich mit nanoskaligen Bausteinen befassen, zusammenwachsen. Diese Bereiche sind Nanowissenschaften und Nanotechnologie (N), Biotechnologie und Biomedizin, einschliesslich der Gentechnologie (B), Informations- und Kommunikationstechnologie (I) sowie Hirnforschung und Kognitionswissenschaften (C). Das neu entstehende Feld der „Converging Technologies“ wird im Englischen mit NBIC abgekürzt (vgl. NSF 2002: ix). Einige Autoren sehen als Teil dieser Entwicklung auch die Synthetische Biologie (S), die das Forschungs- und Technikfeld zu NBICS erweitert (vgl. Wolbring 2006).

¹ Ziel der Systembiologie ist es, biologische Organismen in ihrer Gesamtheit zu verstehen. Erkenntnisse aus der Systembiologie sind wesentlich für die Entwicklung der Synthetischen Biologie. Zugleich kann Synthetische Biologie die Systembiologie um neue Erkenntnisse bereichern.

Die Schöpfer des Begriffs „Converging Technologies“ weisen darauf hin, dass die Konvergenz von Forschungs- und Technikbereichen auch neue Organisationsformen erfordert. Forschung und Technik sollen künftig weniger nach Disziplinen als nach den hierarchischen Ebenen, auf denen sich die Aktivitäten bewegen, organisiert werden. Ganzheitliche Betrachtungsweisen gewinnen vermehrt Bedeutung. Statt verwandte Forschungs- und Technikbereiche gegeneinander abzugrenzen, sollte eher von gemeinsamen Entwicklungstendenzen oder -richtungen ausgegangen werden (vgl. NSF 2002).

4.3 Umstrittener Nutzen, umstrittene Risiken

Wie bei anderen Entwicklungen der Biowissenschaften auch, sind Nutzen und Risiken der Synthetischen Biologie gesellschaftlich umstritten.

Eine auf Nutzen, Kontrolle und schlüssige Fortführung bekannter Aktivitäten fokussierte Beschreibung von Synthetischer Biologie gibt etwa Sven Panke, Professor für Bioverfahrenstechnik an der ETH Zürich: „Synthetische Biologie befasst sich mit dem rationalen Konstruieren von Lebewesen mit neuartigen und nützlichen Funktionen und potentiellen Anwendungen in allen Bereichen, in denen Biotechnologie heute schon eine Rolle spielt – zum Beispiel die Herstellung von Chemikalien, Pharmazeutika und fossilen Brennstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen“ (vgl. scnat 2007: 2).

Bei Niels Boeing, Journalist der Wochenzeitung scheinen dagegen Zweifel an der Vertrauenswürdigkeit der beteiligten Forschenden auf und die Erwartung, dass unkalkulierbare Risiken eingegangen werden: „ForscherInnen wollen neue, künstliche Lebensformen erschaffen, die sich, Maschinen gleich, auf eine bestimmte Aufgabe hin konstruieren lassen [...] «Synthetische Biologie» nennt sich das neue Forschungsgebiet unbescheiden. So soll die Biotechnologie den Sprung vom mitunter hemdsärmelig ausgeführten Laborhandwerk zur echten Ingenieursdisziplin schaffen. Die Vertreter der Synthetischen Biologie wollen das kaum zu überblickende (und dementsprechend auch erst lückenhaft verstandene) Zusammenspiel aus Genen, Enzymen und anderen Molekülen in einer lebenden Zelle nach dem Vorbild von Elektro- und Computingenieuren in einfache und programmierbare Bioschaltkreise umwandeln“ (vgl. WoZ 2007).

Sicherheit und Akzeptanz der Synthetischen Biologie haben sich inzwischen zu einem wichtigen Thema unter Forschenden und Anwendern entwickelt (vgl. z.B. Kelle 2007).

5. Ein Paradigmenwechsel?

Bei Synthetischer Biologie tritt die Konstruktion neuer biologischer Systeme gegenüber der Erforschung bestehender biologischer Systeme in den Vordergrund.

Leben in der Hand von Ingenieuren

Als wesentliches Element der Synthetischen Biologie und zentraler Anknüpfungspunkt gesellschaftlicher Debatten kristallisiert sich heute der „Zugriff der Ingenieure auf das Leben“ heraus. Dabei ist allerdings zu bedenken, dass Lebewesen bereits seit Jahrhunderten, verstärkt aber seit einigen Jahrzehnten technisch genutzt und manipuliert werden. Disziplinen der Biowissenschaften, in denen ein technischer Ansatz verfolgt wird, sind beispielsweise Biotechnologie, Bioverfahrenstechnik, Gentechnik und Nanobiotechnologie (vgl. auch Kapitel 4).

Sprunghafter Wechsel oder fließender Übergang?

Von Kritikern der Synthetischen Biologie wird betont, dass der Zugriff auf das Leben bei dieser Disziplin wesentlich radikaler ausfalle als bisher: "A Synthetic organism (or syn) is the result of 'extreme genetic engineering.' Syn's differ from genetically modified organisms (GMOs), where sections of DNA from one naturally-occurring organism are inserted into another naturally-occurring organism (taking a section of DNA from a soil bacterium and inserting it corn, for example). Syn's aren't just about substituting a few ingredients in the recipe of life – they are making the ingredients from scratch in a laboratory and combining them in unprecedented ways" (ETC Group 2007b: 1).

Das niederländische Rathenau Institut spricht von einem Paradigmenwechsel²:

The paradigm shift of synthetic biology

	Genetic modification		Synthetic biology
Technology	Reading / analysing DNA Trial and error	➔	Writing / synthesis of DNA Software programming
Application	Adaption / modification of existing biological systems	➔	Design and construction / modulation of new biological systems

Abb. 2: Paradigmenwechsel durch Synthetische Biologie nach (Rathenau 2007: 2)

Im Bereich der Synthetischen Biologie werde Leben als Maschine, die Zelle als Ansammlung kooperierender Nanobauteile betrachtet. Leben und seine Bestandteile liessen sich demnach nicht nur erforschen, sondern auch herstellen.

Neue Lebensformen

Forschende im Bereich der Synthetischen Biologie erheben heute in der Regel nicht den Anspruch, Leben neu zu erschaffen – auch wenn dieser Aspekt von

² Ein mehrstufiges Modell „Von der molekularen zur modularen Biologie“ enthält (Synbiology 2005: 5-6).

einigen prominenten Exponenten betont wird und teilweise in den Medien (kritische) Beachtung findet (vgl. z.B. FAZ 2007).

Der Ansatz, neue Lebensformen zu erschaffen, wurde im Umfeld der Nanotechnologie bereits seit den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts intensiv diskutiert (vgl. TAB 2002). Im Verlauf der Jahrzehnte zeigte sich dann jedoch, dass die Fortschritte der Nanotechnologie langsamer erfolgten als ursprünglich angenommen. Die Vision, Leben neu zu gestalten, erwies sich als Utopie, die an gesellschaftlicher Aufmerksamkeit einbüsste.

6. Synthetische Biologie international

Forschung zur Synthetischen Biologie wird in Europa stark durch die Europäische Kommission gefördert. In den USA existieren ebenfalls bedeutende staatliche Förderungsmöglichkeiten. Im Vergleich zur EU nimmt jedoch die private Forschungsförderung, z.B. durch Unternehmen und Stiftungen, eine wichtigere Rolle ein.

6.1 Fachgesellschaften und -zeitschriften

Fachgesellschaften

Synthetische Biologie kristallisiert sich als eigenes Fachgebiet erst seit etwa zehn Jahren heraus. Die internationale Gemeinschaft der Forschenden ist noch lose organisiert. Eine Fachgesellschaft für Synthetische Biologie konnte im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht identifiziert werden.

Da Synthetische Biologie viele junge Forschende anzieht und stark interdisziplinär und international ausgerichtet ist, ist denkbar, dass sich hier neue Organisationsformen der Forschenden herausbilden werden. Einen ersten Schritt in diese Richtung sind Foren im Internet, wie sie beispielsweise vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) betrieben werden. Am MIT hat sich die Synthetische Biologie zudem in sich selbst steuernden Lerngruppen entwickelt.

Das Konsortium, welches das europäische Projekt Eurobiosyn (vgl. unten) durchführt, hat sich die Entwicklung und Etablierung einer Forschungscommunity zur Aufgabe gemacht (vgl. NEST 2004: 1). Mit dem Projekt Tessa, Towards a European Strategy for Synthetic Biology, soll ein partizipativer Prozess unter Experten in Gang gebracht werden, um die Entwicklung der Synthetischen Biologie in Europa zu fördern (vgl. www.tessa-europe.eu/).

Wettbewerbe

Seit 2003 sind Studenten jährlich eingeladen, an einem Wettbewerb teilzunehmen, der durch das Massachusetts Institute of Technology (MIT) koordiniert wird, der international Genetically Engineered Machines Competition (iGEM). Zu den Botschaftern von iGEM zählte 2006 mit Tamara Ulrich auch eine Studentin, die an der ETH Zürich Elektrotechnik studierte (vgl. www.igem2006.com). Teilnehmer an der iGEM konstruieren neue Funktionssysteme. Dabei können sie auf Bausteine aus dem Registry of Standard Biological Parts (vgl. Kapitel 3) zurückgreifen, aber auch eigene biologische Bausteine entwickeln (vgl. www.igem2007.com).

Tagungen

Wichtige Fixpunkte in der Gemeinschaft der Forschenden stellen die internationalen Tagungen Synthetic Biology 1.0 und folgende dar. Diese Tagungen werden von einem internationalen und einem lokalen Komitee organisiert, die keine spezifische Fachgesellschaft repräsentieren. Zu den Sponsoren von Synthetic Biology 3.0 in Zürich zählten Unternehmen, z.B. Lonza, Merck Serono, Novartis, Roche und Syngenta, die ETH Zürich und Organisationen wie die Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften.

Die European Conferences on Synthetic Biology werden von der European Science Foundation (ESF) getragen. Die ESF ist eine Dachorganisation nationaler Förderungsorganisationen und Forschungseinrichtungen, die darauf abzielt, die wissenschaftliche Zusammenarbeit in Europa zu stärken. Der Schweizerische Nationalfonds (SNF) und der Rat der schweizerischen wissenschaftlichen Akademien (CASS) sind Mitglieder der ESF (vgl. SNF 2007b). Die letzte Tagung fand vom 24. bis 28.11.2007 unter dem Titel "Design, Programming and Optimisation of Biological Systems" statt (vgl. ESF 2007).

Daneben existieren weitere Veranstaltungen, wie beispielsweise die Konferenz "Advances in Synthetic Biology", die im März 2008 in Cambridge, Grossbritannien, durchgeführt wurde.

Foren im Internet

Mitarbeiter und Studenten des MIT und der Harvard University unterhalten die Website <http://syntheticbiology.org/>, die für Beiträge weiterer Interessenten offen steht. www.biobricks.org/ ist eine Plattform für standardisierte Bausteine der Synthetischen Biologie, die von der BioBricks Foundation betrieben wird. Die BioBricks Foundation ist nicht gewinnorientiert und wurde von Mitarbeitern des MIT, der Harvard University und der University of California, San Francisco gegründet. Unter www.syntheticbiology.net/ ist ein kommerziell betriebenes Portal zur Synthetischen Biologie aufgeschaltet.

Fachzeitschriften

Forschungsergebnisse zur Synthetischen Biologie werden in einer Vielzahl von Fachzeitschriften publiziert, die vor allem biologischen Themen gewidmet sind. Seit Anfang 2007 erscheint im Springer Verlag vierteljährlich die spezialisierte Zeitschrift "Systems and Synthetic Biology" (vgl. Springer 2006). Die European Molecular Biology Organization (EMBO) und die Nature Publishing Group geben seit 2005 Molecular Systems Biology heraus, eine elektronische Publikation, die der Molekularen Systembiologie und der Synthetischen Biologie gewidmet ist (vgl. EMBO 2005). Seit 2007 spricht die neue Zeitschrift IET Synthetic Biology insbesondere nicht biologisch ausgebildete Forschende und Techniker, die im Bereich der Synthetischen Biologie tätig sind, an. Vor allem junge Wissenschaftler, die sich der Synthetischen Biologie zuwenden, sollen hier mit Informationen unterstützt werden (IET 2006).

6.2 Förderungsprogramme

Europäische Union

Die Europäische Union erklärte Synthetische Biologie im Jahr 2003 zu einem Schwerpunkt im Programm New and Emerging Science and Technology (NEST) innerhalb des 6. Forschungsrahmenprogramms. Zu diesem Zeitpunkt hatte sich in Europa noch keine nennenswerte Gemeinschaft von Forschern im Bereich der Synthetischen Biologie herausgebildet. Die Aufforderung, Forschungsgesuche einzureichen und die begleitenden Aktivitäten bei NEST führten jedoch dazu, dass sich die Forschung zur Synthetischen Biologie in Europa rasch zu entwickeln begann (vgl. POST 2008: 2).

Innerhalb der Europäischen Union werden lediglich 2% der staatlichen Ausgaben für Forschung zentral bestritten. 98% der für Forschung bereitgestellten Mittel stammen aus den nationalen Budgets. Das Verhältnis von privat – etwa durch Stiftungen oder Unternehmen – finanzierter Forschung und Entwicklung zur staatlich finanzierter Forschung und Entwicklung fällt deutlich geringer als in den USA oder Japan aus (vgl. Synbiology 2006: 38).

Die Europäische Union fördert Projekte der Synthetischen Biologie weiterhin vor allem im Programm NEST. Eine Übersicht der zur Zeit laufenden Projekte ist im Anhang 12.2 enthalten. Im Folgenden werden drei dieser Projekte beispielhaft vorgestellt:



Eurobiosyn (www.eurobiosyn.org) bezeichnet ein seit 2004 laufendes Projekt, mit dem die katalytischen Eigenschaften einer biologischen Zelle – hier *Escherichia coli* – nutzbar gemacht werden sollen. Das Konsortium von schweizerischen, deutschen, spanischen und dänischen Forschungsinstituten, das dieses Projekt durchführt, wird vom Bioprozesslabor des Instituts für Verfahrenstechnik der ETH Zürich koordiniert (vgl. NEST 2004: 1).

SYNBIOCOMM

Synbiocomm ist eine Initiative, mit der die Vernetzung unter europäischen Forschenden auf dem Gebiet der Synthetischen Biologie gefördert werden soll. Unter anderem wurde die Tagung Synthetic Biology 3.0 an der ETH Zürich unterstützt (vgl. Synbiocomm 2007).



Synbiosafe zielt darauf ab, Aspekte der Synthetischen Biologie, welche Sicherheits- oder ethische Fragen berühren, näher zu untersuchen und den gesellschaftlichen Diskurs anzuregen. Das Projekt ist mit 236'000 Euro dotiert und wird zwischen Januar 2007 und Ende Dezember 2008 durchgeführt (vgl. Synbiosafe 2007).



Neben den europäischen Programmen existieren Förderungsansätze auf nationaler Ebene. Ein Beispiel ist der Exzellenzcluster "Zentrum für biologische Signalstudien (bioSS)", der an der deutschen Universität Freiburg im Breisgau angesiedelt ist. Im Rahmen von bioSS werden biologische Signalprozesse analysiert und synthetisiert. Dadurch soll ein "dialektischer Forschungsprozess zwischen analytisch und synthetisch arbeitenden Signalwissenschaftlern gefördert werden" (vgl. DFG 2007: 3). Synthetische Biologie wird neu als Lehr- und Forschungsfach an der Universität Freiburg eingeführt. Der Exzellenzcluster erhält zwischen November 2007 und Oktober 2012 insgesamt 32.5 Mio Euro an Forschungsmitteln (vgl. DFG 2007; bioSS 2007).

USA

Forschung zur Synthetischen Biologie findet gegenwärtig vor allem in den USA statt (vgl. POST 2008: 2, Synbiology 2006). Spezifische politische Leit- oder Richtlinien zur Synthetischen Biologie wurden im Rahmen einer Studie der Euro-

päischen Kommission jedoch nicht identifiziert. Die Planungen und Initiativen von Regierungsbehörden wie den National Institutes für Health und der Food and Drug Administration lassen die Förderung von Synthetischer Biologie zu, setzten dort aber keine besonderen Schwerpunkte (vgl. Synbiology 2006: 36 f.). Bei einzelnen Organisationen wurden Förderungsschwerpunkte für Synthetische Biologie diskutiert, bis Mitte 2006 jedoch ausschliesslich individuelle Forschungsvorhaben gefördert (vgl. Synbiology 2006: 5). Das US Department of Energy räumt in seinem Mehrjahresprogramm für den Zeitraum von 2007 bis 2012 der Energiegewinnung aus Biomasse eine wichtige Rolle ein. Synthetische Biologie kann von diesen Förderungsmassnahmen wesentlich profitieren. Eine wichtige strategische Initiative der National Science Foundation ist die Schaffung von Engineering Research Centers (ERC). Eines dieser ERC ist seit kurzem explizit der Synthetischen Biologie gewidmet (vgl. Synbiology 2006: 36 f.):



SynBERC, das Synthetic Biology Engineering Research Center, ist ein Netzwerk, dem das MIT und vier Hochschulen angehören. Die National Science Foundation sprach SynBERC 2006 einen Kredit von 17 Mio. \$, verteilt über eine Fünfjahresperiode zu. Die beteiligten Hochschulen und private Investoren steuerten weitere 3 Mio. \$ bei. Das Projekt ist stark auf die Bereitstellung standardisierter biologischer Bausteine ausgerichtet (vgl. MIT 2006).

Die NASA fördert ebenfalls Forschungsprojekte im Bereich der Synthetischen Biologie, z.B. Untersuchungen zu möglichen "exotischen" Lebensformen auf anderen Planeten des Sonnensystems (vgl. NASA o.J.).

6.3 Forschungsaktivitäten an Hochschulen und hochschulnahen Instituten

Forschungsgruppen und
Forschungsmarkt

Bisher existieren weltweit nur wenige Forschungsgruppen, die sich mit Synthetischer Biologie befassen (vgl. S. Panke 2008). Die Zahl der Institute, die in diesem Bereich arbeiten, wird auf weniger als 100 geschätzt (Kastilan 2008). Da viele der Forschenden jung und mobil sind, verlagern sich Forschungsgruppen gelegentlich auch über weitere geografische Distanzen. Ländervergleiche sind deshalb wenig aussagekräftig (vgl. S. Panke 2008).

In einer Studie für das US Department of Energy wird der globale Forschungsmarkt für Synthetische Biologie mit 300 Millionen £ jährlich (derzeit ca. 590 Millionen CHF) beziffert. Innerhalb der nächsten zehn Jahre wird ein Zuwachs auf bis zu 1.8 Milliarden £ (derzeit ca. 3.6 Milliarden CHF) als realistisch beurteilt (vgl. POST 2008: 1; Beachhead 2006). Diesen Schätzungen liegt vermutlich eine eher weite Definition des Begriffs „Synthetische Biologie“ zugrunde.

Datenbank
Synbiology

Auf der Website des Projekts Synbiology, www2.spi.pt/synbiology/index.asp, befindet sich eine allgemein zugängliche Datenbank, in der Forschende im Bereich der Synthetischen Biologie, Forschungsprojekte und Berichte zur Syntheti-

schen Biologie, Forschungseinrichtungen, an denen zur Synthetischen Biologie gearbeitet wird, Institutionen, welche Forschung zur Synthetischen Biologie fördern, und Unternehmen, die Gene synthetisieren, aufgeführt sind. Neben der Europäischen Union deckt diese Datenbank auch die Schweiz sowie vereinzelte Institutionen ausserhalb Europas, z.B. in Israel und den USA, ab. Auch hier wird der Begriff „Synthetische Biologie“ tendenziell weit gefasst.

6.4 Nichtregierungsorganisationen

Unter den Nichtregierungsorganisationen, welche die Entwicklung der Synthetischen Biologie kritisch beobachten, nimmt international – wie schon im Bereich der Nanotechnologie – die kanadische ETC Group eine führende Rolle ein (vgl. z.B. ETC Group 2007a). Ein offener Brief, der sich gegen die geplante Selbstregulierungs-Charta der Forschenden im Bereich der Synthetischen Biologie (vgl. Kapitel 9.1) richtete, wurde international von zahlreichen Organisationen unterzeichnet (vgl. Anhang 12.4). Die Liste spiegelt unter anderem Befürchtungen wider, Synthetische Biologie könnte Ungleichheiten zwischen ärmeren und reicheren Nationen verstärken und zu unerwünschten Veränderungen im Bereich der Landwirtschaft führen.

7. Synthetische Biologie in der Schweiz

Bei der Forschung zur Synthetischen Biologie spielt die Schweiz eine international bedeutende Rolle. Die Forschungsaktivitäten sind vor allem in Zürich konzentriert.

Tagung Synthetic Biology 3.0 in Zürich

Einen aktuellen Hinweis auf Forschungsaktivitäten zur Synthetischen Biologie in der Schweiz liefern die Proceedings der Tagung Synthetic Biology 3.0, die im Juni 2007 an der ETH Zürich stattfand. Dabei fällt auf, dass alle Schweizer Beteiligten, die im Organisationskomitee vertreten waren, einen Vortrag hielten oder ein Poster präsentierten, von der ETH oder Universität Zürich stammten (vgl. Anhang 12.1).

Arbeitsgruppe an der ETH Zürich

An der ETH Zürich besteht eine Arbeitsgruppe Synthetische Biologie. Im Februar 2006 fand das erste ETH Symposium on Synthetic Biology statt. Die Arbeitsgruppe war zudem an der Organisation der Tagung Synthetic Biology 3.0 beteiligt (ETHZ 2007).

Datenbank zum Projekt Synbiology

In der Datenbank zum Forschungsprojekt Synbiology der Europäischen Union war Anfang 2008 ein breiteres Spektrum von Schweizer Einrichtungen aufgeführt, an denen gemäss Synbiology zur Synthetischen Biologie gearbeitet wird. Dies ist offensichtlich darauf zurückzuführen, dass Synbiology mit einer weit gefassten Definition von Synthetischer Biologie arbeitet (vgl. Anhang 12.1).

Technikfolgen-Abschätzung

Das schweizerische Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzung TA-SWISS hat das Thema „Synthetische Biologie: Fortsetzung der Gentechnik mit anderen Methoden oder komplett neues Konzept?“ als mögliches Thema für eine Technikfolgenabschätzung diskutiert, jedoch zurückgestellt. Im Vordergrund der Arbeiten von TA-SWISS stehen zur Zeit Sozialtechniken und Themen aus der Informations- und Kommunikationstechnologie sowie der Energiewirtschaft (TA-SWISS 2007: 37).

Netzwerke

Das Konsortium, welches das europäische Projekt Eurobiosyn (vgl. oben) durchführt, hat 2004 einen Aufruf an Schweizer Forschende lanciert, die interessiert sind, sich an einer Schweizer Synthetic Biology Community zu beteiligen (vgl. NEST 2004: 1).

Im der Synthetischen Biologie verwandten Bereich der Systembiologie haben die ETH Zürich, EPF Lausanne und die Universitäten Basel, Bern, Genf, Lausanne und Zürich ein Netzwerk SystemsX.ch gegründet. Zur Projektförderung bei SystemsX.ch hat der Bundesrat in der Botschaft zur Förderung von Bildung, Forschung und Innovation (BFI) 2008 bis 2011 100 Millionen Franken vorgesehen. Die erste Ausschreibung für Forschungsprojekte wurde im September 2007 lanciert. Die Gesuche werden vom Schweizerischen Nationalfonds evaluiert (vgl. SystemsX 2007; SNF 2007a).

Synthetische Biologie

Förderungsprogramme Ein spezifisches Programm zur Forschungsförderung im Bereich Synthetische Biologie existiert in der Schweiz derzeit nicht (vgl. S. Panke 2008).

8. Kommerzielle Anwendungen

Bisher ist die Entwicklung der Synthetischen Biologie noch zu wenig fortgeschritten, um festzustellen, wo deren praktische Anwendungen liegen werden. Hohe Investitionen werden derzeit vor allem für Forschungsarbeiten vorgenommen, die der Energiewirtschaft zugute kommen sollen.

8.1 Wirtschaftliches Potenzial

Mögliche Anwendungsbereiche

Die potenziellen Anwendungsgebiete der Synthetischen Biologie sind ausgesprochen vielfältig. Theoretisch umfassen sie nahezu alle Anwendungsgebiete der Biotechnologie und organischen Chemie, z.B. Gewinnung von Rohstoffen und Energie, Herstellung von Werkstoffen, Feinchemikalien, Lebensmitteln und pharmazeutischen Produkten, Bioremediation von Abluft, Abwasser, kontaminierten Böden u.ä. (vgl. z.B. Hill 2001).

Schwerpunkte der Nachfrage

Die wirtschaftlichen Interessen an Synthetischer Biologie sind zur Zeit – aufgrund von Ressourcenverknappung und Klimawandel – im Bereich der Energiegewinnung besonders ausgeprägt. Ein weiteres aktuelles Thema ist die Fixierung und Langzeitspeicherung von Kohlendioxid.

Die chemisch-pharmazeutischen Industrie erlebt weltweit einen starken Umbruch. Ausschlaggebend dafür sind zum einen die Entwicklung neuer Technologien und zum anderen ein wachsender Wettbewerbsdruck, vor allem durch aufstrebende Konkurrenten aus asiatischen und osteuropäischen Ländern. Offenheit für das Vordringen in neue Wissensgebiete und die Nutzung neuer Technologien ist daher ein wichtiger Erfolgsfaktor (vgl. Ryser 2007: 42-43), der auch der Synthetischen Biologie zugute kommen dürfte. Gleichzeitig setzt die Chemieindustrie – getrieben durch steigende Rohstoffpreise, z.B. für Erdöl, und steigende Energiepreise – vermehrt auf Grundstoffe, die energieeffizient, umwelt- und natürliche Ressourcen schonend, preisgünstig und vor der eigenen Haustür von biologischen Organismen hergestellt werden (vgl. Neubauer 2007).

Experteneinschätzungen

Bisher ist die Entwicklung der Synthetischen Biologie noch zu wenig fortgeschritten, um festzustellen, wo deren Anwendungen liegen werden (vgl. NEST 2007: 5). Mindbranch, ein Spezialist für Marktanalysen, ortet kommerzielle Perspektiven bei der Entdeckung und Entwicklung von niedermolekularen Medikamenten (vgl. Mindbranch 2007). S. Panke sieht attraktive Anwendungsmöglichkeiten vor allem im Bereich der Produktion von Feinchemikalien (vgl. S. Panke 2008).

Konkurrierende Technologien

Bei potenziellen Anwendungen steht Synthetische Biologie primär in Konkurrenz zur traditionellen Biotechnologie und Gentechnologie. In der Natur ist bereits eine grosse Vielfalt von Lebewesen vorhanden. Derzeit sind mehr als 2 Millionen Arten von Lebewesen (ohne Einbezug der Viren) bekannt. Die Zahl der neuen Arten, die jährlich in Fachzeitschriften beschrieben wurden, liegt seit Jahren relativ konstant bei 12'000 bis 13'000 pro Jahr (vgl. Streit 2006: 131-134). Diese

Organismen bieten ein grosses Potenzial an Anwendungsmöglichkeiten, das mit gentechnischen Verfahren weiter gesteigert werden kann.

8.2 Aktueller Stand

Forschungsaktivitäten
in Unternehmen

Bisher sind Produkte der Synthetischen Biologie noch nicht zur Marktreife gelangt. Unternehmen, die im Bereich der Synthetischen Biologie arbeiten, sind vorwiegend in der Forschung tätig und auf Unterstützung externer Kapitalgeber, z.B. von Stiftungen, Risiko-Kapitalgebern oder grossen Unternehmen, angewiesen.

Im Folgenden werden beispielhaft einige Unternehmen vorgestellt, die an Anwendungen der Synthetischen Biologie arbeiten.

Amyris Biotechnologies,
Emeryville, California,
USA

Amyris befindet sich im Besitz von Privatinvestoren. Aktuelle Arbeitsschwerpunkte liegen gemäss www.amyrisbiotech.com/ (Stand Dezember 2007) in der preisgünstigen Produktion des Medikaments Artemisinin und der Produktion biologischer Kraftstoffe. Das Unternehmen baut auf Forschungen von Jay D. Keasling, Professor für Chemie und Bioingenieurwesen und Gründer des Departments für Synthetische Biologie an der University of California, zur Herstellung von Artemisininsäure in *Saccharomyces cerevisiae* auf (vgl. Ro et al. 2006). Aus Artemisininsäure kann das gegen Malaria hochwirksame Medikament Artemisin gewonnen werden. Amyris wurde im Jahr 2006 durch das World Economic Forum als Technology Pioneer in der Kategorie Biotechnologie / Gesundheit ausgezeichnet. Seit Ende 2004 arbeiten Amyris, das Non-Profit-Pharmaunternehmen OneWorldHealth und die University of California in Berkeley an einer Technologie-Plattform zur Herstellung von Artemisinin. Die Bill & Melinda Gates Foundation unterstützt das Unternehmen seit 2004 über fünf Jahre mit insgesamt 42.5 Mio \$ (Sanofi 2008, POST 2008: 2, Kanellos 2004). Anfang März 2008 gingen Amyris, OneWorldHealth und die University of California in Berkeley mit Sanofi Aventis eine Vereinbarung zur Zusammenarbeit ein, die es erlauben soll, innerhalb weniger Jahre ein marktfähiges Produkt vorzulegen (Sanofi 2008).

J. Craig Venter Institute,
Rockville, Maryland, USA

Synthetic Genomics,
Rockville, Maryland, USA

Das J. Craig Venter Institute ging 2002 aus dem Institute for Genomic Research hervor, das Venter gegründet hatte. Aktuelle Arbeitsschwerpunkte sind nach www.jcvi.org/research/ (Stand Dezember 2007) die Entwicklung von Methoden, mit denen lange DNA-Abschnitte synthetisiert und letztlich künstliche Chromosomen hergestellt werden können, die Herstellung künstlicher Organismen, die Kohlendioxid binden und die Entwicklung von Mikroorganismen, die umweltfreundliche Treibstoffe produzieren. Das Institut hat die US-Patent-Anmeldung Nr. 20070122826 auf einen Organismus, der auf eine minimale Genausstattung reduziert ist, *Mycoplasma laboratorium*, lanciert (vgl. Grass 2007; ETC Group 2007b). Zudem gelang es, das vollständige Genom von *Mycoplasma genitalium* (Gibson et al. 2008) zu synthetisieren.

Synthetic Genomics ging 2005 aus dem J. Craig Venter Institute hervor. Das Unternehmen ist gemäss www.syntheticgenomics.com/ (Stand Dezember 2007) auf die Programmierung und Herstellung funktionaler Einheiten auf DNA-Basis spezialisiert, vor allem die Produktion von Wasserstoff und Ethanol mit Hilfe modifizierter Mikroorganismen. "Wenn wir einen solchen kraftstoffproduzierenden Organismus machen könnten, wäre das der erste Milliarden-Dollar-Organismus" (J. C. Venter, zitiert nach Newsweek aus WoZ 2007). Ein wichtiger Investor ist British Petroleum (vgl. Kanellos 2007a).

Verschiedentlich werden Befürchtungen laut, Venter könne sich zum Bill Gates der Synthetischen Biologie entwickeln, indem er frühzeitig eine quasi Monopolstellung auf diesem Gebiet erlangt. Die kanadische ETC Group prägte in diesem Zusammenhang das Schlagwort „Microbesoft“.

Kosan Biosciences, Hayward, California, USA

Kosan ist eine Aktiengesellschaft und an der Nasdaq notiert. Das Unternehmen wurde 1995 gegründet. Sein aktueller Arbeitsschwerpunkt im Bereich Synthetische Biologie liegt gemäss www.kosan.com/ (Stand Dezember 2007) in der Herstellung von Polyketiden³, die zur Behandlung von Krebserkrankungen eingesetzt werden können. Diese Polyketide werden unter anderem durch Transfer von Gengruppen zwischen Organismen, Modifikation und Neuzusammensetzung von Genbestandteilen hergestellt.

Weitere Unternehmen

Eine Liste weiterer Unternehmen, die im Bereich der Synthetischen Biologie aktiv sind, veröffentlichte kürzlich die ETC Group (vgl. Anhang 12.3).

Synthetische Biologie im Bereich der Energiewirtschaft

Durch ein besonders intensives finanzielles Engagement im Bereich der synthetischen Biologie zeichnet sich British Petroleum (BP) aus. Anfang 2007 gab BP bekannt, dass es über einen Zeitraum von 10 Jahren verteilt 500 Mio \$ in das Energy Bioscience Institute investieren werde. Das Institut wird von der University of Illinois und der University of California betrieben, wobei letztere als Zentrum der Synthetischen Biologie bekannt ist. Ziel des Engagements von BP ist die biologische Herstellung von Treibstoffen und Verfahren zur Bindung von Kohlendioxid (carbon dioxide sequestration) (vgl. Kanellos 2007b).

Das Ziel, Kohlendioxid zu binden, wird bereits seit einigen Jahren von J. Craig Venter propagiert. Venter ist bestrebt, einen einfachen Mikroorganismus zu konstruieren, der grosse Mengen an Kohlendioxid aufnimmt (vgl. Herrera 2005). In der Natur sind Pflanzen sowie manche Bakterien und Archaeen in der Lage, Kohlendioxid in Biomasse zu fixieren. BP hat denn auch eine unbekannte Summe in eines der Unternehmen Venters, Synthetic Genomics, investiert (vgl. oben). Ziel dieser Investition ist es, Genome von Mikroorganismen, die in Lagerstätten fossiler Brennstoffe leben, zu sequenzieren und die Eigenschaften solcher Organismen anschliessend in industriellem Massstab nutzbar zu machen. Damit soll es beispielsweise gelingen, reinere Brenn- und Treibstoffe zu erhalten und

³ Polyketide sind eine grosse Klasse von Naturstoffen, die in der pharmazeutischen Industrie unter anderem wegen ihrer antibakteriellen, antiviralen und immunsuppressiven Eigenschaften genutzt werden. Gemeinsam ist ihnen der gleiche Biosyntheseweg.

beispielsweise gelingen, reinere Brenn- und Treibstoffe zu erhalten und mehr Öl aus Lagerstätten zu gewinnen. Daneben ist auch Forschung zur Herstellung biologischer Brenn- und Treibstoffe vorgesehen (vgl. Kanellos 2007a).

8.3 Zulieferfirmen

Unternehmen, die DNA synthetisieren

Auch wenn bisher nur wenige Firmen existieren, die an der Entwicklung von Produkten der Synthetischen Biologie arbeiten, und die Zahl der Forschungsgruppen auf diesem Gebiet überschaubar bleibt, hat sich der Markt für Unternehmen, die DNA synthetisieren, in den letzten Jahren gut entwickelt.

Die DNA-Synthese erfolgt heute aus Gründen der Zuverlässigkeit und Economy of Scale meistens in Unternehmen. Dabei lassen sich zwei Gruppen von Unternehmen unterscheiden: 1. Anbieter von Oligonukleotidsynthesen. Dabei handelt es sich um eine relativ reife Industrie. Die Anbieter stehen im Wettbewerb darum, Kunden preisgünstige und auf ihre Bedürfnisse zugeschnittene Angebote zu machen. 2. Anbieter längerer DNA-Sequenzen, d.h. von Abschnitten mit über 200 Nukleotiden Länge. Dabei handelt es sich um eine technisch anspruchsvolle, heute noch relativ unreife Industrie (vgl. Bügl 2007). Synthetische Biologie erfordert vor allem längere DNA-Sequenzen. Allgemein hat die Produktivität und Zuverlässigkeit bei der Sequenzierung und Synthese von DNA in den letzten zehn Jahren stark zugenommen. Gleichzeitig sind die Preise rückläufig. In einer Studie für das US Department of Energy wird der globale Markt für DNA Sequenzierungstechnologie und -dienstleistungen auf mehr als 7 Milliarden \$ im Jahr 2006 geschätzt (vgl. POST 2008: 1). R. Wagner, Gründer von Geneart, rechnet damit, dass sich der Markt für synthetische Gene von derzeit weltweit ca. 50 Millionen \$ bis zum Jahr 2012 verzehnfachen könnte (Marsh 2008).

Biologische Bausteine

In Zukunft könnte sich zudem ein lukrativer Markt für biologische Bausteine herausbilden („biobricks“, „chassis“, „minimal cells“ etc.) (Mindbranch 2007). Die Patentierbarkeit und Patentierung solcher Bauteile wird kontrovers diskutiert. Einerseits kann Patentierung Innovationen fördern. Sie schützt die Forschungsinvestitionen des Patentanmelders, indem sie verhindert, dass Konkurrenten ein ähnliches Produkt herstellen, ohne entsprechende Vorarbeiten geleistet zu haben. Andererseits werden Einschränkungen der Forschungsfreiheit und eine Monopolisierung des Marktes durch Schlüsselpatente befürchtet. Die Gesetze vieler europäischer Länder, nicht aber der USA, sehen ein Forschungsprivileg vor. Damit stehen patentierte Erfindungen staatlichen und nicht-staatlichen Forschungseinrichtungen frei für die Grundlagenforschung zur Verfügung. Allerdings stellen sich Abgrenzungsprobleme zwischen akademischer und kommerzieller Forschung. Gewerbliche Weiterentwicklungen auf der Grundlage eines aufgrund der Forschungsfreiheit genutzten Patents sind zwar ggf. patentierbar, setzen bei der Anwendung jedoch immer den Besitz einer Lizenz für die Grunderfindung voraus (vgl. Rathenau 2007: 11f., TA-SWISS 1999: 115 f.).

9. Sicherheits- und Sicherungsaspekte

Synthetische Biologie erfordert neue Verfahren der Risikoanalyse und -beurteilung.

9.1 Regulierungsansätze

Definitionen

Bei der Forschung zur Synthetischen Biologie, der Entwicklung und Anwendung von Produkten, die mittels Synthetischer Biologie erzeugt werden, kann es zu unabsichtlich verursachte Schäden kommen. Die Vermeidung solcher Schäden wird unter dem Begriff „Sicherheit“ zusammengefasst. Als „Sicherung“ werden Aktivitäten bezeichnet, die der absichtlichen schädigenden Verwendung von Synthetischer Biologie, etwa zu militärischen, terroristischen oder kriminellen Zwecken, entgegen wirken.

Thematische Schwerpunkte

Synthetische Biologie wird heute vielfach als eine weit gehende Form der Gentechnologie betrieben. DNA-Sequenzierung, vor allem aber auch die DNA-Synthese, spielen eine wichtige Rolle bei der Entwicklung der Synthetischen Biologie (vgl. auch 8.3). Viele Überlegungen zu Sicherheit und Sicherung bei der Synthetischen Biologie sind daher auf die DNA-Synthese gerichtet.

Initiativen zur Selbstregulierung

Im Rahmen der Tagung „Synthetische Biologie 2.0“, die 2006 in Berkeley, Kalifornien, stattfand, wurde eine Charta zur Selbstregulierung im Bereich der Synthetischen Biologie vorgelegt. Mit der Charta sollte unter anderem darauf hingewirkt werden, dass Unternehmen die Besteller potenziell gefährlicher DNA-Sequenzen einer Sicherheitsprüfung unterziehen und potenziell gefährliche Experimente einer Meldepflicht unterstehen. Die Charta wurde von verschiedenen Umweltorganisationen kritisiert – unter anderem da sie mögliche Sicherheitsdefizite, die bei den Forschenden selbst entstehen, zu wenig berücksichtige und den Bedarf an gesellschaftlicher Diskussion und Regulierung vernachlässige – und blieb auch unter Forschenden im Bereich der Synthetischen Biologie umstritten (vgl. Aldhous 2006; vgl. GeneWatch 2006). In der letzten Fassung der Meeting Declaration zur Tagung „Synthetische Biologie 2.0“ wird betont, dass Aktivitäten zur Synthetischen Biologie, welche genetisches Material betreffen, den entsprechenden bereits existierenden Regelungen unterstehen. Zudem wird Offenheit und Unterstützung für den wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Diskurs postuliert (vgl. Declaration 2006).

Vorschläge zur Regulierung

Im Jahr 2006 haben sich vier Unternehmen im Bereich der DNA-Synthese zum International Consortium for Polynucleotide Synthesis (ICPS) zusammengeschlossen. Mitglieder sind Geneart, Codon Devices, BlueHeron Biotechnology und Coda Genomics. Die Unternehmen beabsichtigen, Sicherheit und Sicherung in ihrem Arbeitsgebiet und insbesondere auch im Bereich der Synthetischen Biologie zu fördern (ICPS 2008).

2007 legten Vertreter einiger Unternehmen, die DNA synthetisieren, und Forschende an Hochschulen einen Vorschlag vor, um die Sicherheitsaspekte bei DNA-Synthese und Synthetischer Biologie zu regulieren. Demnach sollen die Besteller von DNA verpflichtet werden, Informationen zu ihrer Identität und zur Biosicherheit der mit den DNA-Sequenzen geplanten Aktivitäten an die Unternehmen zu liefern, welche DNA synthetisieren. Fälle, in denen Verdacht auf eine Sicherheitsgefährdung besteht, melden die Synthese-Unternehmen an eine Regierungsstelle weiter. Das International Consortium for Polynucleotide Synthesis stellt sowohl Regierungsstellen als auch Syntheseunternehmen grundlegende Informationen zur Biosicherheit bereit (Bügl et al. 2007: 627).

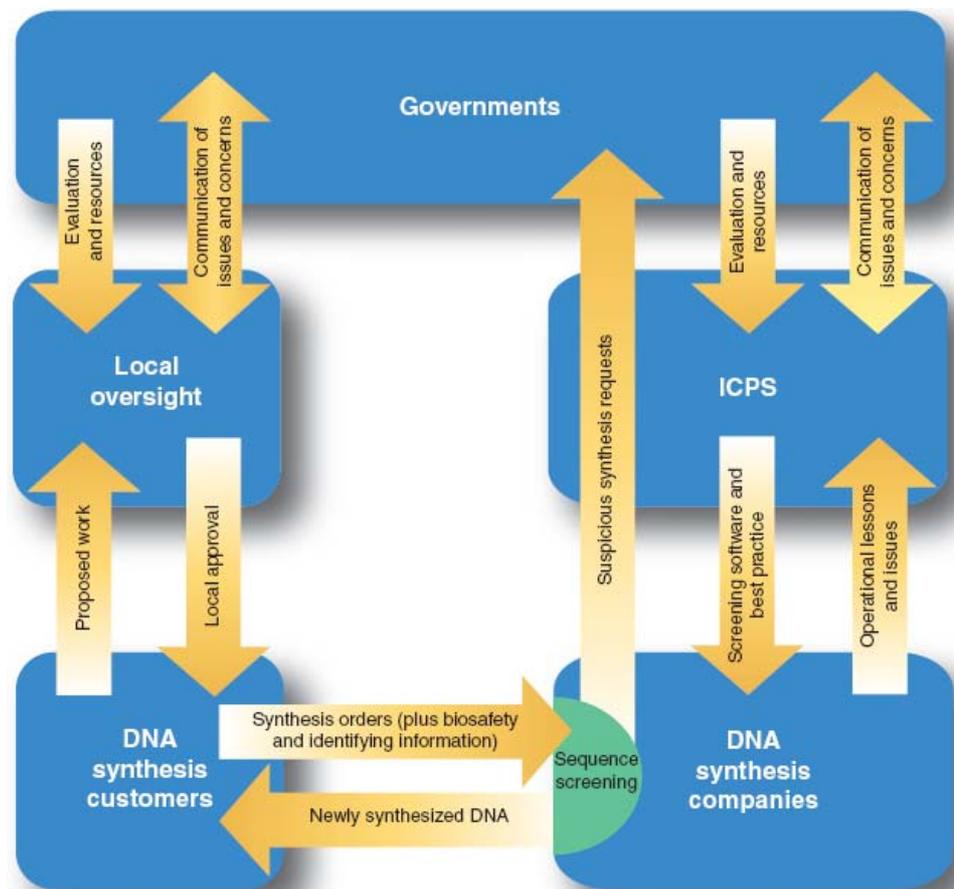


Abb. 3 : Vorschlag zur sicherheitsgerichteten Regulierung der DNA-Synthese (vgl. Bügl et al. 2007: 627)

Wichtig für die Konkurrenzfähigkeit von Unternehmen, die DNA synthetisieren, ist, ihre Kunden rasch und kostengünstig beliefern zu können. Anbieter und Anwender der DNA sind daher an internationalen Regelungen interessiert, welche die Gleichbehandlung in unterschiedlichen Ländern und Regionen fördern und die Weiterentwicklung der Synthetischen Biologie nicht unnötig behindern (Bügl et al. 2007: 628).

Ebenfalls im Jahr 2007 publizierten Vertreter des J. Craig Venter Institute, des Massachusetts Institute of Technology und des Center for Strategic and Interna-

tional Studies, Washington DC einen Vorschlag zur Regulierung der Gen- und Genomsynthese. Dieser Vorschlag konzentriert sich auf die Sicherheitsaspekte. Die Autoren fordern, Maschinen zur DNA-Synthese zu registrieren. Wer solche Maschinen besitzt sowie Reagenzien und Dienstleistungen bezieht, die zum Betrieb solcher Maschinen erforderlich sind, soll verpflichtet werden, zuvor eine Lizenz zu erwerben. Firmen, die Gene und Genome herstellen, sollen gehalten werden, die Vertrauenswürdigkeit ihrer Kunden und von deren Bestellungen zu überprüfen sowie eine Dokumentationspflicht zu erfüllen. Zudem werden Massnahmen im Bereich der Sensibilisierung, Aus- und Weiterbildung sowie des Informationsaustauschs und der Herausbildung etablierter Techniken gefordert (vgl. Garfinkel et al. 2007: ii).

Ein ähnlicher Ansatz wird in einem 2007 erschienenen Bericht vorgeschlagen, der im Rahmen des Projekts Synbiosafe der Europäischen Union entstanden ist. Dieser Bericht stützt sich im Wesentlichen auf die Vorschläge von Garfinkel et al. Die Kontrolle der Biosicherheit soll den Firmen selbst überlassen werden, die sich in zweifelhaften Fällen an eine amtliche Stelle wenden können. Zudem sollen Listen von Institutionen geführt werden, die bei der Bestellung von längeren DNA-Sequenzen vereinfachtes Prozedere durchlaufen können (vgl. Kelle 2007: 7 f.).

Weitere Aktivitäten

International sind verschiedene weitere Aktivitäten im Gang, die unter anderem dazu dienen, sicherheitsgerichtete Regulierungsansätze für die Synthetische Biologie bereit zu stellen. Im Folgenden sind drei Beispiele aufgeführt.

Das niederländische Rathenau Institut hat im Jahr 2006 eine Studie "Constructing Life. Early social reflections on the emerging field of synthetic biology" veröffentlicht. Seit November 2007 ist zudem die englische Übersetzung des Berichts, den das Rathenau Institut zuhanden des niederländischen Parlaments erstellte, verfügbar: "Constructing Life – The world of synthetic biology" (vgl. Rathenau 2006; Rathenau 2007). In beiden Berichten wird der politische Handlungsbedarf, insbesondere auch im Hinblick auf Regulierung und Kontrolle, untersucht. Das Rathenau Institut empfiehlt der niederländischen Regierung:

- rasch Forschungsarbeiten zu Sicherheitsfragen rund um die Synthetische Biologie aufzunehmen
- die Regulierung von Sicherheitsfragen rund um die Synthetische Biologie frühzeitig auf die Agenda der Europäischen Union zu setzen
- die internationale Harmonisierung von Massnahmen gegen den Bioterrorismus auch im Hinblick auf Synthetische Biologie voran zu treiben
- die Forschenden im Bereich der Synthetischen Biologie auf Sicherheits- und Sicherheitsfragen zu sensibilisieren
- bei staatlich geförderter Forschung die freie, ungehinderte Zugänglichkeit aller Ergebnisse sicher zu stellen

- ethische Untersuchungen und die öffentliche Diskussion zu Synthetischer Biologie zu unterstützen

Das Institut für Technikfolgen-Abschätzung bei der österreichischen Akademie der Wissenschaften ist Partner des EU-Projekts Synbiosafe. Zwischen Januar 2007 und Dezember 2008 führt es ein Projekt "Sicherheitsrelevante und ethische Aspekte der synthetischen Biologie" durch (vgl. ITA 2007).

Die britische Royal Academy of Engineering hat eine Expertengruppe ins Leben gerufen, die Strategien zum Umgang mit Synthetischer Biologie koordinieren soll (vgl. POST 2008: 4).

9.2 Sicherheit

Schadenpotenzial

Künstliche biologische Funktionssysteme können Eigenschaften aufweisen, die Schäden an Menschen, Umwelt und Sachwerten verursachen, z.B. natürliche Lebensräume stören oder Krankheiten hervorrufen. Potenziell sind sie in der Lage, sich zu vermehren und evolutiv weiter zu entwickeln, was das Schadenpotenzial erhöht.

Eintretenswahrscheinlichkeit

Voraussichtlich werden die meisten Produkte der Synthetischen Biologie ausserhalb einer speziellen Laborumgebung nicht lebensfähig sein (vgl. HSE 2007). Sven Panke beurteilt es als Stärke der Synthetischen Biologie, dass Funktionssysteme explizit so konstruiert werden können, dass sich bestimmte Risiken, darunter das Risiko einer Freisetzung und unkontrollierten Verbreitung in der Umwelt, ausschliessen lassen (vgl. S. Panke 2008).

Risiko

Im technisch-naturwissenschaftlichen Bereich wird Risiko im Allgemeinen als Produkt von Eintretenswahrscheinlichkeit und Schadenausmass definiert. Aus heutiger Sicht ist die Wahrscheinlichkeit, dass künstliche biologische Funktionssysteme ausserhalb von Forschungseinrichtungen oder Produktionsstätten zu einem Schaden führen, gering. Mögliche Schäden könnten jedoch weitreichend sein. Mit einem gewissen Restrisiko, dass sich solche Systeme in der Umwelt ausbreiten und zu Schäden führen, muss daher gerechnet werden.

Risikoanalyse

Die Höhe des Risikos lässt sich mit einer Risikoanalyse einschätzen.

Das Risiko, das mit herkömmlicher Gentechnik verbunden ist, kann abgeschätzt werden, indem Bezug auf die Funktion der übertragenen DNA und den Empfängerorganismus genommen wird. Dieser Ansatz greift bei Synthetischer Biologie nicht mehr (vgl. HSE 2007), da es hier nicht darum geht, einen bekannten Organismus zu modifizieren, sondern ein System von Grund auf neu aufzubauen⁴.

⁴ Eine Expertengruppe der Europäischen Kommission sieht keinen qualitativen Unterschied zu anderen Bereichen der Bio- und Gentechnologie. Allerdings berge Synthetische Biologie ein grösseres Potenzial zur Manipulation und Kontrolle, was positive und negative Aspekte habe (vgl. NEST 2005: 18).

Technische Risiken werden in der Regel mit Hilfe probabilistischer Risikoanalysen quantifiziert. Solche Risikoanalysen stützen sich wesentlich auf Erfahrungswerte zur Zuverlässigkeit menschlichen Handelns und technischer Komponenten, wie z.B. Ventile oder Notstromgeneratoren. Dieser Ansatz lässt sich kaum auf biologische Funktionssysteme übertragen. Einige Gründe dafür sind: Biologische „Bausteine“ sind häufig nicht in allen Organismen einer Art identisch aufgebaut, sondern weisen eine gewisse natürliche Variationsbreite auf. Die Funktion biologischer Bausteine ist kontextabhängig. Manche biologische Bausteine können, je nachdem, in welcher Umgebung sie aktiv sind, verschiedene Funktionen entfalten. Biologische Bausteine sind in ihrer Funktionsweise untereinander stark vernetzt.

Im Bereich der Synthetischen Biologie müssen daher neue Analysemethoden entwickelt werden. Solche Analysemethoden können sich auf Erfahrungen mit der biologischen und der technischen Risikoanalyse stützen.

Risikobeurteilung

Synthetische Biologie wird es voraussichtlich erforderlich machen, bestehende Schutzziele beim Umgang mit biologischen und technischen Risiken zu überdenken. Eine genauere Untersuchung zu diesem Thema steht noch aus. Im Folgenden sollen nur zwei Fragen beispielhaft aufgezeigt werden:

1. Wie wird der Begriff „Organismus“ verstanden? Organismen sind in Art. 7 des Umweltschutzgesetzes als „zelluläre und nichtzelluläre biologische Einheiten“ definiert, „die zur Vermehrung oder zur Weitergabe von Erbmaterial fähig sind.“ Dazu könnten künftig auch künstlich geschaffene Funktionssysteme zählen. 2. Tragen künstliche biologische Funktionssysteme zur Biodiversität bei? Der Umgang mit Organismen ist unter anderem mit dem Ziel rechtlich geregelt, Menschen und Umwelt vor schädlichen und lästigen Einwirkungen, vor Gefährdungen und Beeinträchtigungen zu schützen. In Art. 1 der Freisetzungsverordnung ist als Zweck der Regelung unter anderem aufgeführt, die „biologische Vielfalt“ zu erhalten. Synthetische Organismen könnten – unter bestimmten Voraussetzungen – als Beitrag zur Biodiversität aufgefasst werden.

Grundlegender wurde diese Thematik im Jahr 2007 von G. Wolbring angesprochen, der Probleme bei der Zuordnung von Synthetischer Biologie zu Regelungen im technischen oder biologischen Bereich ausmacht (vgl. Wolbring 2007: 117f).

Risikomanagement

Um das Risiko, das vom Umgang mit künstlichen biologischen Funktionssystemen ausgeht, zu begrenzen, kann auf ein breites Spektrum von Erfahrungen aus der Bio- und Gentechnologie zurückgegriffen werden. Eine spezifische Problematik geht auf das hohe Mass an interdisziplinärer Forschung an künstlichen biologischen Funktionssystemen zurück: Viele Forschende im Bereich der Synthetischen Biologie sind keine Biologen, sondern stammen aus technischen Diszipli-

nen, z.B. Informationstechnologie oder Elektrotechnik. Ihr Verständnis für biologische Mechanismen ist gering, eine Ausbildung zum Umgang mit biologischen Risiken fehlt. Diese Situation bringt erhöhte Risiken mit sich, z.B. von Laborunfällen (HSE 2007).

Chancen

Die mit Synthetischer Biologie verbundenen Risiken sollten immer auch im Kontext der mit ihr verbundenen Chancen betrachtet werden. Beispielsweise ist denkbar, dass künstliche biologische Funktionssysteme sicherheitsgerichtet eingesetzt werden, z.B. zur Umweltremediation, zur Detektion und zum Abbau gefährlicher Stoffe, in Produktionsprozessen, die mit geringem Druck und Temperaturen auskommen, zur umweltfreundlichen Energieversorgung etc. (vgl. NEST 2005: 6).

9.3 Sicherung

Militärische Anwendung

Während sich die Aktivitäten zur Verminderung des von Synthetischer Biologie ausgehenden Risikos in der Europäischen Union wesentlich auf Sicherheitsaspekte konzentrieren, steht in den USA die Sicherung im Vordergrund (vgl. POST 2008: 3).

In Grossbritannien hob das Verteidigungsministerium in seiner Technologie-Strategie unter anderem die Bedeutung der Synthetischen Biologie hervor. Der Defence Science Advisory Council entschied daraufhin, die militärischen Chancen und Risiken, die sich mit Synthetischer Biologie verbinden, näher zu untersuchen (vgl. POST 2008: 3). In den USA werden Projekte zur Synthetische Biologie unter anderem durch das Pentagon finanziell unterstützt (Herrera 2005).

Produktion
biologischer Waffen

Synthetische Biologie eignet sich potenziell, um Biowaffen herzustellen, die stärker, spezifischer oder kontrollierbarer wirken als dies bei heute bekannten Organismen der Fall ist. Aus derzeitiger Sicht sind jedoch der Aufwand, um solche Funktionssysteme zu konstruieren und die Gefahr, dass es zu unerwarteten Nebenwirkungen kommt, hoch. Insbesondere für terroristische Zwecke scheinen daher konventionelle Biowaffen naheliegender zu sein.

Die Synthese langer DNA-Sequenzen, wie sie häufig für Projekte des Synthetischen Biologie benötigt werden, könnte theoretisch gefragt sein, um Pathogene herzustellen, die sich schwer aus der Natur zu isolieren lassen (z.B. Ebola Viren), die nur in einer kleinen Zahl von Institutionen vorhanden und dort unter Verschluss sind (z.B. Pockenviren) oder die in der Natur nicht mehr existieren (z.B. das Grippevirus von 1918). Informationen über potenziell schädigende DNA-Sequenzen sind verhältnismässig einfach zu beschaffen. Die Kontrolle muss daher bei Unternehmen und Institutionen ansetzen, die lange DNA-Sequenzen herstellen (vgl. Bügl 2007).

Regulierung

Zur Kontrolle von Biowaffen existieren internationale Regelungen, die auch im Bereich der Synthetischen Biologie zur Anwendung gelangen können, z.B. die Biological and Toxin Weapons Convention von 1972 oder die Regulierung der EU für zivil und militärisch nutzbare Güter (EC No. 1334/2000) (vgl. Kelle 2007: 7-8). Inwiefern diese Regulierungen, die heute vor allem auf gentechnisch veränderte und pathogene Organismen zugeschnitten sind, für Produkte der Synthetischen Biologie angepasst werden müssen, bedarf noch einer systematischen Überprüfung.

10. Schlussfolgerungen

Synthetische Biologie führt verschiedene frühere Entwicklungen in den Biowissenschaften weiter und stellt Querbezüge zu anderen Disziplinen wie Informations- oder Nanotechnologie her. Die Untersuchung ethischer Fragestellungen kann daher vielfach auf Diskussionen aufbauen, die bereits mit der Entwicklung der Gentechnologie, der Nanobiotechnologie und weiterer Fachgebiete geführt wurden.

Zwei ethisch relevante, wichtige Fragenkomplexe verbinden sich spezifischer mit der Synthetischen Biologie: Welchen Status können neue Formen des „Lebens“ beanspruchen? Welche Risiken gehen mit der Schaffung neuer „lebensähnlicher“ Funktionssysteme einher?

10.1 Welchen Status können neue Formen des „Lebens“ beanspruchen?

Die Frage, was unter „Leben“ zu verstehen ist, lässt sich nicht eindeutig beantworten (vgl. Brenner 2007). Verschiedenen Formen des Lebens werden in der Schweiz jedoch heute Rechte zugestanden, z.B. auf Sicherheit und Schutz der Würde. Andere Formen des Lebens, beispielsweise Krankheitserreger, werden bekämpft. Damit stellt sich die Frage, welchen Status künftig die „lebensähnlichen“ Funktionssysteme erhalten sollen, die mit Synthetischer Biologie erzeugt werden:

- Wann sind Produkte der Synthetischen Biologie als „Organismen“ zu betrachten?
- Welche Rechte, die natürlichen Lebewesen zugestanden werden, stehen auch „lebensähnlichen“ Funktionssystemen zu?
- Welche weiteren Regelungen, die für natürliche Lebewesen gelten, sollen auch auf „lebensähnliche“ Funktionssysteme angewendet werden, z.B. Regulierungen zur Biosicherheit?
- Sind neue spezifische Regelungen für „lebensähnliche“ Funktionssysteme erforderlich?

Auf eine weitere, möglicherweise tiefgreifende Auswirkung weist Andreas Brenner hin: „Wenn die Vorstellung, dass Leben machbar geworden ist, im allgemeinen Bewusstsein Platz greift, dann kann dies eine zweifache Wirkung entfalten: *Erstens* könnte in der Wahrnehmung von Leben eine Aufspaltung einsetzen, der Art, dass es neben dem bisherigen «natürlichem Leben» auch noch «künstliches Leben» gebe. Dies würde zu einer Aufspaltung der bislang herrschenden Einheit allen Lebens führen. *Zweitens* könnte die Überzeugung von der erfolgreichen Synthetisierung des Lebens den Lebensbegriff insgesamt verändern, indem die bisherigen Lebens-Vorstellungen nun als Täuschung angesehen würden. «Leben» wäre demnach endgültig entzaubert und eindeutig als eine Form materiel-

len Seins ausgewiesen, welche sich von anderem materiellen Sein lediglich durch seine Komplexität unterscheiden“ (vgl. Benner 2007: 166).

10.2 Welche Risiken gehen mit der Schaffung neuer „lebensähnlicher“ Funktionssysteme einher?

Produkte der Synthetischen Biologie weisen sowohl Eigenschaften biologischer als auch technischer Systeme auf. Die Methoden zur Einschätzung technischer und biologischer Risiken, welche in den letzten Jahrzehnten entwickelt und zunehmend verfeinert wurden, lassen sich nicht ohne weiteres auf „lebensähnliche“ Funktionssysteme übertragen.

Im Bereich der Synthetischen Biologie müssen daher eigene Analysemethoden entwickelt werden. Solche Analysemethoden können sich auf Erfahrungen mit der biologischen und der technischen Risikoanalyse stützen. Voraussichtlich müssen jedoch auch neuartige Verfahrenselemente entwickelt werden.

Um die Ergebnisse solcher Risikoanalysen bewerten zu können, sind Beurteilungsmassstäbe, vor allem Schutzziele, erforderlich. Auch hier können Erfahrungen aus dem Umgang mit technischen und biologischen Risiken sowie Naturgefahren als Grundlage dienen. Es werden aber auch weitergehende Entwicklungsarbeiten erforderlich sein.

11. Quellen

11.1 Gespräche

(S. Panke 2008): Gespräch mit Herrn S. Panke, Assistenzprofessor für Bioverfahrenstechnik im Institut für Verfahrenstechnik der ETH Zürich, am 16. Januar 2008⁵.

11.2 Literatur

Anmerkung zur Form der Literaturzitate: Bei Verweisen auf Bücher, Berichte und Artikel in Fachzeitschriften ist jeweils die Seitenzahl angegeben. Bei Verweisen auf Artikel in Tageszeitungen, Webseiten und kurze Dokumente ohne Nummerierung der Seiten ist keine Seitenzahl vermerkt.

(Aldhous 2006): Synthetic biologists reject controversial guidelines, Peter Aldhous, New Scientist, 23.5.2006, www.newscientist.com/channel/health/dn9211.html, Stand 4.1.2008.

(Beachhead 2006): Synthetic Biology, A New Paradigm For Biological Discovery, Beachhead Consultants, Zusammenfassung auf www.researchandmarkets.com/reports/314528, Stand 9.3.2008.

(bioss 2007): bioss – dem Leben auf der Spur, Pressemitteilung vom 19.10.2007, www.bioss.uni-freiburg.de/img/pressemitteilung_bioss_deutsch.pdf, Stand 5.1.2008.

(Brenner 2007): Leben. Eine philosophische Untersuchung. Andreas Brenner, Schriftenreihe der Eidgenössischen Ethikkommission für die Biotechnologie im Ausserhumanbereich EKAH und Ariane Willemsen, Bundesamt für Bauten und Logistik BBL, Bern.

(Bügl et al. 2007): DNA synthesis and biological security, Hans Bügl, John P Danner, Robert J Molinari, John T Mulligan, Han-Oh Park, Bas Reichert, David A Roth, Ralf Wagner, Bruce Budowle, Robert M Scripp, Jenifer A L Smith, Scott J Steele, George Church, Drew Endy, Nature Biotechnology, Volume 25, Number 6, June 2007, 627-629.

(Declaration 2006): Declaration of the Second International Meeting on Synthetic Biology, Berkeley, California, USA, 29.5.2006, Revised Public Draft, <http://syntheticbiology.org/SB2Declaration.html>, Stand 17.11.2007.

(DFG 2007): Exzellenzcluster Zentrum für biologische Signalstudien (bioss) – von der Analyse zur Synthese, Deutsche Forschungsgemeinschaft, 19.10.2007.

(EMBO 2005): Now live – Molecular Systems Biology - A first in systems biology publishing, 14.4.2005, www.embo.org/about_embo/press/msb.html, Stand 17.11.2007.

(Endy 2007): Drew Endy, <http://web.mit.edu/be/people/indy.htm>, Stand 17.11.2007.

⁵ Die in diesem Bericht zitierten Aussagen wurden von Herrn Panke nicht nochmals korreferiert.

- (HSE 2007): HSE Horizon Scanning Intelligence Group Short Report Synthetic Biology, Horizon Scanning SR010.
- (ICPS 2008): Website des International Consortium for Polynucleotide Synthesis, <http://pgen.us/ICPS.htm>, Stand 10.3.2008.
- (IET 2006): IET Synthetic Biology, IET Digital Library, Institution of Engineering and Technology, Grossbritannien, www.ietdl.org/IET-STB, Stand 9.3.2008.
- (Irrgang 2003): Von der Mendelgenetik zur synthetischen Biologie – Epistemologie der Laboratoriumspraxis Biotechnologie, Bernhard Irrgang, Universitätsverlag und Buchhandel Eckhard Richter & Co OHG, Dresden.
- (ITA 2007): ITA-Projekt Sicherheitsrelevante und ethische Aspekte der synthetischen Biologie, www.oeaw.ac.at/ita/ebene4/d2-2c19.htm, Stand 13.11.2007.
- (Kanellos 2007a): Oil giant BP invests in microbe specialist, Michael Kanellos, [cnet news.com](http://cnet.news.com), 15.6.2007, www.news.com/2100-11395_3-6191159.html, Stand 4.1.2008.
- (Kanellos 2007b): BP to fund biofuel research institute, Michael Kanellos, [cnet news.com](http://cnet.news.com), 1.2.2007, www.news.com/BP-to-fund-biofuel-research-institute/2100-1008_3-6155570.html?tag=st.nl, Stand 4.1.2008.
- (Kanellos 2004): Gates foundation to promote synthetic biology, Michael Kanellos, [cnet news.com](http://cnet.news.com), 13.12.2004, www.news.com/Gates-foundation-to-promote-synthetic-biology/2100-1008_3-5489245.html?tag=st.nl, Stand 4.1.2008.
- (Kastilan 2008): Dr. Venter spielt Lego, Sonja Kastilan, Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, 27.1.2008.
- (Kelle 2007): Synthetic Biology & Biosecurity – Awareness in Europe, Alexander Kelle, Organisation for International Dialogue and Conflict Management (IDC), Wien / Bradford Science and Technology Report No.9.
- (Leduc 1914): Die Synthetische Biologie, Stéphane Leduc, deutsche Übersetzung von Alfred Gradenwitz, Das Leben, Bd. II, Ludwig Hofstetter Verlag, Halle a.S.
- (Marsh 2008): The code for a successful start-up, Financial Times, 23.1.2008.
- (Mindbranch 2007): Synthetic Biology: An Emerging Tool for Drug Discovery and Production, Oktober 2007, http://www.mindbranch.com/catalog/print_product_page.jsp?code=R55-494, Stand 4.1.2008.
- (NASA o.J.): Benner – Self-Reproducing Molecular Systems and Darwinian Chemistry, <http://nai.nasa.gov/team/customtags/projectreports.cfm?teamID=25&year=5&projectID=491>, Stand 4.1.2007.
- (NEST 2005): Synthetic Biology – Applying Engineering to Biology. Report of an NEST High-Level Expert Group, Project Report EUR 21796, Brüssel.
- (Neubauer 2007): Die Rohstoffe der Zukunft wachsen auf dem Acker, Uta Neubauer, NZZ am Sonntag, 16.12.2007.

- (NSF 2002): Converging Technologies for Improving Human Performance. Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science, Mihail C. Roco, William S. Bainbridge (eds.), Arlington.
- (POST 2008): Synthetic Biology, postnote Number 298, Parliamentary Office of Science and Technology, London.
- (Rathenau 2007): Constructing Life – The World of Synthetic Biology, Rinie van Est, Huib de Vriend, Bart Walhout, Rathenau Instituut, Den Haag.
- (Rathenau 2006): Constructing Life – Early reflections on the emerging field of synthetic biology, Huib de Vriend, Rathenau Instituut, Den Haag.
- (Ro et al. 2006): Production of the antimalarial drug precursor artemisinic acid in engineered yeast, Dae-Kyun Ro¹, Eric M. Paradise, Mario Ouellet, Karl J. Fisher, Karyn L. Newman, John M. Ndungu, Kimberly A. Ho, Rachel A. Eachus, Timothy S. Ham, James Kirby, Michelle C. Y. Chang, Sydnor T. Withers, Yoichiro Shiba, Richmond Sarpong & Jay D. Keasling, *nature*, Vol 440, 13.4.2006.
- (Ryser 2007): Wachstumstreiber chemisch-pharmazeutische Industrie, Nina Ryser, *Die Volkswirtschaft* Nr. 6 2007, 39-43.
- (Sanofi 2008): Vereinbarung zur Entwicklung von halbsynthetischem Artemisinin. Bessere Versorgung von Malaria-Patienten angestrebt, Pressemitteilung der Sanofi-Aventis Deutschland vom 3.3.2008, Frankfurt.
- (SB3.0 2007): Informationen zur Tagung Synthetic Biology 2007 in Zürich, www.syntheticbiology3.ethz.ch/index.htm, Stand 12.11.2007.
- (SB2.0 2006): Informationen zur Tagung Synthetic Biology 2006 in Berkeley, California, <http://pbd.lbl.gov/sbconf/>, Stand 12.11.2007.
- (SB1.0 2004): Informationen zur Tagung Synthetic Biology 2004 in Cambridge, Massachusetts http://syntheticbiology.org/Synthetic_Biology_1.0.html, Stand 12.11.2007 (Proceedings wurden nicht veröffentlicht).
- (scnat 2007): Synthetic Biology – Potenzial für die Zukunft sinnvoll nutzen, Öffentliche Informations- und Diskussionsveranstaltung, Zusammenfassung der Referate, www.geneticresearch.ch/downloads/Kurzbericht_Panel_SB3-0.pdf.
- (SNF 2007a): SNF evaluiert erstmals Gesuche von SystemsX.ch, Mitteilung vom 7.9.2007, www.snf.ch/D/NewsPool/Seiten/news_070907_systemsx.aspx, Stand 13.11.2007.
- (SNF 2007b): European Science Foundation, www.snf.ch/d/international/seiten/esf.aspx, Stand 17.11.2007.
- (Springer 2006): Springer veröffentlicht neue Fachzeitschrift *Systems and Synthetic Biology*, Mitteilung vom 22.11.2006, www.springer-sbm.com/index.php?id=291&backPID=131&swords=open%20access&L=1&tx_tnc_news=2924&cHash=72e5900f0a, Stand 17.11.2007.
- (Stelling 2007): Computational Systems Biology, Überblick über die aktuelle Forschung, <http://csb.inf.ethz.ch/research/synthbio.html>, Stand 13.11.2007.
- (Streit 2006): Biozahl 2006 – 2 Millionen-Grenze erreicht, Bruno Streit, *Natur und Museum*, Band 136, Heft 5/6, 131-134.

- (Synbiocomm 2007): SYNBIOCOMM,
www.syntheticbiology.ethz.ch/synbiocomm/index, Stand 17.11.2007.
- (Synbiology 2006): Synbiology – An Analysis of Synthetic Biology Research in Europe and North America, Europe/North America Comparative Assessment, European Commission 6th Framework Programme, September 2006.
- (Synbiology 2005): – An Analysis of Synthetic Biology Research in Europe and North America, Output D3: Literature and Statistical Review, European Commission 6th Framework Programme, October 2005.
- (Synbiosafe 2007): Safety and Ethics of Synthetic Life, Merkblatt zum Projekt Synbiosafe, Europäische Kommission, Brüssel,
www.synbiosafe.eu/uploads///pdf/Synbiosafe.pdf, Stand 13.11.2007.
- (SystemsX 2007): Website von SystemsX.ch, www.systemsx.ch/, Stand 13.11.2007.
- (TA-SWISS 2007): TA-SWISS Jahresbericht 2006, Bern.
- (TA-SWISS 1999): Somatische Gentherapie. Anne Eckhardt, Hans Maurer, Thomas Bonk, Felix Gmünder, Sandra Nocera, Bern.
- (Weiss 2007): Ron Weiss, www.ee.princeton.edu/people/Weiss.php, Stand 17.11.2007.
- (WoZ 2007): Synthetische Biologie – Die Maschine lebt, Niels Boeing, WoZ vom 12.7.2007, Ressort Wissen.
- (Wolbring 2007): Bio-tech, NanoBio-Tech, SynBio-tech, NanoSynBio-tech? The changing face of biotech law? (Part I), Gregor Wolbring, Journal of International Biotechnology Law, Vol. 4 177-186.
- (Wolbring 2006): Synthetic Biology 2.0, Gregor Wolbring, Innovation Watch, 30.5.2006,
www.innovationwatch.com/choiceisyours/choiceisyours.2006.05.30.htm,
Stand 4.1.2008.

12. Anhang

12.1 Forschungsgruppen in der Schweiz

In der folgenden Liste sind Schweizer Forschende resp. Organisationen aufgeführt, die in Literatur und Internet mit Synthetischer Biologie – im weiteren Sinn – in Verbindung gebracht werden. Die Liste soll lediglich eine Orientierung vermitteln und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Prof. Nikola Biller-Adorno, Institut für Biomedizinische Ethik, Ethik-Zentrum der Universität Zürich (vgl. SB03 2007: 46, 109)

Prof. Andreas Engel, Maurice E. Müller Institut für Strukturbioogie am Biozentrum der Universität Basel (Datenbank Synbiology, Institutions database)

Prof. Martin Fussenegger, Institut für Chemie- und Bioingenieurwissenschaft, ETH Zürich (vgl. SB03 2007: 19)

Dr. Matthias Heinemann, Institut für Molekulare Systembiologie, ETH Zürich (vgl. Heinemann 2007)

Prof. Wolfgang Meier, Institut für Physik der Universität Basel (Datenbank Synbiology, Institutions database)

Prof. Sven Panke, Institut für Bioverfahrenstechnik, ETH Zürich (vgl. SB03 2007: 150)

Prof. Andreas Plückthun, Biochemisches Institut, Universität Zürich (vgl. SB03 2007: 140)

Prof. Peter H. Seeberger, Laboratorium für Organische Chemie, ETH Zürich (vgl. SB03 2007: 58)

Prof. Jörg Stelling, Computational Systems Biology, ETH Zürich (vgl. Stelling 2007)

Dr. Ivo Utke, Laboratory for Mechanics of Materials and Nanostructures an der EMPA Thun (Datenbank Synbiology Institutions database)

Prof. Viola Vogel, Biologisch orientierte Materialwissenschaften, ETH Zürich (vgl. SB03 2007: 57, 87)

Departement für Physik an der Université de Fribourg (Datenbank Synbiology, Institutions database)⁶

Friedrich Miescher Institute for Biomedical Research, Basel (Datenbank Synbiology, List of author's affiliations)

Gruppe für theoretische Biologie, Institut für Integrative Biologie, ETH Zürich (Datenbank Synbiology, List of author's affiliations)

Institut für Biotechnologie, ETH Zürich (Datenbank Synbiology, List of author's affiliations)

Swiss Institute of Bioinformatics, Lausanne (Datenbank Synbiology, List of author's affiliations)

⁶ Prof. Maria Miguel, ehemals Université de Fribourg, arbeitet heute an der Universität von Coimbra, Portugal und ist dort am EU-Projekt Neonuclei beteiligt.

12.2 Europäische Projekte

Die Europäische Union fördert Projekte der Synthetischen Biologie gegenwärtig vor allem im Programm New and Emerging Science and Technology (NEST). Projekte mit Bezug zur Synthetischen Biologie sind gemäss www.synbiosafe.eu und (Post 2008: 2):

- BIOMODULAR H2: Engineered Modular Bacterial Photoproduction of Hydrogen
- BioNano-Switch: A Biological Nanoactuator as a Molecular Switch for Biosensing
- CELLCOMPUT: Biological Computation Built on Cell Communication Systems
- COBIOS: Engineering and Control of Biological Systems: a New Way to Tackle Complex Diseases and Biotechnological Innovation
- EMERGENCE: Coordination puts synthetic biology on firm footing
- EUROBIOSYN: A modular platform for biosynthesis of complex molecules
- FuSyMEM: Functional Synthetic Membranes for GPCR based Sensing
- HYBLIB: Human monoclonal antibodies from a library of hybridomas
- NANOMOT: Synthetic Biomimetic Nanoengines: a Modular Platform for Engineering of Nanomechanical Actuator Building Blocks
- NEONUCLEI: Self-assembly of synthetic nuclei: key modules for semibiotic chemosynthetic systems
- NETSENSOR: Design and Engineering of gene networks to respond to and correct alterations in signal transduction pathways
- ORTHOSOME: An Orthogonal Episome: an Artificial Genetic System Based on a Novel Type of Nucleic Acids
- PROBACTYS: Programmable Bacterial Catalysts
- SynBioComm: Towards a European Synthetic Biology Community
- SYNBIOSAFE: Safety and Ethical Aspects of Synthetic Biology
- SYN BIOLOGY: An Analysis of Synthetic Biology Research in Europe and North America
- SYNTHCELLS: Approaches to the Bioengineering of Synthetic Minimal Cells
- TESSY: Towards a European Strategy for Synthetic Biology

12.3 Unternehmen

Eine Liste von Unternehmen, die international im Bereich der Synthetischen Biologie aktiv sind, veröffentlichte kürzlich die ETC Group (ETC Group 2007b: 45):

Ambrx, www.ambrx.com, La Jolla, CA, USA

Develops biopharmaceuticals utilizing artificial amino acids

Associated with Dr. Peter Schultz, Scripps Research Institute, San Diego, USA

Amyris Biotechnologies, www.amyrisbiotech.com, Emeryville, CA, USA

Developing synthetic microbes to produce pharmaceuticals, fine chemicals, nutraceuticals, vitamins, flavors and biofuels

Founded by Prof. Jay Keasling of University of California, Berkeley

CEO John G. Melo was previously president of U.S. Fuels Operations for British Petroleum; Vice President of Research is Dr. Jack D. Newman

Egea Biosciences, www.egeabiosciences.com, www.centocor.com, San Diego, CA, USA

Now wholly owned by Johnson & Johnson. Develops innovative genes, proteins and biomaterials for J&J medical immunology subsidiary Centocor; Egea holds broad patent on genome synthesis

Founded by Dr. Glen Evans, formerly a leading investigator in the Human Genome Project

Codon Devices, www.codondevices.com, Cambridge, MA, USA

Describes itself as a 'Bio Fab' able to design and construct engineered genetic devices for partners in medicine, biofuels, agriculture, materials and other application areas

Founders include: Prof. Drew Endy (MIT), Prof. George Church (Harvard), Prof. Jay Keasling (Berkeley), Prof. Ron Weiss (Princeton) and others

Diversa, www.diversa.com, San Diego, CA, USA

Diversa adds new codons to 'optimise' enzymes taken from natural bacteria to apply to industrial processes

Eric Mather, Vice-President of Scientific Affairs

DuPont, www.dupont.com, Wilmington, Delaware, USA

DuPont is partnering with Genencor, BP, Diversa and others to develop microbes that will produce fibers (Sorona) and biofuels

John Pierce is Vice President, DuPont Bio-Based Technology

EngeneOS, www.engeneOS.com, Waltham, MA, USA

Designs and builds programmable biomolecular devices from both natural and artificial building blocks

Founders include Prof. George Church (Harvard); Joseph Jacobson (MIT)

EraGen Biosciences, www.eragen.com, Madison, WI, USA

Develops genetic diagnostic technologies based on expanded genetic alphabet

Founded by Dr. Steven A. Benner

Firebird Biomolecular Sciences, www.firebirdbio.com, Gainesville, FL, USA

Supplies nucleic acid components, libraries, polymerases, and software to support synthetic biology

Founded by Dr. Steven A. Benner

Genencor, www.genencor.com, Palo Alto, CA, USA

Develops and sells biocatalysts and other biochemicals. Undertakes pathway engineering

Owned by Danisco

Genomatica, www.genomatica.com, San Diego, CA, USA

Designs software that models genetic network for synthetic biology applications

LS9, www.LS9.com, San Francisco, CA, USA

Designs microbial factories that produce biofuels and other energy related compounds

Founders include Prof. George Church (Harvard)

Mascoma, www.mascoma.com, Cambridge, MA, USA

Developing microbes to convert agricultural feedstock into cellulosic ethanol

Founded by Dr. Lee R. Lynd (Dartmouth College)

Protolife, www.protolife.net, Venice, Italy

Developing artificial cells and synthetic living systems

Founded by Dr. Norman Packard

Sangamo Biosciences, www.sangamo.com, Richmond, CA, USA

Produce engineered 'zinc finger' proteins for controlling gene regulation

Synthetic Genomics, www.syntheticgenomics.com, Rockville, MD, USA

Developing minimal genome as chassis for energy applications

Founded by Dr. Craig Venter and Dr. Hamilton Smith;

President is Dr. Ari Patrinos (formerly US Department of Energy)

12.4 Nichtregierungsorganisationen

Ein offener Brief zur geplanten Selbstregulierungs-Charta der Forschenden im Bereich der Synthetischen Biologie (vgl. Kapitel 0) wurde von folgenden Organisationen unterzeichnet (vgl. GeneWatch 2006):

- Acción Ecológica (Ecuador) - www.accionecologica.org
- California for GE Free Agriculture - www.calgefrees.org
- Centro Ecológico (Brasilien)
- Clean Production Action - www.cleanproduction.org
- Corporate Europe Observatory - www.corporateeurope.org
- Corporate Watch (Grossbritannien) - www.corporatewatch.org
- Edmonds Institute - www.edmonds-institute.org/
- ETC Group - www.etcgroup.org
- Farmers Link - www.farmerslink.org.uk
- Friends of the Earth International - www.foe.org
- Foundation on Future Farming (Deutschland) - www.zs-l.de
- Fondation Sciences Citoyennes (Frankreich) - www.sciencescitoyennes.org
- Gaia Foundation - www.gaiafoundation.org
- GeneEthics Network (Australien) - www.geneethics.org
- Genewatch (Grossbritannien) - www.genewatch.org
- GRAIN - www.grain.org
- Greenpeace International - www.greenpeace.org
- Henry Doubleday Research Association (Grossbritannien) - www.gardenorganic.org.uk
- Indigenous People's Biodiversity Network
- International Center for Technology Assessment - www.icta.org
- International Network of Engineers and Scientists - www.inesglobal.com
- Institute for Social Ecology - www.social-ecology.org
- Institute for Bioethics, Culture and Disability - www.bioethicsanddisability.org
- International Union of Food and Agricultural Workers - www.iuf.org
- Lok Sanjh Foundation (Pakistan) - www.loksanjh.org
- National Farmers Union (Kanada) - www.nfu.ca
- Oakland Institute - www.oaklandinstitute.org
- Polaris Institute - www.polarisinstitute.org
- Pakistan Dehqan Assembly
- Practical Action - www.practicalaction.org
- Quechua Ayamara Association for Sustainable Livelihoods (Peru) - www.andes.org.pe
- Research Foundation for Science, Technology and Ecology (Indien) - www.navdanya.org/
- Soil Association - www.soilassociation.org
- Sunshine Project - www.sunshine-project.org
- Third World Network - www.twinside.org.sg