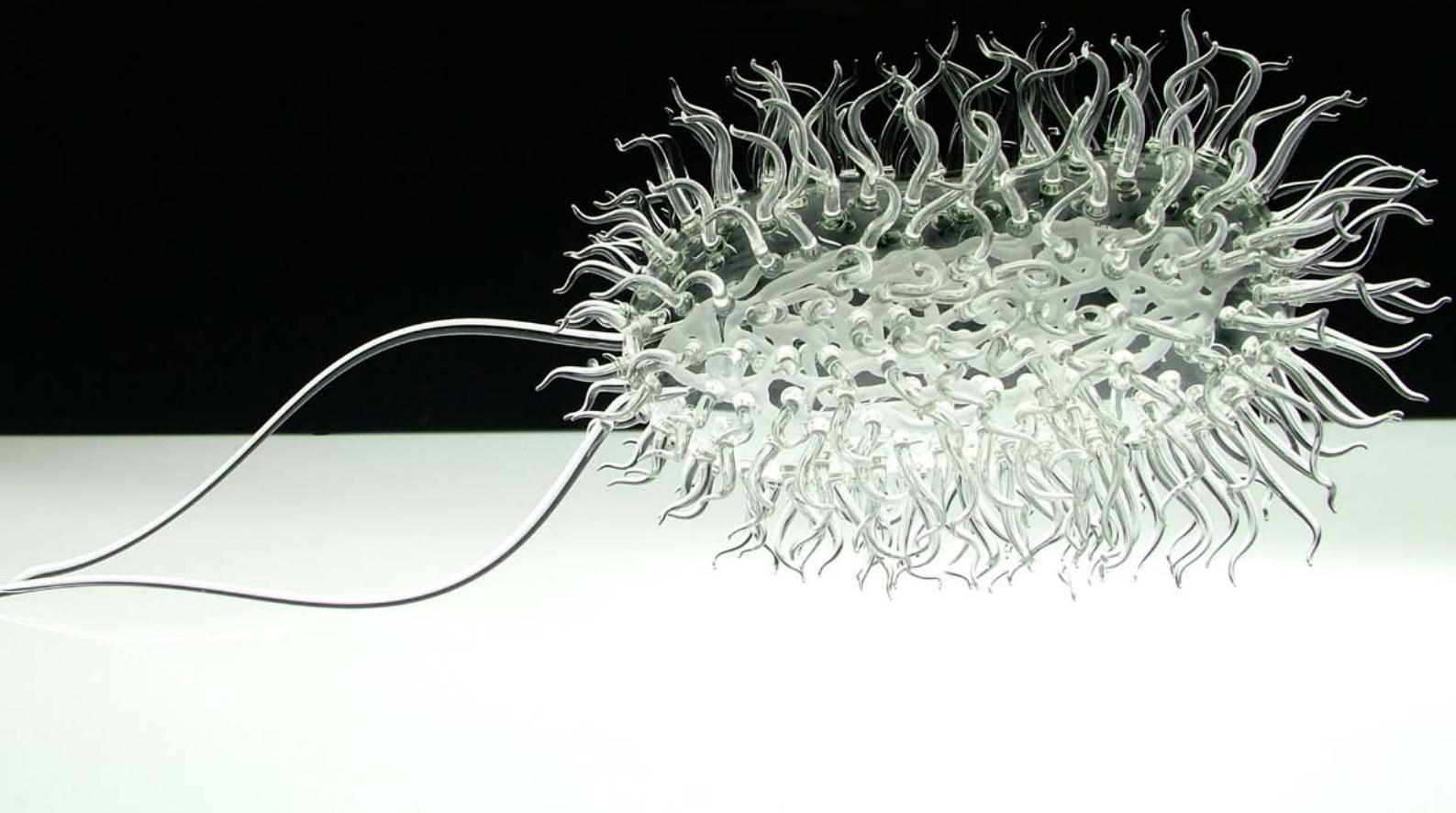
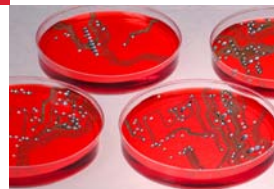




Von der Gentechnologie zur Synthetischen Biologie – neue Chancen, neue Risiken?



Streiflichter über eine gemeinsame Tagung der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz
und der Schweizerischen Akademie der Technischen Wissenschaften vom 2. November 2010 in Bern

sc | nat ⁺

Science and Policy
Platform of the Swiss Academy of Sciences
Forum for Genetic Research

SATW

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften
Académie suisse des sciences techniques
Accademia svizzera delle scienze tecniche
Swiss Academy of Engineering Sciences



Kontext und Anspruch des Berichts

Im Frühjahr 2010 ging die Nachricht um die Welt, dass erstmals das Erbgut eines Bakteriums vollständig synthetisiert worden sei; einzelne Fachleute setzten diesen Schritt mit der künstlichen Schaffung von «Leben» gleich (Gibson et al., 2010). Diese Meldung warf ein Schlaglicht auf das Forschungsgebiet der Synthetischen Biologie. Doch was ist Synthetische Biologie überhaupt? Welche Aspekte sind neu und legen eine Abgrenzung zur herkömmlichen Gentechnologie – dem gezielten Eingriff in das Erbgut eines Lebewesens – nahe? Wie kann erreicht werden, dass erwünschte Chancen des neuen Forschungsfeldes genutzt und all-fällige Risiken minimiert werden können?

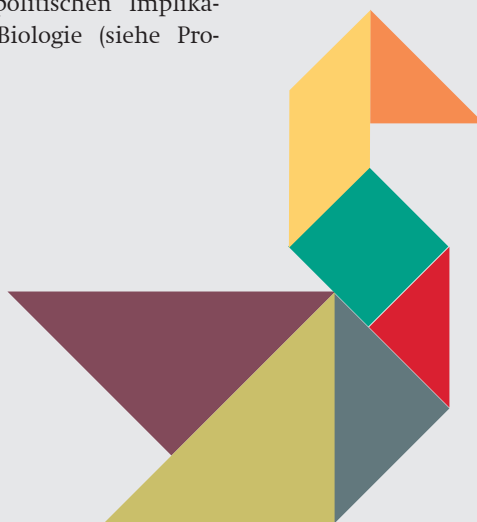
Vor diesem Hintergrund haben die Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) und die Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW) im Herbst 2010 Interessierte und Institutionen aus Forschung, Bildung, Wirtschaft, Verwaltung und NGOs zu einer «Séance de Réflexion» eingeladen. Ihr Ziel war es, Fragen zu identifizieren, die sich angesichts der Synthetischen Biologie stellen und anhand des aktuellen Wissens mit fokussierten Diskussionen mögliche Antworten auf die Fragen zu finden.

Fachleute aus der Schweiz und dem Ausland legten dabei mit Input-Referaten die Basis für vertiefende Reflexionen zu technisch-wissenschaftlichen, ökonomischen, ethischen, aber auch forschungs- und gesellschaftspolitischen Implikationen der Synthetischen Biologie (siehe Programm im Anhang).

Der vorliegende Bericht bündelt die Reflexionen aus der Tagung. Dem Bericht ist eine Zusammenfassung vorangestellt, die einen kurzen Einblick in die Synthetische Biologie und die Synthese der Tagung gibt. Der Teil «Grundlagen» vermittelt in geraffter Form die Inhalte aus den Input-Referaten. Die wichtigsten Inhalte, die in den Workshops und im Plenum behandelt wurden, fasst der daran anschliessende Teil «Diskussionsschwerpunkte» zusammen.

An der Séance de Réflexion wurde nicht zum ersten Mal über die Synthetische Biologie nachgedacht; vielmehr existiert bereits ein umfangreicher Bestand an Literatur zum neuen Forschungsfeld. Im Sinn einer Unterstützung für weiterführende Recherchen führt der Anhang eine kurz kommentierende Liste mit wichtigen Publikationen im Bereich der Synthetischen Biologie auf.

Die Séance de Réflexion wurde vom Forum Genforschung der SCNAT und von der Kommission für angewandte Biowissenschaften der SATW organisiert; finanzielle Unterstützung gewährte das Bundesamt für Umwelt BAFU.





Inhaltsverzeichnis

Kontext und Anspruch des Berichts	2
Inhaltsverzeichnis	3
Zusammenfassung	4
1. Grundlagen	6
1.1 Wissenschaftlich-technischer Ansatz der Synthetischen Biologie	6
1.2 Wirtschaftliches Potential	7
1.3 Wissenschaftssoziologische Betrachtungen	8
1.4 Risikoabklärungen und staatliche Regulierung	10
1.5 Ethische Aspekte	11
1.6 Referenzen zu den Grundlagen	12
2. Diskussionsschwerpunkte	13
2.1 Schwerpunktthema Forschung und Technik	13
a) Welche Hürden stellen sich der Synthetischen Biologie?	13
b) Wie sind die Ansätze der Synthetischen Biologie zu bewerten?	13
c) Wie gross ist das gesellschaftliche Transformationspotential der Synthetischen Biologie?	14
2.2 Schwerpunktthema Wirtschaft	14
a) Welche Lehren können aus der Informationstechnik gezogen werden, um das Transformationspotential der Synthetischen Biologie einzuschätzen?	14
b) Wie sieht die Bilanzierung von Kosten und Nutzen der Synthetischen Biologie aus?	15
c) Welche potentiellen Märkte sind absehbar?	15
2.3 Schwerpunktthema Wissenschaftssoziologie	17
a) Als wie neuartig wird Synthetische Biologie wahrgenommen?	17
b) Welche Bedeutung wird der Interdisziplinarität in der Synthetischen Biologie zugemessen?	17
c) Wie ist die Bedeutung der Sprache in der Forschung allgemein und in der Synthetischen Biologie einzuschätzen?	18
d) Welche Rolle spielen die Sozialwissenschaften in der Synthetischen Biologie?	18
2.4 Schwerpunktthema Ethik	19
a) Schafft Synthetische Biologie neue «Lebensformen» – und welches ist ihr moralischer Status?	19
b) Risikofaktor Mensch?	20
c) Setzen sich Forschende der Synthetischen Biologie der Versuchung aus, «Gott zu spielen»?	20
d) Ist Synthetische Biologie ein Marketing-Instrument – und wie steht es um ihre Akzeptanz?	20
2.5 Staatliche Interventionen, Regulation und Risikoabklärungen	21
a) Welche Massnahmen soll der Staat ergreifen, um die Synthetische Biologie zu fördern oder zu lenken?	21
b) Gilt es, Vorkehrungen zum Schutz des geistigen Eigentums in der Synthetischen Biologie zu treffen?	21
c) Wie steht es um die Notwendigkeit nach Risikoforschung in der Synthetischen Biologie?	21
2.6 Schlussfolgerungen der Séance de Réflexion «Von der Gentechnologie zur Synthetischen Biologie»	22
Anhang	24
Programm	24
Empfohlene Literatur	25

Zusammenfassung

Dank der Informationstechnik arbeitet die Biologie seit einiger Zeit vermehrt mit Modellierungen. An Stelle von Beobachtungen tritt der eigene Entwurf und es werden vermehrt Analogien zwischen biologischen und technischen Systemen gemacht. Die Synthetische Biologie gliedert sich an der Schnittstelle der Biologie und der Ingenieurwissenschaften ein und verwendet diese Arbeitsweise.

Die methodischen Grundlagen stammen aus der Molekularbiologie und werden mit Techniken der organischen Chemie, der Ingenieurwissenschaften, der Nanotechnologie und der Informatik kombiniert. Das Ziel der Synthetischen Biologie ist es, in interdisziplinärer Zusammenarbeit von Fachpersonen der Biologie, Chemie, Ingenieurwissenschaft und Informatik biologische Systeme zu erzeugen, die in der Natur nicht vorkommen. Es werden künstliche, biochemische Systeme in Mikroorganismen integriert, die dadurch definierte Produkte erzeugen. So können biologische Systeme derart verändert werden, dass in ihnen Syntheseprozesse ablaufen, die bestimmte Eigenschaften ausweisen. Charakteristisch ist, dass Organismen auf ihre notwendigsten Systemkomponenten reduziert werden und als Rahmen für den Einbau von Teilen dienen, die biologische Schaltkreise erzeugen. Dank einer Neukombination von Genen aus drei Wirten in der Bäckerhefe wird zum Beispiel Artemisinin, eine Vorstufe eines Malaria-Medikamentes, erzeugt.

Das wirtschaftliche Potential der Synthetischen Biologie wird in den Bereichen der pharmazeutischen und chemischen Industrie, aber auch in der Agrochemie als beträchtlich eingeschätzt, kann aber zurzeit noch nicht beziffert werden. Für den Energiesektor sind Produktionsverfahren mittels Synthetischer Biologie, für Biotreibstoffe eine interessante Alternative zu den herkömmlichen Verfahren, die es potentiell erlauben, Biotreibstoffe ohne die Konkurrenzierung der Produktion von Nahrungsmitteln herzustellen. Auch in der Bioremediation – dem Abbau von Verschmutzungen oder Abfall durch Mikroorganismen – kann die Synthetische Biologie für die gezielte Entwick-

lung von Mikroben bedeutend sein. Sie schafft auch gute Voraussetzungen, um Lebensmittel aufzuwerten oder für spezielle Diäten zu verändern.

Aus wissenschaftssoziologischer Sicht ist die Synthetische Biologie interessant, weil technologische, wissenschaftliche und ökonomische Praktiken verbunden werden und interdisziplinäres Arbeiten voraussetzen. Die Synthetische Biologie als Disziplin steht noch am Anfang eines Entwicklungsprozesses und ist daher geeignet um zu untersuchen, wie wissenschaftliches Wissen und eine neue Technologie entstehen und wie diese von der Gesellschaft aufgenommen werden. Ethische Fragen, die sich zur Synthetischen Biologie stellen, umfassen einerseits das Ziel, «neues Leben» herzustellen und andererseits Fragen zur Anwendung und den damit verbundenen Risiken für Individuen, Gesellschaft und Umwelt. Ebenfalls stellen sich Fragen der Verteilung und des gerechten Zugangs zu Erzeugnissen der Synthetischen Biologie. Der moralische Status von Produkten der Synthetischen Biologie muss eigens diskutiert werden. Eine ethische Diskussion der Synthetischen Biologie wird sich von derjenigen der herkömmlichen Gentechnologie unterscheiden, da die Betrachtung der Organismen als «Modelle» oder deren Vergleich zu Maschinen im Vordergrund steht und die Diskussion in einem anderen gesellschaftlichen und historischen Rahmen stattfindet.

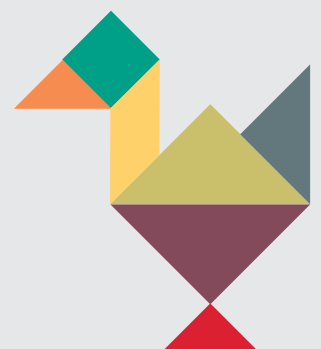
Aktuell gelten für die Synthetische Biologie dieselben staatlichen Regulierungen wie für die Gentechnologie. Es gilt zu prüfen, ob Risikountersearchungen notwendig und Vorkehrungen zum Schutz des geistigen Eigentums in der Synthetischen Biologie zu treffen sind. Ebenfalls ist zu klären, welche Massnahmen der Staat ergreifen soll, um die Synthetische Biologie zu fördern und zu lenken. Bei der Beurteilung der Gefahren ist zu beachten, dass bei der Synthetischen Biologie – anders als bei der Gentechnologie – durch das Zusammenfügen von Einzelteilen zu einem Organismus kein funktional äquivalenter Organismus existiert, der als Referenz dienen kann, was die Risikoabschätzung erschwert. Da die Synthetische



Biologie aber oft auf die Konstruktion von Minimalzellen zielt, die auf spezifische Bedingungen abgestimmt sind und in der natürlichen Umgebung nicht überlebensfähig sind, wird das Risiko verringert. Zusätzlich erlangen die Forscher durch den Bau von artifizieller Desoxyribonukleinsäure (DNA) Sicherheit, da sich die synthetischen Organismen nicht mit natürlichen Organismen kreuzen können.

Die Diskussionsrunden der Tagung zogen folgende Schlüsse:

- Die Synthetische Biologie steht ganz am Anfang ihrer Entwicklung und ist noch im Begriff sich zu definieren. Sie wird als Weiterentwicklung der Gentechnologie gesehen und nicht als etwas grundsätzlich Neues.
- Gelingt es, die Synthetische Biologie zu einer kostengünstigeren, effizienteren und ziel sichereren Arbeitsweise zu führen, ist ihr wirtschaftliches Potential beträchtlich.
- Als Neuheit gilt die Interdisziplinarität, die verschiedene Fachgemeinschaften vereint und diese zu einer gemeinsamen Sprache finden lässt.
- Die Vorgaben, die mit Blick auf gentechnische Anwendungen zur Wahrung der biologischen Sicherheit erarbeitet wurden, sind zum jetzigen Zeitpunkt für die Synthetische Biologie ausreichend.
- Als Kriterium für die Beurteilung der veränderten oder neu geschaffenen Organismen sollten eher deren Eigenschaften dienen und weniger die Gene.
- Die Ethik gebietet es, die Technologie nicht nur aus professionellem Blick zu beurteilen, sondern auch den Wertmassstäben der Öffentlichkeit Rechnung zu tragen.
- Aus ethischer Sicht stellen sich zurzeit keine Fragen, die nicht schon im Zusammenhang mit der Gentechnologie behandelt werden. Sollte es der Synthetischen Biologie indes gelingen, tatsächlich neuartige Lebensformen zu erzeugen, wäre deren moralischer Status zu klären.
- Im Gegensatz zu anderen Ländern in Europa wird in der Schweiz die sozialwissenschaftliche Begleitforschung kaum unterstützt. Erfahrungen aus Grossbritannien zeigen aber, dass diese zum verbesserten Dialog mit der Öffentlichkeit beiträgt, die Interdisziplinarität begünstigt, in den Naturwissenschaften selbst zu Wissensgewinn führt und einen gesellschafts- und wissenschaftspolitischen Mehrwert schafft.
- Für die Verständigung unter den beteiligten Wissenschaftszweigen und für den Dialog mit der Bevölkerung sind Sprache und Wortwahl von grosser Bedeutung. Gewagte Metaphern oder allzu optimistische Versprechungen sind zu vermeiden.





1. Grundlagen

1.1 Wissenschaftlich-technischer Ansatz der Synthetischen Biologie

Inputreferat Sven Panke, Department of Biosystems Science and Engineering (D-BSSE), ETH Zürich

Wissenschaftlicher Fortschritt ist ein progressiver Prozess; in diesem Sinn knüpft auch die Synthetische Biologie an die technischen Vorentwicklungen an. Verschiedene methodische Durchbrüche markieren ihre Fortschritte — und sind zugleich Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung. Voraussetzungen für den neuen Ansatz der Synthetischen Biologie waren zum ersten die Systembiologie, die biologische Organismen in ihrer Gesamtheit analysiert, um ein integriertes Bild aller regulatorischen Prozesse zu bekommen, zum zweiten die DNA-Synthese, welche die benötigte Technologie bereitstellt, und schliesslich die Interdisziplinarität als Grundlage für die erforderliche Forschungskultur.

Methodisch lässt sich die Synthetische Biologie in erster Linie als Bestreben charakterisieren, Konzepte und Vorgehensweisen der Ingenieurwissenschaft auf die Biologie zu übertragen. Sie nutzt die Methoden und Verfahren aus den Ingenieurwissenschaften, um das «trial-and-error»-Prinzip, das eine Grundlage für die Evolution der Lebewesen ist, um eine planmässige Entwicklung zu ergänzen. Somit wird versucht, eine Verbindung zwischen biologischer Evolution und technischer Entwicklung herzustellen.

Die Anlehnung an die Methoden der Ingenieurwissenschaft bricht mit dem herkömmlichen Eigenbild der Biologie: Im althergebrachten Verständnis arbeiten Biologinnen und Biologen mit natürlichen Biosystemen oder Zellen, die sie möglichst gezielt verändern. Da biologische Abläufe komplex sind, ist die Umsetzung der guten Ideen der Forschenden ein langsamer Prozess, in dem Fehlschläge oft zahlreicher sind als Erfolge. Die Synthetischen Biologie ist eine neue Technik, die eingesetzt wird, um Fehlschläge in der Forschung zu verringern und Ideen und Ziele auf einem neuen Weg zu verwirklichen.

Von Biologen angewendete Verfahren scheitern oft an den unzähligen Verknüpfungen, die für biologische Systeme (in diesem Fall: Zellen) charakteristisch sind: Ein punktueller Eingriff wirkt

auf das gesamte System zurück, und zwar oft auf unvorhersehbare Weise. In den Techniken der Ingenieurwissenschaft hingegen werden Interaktionen künstlich begrenzt: Es existieren zahlreiche Verfahren, um Einzelteile zu isolieren und somit auch die Interaktionen zu unterbinden. Die Synthetische Biologie versucht, die Zelle an diese technischen Verfahren anzupassen. Damit könnte ein wesentlicher Vorteil der Technik auch für die Biologie fruchtbar gemacht werden: die Orthogonalität, ein aus der Mathematik entliehener Begriff, der in der Informatik bildlich verwendet wird. Damit wird ein Entwurfsprinzip bezeichnet, wonach einzelne unabhängige Konzepte frei mit einander kombiniert werden können, ohne dass sich aus der Kombination neue Eigenschaften ergeben. Angewendet auf die Biologie bedeutet dieses Prinzip, dass neu eingebaute Teile nicht auf die bereits eingebauten zurückwirken und dass allenfalls punktuell entstehende «Nebenwirkungen» nicht weiter geleitet werden.

Vor diesem Hintergrund lässt sich Synthetische Biologie verstehen als die Disziplin für das rationale Entwerfen, Modellieren, Konstruieren, Korrigieren und Testen von künstlichen lebenden Systemen vor dem Hintergrund der nur unvollständig verstandenen Komplexität der zugrunde liegenden Biologie.

Eine wichtige technische Voraussetzung ist es, dass kontextfreie Bauteile oder Baugruppen zur Verfügung stehen. Zurzeit gibt es noch keine Übersicht über alle vorhandenen, äusserst zahlreichen Bauteile; allerdings sind Forschende im Begriff, eine solche zu erarbeiten. Eine weitere Schwierigkeit liegt im Fehlen standardisierter Verfahren, um Bauteile zusammen zu fügen. Eine Standardisierung würde auch die Automatisierung gestatten. Die Laborumgebung bedürfte ebenfalls einer Veränderung: Arbeitsschritte müssten standardisiert und parallelisiert werden. Auch bräuchte es ein computer aided Design (CAD) für Biologen, um Simulationen am Bildschirm zu ermöglichen. Schliesslich wären auch design-kompatible Informationssysteme erforderlich.



In der Fachwelt werden verschiedene Projekte diskutiert, die bereits Erfolge verzeichnen konnten. Drei Beispiele zur Illustration:

- Martin Fussenegger von der ETH Zürich hat einen Oszillator in einer höheren Zelle konstruiert in Form eines blinkenden fluoreszierenden Proteins (Fussenegger et al., 2009).
- Der Biologe Jason Chin von der Universität Cambridge hat mit seiner Gruppe ein System zur Produktion von Proteinen in *E. coli* gebaut, das von den natürlichen Proteinsynthesystemen von *E. coli* isoliert ist (An and Chin, 2009).
- Dank einer Neukombination von Genen aus drei Wirten wurde in der Bäckerhefe Artemisinin erzeugt, eine Vorstufe eines Malaria-Medikamentes (Ro et al., 2006).

Den Fachleuten der Synthetischen Biologie ist bewusst, dass ihr Arbeitsgebiet Kontroversen hervorruft. Deshalb versuchen sie, sich früh mit ethischen Fragen auseinander zu setzen und es gibt Initiativen zur Selbstregulierung. Synthetische Biologie ist zurzeit klar als Forschungsprojekt zu deklarieren und noch nicht als ausgereifte Disziplin.



1.2 Wirtschaftliches Potential

Jutta Heim, Chief Technology Officer Evolva SA Allschwil

Die Synthetische Biologie zielt auf verschiedene Ergebnisse und Produkte ab. Zu nennen sind beispielsweise die Konstruktion minimaler lebender Zellen oder gänzlich künstlicher Zellen, die Erzeugung synthetischer Biomoleküle oder der Entwurf auswechselbarer Teile, die zu neuen Stoffwechselwegen kombiniert werden können.

Den positiven Erwartungen nach einer «biologischen» Revolution in der Industrie, die zu umweltverträglichen Verfahren und Produkten oder auch zu gänzlich neuen Erzeugnissen führen könnte, stehen auch Befürchtungen gegenüber: Mitunter wird der Ruf nach einem «Asilomar-Moratorium» laut, das – analog zur namensgebenden Konferenz von 1975 im Bereich der Gentechnologie – genaue Regeln für die Synthetische Biologie definieren sollte.

Die Synthetische Biologie verfügt über das Potential, viele Industriebereiche zu beeinflussen:

- Die pharmazeutische Industrie erhofft sich dank künstlicher Zellen zum einen ein besseres Verständnis von Krankheitsprozessen und zum anderen neue Produktionsverfahren.
- Die Agrochemie rechnet sich eine bessere Abbaubarkeit ihrer Erzeugnisse und effizientere Produktionsweisen aus.

- Die chemische Industrie arbeitet auf «natürlichere» Herstellungsprozesse und naturverträgliche Endprodukte hin.
- Der Energiesektor wünscht sich neue Biotreibstoffe, deren Herstellung die Produktion von Nahrungsmitteln nicht konkurrenziert.

Diese Erwartungen gründen auf den massgeschneiderten Stoffwechselwegen, auf welche die Synthetische Biologie abzielt. Chemikalien sind oft das Endprodukt von Stoffwechselwegen, und so sollen neue, synthetische Stoffwechselwege entweder effizienter etwas Bekanntes herstellen oder etwas Neues produzieren. Der neue Stoffwechsel wird dann in «molekularbiologische Arbeitstiere» eingepflanzt – in der Regel *E. coli* oder die Bäckerhefe.

Die Firma Evolva konstruiert mit Genen aus unterschiedlichen Organismen künstliche Hefechromosomen und fügt diese in Hefezellen ein. So wird zum Beispiel in die Bäckerhefe ein künstliches Chromosom eingefügt, das pflanzliche Gene enthält und somit ermöglicht, aus Naringenin weitere Flavonoid-Moleküle künstlich herzustellen, etwa Kaempferol, Eryodictol, Quercetin und andere. Flavonoide sind u.a. wegen ihrer entzündungshemmenden und/oder bakterientötenden Eigenschaften interessant für die pharmazeutische Industrie.

Durch das Einfügen von mehreren Genen aus verschiedenen Organismen können parallel verschiedene Produktionswege analysiert werden, um herauszufinden, welches der effizienteste ist. Ausgehend von Genen eines Bakteriums, eines Pilzes und zweier Pflanzen wurde bspw. beta-Carotin erzeugt, ein Stoff, der zu den Isoprenoiden/Terpenen gehört. Diese sind Ausgangsstoff und Bestandteil für die unterschiedlichsten Produkte vom Kautschuk über Medikamente bis zum Insektizid. Die konventionelle Isolation von Terpenen ist schwierig und kostspielig.

Ein weiteres Beispiel ist Bernsteinsäure, ein wichtiger Baustein für Produkte wie Kühl- und Lösungsmittel und Polyester. Wird Bernsteinsäure biosynthetisch hergestellt, kann auf fossile Ressourcen verzichtet werden, was die Abhängigkeit von Erdöl verringert.

Am Beispiel der Isoprenoide lässt sich das gewaltige Marktpotential für synthetische Biologie aufzeigen: Allein Insektizide auf Basis von Pyrethrinen und Pyrethroiden generieren ein Marktpotential von über 1 Milliarde US-Dollar jährlich – eine

Größenordnung, die auch von den Carotinoiden erreicht wird. Auch viele Vitamine und gewisse Polymere sind das Ergebnis von Stoffwechselwegen, die mit dem Ansatz der Synthetischen Biologie erzeugt werden können.

Marktpotential für Produkte auf biologischer Basis in den Vereinigten Staaten:

Chemischer Sektor	2010	2025
Chemische «Grundstoffe»	1–2 %	6–10 %
Spezialitätenchemie	20–25 %	45–50 %
Feinchemie	20–25 %	45–50 %
Polymere	5–10 %	10–20 %

(Quelle: Referat J. Heim, gestützt auf USDA, US Biobased Products Market Potential and Projections Through 2025)

Fachleute gehen davon aus, dass bis 2025 rund die Hälfte der Fein- und Spezialitätenchemie auf biologischer Basis produziert werden wird. Insbesondere der Preisanstieg für Rohöl dürfte den wirtschaftlichen Aufschwung der Synthetischen Biologie begünstigen.

1.3 Wissenschaftssoziologische Betrachtungen

Inputreferat Susan Molyneux-Hodgson, Department of Sociological Studies, Universität Sheffield UK

Als Wissenschaftssoziologin untersucht Frau Molyneux, wie wissenschaftliches Wissen entsteht. Aus dieser Perspektive ist die Synthetische Biologie deshalb interessant, weil es sich um eine neu entstehende Technowissenschaft handelt, die technologische, wissenschaftliche und ökonomische Praktiken verbindet. Als akademische Disziplin ist sie sich erst am Entwickeln, und in ihrem Kontext werden eine Reihe von Zielen und Versprechen geäußert.

Das neu entstehende Forschungsfeld kann aus zwei entgegengesetzten Perspektiven untersucht werden: (a) aus der top down-Blickrichtung der gesellschafts- und wissenschaftspolitischen Rahmenbedingungen und (b) aus dem bottom up-Blickwinkel der täglichen Praxis im Labor.

Für ihre Untersuchungen wendet die Wissenschaftssoziologie verschiedene Methoden an wie

teilnehmende Beobachtung in wissenschaftlichen Labors, Interviews und Textanalyse.

Zu a) «top down»

Der Blick in die USA zeigt, dass die Rhetorik der Verschmelzung verschiedener Disziplinen, bekannt auch unter der Bezeichnung «NBIC» (nanotechnology, biotechnology, information technology and cognitive science), der Synthetischen Biologie ihre Initialzündung gab. Mit NBIC verbunden ist die Vorstellung einer «Evolution der Gesellschaft durch Wissenschaft». Die Disziplinen sollen sich wieder vereinen: Gesucht wird der «Generalwissenschaftler» in der Form eines «Renaissance-Menschen». Nicht nur zwischen den Fachrichtungen werden die Grenzen durchlässig, sondern auch zwischen Technologie und Natur und zwischen beseelter und unbeseelter Materie.



Der Blick nach Europa verrät, dass hier die Diskussion leicht anders verläuft als in den USA. Hierzulande wird über die «Converging Technologies» diskutiert, und im Unterschied zur US-Rhetorik stehen dabei Ziele im Vordergrund wie die Bedürfnisse der Gesellschaft nach Umweltschutz, neuen Bildungsformen und Infrastrukturen. Den technischen Möglichkeiten einer wissenschaftlichen Evolution der Gesellschaft wird dagegen wenig Bedeutung zugewiesen. Grosse Unterschiede sind auch im Ethik-Verständnis auszumachen.

Zu b) «bottom up»

Es gibt nur wenige Theorien darüber, wie neue Wissenschaftszweige entstehen; in der Wissenschaftssoziologie werden Fachgemeinschaften aufgefasst als

- Gemeinschaften mit einer übergeordneten normativen Struktur («normative units» basierend auf der Theorie des Soziologen Robert K. Merton),
- Denkkollektive, die gleichen Ideen und Denkstilen folgen («collectives and styles» basierend auf der Theorie von Ludwik Fleck),
- Einheiten, die im Konsens gleichen Paradigmen verpflichtet sind («paradigmatic units» basierend auf der Theorie von Thomas S. Kuhn)
- transaktionale Einheiten («transactional units» nach Hagstrom, Latour und Woolgar)
- durch Versprechungen und Hoffnungen verbundene Gemeinschaften («communities of promise and hope» nach Brown und Martin).

Die meisten wissenschaftssoziologischen Studien befassen sich mit etablierten Disziplinen; im Hinblick auf entstehende Fächer sind neue Denkmodelle erforderlich.

Bei der Synthetischen Biologie sind die Fachleute zurzeit stark damit beschäftigt, ihr Gebiet zu verhandeln und zu erklären. Die Arbeitsweisen lassen sich in der Praxis kaum je so verfolgen, wie es sich die Promotoren der Synthetischen Biologie in der Theorie vorstellen. Meistens arbeiten die Leute zweigleisig: Sie treiben die eigene Forschung im etablierten Fachgebiet voran und betreiben daneben noch Synthetische Biologie. In der Praxis geht es also eher um kleine Verschiebungen und Differenzierungen und weniger um den grossen Wurf. Ausserdem stellen sich ganz praktische Probleme:

- Die Infrastruktur ist nicht auf Synthetische Biologie ausgerichtet.

- Dies führt dazu, dass Ausrüstung «umgewidmet» wird.
- Benötigte Fachleute müssen angeworben werden.
- Finanzielle Mittel für die Forschung fließen nicht ohne weiteres in ein neues Feld.

Allgemein übt die Informationstechnik einen gewaltigen Einfluss auf den Wandel der Gesellschaft aus. Auch in der Wissenschaft schlägt er durch. Der Computer-Ansatz bedeutet, dass mehr mit Modellierung gearbeitet wird. Die Biologie soll vorhersehbarer gemacht werden, und Vorhersehbarkeit ist ein Zwischenschritt zur Synthetischen Biologie. Auch die symbolischen Formen ändern sich, es werden Analogien zwischen biologischen und technischen Systemen postuliert. Mathematik gewinnt gegenüber der Statistik die Oberhand, an Stelle von Beobachtung und Abbildung tritt der eigene Entwurf, das «designing». Natur wird zum «natural control engineer», und statt nur zu beobachten und zu beschreiben, wird gestaltet. Ganz allgemein wird der Einsatz computergestützter Methoden auch dadurch gefördert, dass dank der Informationstechnik viele Daten anfallen, die es zu verarbeiten gilt.

Schliesslich lassen sich Analogien feststellen zwischen der Synthetischen Biologie als solcher und der Wissenschaftsgemeinschaft, die sie betreibt: Die Forscher, die am Massachusetts Institute of Technology Synthetische Biologie betreiben, sind selber «Einzelteile» (parts), die zu etwas Grösserem zusammengesetzt werden sollen, zu einem «neuen Forschungstypus». Zurzeit werden in der Synthetischen Biologie sowohl Forschungsobjekt wie auch die Forschungsgemeinschaft gleichzeitig definiert. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die neu in der Synthetischen Biologie arbeiten bzw. in Studiengänge und Lehre zur Synthetischen Biologie involviert sind müssen herausfinden, über welche Kenntnisse es zu verfügen gilt, um ernst genommen zu werden, und sie müssen so in die entsprechende Kultur herein wachsen, dass sie sie unbewusst ausüben.

In mancher Hinsicht ist Synthetische Biologie eine neue Wissenschaft; sie erzählt neue Geschichten, verwendet neue Metaphern und schaut auf neue Art auf biologische Systeme.





1.4 Risikoabklärungen und staatliche Regulierung

Input Markus Schmidt, International Dialogue and Conflict Management (IDC), Wien

Synthetische Biologie folgt implizit der Vorstellung, dass man nicht richtig verstehen kann, was man nicht selber zu erzeugen vermag. Es fragt sich bloss, ob man imstande ist zu verstehen, was man erzeugen kann. Die Synthetische Biologie präsentiert sich demnach als Fachgebiet, für welches Risikoabklärungen vorgenommen werden müssen, um das sinnvolle/ nötige Ausmass von staatlicher Regulierung bestimmen zu können. Dabei stellt sich die komplexe Frage, ob Synthetische Biologie wirklich ein neues Fachgebiet ist und falls ja, welche Teilbereiche ihm zuzuordnen sind. Letztlich entscheidet sich daran, ob neue Methoden der Risikobewertung notwendig sind. Die Grundlagen für die heutigen Bestimmungen zur Biosicherheit erarbeiteten im Jahr 1975 Wissenschaftler aus verschiedenen Fachbereichen im Rahmen der Asilomar Conference on Recombinant DNA.

Es gilt zu berücksichtigen, dass es unterschiedliche Auffassungen von «Sicherheit» gibt. Auf Englisch gibt es die beiden Ausdrücke «safety» und «security» für «Sicherheit». Safety bezieht sich auf unbeabsichtigte Schäden (also auf die unbeabsichtigten Nebenfolgen einer Tätigkeit), security zielt auf beabsichtigten Schaden ab, zum Beispiel durch Terrorismus.

Verschiedene Teilbereiche lassen sich der Synthetischen Biologie zuordnen, die spezifische Merkmale aufweisen und die im Hinblick auf Risikofragen in unterschiedlicher Hinsicht relevant sind: Die Synthese der DNA, die Konstruktion von biologischen Schaltkreisen, die Herstellung von Minimalorganismen und von Protozellen sowie die Verwendung von modifizierten Biomolekülen, die in der Natur nicht vorkommen (Xenobiologie).

Im Hinblick auf die Sicherheit der Synthetischen Biologie stellen sich drei neue Fragen:

1) Kann das Risiko neuer Produkte aus der Synthetischen Biologie abgeschätzt werden?

Die Risikoabschätzung bei der Gentechnologie ist insofern einfacher, als dass der transgene Organismus in der Regel als funktional äquivalent gilt zum Organismus, an welchem die gentechnische Modifikation vorgenommen wurde und mithin bei der Risikoabschätzung als Referenz dienen kann. Indem Synthetische Biologie alles neu zu-

sammenfügt, fehlt ihr die funktionale Äquivalenz als Vergleichsbasis, was die Risikoabschätzung erschwert.

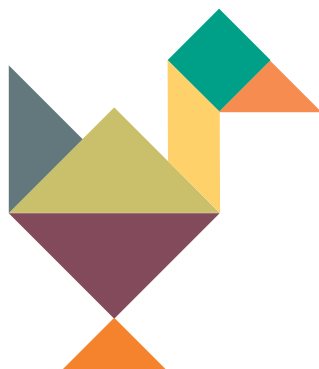
2) Wie kann synthetische Biologie zu höherer Biosicherheit beitragen?

Die Synthetische Biologie zielt oft auf die Konstruktion von Minimalzellen, die auf spezifische Bedingungen abgestimmt und daher in einer natürlichen Umgebung nicht überlebensfähig sind. Das Konzept der Orthogonalität könnte ebenfalls zur Sicherheit beitragen, indem z.B. eine Base der DNA-Basenpaare verändert wird und etwa Glycol an die Stelle des DNA-«Rückgrates» aus Deoxyribose gesetzt wird. Statt einer DNA läge eine GNA vor, die nicht mehr mit natürlichen Naturbausteinen operieren könnte. Auch die Chiralität liesse sich zur Konstruktion sichererer Organismen verwenden, d.h. es werden spiegelverkehrte Lebensformen erzeugt, die nicht imstande sind, mit den natürlichen zu interagieren.

3) Was machen Amateur-Biologen mit der Synthetischen Biologie?

Vor allem in den USA befassen sich zunehmend Amateure mit gentechnischen Methoden, da die dafür erforderlichen Ausrüstungen und Materialien immer billiger werden. Solche Do-it-yourself-Biologen sind schwer zu kontrollieren, zumal sie gerade in Zeiten der Terrorismus-Diskussion nicht gern an die Öffentlichkeit treten. Dass Pathogene konstruiert werden könnten, wird als echtes Risiko eingeschätzt. Die Firmen, die im Bereich der Biotechnologie tätig sind, müssen daher die Bestellungen kontrollieren und einen code of conduct berücksichtigen. Das Risiko, dass neue Biowaffen konstruiert werden, ist schwer vorhersehbar, da es sich um ein komplexes Gebiet handelt. Allerdings ist die Arbeit mit solchen Komponenten selber auch gefährlich und erfordert umfassende Sicherheitsvorkehrungen für die Beteiligten; Private können sich das kaum leisten.

Die Risikowahrnehmung in der Wissenschaft deckt sich oft nicht mit jener der Öffentlichkeit. Die Wissenschaft ist bestrebt, mit der Gesellschaft in einem konstruktiven Dialog zu stehen und möchte eine stark polarisierte, der Sache wenig dienliche Diskussion wie jene über die Gentechnologie vermeiden. Eine Studie, die das öster-





reichische Institut für Technikfolgenabschätzung zur öffentlichen Wahrnehmung der Synthetischen Biologie durchgeführt hat, zeigte allerdings, dass die zunächst uninformatierten Laien dem neuen Forschungsfeld recht gleichgültig und neutral gegenüberstanden. Nachdem sie informiert wurden, liess sich eine klare Polarisierung feststellen: Die NGO-Vertreter waren massiv dagegen, Studierende und andere Gruppen eher dafür. Dabei waren es

weniger die Risiken, die aus Sicht der Skeptiker ins Gewicht fielen; vielmehr vermochten diese den Versprechungen keinen Glauben zu schenken (Studie COSY – Kommunikation über Synthetische Biologie, www.synbio.at/).

Generell ist zu sagen, dass zurzeit das neue Feld noch wenig diskutiert wird, weil es in der Öffentlichkeit kaum bekannt ist.

1.5 Ethische Aspekte

Input Anna Deplazes Zemp, Ethik-Zentrum der Universität Zürich

Im Kontext der grünen Gentechnologie wurden in Europa intensive Diskussionen zur Ethik der Biotechnologie geführt. Es stellt sich nun die Frage, inwiefern es sinnvoll und wichtig ist, zur Synthetischen Biologie erneut ähnliche Fragen zu diskutieren.

Ethische Fragen zur Synthetischen Biologie sind oft eng gekoppelt an empirische Fragen, z. B. zur Biosicherheit. Aber in der Ethik stehen nicht empirische Fragen zur Sicherheit im Fokus, sondern es geht darum, moralische Handlungsanweisungen zu geben. Konkret drängen sich im Zusammenhang mit der Biosicherheit beispielsweise folgende ethische Fragen auf:

- Welche Risiken sind moralisch vertretbar?
- Kann der erwartete Nutzen die Risiken rechtfertigen?
- Wann sind Risiken ungerecht?
- Wessen Interessen müssen berücksichtigt werden?

Die ethischen Fragen, die sich zur Synthetischen Biologie stellen, lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- Fragen, die im Zusammenhang mit ihrer Anwendung und den damit verbundenen Risiken für Individuen, Gesellschaft und Umwelt aufkommen.
- Fragen der Verteilung und Gerechtigkeit. Dabei geht es um den gerechten Zugang zu Produkten der Synthetischen Biologie, also um

Fragen zu Patenten, zum Verhältnis von bzw. dem Unterschied zwischen Ländern des Nordens und des Südens.

- Fragen, die das Weltverständnis und die «Philosophie» der Synthetischen Biologie betreffen. Hier gilt es das Ziel zu hinterfragen, neues Leben herzustellen. Was ist überhaupt Leben, und welchen moralischen Status haben Produkte der Synthetischen Biologie?

Die Beurteilung dieser ethischen Fragen wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, die teilweise in der Synthetischen Biologie selbst zu finden sind, teilweise aber auch in deren Rolle in unserer Zeit und Gesellschaft:

- die technischen Möglichkeiten
- die geplanten Anwendungen
- die Interdisziplinarität
- die Einstellungen, Bilder und Erfahrungen in der Gesellschaft; so können beispielsweise die Erfahrungen mit der digitalen Revolution auch die Sichtweise auf andere Techniken prägen.
- schliesslich: die Erfahrung mit der Gentechnik-Debatte

Im Bezug auf diese Punkte wird deutlich, dass eine ethische Diskussion der Synthetischen Biologie sich von denjenigen der herkömmlichen Gentechnologie unterscheiden wird. Es gibt Unterschiede im Hinblick auf die technischen Möglichkeiten und geplanten Anwendungen. Ausserdem bringt die starke Interdisziplinarität der Synthetischen Biologie mit sich, dass hier nicht



mehr in erster Linie Fachleute der Biologie am Werk sind. Dies beeinflusst die Einstellung und Herangehensweise in dieser «Disziplin». Der Vergleich zu Maschinen oder die Betrachtung der Organismen als «Modelle» steht im Vordergrund. Auch findet diese Diskussion in einem anderen gesellschaftlichen und historischen Rahmen statt: Gewisse Entwicklungen der letzten 10 bis 20 Jahre, wie z. B. die digitale Revolution, hat die Einstellung der Bevölkerung zur Technologie beeinflusst. Schliesslich werden auch die Erfahrungen aus der Gentechnik-Debatte die ethischen Diskussionen zur Synthetischen Biologie beeinflussen.

Aus der Gentechnik-Debatte lässt sich die Lehre ziehen, dass es in der Bevölkerung unterschiedliche und teilweise unerwartete Moralvorstellungen gibt. Ein respektvoller Umgang mit den Ängsten der Bevölkerung ist ein Gebot der Ethik. Es braucht daher eine «zweistufige Ethik» der Forschenden im Feld der Synthetischen Biologie: zum einen gegenüber der Technik und ihren Möglichkeiten, zum anderen gegenüber den Ängsten der Bevölkerung.

Es gilt, eine Polemik zu verhindern. Geeignete Mittel dazu sind Aufklärung, das Hinterfragen plakativer Argumente, der Einbezug der Medien

usw. Der Übergang von der herkömmlichen Gentechnologie zur Synthetischen Biologie erlaubt einen Neuanfang und ermöglicht einen Übergang zu einem sachlichen Dialog. Das hier durchgeführte Symposium leistet dazu einen Beitrag.

Zusammenfassend ist es aus den folgenden Gründen sinnvoll und wichtig, ethische Fragen der Synthetischen Biologie zu diskutieren, selbst wenn es thematische Überlappungen mit den Fragen zur Gentechnologie gibt

- In der Ethik geht es nicht nur darum, Fragen zu lösen, sondern auch darum, über die Synthetische Biologie nachzudenken und sie zu diskutieren.
- Die Synthetische Biologie wirft verschiedene ethische Fragen auf, betreffend Anwendung und Risiken, Verteilung und Gerechtigkeit sowie der «Philosophie» der Synthetischen Biologie.
- Alte Fragen erlangen neue Aktualität durch neue technische Möglichkeiten, neue Anwendungen, veränderte Einstellung der Forscher und Bevölkerung, neue Erfahrungen, Zeitumstände
- Fehler, die besonders in der Gentechnik-Debatte gemacht wurden, sollen vermieden werden.

1.6 Referenzen zu den Grundlagen

An, W. & Chin, J. W. (2009) Synthesis of orthogonal transcription-translation networks. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 106, 8477-8482

Gibson, D.G. et al. (2010) Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. *Science* 329, 52-56

Ro, D.-K. et al. (2006) Production of the antimalarial drug precursor artemisinic acid in engineered yeast. *Nature* 440, 940-943

Tigges, M., Marquez-Lago TT., Stelling J. and Fussenegger M. (2009) A tunable synthetic mammalian oscillator. *Nature* 457, 309-312





2. Diskussionsschwerpunkte

Die hier zusammengestellten Diskussionspunkte folgen in ihrer Gliederung den Themen, die in den Workshops und im Plenum behandelt wurden. Zusätzlich zu den in Absatz 2.1 bis 2.4 zusammengefassten Diskussionen der vier Workshops werden in Absatz 2.5 Diskussionen zu staatlichen Interventionen, Regulationen und Risikoabklärungen dargestellt, die in den verschiedenen Workshops und im Plenum entstanden sind. Jedes

Schwerpunktthema wird von einer kurzen Übersicht der behandelten Aspekte eingeführt. Die Aussagen und Meinungen der Teilnehmenden sind ohne Gewichtung wiedergegeben und sind nicht als konsolidierte Meinung der Akademie der Naturwissenschaften und der Schweizerischen Akademie der Technischen Wissenschaften zu verstehen.

2.1 Schwerpunktthema Forschung und Technik

Aus technischer Sicht interessieren die Durchsetzbarkeit und die Hürden, die sich der Synthetischen Biologie entgegen setzen (a). Die Frage, inwiefern sie sich von herkömmlicher Biologie unterscheidet, lässt sich mit Blick auf ihre wichtigsten Ansätze erläutern (b). Ob der Synthetischen Biologie das Potential innewohnt, die Gesellschaft tiefgreifend zu verändern, wird kontrovers beurteilt (c).

a) Welche Hürden stellen sich der Synthetischen Biologie?

In ihrem Vortrag hat Frau Heim gezeigt, wie die Evolva AG versucht, mittels Synthetischer Biologie metabolische Ketten zu erzeugen, die zur künstlichen Herstellung von seltenen natürlichen Rohstoffen herangezogen werden können. Dieses Unterfangen erweist sich als schwierig, weil die Interaktionen der Komponenten innerhalb eines biologischen Systems noch nicht gut verstanden werden.

Um diese Hürden zu überwinden, muss versucht werden, diese Systeme besser zu verstehen. Ein Ansatz der Synthetischen Biologie und ein Forschungsziel der Gruppe von Prof. Sven Panke ist es, biologische Systeme zu vereinfachen. Nicht, weil diese Systeme dann zwingend besser funktionieren sollen, sondern weil sie einfacher nachvollziehbar sind.

Ein anderer Weg, um Klarheit zu gewinnen, besteht darin, Verfahren zu standardisieren. In der wissenschaftlichen Gemeinschaft gibt es Anzeichen, dass die Zeit für die Standardisierung reif ist.

Die Wirtschaftlichkeit stellt eine weitere Hürde für die Synthetische Biologie dar. Die benötigten Techniken sind teuer und müssen rentieren, damit es zum technologischen Durchbruch kommt. Dies lässt sich am Beispiel der ethylen-basierten Chemie illustrieren: Der Markt für Ethylen ist riesig und sein Rohstoff, das Rohöl, ist beschränkt. Bis heute gibt es für die Petrochemie keine alternative Quelle, und solange der Preis des Erdöls auf dem heutigen tiefen Stand verharrt, wird es für Alternativen schwierig, wettbewerbsfähig zu sein. Synthetische Biologie muss also billiger werden und das Erdöl teurer, damit der Ethylen-Markt zur Opportunität für Synthetische Biologie wird. Die Standardisierung sollte dazu beitragen, Synthetische Biologie kostengünstiger und konkurrenzfähiger zu machen.

b) Wie sind die Ansätze der Synthetischen Biologie zu bewerten?

Im Bereich der Synthetischen Biologie lassen sich verschiedene wissenschaftliche Ansätze unterscheiden.

Einen oft verfolgten Ansatz stellt die Erzeugung *neuer biologischer Schaltkreise* dar mit möglichen Anwendungen in den verschiedensten technischen Gebieten. In den USA wurde neulich viel Energie und Geld investiert, um alternative Energiequellen zu erforschen. Ein hoch dotiertes Feld, in dem auch das Craig Venter-Institute aktiv wurde, ist die Steigerung der photosynthetischen Fähigkeiten von Algen mit den Methoden der Syn-

thetischen Biologie. Motiviert wird dieses Vorhaben durch die Idee, eine wettbewerbsfähige Rohstoffquelle für die kohlenstoffbasierte Chemie bereitzustellen. Der Ansatz ist zukunftsorientiert und gross dimensioniert.

Die Forschung an *minimalen Modellen* (Genomen, Zellen, etc.), die als Gerüst für biologische Schaltkreise dienen sollen, ist ein weiteres Gebiet der Synthetischen Biologie. Der Grundgedanke darf allerdings nicht als Sicherheitskonzept missverstanden werden. Zum Beispiel besteht ein Ziel darin, einen *E. coli*-Stamm durch Genomreduktion herzustellen, um eine erhöhte Stabilität des Genoms zu erreichen oder den Organismus zu vereinfachen. Im übergeordneten Gebiet der Protozellen gibt es interessante Fortschritte. Das Konzept zielt darauf ab, Zellen zu entwerfen, die nicht alle Eigenschaften einer herkömmlichen Zelle aufweisen. Ein Ziel wäre z.B., dass sich solche Zellen in einem Produktionsprozess nicht mehr teilen und somit keine Rohstoffe mehr für Wachstum verbrauchen, sondern alles in die Produktion lenken.

Die Synthetische Biologie forscht auch an der Möglichkeit, parallele Welten zu erzeugen. Hier ist der Denkansatz durchaus auch als Sicherheitskonzept zu verstehen. So sollte etwa zwischen einer Welt, die auf einem neuen Typ von orthogonalem Erbgut basiert, und der «natürlichen» Welt kein horizontaler Gentransfer stattfinden.

Gesamthaft betrachtet, unterscheidet sich die heutige Synthetische Biologie aus technischer Sicht kaum von der herkömmlichen molekularen Biologie. Die Erfolge bei der Herstellung von synthetischen biologischen Systemen mussten sich bis jetzt auf die Abbildung von natürlichen Systemen beschränken (z.B. Craig Venter, der ein Bakterium mit künstlich nachgebautem Erbgut erzeugt hat). Das Ziel, ein lebendes System künstlich herzustellen, wird wahrscheinlich noch 10 bis 20 Jahre auf sich warten lassen.

c) Wie gross ist das gesellschaftliche Transformationspotential der Synthetischen Biologie?

Verglichen mit Kommunikationstechnologien ist die Synthetische Biologie, die auf molekularen Techniken basiert, mit grossem Aufwand und hohen Kosten verbunden. Mithin ist es unwahrscheinlich, dass nach dem Vorbild der Informationstechnik auch im Bereich der Synthetischen Biologie erfolgreiche Start-ups in den Garagen von Hobby-Ingenieuren entstehen – obwohl es Do-it-yourself-Biologen gibt. In der Diskussionsrunde wurde die Wahrscheinlichkeit als gering eingeschätzt, dass Produkte der Synthetischen Biologie erzeugt werden, die einen vergleichbaren Einfluss auf die Gesellschaft haben könnten wie die Erfindung des PCs oder des mobilen Telefons.

2.2 Schwerpunktthema Wirtschaft

Der interdisziplinäre Zugang der Synthetischen Biologie macht sie auch für die Informationstechnik anschlussfähig. Für die Auseinandersetzung mit ihrer Entwicklung und den wirtschaftlichen Potentialen drängt sich daher die Analogie mit der Informations- und Kommunikationstechnik auf. Es stellt sich die Frage, welche Lehren aus dieser Technik für die Synthetische Biologie gezogen werden können (a). Aus ökonomischer Perspektive ist sodann die Bilanzierung von Kosten und Nutzen von zentraler Bedeutung (b). Um die wirtschaftliche Bedeutung der Synthetischen Biologie zu ermitteln, müssen potentielle Märkte ausgemacht und benannt werden (c).

a) Welche Lehren können aus der Informationstechnik gezogen werden, um das Transformationspotential der Synthetischen Biologie einzuschätzen?

Der Übergang von der rekombinanten Gentechnologie zur Synthetischen Biologie ist vergleichbar mit dem Sprung, den die Elektronik von der Analogtechnik zur digitalen Technologie bewältigt hat: Obschon die Röhrentechnik weit verbreitet war, wurde sie von der Transistortechnologie und der weiterführenden Informationstechnik schnell verdrängt. Während der analogen Technologie relativ enge Grenzen gesetzt sind, scheinen die Möglichkeiten der digitalen Technologie nahe-



zu unbeschränkt. Wie die Analogtechnik hat auch die rekombinante Gentechnologie Märkte erobert, die im Bereich von Molekülen wie Cytokine und Wachstumsfaktoren Blockbuster-Dimensionen erreicht haben. Enzyme für vielfältige Applikationen vom Waschmittelenzym bis hin zur enzymatischen Therapie und der Vielfalt von diagnostischen Enzymen (z. B. die Serumanalytik, Schwangerschaftstest etc.) sind weit herum bekannt. Im Bereich der multiplen Gensysteme hat die Biosynthese von Vitaminen, Feinchemikalien und auch von Antibiotika eine gewisse Bedeutung erlangt. Antikörpertherapien bedienen wirksam und erfolgreich Milliardenmärkte.

Indem die Synthetische Biologie standardisierte molekulare Bauteile modular einsetzt oder verfremdete natürliche Systeme verwendet, erreicht sie zum einen eine höhere Sicherheit. Zum anderen erhöht sich in dramatischem Ausmass die Geschwindigkeit, mit der Technologien entwickelt und zur Marktreife gebracht werden können. Auch werden Applikationen realisierbar, die bislang nicht möglich waren.

Im aktuellen Stadium wird Synthetische Biologie von der Technologie und nicht vom Markt voran getrieben. Das bedeutet, dass Projekte mit wissenschaftlichem Interesse nach der Philosophie des technologisch Machbaren verfolgt werden, wobei der Frage nach einer möglichen Anwendung untergeordnete Bedeutung beigemessen wird.

Die Synthetische Biologie wird sich möglicherweise in die Reihe der «destructive but creative Technologies» einreihen: Solche Technologien ersetzen die Grundlage der bestehenden Ökonomie durch eine andere Basis («destructive»), die ein vielfältigeres Anwendungspotential aufweist («creative»; im Verlauf der Menschheitsentwicklung etwa Metalle, die an die Stelle von Steinen traten). Theoretisch ist das wirtschaftliche Potential der Synthetischen Biologie beträchtlich. Allerdings fehlt zurzeit noch der Beweis, dass sie sich in verwertbare Produkte umsetzen lässt.

b) Wie sieht die Bilanzierung von Kosten und Nutzen der Synthetischen Biologie aus?

Eine Cost-/Benefit-Analyse von Anwendungen der Synthetischen Biologie fällt momentan nicht vorteilhaft aus. Dies ist unter anderem dem Umstand geschuldet, dass Vermeidungskosten – z. B. für Umweltauswirkungen heutiger Technologien –

in dieser Rechnung nicht erscheinen. Dagegen sind die Investitionskosten der Synthetischen Biologie sehr hoch und somit risikoreich, um den potentiellen Nutzen, u. a. auch für die Gesellschaft als Ganzes, zu realisieren. Es drängt sich die grundsätzliche Frage auf, ob diese Investitionen durch die Wirtschaft oder den Staat geleistet werden sollen.

Zurzeit zeichnen sich bereits Investitionen der Erdölwirtschaft in Bereiche der Synthetischen Biologie ab. Erklärbar ist dies mit der Ähnlichkeit der möglichen Endprodukte, wobei der Rohstoff Pflanze dank der Synthetischen Biologie ohne Umweg über «geologische Zwischenlager» (wie Erdöl oder Kohle) verwertet werden kann. Im Fokus stehen dabei zum Beispiel Mikroalgen, die zur Produktion von Biotreibstoffen verwendet werden.

c) Welche potentiellen Märkte sind absehbar?

Der Erdölpreis ist ein wichtiger Faktor, der die ökonomische Attraktivität der Synthetischen Biologie beeinflusst. Die Aussicht, mit ihrer Hilfe künftig Produkte herzustellen, die heute noch auf petrochemischer Grundlage erzeugt werden, motiviert die Forschung.

Weil Synthetische Biologie noch kaum konkrete Produkte bereitstellt, müssen die Überlegungen zu ihren Märkten zwangsläufig von Potentialabschätzungen ausgehen, die aufgrund von Erfahrungen in ähnlichen Bereichen vorgenommen werden. Da aus Sicht des Marktes kein fundamentaler Unterschied zwischen Synthetischer Biologie und klassischer Gentechnologie besteht, kann diese als Ausgangspunkt für die Potentialabschätzung der Synthetischen Biologie dienen.

Merkmale der Synthetischen Biologie, die ihr gegenüber herkömmlichen Verfahren einen Konkurrenzvorteil verschaffen können, sind etwa ihre hohe Energieeffizienz, da die Reaktionen bei Normalbedingungen, unter normalem Druck und bei moderaten Temperaturen, verlaufen. Zudem sind organische Lösungsmittel durch Wasser ersetzbar. Maximale Spezifitäten können ohne Nebenwirkungen erreicht werden. Des Weiteren benötigt die Synthetische Biologie nur kleine Produktionsanlagen und ist umweltfreundlich, da sie anstrebt, CO₂-neutral zu sein. Durch Modularität und Standardisierung kann langfristig eine starke Reduktion von Kosten der Forschung und Entwicklung erreicht werden.





Ausgehend von diesen Vorteilen lassen sich verschiedene Marktsegmente identifizieren, die für die Synthetische Biologie ein ausreichend grosses Potential aufweisen:

Biopharmaka

Die Produkte-Pipelines der Pharmafirmen müssen immer neu gefüllt werden. In verschiedenen Bereichen ist eine Nachfrage vorhanden, die möglicherweise mit den Vorgehensweisen der Synthetischen Biologie befriedigt werden kann, allenfalls im Sinne einer Abkürzung des systembiologischen Ansatzes, wobei nicht klar ist, ob dies zielführend ist. Des Weiteren können Feinchemikalien unter höherer Ausbeute und mit weniger Nebenprodukten synthetisiert werden.

Die Entwicklung neuer Antibiotika und neuer Impfstoffe kann dank computer-aided-design (CAD) der Moleküle mit anschliessendem Engineering durch die Synthetische Biologie (Business-to-Business-Markt [B2B]) verbessert und gesteigert werden. Auch im Bereich des Tissue Engineering, zum Beispiel bei der Regeneration von Knorpel (*in* oder *ex situ*), sind Anwendungen der Synthetischen Biologie vorstellbar.

Mit Ansätzen der Synthetischen Biologie können Biosensorik und Therapie zur Zuckerhomöostase weiterentwickelt werden. Der Endkundenmarkt (Diabetiker) ist vorhanden. Eine Konkurrenztechnologie könnte die Nanotechnologie darstellen.

Energie

Bio-Raffinerien werden zur Erzeugung von Bio-treibstoff (Ethanol) eingesetzt. Durch effizientere und spezifischere Prozesse können Einsparungen bei der Bioproduktion von verschiedenen Materialien erzielt werden. Es wird angestrebt, in einem Kreisprozess das durch die Verbrennung von fossilen Treibstoffen erzeugte Kohlendioxid wieder aus der Atmosphäre zu entfernen und in Biomasse umzuwandeln. Dabei wird das aus den fossilen Energieträgern freigesetzte Kohlendioxid durch gross dimensionierte Algenreaktoren geleitet und dort durch die Assimilationsprozesse der Algen in Abhängigkeit von Sonnenlicht wieder gebunden und in Biomasse umgewandelt. Die so entstandene Biomasse kann als Düngemittel oder Viehfutter verwendet werden. Um einen Kreisprozess zu erlangen, müsste die Algenbiomasse direkt oder in Form von Viehexkrementen in Biogasanlagen vergast werden und das dabei entstan-

dene Kohlendioxid wieder in Algenbioreaktoren geleitet werden. Solche Verfahren werden angestrebt und erforscht. Ein weiteres Ziel ist es, aus Kohlendioxid durch den Einsatz von Algen mittels Photosynthese Wasserstoff zu produzieren. Dieser Prozess wäre grundsätzlich nachhaltiger als die Photovoltaik, der Prozess ist aber noch zu ineffizient und muss weiter entwickelt werden. Eine kompetitive Technologie ist die artifizielle Photosynthese, in der mittels organischer Farbmoleküle Energie gewonnen wird. In diesem Bereich hat die Synthetische Biologie ein grosses Potential. Eine Konkurrenztechnologie ist die Photovoltaik (Silizium-Technologie), wobei die Gewinnung von photoeffektivem Silizium und die Herstellung von Sonnenkollektoren sehr energieaufwändig sind und eine Menge Abfall erzeugen. Die Synthetische Biologie kann zur Herstellung von leistungsfähigen organischen Molekülen für die Erzeugung von Elektrizität aus Sonnenenergie beitragen. Anders als bei der Kernkraft stellen sich bei Ansätzen der Synthetischen Biologie auch keine Probleme der Endlagerung von Abfällen.

Bioremediation (Organismen zur Reinigung belasteter Standorte)

Durch gezielte Entwicklung von Mikroben können Verunreinigungen und Schadstoffe beseitigt werden. Erste Projekte werden durchgeführt. Hier würde es sich primär um einen B2B Markt handeln. Die Herausforderung in dieser Branche liegt in der Freisetzungproblematik.

Ernährung

Die Synthetische Biologie schafft gute Möglichkeiten, Lebensmittel aufzuwerten. Nutraceuticals sind biologisch aktive Inhaltsstoffe in Nahrungsmitteln. Der Endkundenmarkt ist bereits teilweise vorhanden (Functional Food). Auch für die Anreicherung oder Produktion von Vitaminen, von Futtermitteln und speziellen Diäten kann die Synthetische Biologie eingesetzt werden.

Landwirtschaft

Die Synthetische Biologie birgt ein grosses Potential beim Ersatz der aktuellen Verfahren für die Herstellung von Stickstoffdünger (Haber-Bosch) durch Biologie-basierte Verfahren. Der B2B-Markt und evtl. auch der Endkundenmarkt sind vorhanden.

Die Synthetische Biologie kann die aktuellen Herstellungsverfahren von Non-Food – Agrochemi-



kalien ersetzen. Auch hier ist ein Endkundenmarkt vorhanden. Die Herausforderung liegt wie bei der Ernährung in der negativen Bewertung der grü-

nen Gentechnologie durch weite Teile der Bevölkerung – eine Haltung, die sich eventuell auf die Synthetische Biologie übertragen könnte.

2.3 Schwerpunktthema Wissenschaftssoziologie

Aus wissenschaftssoziologischer Sicht ist insbesondere interessant zu klären, (a) inwiefern die Synthetische Biologie als neuer Ansatz verhandelt wird, (b) wie die interdisziplinäre Zusammenarbeit durchgeführt und wahrgenommen wird, (c) welche Bedeutung der Sprache und der gewählten Begrifflichkeit zukommt und (d) welche Rolle der Sozialwissenschaft in der Synthetischen Biologie zugewiesen wird.

a) Als wie neuartig wird Synthetische Biologie wahrgenommen?

Allgemein oszillieren Diskussionen zur Neuartigkeit der Synthetischen Biologie zurzeit zwischen «nichts Neuem» und «revolutionär» – wobei die Forschergruppen, die Synthetische Biologie betreiben, mehrheitlich eher zurückhaltend sind und die Synthetische Biologie nicht als revolutionäre Neuerfindung bewerten. So wird sie aus technischer Sicht eher als eine Weiterentwicklung von bekannten Technologien betrachtet, also eine Evolution der Biotechnologie und nicht eine Revolution. Dabei ist eine Verschiebung Richtung Komplexität zu verzeichnen, indem die Informationen der OMICS (genomics, proteomics, metabolomics) gebraucht werden, um komplexe Systeme zu verstehen und zu konstruieren. Im letzten Jahrzehnt hat die Wissenschaft eine Explosion von Techniken erlebt, die es erlauben, die noch einfache und wenig umfassende Sichtweise von komplexen Systemen zu vertiefen und komplexe Systeme in ihrer Integrität zu verstehen. Als neuartig wird das Erbauen von Einzelbausteinen bezeichnet, die zu einem Ganzen zusammengefügt werden können, ohne dass die Einzelbausteine interagieren. Zudem wird argumentiert, dass die Synthetische Biologie interdisziplinäre Ansätze vertieft und beschleunigt.

Zudem als neu an der Synthetischen Biologie wahrgenommen wird die ausdrücklich geführte Diskussion um die Mittel, die verwendet werden könnten, um bestimmte technowissenschaftliche

Ziele zu erreichen. Man stellt sich ein Zukunftssprodukt vor – und versucht, die Leute dafür auszubilden. Hier manifestiert sich die Denkweise der Ingenieure: Man hat ein Ziel vor Augen und entwickelt einen Weg, um es zu erreichen. Das ist eine andere Sichtweise als diejenige der Biologen, die beobachtend vorgehen.

b) Welche Bedeutung wird der Interdisziplinarität in der Synthetischen Biologie zugemessen?

Die gelebte Interdisziplinarität wird als eine Neuerung gesehen, die durch die Synthetische Biologie etabliert wird und im Zusammenhang mit der Beschleunigung von analytischen Techniken steht, da vermehrt Informationen zusammenfließen, die zu zahlreichen Anknüpfungspunkten für die unterschiedlichsten Disziplinen führen.

Interdisziplinäre Ansätze bergen aber auch Hürden und die Zusammenarbeit gestaltet sich schwierig, da zuerst eine gemeinsame Sprache und gemeinsame Denkmodelle entwickelt werden müssen. Wie schwer die Verständigung über fachliche Grenzen hinweg fällt, zeigt sich auch im Dialog mit Laien, wobei sich die Schwierigkeit nicht auf die Synthetische Biologie beschränkt und sich auch in anderen Fachgebieten stellt. Man versteht als Fachperson oft nicht, was Laien meinen. Es braucht neue Plattformen, um das Wissen zu teilen. Erst dann kommt es zur Konvergenz der Gespräche und man findet zu einer einheitlichen «Story» dessen, was man tut.

Zur Förderung von Interdisziplinarität könnten neue Curricula beitragen. So hat die ETH Zürich kürzlich ein neues interdisziplinäres Department eingerichtet (das Department für Biosysteme in Basel). Die EPFL beschäftigt ausschliesslich Biologen, die gute Leistungen in Mathematik und Physik nachweisen können. Bei der Förderung von Interdisziplinarität ist es wenig zielführend, wenn ein Kurs zur Interdisziplinarität selber auch wie-



der in disziplinäre Blöcke aufgeteilt wird. Ein konstruktiver Ansatz ist, von konkreten Problemstellungen auszugehen, die jeder aus seiner fachlichen Perspektive betrachtet und zu lösen versucht.

Etablierte Forschungsförderung hingegen tut sich eher schwer, wenn sie Interdisziplinarität unterstützen soll. Denn die historisch gewachsenen Strukturen solcher Organisationen haben sich bisher vorwiegend an den Disziplinen orientiert und die Bewertung von interdisziplinären Forschungsgesuchen bedingt einen aufwendigen Beurteilungsprozess, der Experten aus allen beteiligten Disziplinen verlangt.

c) Wie ist die Bedeutung der Sprache in der Forschung allgemein und in der Synthetischen Biologie einzuschätzen?

Als Spezifikum der Schweiz gilt es, die Vielsprachigkeit zu berücksichtigen. Es stellt sich die Frage, wie sie sich auf die Wahrnehmung der Synthetischen Biologie in der Öffentlichkeit auswirkt. Sprache ist nicht «nur» in der Kommunikation mit Laien von grundlegender Bedeutung. Vielmehr gibt es bspw. starke konzeptionelle Verbindungen zu «Denkschulen», die in einem Sprachraum vorherrschen.

Ausserdem ist auch die Metaphorik stark sprachgebunden. Es gibt emblematische Begriffe wie «top down», «bottom up», «design» und Ähnliches. In einer Diplomarbeit erwies es sich als unmöglich, «design» auf Französisch zu übersetzen. Im Plenum wurde auch auf die Problematik hingewiesen, dass es kein deutsches oder französisches Pendant zu den beiden Ausdrücken «safety» und «security» gibt. Auch zwischen den Disziplinen gibt es Unübersetzbare. Dabei erleichtern gemeinsame Ausdrücke die Zusammenarbeit, denn sie machen ein ständiges Definieren und Erklären hinfällig. Andererseits tragen sie mitunter dazu bei, Unschärfen zu verschleiern, weil jeder denkt, er wisse, was gemeint sei – auch wenn sich das implizite Verständnis der Beteiligten unter Umständen von einander unterscheidet.

Die Synthetische Biologie erhält schliesslich zahlreiche massgebliche Impulse aus den USA. Für die Akzeptanz des neuen Fachgebietes ist es problematisch, wenn Äusserungen aus dem US-amerikanischen Kontext auf europäische Verhältnisse übertragen werden.

d) Welche Rolle spielen die Sozialwissenschaften in der Synthetischen Biologie?

In der Schweiz hat sich eine sozialwissenschaftliche Begleitforschung noch nicht etabliert. So stehen bislang hier im Vergleich zu anderen Ländern noch wenig öffentliche Forschungsgelder für Begleitforschung wie die insbesondere im angelsächsischen Raum verbreitete ethical, legal and social implications (ELSI) Forschung oder reflektierende Disziplinen wie die Science and Technology Studies (STS) zur Verfügung. Viele Projekte der Begleitforschung fokussieren auf Risiken, teilweise gar auf naturwissenschaftlich-medizinische Risiken. Gesellschafts- und wissenschaftspolitisch bedeutsam sind aber auch die sozialwissenschaftlichen, rechtlichen und ethischen Fragen. Im nationalen Forschungsprogramm «Chancen und Risiken von Nanomaterialien» werden unter Risiken rein naturwissenschaftliche, toxikologische Aspekte berücksichtigt, die sozialwissenschaftlichen Aspekte werden vernachlässigt.

Auch ist in der Schweiz vielen Forschenden und forschungspolitischen Akteuren nicht klar, wieso Sozialwissenschaft und Ethik getrennt betrachtet werden. Generell fällt es Evaluatoren von Forschungsprojekten schwer, mit Begleitforschung und ihren Verknüpfungen umzugehen: Sie sind sich gewohnt, dass zuerst die wissenschaftlichen Aspekte beleuchtet werden und erst dann die sozialen Folgen. Das fehlende Interesse an ethischen Abklärungen bestätigt sich in der Praxis, wie eine Teilnehmerin berichtet: Wenn Projekte zu Synthetischer Biologie oder Biotechnologie eingereicht werden, die ethische Aspekte mit untersuchen wollen, kann es geschehen, dass die angefragte Förderagentur sie zurückweist mit der Auflage, den Ethik-Teil zu streichen.

In Grossbritannien ist die wissenschaftssoziologische Begleitforschung besser gestellt als in der Schweiz, weil man sich einig ist, dass die Soziologie die naturwissenschaftliche Forschung konstruktiv reflektieren und weiterbringen kann. Vor diesem Hintergrund liegt ein Potential der Synthetischen Biologie darin, dass sie die Sozialwissenschaft als Teil ihrer Entwicklung mitintegriert. Damit könnte die Synthetische Biologie den Trend begründen, dass soziologische Inhalte verstärkt im Curriculum der Biologinnen und Biologen und eventuell sogar grundsätzlich in dem der Naturwissenschaften Berücksichtigung findet.



Auch ist durchaus denkbar, dass die Auseinandersetzung mit soziologischen Konzepten in der Biologie produktiv nutzbar wird. So wird es als hilfreich angesehen, in Analogien zu denken und Erkenntnisse aus der Soziologie wie die Systemtheorie auf die Biologie zu übertragen. In der Praxis hat sich z. B. gezeigt, dass etwa in der Auseinandersetzung mit ansteckenden Krankheiten die Soziologie die Biologen durchaus unterstützen kann. Gegenüber dieser Vorstellung wird allerdings auch Skepsis laut, da bereits zahlreiche soziologische Theorien existieren, die mit Netzwerken und Interaktion, Übersetzung, Zirkulation

etc. arbeiten, aber die Begriffe kaum je symmetrisch verwendet werden.

Converging Technologies können einen Einfluss auf die Gesellschaft haben und diese verändern. Die treibende Kraft ist dabei vorwiegend die Wirtschaft und weniger die Wissenschaft selber. Vor diesem Hintergrund kann die wissenschaftssoziologische Reflexion dazu beitragen, Initiativen der Wissenschaftler gegen die Instrumentalisierung der Wissenschaft durch die Wirtschaft zu unterstützen.

2.4 Schwerpunktthema Ethik

Die technische Frage, inwiefern Synthetische Biologie überhaupt neues Leben schafft (und wie überhaupt Leben zu definieren sei), bildet einen Ausgangspunkt für die ethische Auseinandersetzung mit Synthetischer Biologie (a). Der Mensch (und sein allfälliges Versagen oder kriminelle Absichten) fließt als handelndes Subjekt in die ethischen Betrachtungen ein (b), und auch religiöse Vorstellungen sind in der ethischen Beurteilung zu berücksichtigen (c). Inwiefern Synthetische Biologie übertriebene Erwartungen weckt und ob das Konzept in der Öffentlichkeit auf Wohlwollen stößt, ist ethisch ebenfalls von Relevanz (d).

a) Schafft Synthetische Biologie neue «Lebensformen» – und welches ist ihr moralischer Status?

Aus biologischer Sicht ist Leben dadurch gekennzeichnet, dass sich ein Organismus selbst vermehren kann. Je nach Sichtweise wird Leben allein auf physikalische und chemische Vorgänge zurückgeführt (Monismus). Demgegenüber postuliert die dualistische Sichtweise, dass physikalisch-chemische Eigenschaften nicht ausreichen, um das Leben zu erklären, weil zur Physis auch der Geist (bzw. die Seele) hinzukommen muss.

Unabhängig davon, ob die Beurteilung vom monistischen oder dualistischen Standpunkt erfolgt, gilt es festzustellen, dass bis anhin die Synthetische Biologie kein neues Lebewesen geschaffen hat. Auch die am weitesten fortgeschrittenen Experimente von Craig Venter und seiner Forschungs-

gruppe (Gibson et al., 2010) führten lediglich dazu, dass eine Bakterienzelle wieder lebensfähig wurde, nachdem deren eigenes Erbgut entfernt und durch das fremde, nahezu exakt «nachgebaute», Genom einer anderen Bakterienart ersetzt wurde. Beim neuen, transferierten Erbgut handelte es sich also «nur» um eine Kopie, und das Zytoplasma der Empfängerzelle war noch vorhanden. Mithin wurden also weder neue Gene noch neue Eigenschaften und schon gar kein neuartiger Organismus erzeugt. Somit handelt es sich bei diesem Experiment der Synthetischen Biologie um eine fortgeschrittene Anwendung der Gentechnologie und nicht um etwas grundsätzlich Neues.

Dennoch ist nicht ausgeschlossen, dass Synthetische Biologie ethische Fragen aufwerfen könnte, die im Kontext der Gentechnologie noch nie diskutiert wurden. Voraussetzung hierfür wäre, dass ganz neue Lebensformen geschaffen werden könnten. Solche müssten zwar physikalisch-chemisch auf den bekannten Prinzipien beruhen. Doch was die Biochemie betrifft, sind durchaus neue Formen denkbar – und womöglich mit den Mitteln der Biotechnologie konstruierbar. So kommen als Erbsubstanz auch andere Moleküle als die DNA in Frage.

Lebensformen, die auf der herkömmlichen Biochemie beruhen, könnten wie andere Züchtungen weiterhin als Teil der Natur betrachtet werden. Sie hätten dann – wenn man nicht eine spezifische Ethik für Nutztiere, -pflanzen und -orga-





nismen einführen möchte – denselben moralischen Status wie die entsprechenden natürlichen Organismen. Bei grundsätzlich neuen Lebensformen würde sich allerdings die Frage stellen, ob sie noch als Teil der Natur gelten könnten. Wenn nicht, käme ihnen womöglich ein anderer moralischer Status zu als den natürlichen Organismen. Auch wären die Risiken bei einer Interaktion der «synthetischen» mit den natürlichen Organismen bzw. Ökosystemen zu untersuchen. Als Kriterium für die Beurteilung der (veränderten oder neuen) Organismen sollten eher deren Eigenschaften dienen und weniger die Gene.

b) Risikofaktor Mensch?

Was die Frage der Sicherheit betrifft, so wird der Begriff «anthropologisches Risiko» erwähnt. Damit soll gesagt werden, dass der Mensch (auch ohne böswillige, etwa terroristische, Absicht) im Umgang mit Systemen der Synthetischen Biologie einen Unsicherheitsfaktor darstellt, weil deren Risiken noch nicht ausreichend bekannt sind. Der «Risikofaktor Mensch» könnte vor allem dann zum Problem werden, wenn er unter dem wirtschaftlichen Druck steht, bestimmte Produkte der Synthetischen Biologie herzustellen. Die Eidgenössische Ethikkommission für Biotechnologie im Ausserhumanbereich EKAH schlägt vor, das Vorsorgeprinzip anzuwenden, das fordert, dass nur unter angemessenen Vorsichtsmassnahmen gearbeitet wird.

Beim allfälligen Missbrauch von Synthetischer Biologie für kriminelle Zwecke oder für einen militärischen Einsatz erkennen die Fachleute aus dem Bereich der Ethik keine grundsätzlich neuen Probleme. Für solche Anwendungen gibt es in der Natur bereits genügend toxische Mikroorganismen, die missbraucht werden können.

c) Setzen sich Forschende der Synthetischen Biologie der Versuchung aus, «Gott zu spielen»?

Die bei der Gentechnologie früher oft geäusserte Befürchtung, die Forschenden würden «Gott spielen», ist bei der Synthetischen Biologie selten zu hören – obwohl in diesem Forschungsfeld das Bild näher läge als bei der Übertragung einzelner Gene. Womöglich hat die Tatsache, dass bisher praktisch nur das Kopieren bzw. Neukombinieren von bereits bestehenden Eigenschaften möglich ist, zu einer weniger dramatischen Einschätzung der Situation geführt.

Die Metapher «Gott spielen» hat in Bezug auf die Bewertung von Technologien an Bedeutung verloren. Dennoch besteht ein gewisser Respekt im Hinblick auf den Umgang mit der Natur bzw. mit Eingriffen in natürliche Systeme. Die Tatsache, dass normierte Bio-Bausteine («Bio-Bricks») als Werkzeuge zur Veränderung von Organismen verwendet werden, zeigt den ingenieurhaften Zugang zu gewissen Gebieten der modernen Biologie. Dies ruft Befürchtungen hervor, wonach der Umgang mit Lebewesen zunehmend rein materialistisch und durch Technik geprägt wird.

Dieser Zugang zur Biologie wird einerseits kritisch gesehen: Gibt es in Zukunft nur noch die «intervenierende Biologie» anstelle der «beobachtenden, verstehenden Biologie»? Andererseits ist dieser intervenierende Ansatz nicht neu: Die Gentechnologie, die ja auf Englisch «genetic engineering» heisst, stellt in der heutigen Biologie eine wichtige Methode dar. Allerdings liegt die herkömmliche Gentechnologie vergleichsweise nahe bei der Biologie – nicht zuletzt, weil sie vor allem von Biologinnen und Biologen betrieben wird. Im Gegensatz dazu besteht bei der Synthetischen Biologie die Möglichkeit, dass sich diese von der Biologie teilweise löst, da hier zunehmend Personen aus Gebieten wie der Physik oder Informatik aktiv sind.

d) Ist Synthetische Biologie ein Marketing-Instrument – und wie steht es um ihre Akzeptanz?

Synthetische Biologie wird auch als Marketing-Instrument für die Forschung eingesetzt: Auch wenn die Methoden und Produkte nicht grundsätzlich neuartig sind, werden mit dem Label «Synthetische Biologie» grosse Erwartungen geweckt, um beim Wettbewerb um Forschungsgelder die eigene Position zu stärken. Die Bezeichnung «Synthetische Biologie» ist aus Sicht etlicher Fachleute nicht unproblematisch – und gänzlich vermessen ist für viele die Aussage, es würden «neue Lebensformen» resp. «künstliches Leben» geschaffen. Missbehagen in der Gesellschaft könnte auch der Umstand wecken, dass die Biologie von vielen als etwas Mysteriöses empfunden wird und im Widerspruch zu dem aus dem Ingenieurwesen abgeleiteten Ansatz der Vereinfachung steht. Die ethische Diskussion in der Gesellschaft könnte sich nicht zuletzt an missglückter Wortwahl entzünden. Aus Sicht einiger Vertreter der Synthetischen Biologie spricht für die an der



Alltagssprache angelehnte Begrifflichkeit, dass sie sich weniger dem Verdacht aussetzt, Sachverhalte verschleiern zu wollen.

Ob die Bevölkerung die Synthetische Biologie ablehnt oder nicht, kann zurzeit nur spekulativ beantwortet werden. Die Grundlagenforschung dürfte diesbezüglich eher unproblematisch sein, aber bei konkreten Anwendungen stellt sich die Frage, ob sie für die Bevölkerung einen klar er-

sichtlichen Nutzen bringen. Letztlich wird der Markt entscheiden, ob diese neue Technologie Vorteile bringt. Ob durch die Synthetische Biologie grundsätzlich neue ethische Fragen aufgeworfen werden, wird am Schluss der Diskussion eher bezweifelt. Generell wird die Synthetische Biologie – auf dem jetzigen Stand der Möglichkeiten – eher als eine Weiterentwicklung der Gentechnologie gesehen und nicht als etwas grundsätzlich Neues.

2.5 Staatliche Interventionen, Regulation und Risikoabklärungen

Mit Blick auf allfällige Interventionen des Staates finden drei Problemfelder besondere Erwähnung: die Wirtschaftspolitik bzw. allfällige Massnahmen von staatlicher Seite, um Synthetische Biologie zu fördern (a), der Umgang mit bzw. Schutz von geistigem Eigentum (b) und der Umgang mit eventuellen Risiken der Synthetischen Biologie (c).

a) Welche Massnahmen soll der Staat ergreifen, um die Synthetische Biologie zu fördern oder zu lenken?

Zurzeit dürften die Perspektiven der Synthetischen Biologie noch zu wenig konkret sein, als dass für diesen Bereich eine eigentliche Wirtschaftspolitik entworfen werden könnte. Offen ist auch die Frage, inwiefern der Staat überhaupt als Akteur auftreten soll – zumal staatliche Eingriffe «von oben» der Tradition und dem Selbstverständnis der föderalen Schweiz widersprechen. In jedem Fall sollte der bürokratische Aufwand für die Forschung und Industrie eng begrenzt bleiben.

b) Gilt es, Vorkehrungen zum Schutz des geistigen Eigentums in der Synthetischen Biologie zu treffen?

Die Synthetische Biologie integriert auch Wissen-schaftler und Konzepte aus der Informatik; von dieser hat die Gemeinschaft der Synthetischen Biologie u. a. das Konzept des «open source»-Zugangs zu biologischen Bausteinen übernommen. Unter der Bezeichnung «International Genetically Engineered Machine Competition (iGEM)» findet jährlich ein Wettbewerb statt, in dessen Rahmen Studierende anhand des «Register of Standard Biological Parts» biologische Systeme herstellen. Der Wettbewerb fördert die wissenschaftliche

Kreativität der Studierenden, bereitet sie auf den neuen wissenschaftlichen Ansatz «Synthetische Biologie» vor und ermöglicht die Sammlung von neuen, standardisierten biologischen Bausteinen im Bausteine-Register. Die Gründung der iGEM-Initiative am Massachusetts Institute of Technology weist starke Verbindungen zum Bereich der Informatik auf. Dieser Einfluss macht das «Open Source»-Konzept zur wichtigen Stütze für die Synthetische Biologie.

Die Initiative «BioBricks» ist ebenfalls vom Gedanken des Open Source-Zugangs geprägt. BioBricks wird namentlich vom Pionier in der Synthetischen Biologie, Drew Endy (Stanford University) vorangetrieben und sieht vor, dass ein Katalog standardisierter DNA Abschnitte produziert wird, die allen zur Verfügung stehen, welche sich dem entsprechenden «public agreement» verpflichten. Dass Synthetische Biologie von offener Mentalität und Kooperationsbereitschaft geprägt ist, lässt sich womöglich auf die Jugend der Disziplin zurückführen.

Die lockere Einstellung könnte sich rasch ändern, wenn die ersten Patente auf standardisierte Bauteile eingereicht werden und wenn die ersten kommerziellen Erfolge der Synthetischen Biologie absehbar werden. Es ist also wichtig, auch für die Synthetische Biologie eine klare Regelung zum geistigen Eigentum zu finden.

c) Wie steht es um die Notwendigkeit nach Risikoforschung in der Synthetischen Biologie?

Da die Synthetische Biologie auf die Konstruktion neuartiger (wenn auch oft minimaler) Organis-

men abzielt, fehlt das Kriterium der funktionalen Äquivalenz, das bei Risikoabklärungen der Gentechnologie ein wichtiger Ausgangspunkt ist. Andererseits stellt die Synthetische Biologie spezifische Ansätze bereit, um Risiken zu mindern. So ist die Orthogonalität der Synthetischen Biologie eng mit der Risikoreduktion verbunden: Wenn es gelingt, die Synthetische Biologie nicht nur mit physikalischen Sicherheitsbehältern, sondern auch durch «molekulare Inkompatibilität» von der natürlichen Welt zu trennen, ist dies für die Minimierung der Risiken ein grosser Erfolg. Skeptiker befürchten, dass dieser Ansatz andere potentielle Risiken birgt – etwa eine Hybridisierung der molekularen Welten oder eine allfällige Invasion der Natur durch künstlich erzeugte Organismen. Diese Vorstellungen liegen nahe an der Science-Fiction und dürften viele Menschen abschrecken.

Dass durch die vor allem in den USA aufkommende Bewegung der «Heimwerker-Biologie» (DIYbio, do-it-yourself biology) eine besondere Gefahr entsteht, wird bezweifelt. Die Möglichkeiten für diese Art von Forschung sind limitiert; der Wegfall der sozialen Kontrolle, die durch eine institutionelle

Umgebung gegeben ist, könnte allerdings problematisch sein, weil er womöglich riskantem Verhalten Vorschub leistet.

Zusammenfassend kommen die Fachleute zum Schluss, dass die heutige Risikobewertung, basierend auf den derzeitigen chemischen und biotechnologischen Kenntnissen, zurzeit ausreicht. Die auf die Biotechnologie zugeschnittenen gesetzlichen Rahmenbedingungen vermögen die auftretenden rechtlich relevanten Fragen abzudecken. Zudem ist es schwierig, Richtlinien für die Sicherheitsrelevanz zu entwickeln, wenn die Produkte noch nicht bekannt sind. Der Bedarf für neue Risikoansätze wird sich erst nach 5–10 Jahren weiterer Forschung und Entwicklung herauskristallisieren. Wie bei anderen technologischen Entwicklungen (Atomkraft, Biotechnologie, Gentechnologie und Nanotechnologie) wird die Risikotoleranz der Öffentlichkeit vom Kontext abhängen. Stichworte sind hier der Nutzen entsprechender Produkte, ihre Wirtschaftlichkeit und die Verfügbarkeit von Techniken, die es gestatten, Organismen aus der Synthetischen Biologie von der natürlichen Umwelt zuverlässig fern zu halten.

2.6 Schlussfolgerungen der Séance de Réflexion «Von der Gentechnologie zur Synthetischen Biologie»

Die Synthetische Biologie ist eine Forschungsrichtung, die sich derzeit neu formiert und zu etablieren versucht. Entsprechend ist es schwierig, bereits gesicherte Aussagen über ihre Tragweite zu treffen. Dennoch sei hier der Versuch unternommen, die Informationen aus Input-Referaten und Workshop- und Plenumsdiskussionen zu Schlussfolgerungen zu bündeln.

Der Forschungsbereich Synthetische Biologie steht noch am Anfang seiner Entwicklung. Der Versuch, neue biologische Schaltkreise zu erbauen, minimale Modelle zu entwickeln und parallele Welten zu schaffen, hat schon vereinzelt zum Erfolg geführt.

Gelingt es, die Synthetische Biologie zu einer kostengünstigeren, effizienteren und zielsichereren

Arbeitsweise zu führen, dürfte ihr wirtschaftliches Potential beträchtlich sein. Insbesondere für die Herstellung von Biopharmazeutika sowie von Molekülen für die Energieversorgung, die Bioremediation, die Ernährung und die Landwirtschaft könnte sie interessante Lösungsansätze hervorbringen. Die Synthetische Biologie wird möglicherweise die Grundlage der bestehenden Ökonomie durch eine andere Basis ersetzen, die ein vielfältigeres Anwendungspotential aufweist. Allerdings hat die Synthetische Biologie bislang noch nicht umfassend gezeigt, dass sie sich in verwertbare Produkte umsetzen lässt.

Aus technischer Sicht bedient sich die Synthetische Biologie der Methodik der Molekularbiologie, unterscheidet sich aber von der Molekularbiologie in den Fragestellungen, Konzeptionen und den



Technologien, die sie für Lösungsansätze weiterentwickelt. Das Neue an der Synthetischen Biologie liegt auch darin, dass ausdrücklich eine Diskussion um die Mittel geführt wird, die verwendet werden könnten, um bestimmte wissenschaftlich-technische Ziele zu erreichen. Zudem kann die zwischen den Ingenieurwissenschaften und der Biologie gelebte Interdisziplinarität als Neuheit betrachtet werden, wobei die verschiedenen Fachgemeinschaften noch nicht in einer gemeinsamen Sprache interagieren.

Die Vorgaben, die mit Blick auf gentechnische Anwendungen zur Wahrung der biologischen Sicherheit erarbeitet wurden, sind zum jetzigen Zeitpunkt für die Synthetische Biologie ausreichend. Bestimmte Ansätze wie etwa die Konstruktion von Organismen mit spiegelverkehrten Biomolekülen (Chiralität) oder minimaler Lebewesen können sogar als Beitrag zur Biosicherheit gesehen werden, da nach derzeitigem Stand der Kenntnisse davon ausgegangen wird, dass sie mit natürlichen Lebewesen nicht interagieren können bzw. ausserhalb des Labors nicht überlebensfähig sind.

Aus ethischer Sicht stellen sich zurzeit noch keine Fragen, die nicht schon im Zusammenhang mit der Gentechnologie behandelt werden. Sollte es der Synthetischen Biologie indes gelingen, neuartige Lebensformen zu erzeugen, wäre deren moralischer Status zu klären. Auch gilt es zu berücksichtigen, dass die Bevölkerung mitunter strengere ethische Massstäbe anwendet als professionelle Ethiker; hier gebietet es die Ethik, Technologie nicht nur aus professionellem Blick zu beurteilen, sondern auch den Wertmassstäben der Öffentlichkeit Rechnung zu tragen.

Im Gegensatz zu anderen Ländern in Europa wird in der Schweiz die sozialwissenschaftliche Begleitforschung kaum unterstützt. Erfahrungen aus Grossbritannien zeigen aber, dass diese zum verbesserten Dialog mit der Öffentlichkeit beiträgt, die Interdisziplinarität begünstigen kann, einen gesellschafts- und wissenschaftspolitischen Mehrwert schafft und Impulse für die naturwissenschaftliche Arbeit als solche zu geben vermag.

Im Hinblick auf die Verständigung unter den beteiligten Wissenschaftszweigen und auf den Dialog mit der Bevölkerung sind Sprache und Wortwahl von grosser Bedeutung. Um nicht falsche Hoffnungen in der Gesellschaft zu generieren, sind gewagte Metaphern oder allzu optimistische Versprechungen zu vermeiden.



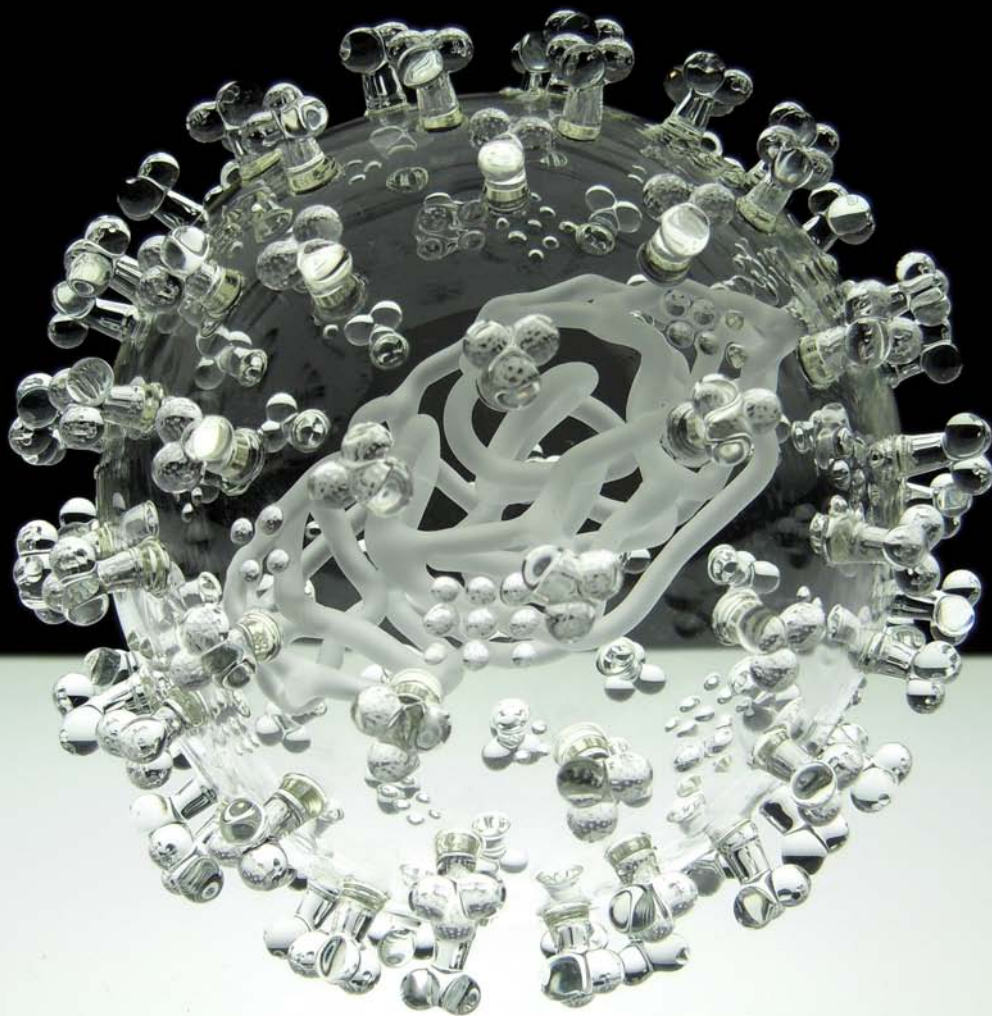
Anhang

Programm

- 9.15 – 9.25 Empfang der Teilnehmenden und Begrüssungskaffee
- 9.25 – 9.30 **Begrüssung**
Prof. Dr. Patrick Matthias, Präsident Forum Genforschung
Prof. Dr. Daniel Gyga, Präsident Kommission für angewandte Biowissenschaften
- 9.30 – 10.15 **Technisch-wissenschaftliche Aspekte:**
Synthetische Biologie – der lange Weg zum Bioingenieur
Prof. Dr. Sven Panke, Department of Biosystems Science and Engineering (D-BSSE),
ETH Zürich, Basel
- 10.15 – 10.35 **Ökonomische Aspekte**
Prof. Dr. Jutta Heim, Chief Technology Officer der Evolva SA, Allschwil
- 10.35 – 10.55 Pause
- 10.55 – 11.20 **Soziokulturelle Aspekte:**
Soziologische Betrachtungen einer neuen technischen Wissenschaft
Prof. Dr. Susan Molyneux-Hodgson, Department of Sociological Studies,
The University of Sheffield
- 11.20 – 11.35 **Risiko-Aspekte: Verstehen wir, was wir kreieren wollen?**
Dr. Markus Schmidt, International Dialogue and Conflict Management (IDC), Wien
- 11.35 – 12.00 **Ethische Aspekte: Ethische Fragen zur Synthetischen Biologie
vor dem Hintergrund der Gentechnik – Debatte**
Dr. Anna Deplazes Zemp, Ethikzentrum der Universität Zürich
- 12.00 – 13.15 Mittagessen – Buffet
- 13.15 – 15.00 **Parallelworkshops**
A) Technisch-wissenschaftliche Neuheitsaspekte und Risiken
Leitung: Prof. Dr. Daniel Gyga, Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz
B) Ökonomisches Potential
Leitung: Dr. Hubert Bernauer, CEO ATG:biosynthetics GmbH, Merzhausen
C) Soziokulturelle Neuheitsaspekte
Leitung: Dr. Monika Kurath, Programm für Wissenschaftsforschung,
Universität Basel und Alain Kaufmann, Interface sciences-société,
Université de Lausanne
D) Ethik
Leitung: Prof. Dr. Markus Huppenbauer, Ethikzentrum der Universität Zürich
- 15.00 – 15.30 Pause
- 15.30 – 17.15 **Podiumsdiskussion**
Teilnehmer: Dr. Hubert Bernauer, ATG:biosynthetics GmbH
Prof. Dr. Sven Panke, ETHZ, Basel
Alain Kaufmann, Université de Lausanne
Dr. Markus Schmidt, IDC, Wien
Dr. Anna Deplazes Zemp, Universität Zürich
Moderation: Dr. h.c. Beat Glogger, scitec-media GmbH, Winterthur
- 17.30 Ende der Veranstaltung

Empfohlene Literatur

Erscheinungs- jahr	AutorInnen	Titel	Inhalt
2011	Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften	Synthetische Biologie. Eine neue Ingenieurwissenschaft entsteht	Einführung in die Synthetische Biologie für die interessierte Öffentlichkeit
2010	European Academies Science Advisory Council EASAC	Realising European potential in synthetic biology: scientific opportunities and good governance	Zusammenfassung aus Analysen und Aussichten der Mitgliedakademien der EASAC zum Thema Synthetische Biologie
2010	Policy brief. International Risk Governance Council	Guidelines for the appropriate risk governance of synthetic biology	Konzept zur angemessenen Risikohandhabung im Bereich der Synthetischen Biologie
2010	Presidential Commission for the Study of Biomedical Issues	New directions: The ethics of synthetic biology and emerging technologies	Amerikanische Studie der bioethischen Konsequenzen die mit der Entwicklung des neuen Wissenschaftszweig verbunden sind
2010	TNS-BMRB (British Market Research Bureau)	Synthetic biology dialogue	Darstellung der Ergebnisse aus einer Workshopserie und aus Interessensgruppeninterviews zum Thema Synthetische Biologie
2010	Eidgenössische Ethikkommission für die Biotechnologie im Ausserhumanbereich EKAH	Synthetische Biologie – ethische Überlegungen	Zusammenfassung von Referaten und Gesprächen mit Schweizer Experten aus den Gebieten der Ethik und der Naturwissenschaften.
2009	The European Group on Ethics in Science and New Technologies to the European Commission, Opinion No 25	Ethics of synthetic biology	Stellungnahme der European Group on Ethics zu den möglichen ethischen, gesetzlichen und sozialen Auswirkungen der Synthetischen Biologie in Europa
2009	Bernard Baertschi (Hrsg. CENH)	La vie artificielle. Le statut moral des êtres vivants artificiels	Studie über den ethischen Status von synthetisch hergestellten Lebewesen
2009	The Royal Academy of Engineering	Synthetic biology: scope, applications and implications	Definition des Begriffs Synthetische Biologie, Rückblick der Entwicklungslage des Fachgebiets und Überblick des zukünftigen Entwicklungspotentials
2009	Markus Schmidt et al; Verlag Springer	Synthetic Biology. The technoscience and its societal consequences.	Prinzipien der Gentechnologie und die Entwicklung von neuen Anwendungsmöglichkeiten durch computergesteuertes Design
2009	Joachim Boldt et al., (Hrsg. EKAH)	Synthetische Biologie. Eine ethisch-philosophische Analyse.	Zusammenfassung von philosophischen Gedanken und biologisch-medizinischer Sachkenntnis zur Erfassung der ethischen Implikationen der Synthetischen Biologie
2009	DFG, acatech und Leopoldina	Synthetische Biologie	Gemeinsame Stellungnahme der deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech) und der Nationalen Akademie der Wissenschaften (Leopoldina) zur Synthetischen Biologie
2008	Andrew Balmer & Paul Martin, Institute for Science and Society, University of Nottingham	Synthetic Biology. Social and Ethical Challenges.	Kurze Zusammenfassung der ethischen und gesellschaftlichen Aspekte der öffentlichen Debatte zum Thema Synthetische Biologie



Autoren: Lucienne Rey, Adrian Rüeggsegger, Pia Stieger

Review: Sibylle Ackermann, Anna Deplazes, Daniel Gygax, Markus Huppenbauer, Martine Jotterand, Monika Kurath, Patrick Matthias, Stefan Nussbaum, Sven Panke, Markus Schmidt

Kontakt: Forum Genforschung
Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT)
Schwarztorstrasse 9, 3007 Bern
www.geneticresearch.ch