

Mit Schlagzeilen wie „Frankensteins Zeit ist gekommen“ (*Der Spiegel*), „Leben aus toter Materie“ (*Die Zeit*) oder „Leben maßgeschneidert“ (*Süddeutsche Zeitung*) wird die synthetische Biologie seit Kurzem der deutschen Öffentlichkeit in der Presse vorgestellt und ist damit endgültig kein Thema mehr, das lediglich auf Laborfluren oder in den Elfenbeintürmen der Wissenschaft diskutiert wird. Was hinter der synthetischen Biologie steckt, was sie von konventioneller Gentechnologie unterscheidet, welche gesellschaftlichen Implikationen sie haben könnte und ob es politischen Handlungsbedarf gibt, ist Thema dieses einführenden und der nachfolgenden Artikel.

Die synthetische Biologie ist ein junger Forschungszweig der modernen Biologie, der sich seit knapp zehn Jahren sehr dynamisch und mit Macht entwickelt und sich mit der maßgeschneiderten Konstruktion von Lebewesen beschäftigt. Die Forschungsziele sind divers. Sie reichen von grundlegenden Fragestellungen wie der Erschaffung von neuem Leben im Reagenzglas, durch die unter anderem Fragen zu essenziellen Lebensprozessen erforscht werden, bis hin zu rein angewandten und marktrelevanten Forschungszielen. Die Entwicklung neuer und zugleich billiger Arzneimittel, klimagünstiger Biokraftstoffe oder neuer Methoden zur Produktion von hochwertigen Chemikalien in der Postpetroleum-Ära sei beispielhaft hierfür. Durch die Zusammenführung der Disziplinen Informatik, Ingenieurwissenschaften und Bio-

logie hat sich mit der synthetischen Biologie ein auch methodisch grundlegend neuer Forschungszweig entwickelt, der weltweit an Bedeutung gewinnt und erste Erfolge aufzuweisen hat. Die synthetische Biologie geht mit der systemischen Vorgehensweise und ihrem Ansatz, Organismen teilweise in Ablösung von Vorbildern in der Natur zu entwerfen und herzustellen, weit über Methoden und Anwendungen der Gentechnik hinaus. Mit der geplanten Neuschaffung von Lebewesen beziehungsweise der Entwicklung neuer, optimierter Bausteine des Lebens wie zum Beispiel der Entwicklung eines veränderten genetischen Codes betritt die synthetische Biologie nicht nur in der Biologie Neuland. Auch die ethische Begleitforschung ist mit neuen Fragestellungen konfrontiert. Obwohl sie – verglichen mit anderen neuen Technologien – zu einem bemerkenswert frühen Zeitpunkt eingesetzt hat, muss sie sich auch vor dem Hintergrund der außergewöhnlichen Forschungsaktivitäten noch enormen Herausforderungen stellen.

Die synthetische Biologie geht weit über die Gentechnik hinaus

Die Biologie hat sich in den letzten einhundert Jahren in rasanten Schritten von einer vorwiegend beschreibenden hin zu einer angewandten Disziplin entwickelt. Mit der Beschreibung des genetischen Codes wurden die Grundlagen für die erste künstliche Einschleusung eines Gens in einen Organismus geschaffen. In

der Folge konnte bereits 1977 das erste Gen menschlichen Ursprungs in einen Mikroorganismus kloniert werden mit dem Ziel, rekombinierte – sprich gentechnisch hergestellte – Proteine zu produzieren. Dieses Experiment wird häufig als der Startschuss für die moderne Biotechnologie bezeichnet. Seitdem hat die Gentechnologie eine Vielzahl von Anwendungen hervorgebracht. Sie reichen von der Herstellung einzelner Moleküle wie zum Beispiel Biopharmazeutika bis hin zur Entwicklung transgener Pflanzen, die beispielsweise resistent gegen bestimmte Schädlinge sind. Die synthetische Biologie geht nun sowohl konzeptionell als auch methodisch weit über die klassische Gentechnik hinaus. Während die klassische Gentechnik einzelne Gene von einem Organismus in einen anderen bereits existierenden Organismus überträgt, arbeitet die synthetische Biologie auf einer wesentlich grundlegenden Ebene: Es geht darum, biologische Systeme von Grund auf neu zu entwickeln und zu konstruieren. Biologische Bauteile, Bauteilgruppen und Lebewesen werden neu entwickelt und existierende natürliche biologische Systeme überarbeitet. Dabei gelangen selbst biochemische Grundbausteine wie Nuklein- und Aminosäuren auf den Prüfstand. Erste Versuche, das genetische Alphabet zu erweitern und neue Nukleinsäuren zu konstruieren, waren bereits erfolgreich. Theoretisch kann die synthetische Biologie neue, in der Natur so nicht vorkommende biologische Strukturen herstellen, die exakt die von ihnen Erschaffern erdachten Eigenschaften tragen. Zusammenfassend ist der trennende Schritt zwischen Gentechnik und synthetischer Biologie ein Wechsel von *manipulatio* zu *creatio*. Dabei muss allerdings im Blick behalten werden, dass der Wechsel zwischen gentechnischer Manipulation und synthetischer Kreation nicht durch eine vollkommen scharfe Trennlinie charakterisiert ist und dass es immer wieder

Anwendungen gibt, die beiden Disziplinen zugeordnet werden können. Sowohl Gentechnik als auch synthetische Biologie haben ihre konzeptionellen Wurzeln in den 1970er-Jahren. Aber erst die aktuelle rasante Entwicklung in der Systembiologie und Bioinformatik und der technische Fortschritt, der Gensequenzierungen und Gensynthese im großen Stil finanzierbar gemacht hat, haben den schnellen Aufschwung der synthetischen Biologie in den letzten Jahren ermöglicht.

Es gibt für die synthetische Biologie momentan noch keine einheitliche und allgemein anerkannte Definition, was aber für ein derart dynamisches Forschungsfeld typisch ist. Erschwerend bei der Diskussion um eine einheitliche Definition kommt hinzu, dass die Bandbreite dessen, was zur synthetischen Biologie gezählt wird, auch eine förderpolitische Dimension hat. Es wird eine wichtige Aufgabe der philosophischen Begleitforschung sein, die Suche nach einer problemorientierten Definition zu unterstützen, um den Diskurs über die synthetische Biologie zu vereinfachen. In der Zwischenzeit kann die folgende Definition einer EU-NEST-Expertengruppe als Arbeitsversion dienen: *“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”* (aus: *“Synthetic Biology: Applying Engineering to Biology”*, EU NEST High Level Expert Group, 2005).

Die systemischen und ingenieurwissenschaftlichen Ansätze, die in dieser Definition deutlich werden, sind ein wichtiger Unterschied zur Gentechnik. Die synthetische Biologie arbeitet wesentlich stärker mit den Ingenieurwissenschaften

zusammen als die Gentechnologie. Dies hat zu einem gravierenden Wechsel in der biotechnologischen Arbeitsweise geführt. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren, Informatikern und Biologen, die für die synthetische Biologie charakteristisch ist, spiegelt sich in den sprachlichen Anleihen aus den technischen Wissenschaften (zum Beispiel „microbial chassis“, Schaltkreis, Oszillator) wider und wirkt sich auf die technische Vorgehensweise aus: Es wird daran gearbeitet, Organismen auf standardisierte Bauteile zu reduzieren, um so bei der Entwicklung neuer Organismen einzelne Bausteine einfach und beliebig kombinieren zu können. Das dahinterstehende Prinzip der Modularisierung und Standardisierung greift auf Prinzipien der Ingenieurwissenschaften und der Informatik zurück. Am Massachusetts Institute of Technology (MIT) hat man bereits einen Katalog mit standardisierten Lebensbauteilen, sogenannten Bio-Bricks (<http://partsregistry.org>), angelegt. Augenblicklich wird in einem nächsten Schritt daran geforscht, einen minimalen Satz an Genen zu finden, der für die Lebensfähigkeit einer Zelle erforderlich ist. Wenn dieser bekannt ist, soll eine Minimalzelle entwickelt werden, die dann mit nützlichen Zusatzfunktionen ausgestattet werden kann. Beispielsweise könnte eine so entwickelte Zelle den Energieträger Wasserstoff produzieren. Wie konkret aber die Bemühungen zur Schaffung neuen Lebens im Reagenzglas sind, zeigt sich darin, dass bereits verschiedene Viren (unter anderem das Spanische-Grippe-Virus) und die kompletten Genome von Bakterien *in vitro* synthetisiert werden konnten. Craig Venter, eine treibende Kraft in diesem Bereich, ist es jetzt zudem gelungen, ein im Reagenzglas synthetisiertes Genom in eine Bakterienhülle zu transplantieren. Venter und seine Coautoren sprechen in ihrer Veröffentlichung vom 20. Mai 2010 in Science von

der Kreation einer synthetischen Zelle. Die Frage, ob für den Anspruch synthetisches Leben im Reagenzglas zu schaffen auch die leere Bakterienhülle chemisch synthetisiert werden muß, wird Teil der philosophischen Aufarbeitung sein.

Ethische Einordnung der synthetischen Biologie

Verglichen mit anderen neuen Technologien, hat die ethische Begleitforschung zur synthetischen Biologie sehr früh eingesetzt. Bereits als das Forschungsfeld neu aufkam, wurden ethische Aspekte (in erster Linie Risikoaspekte) vor allem von den synthetischen Biologen selbst diskutiert und unter allgemeinerem Blickwinkel von einigen NGOs thematisiert. Erst kürzlich äußerten sich die Deutsche Forschungsgemeinschaft, die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) und die Nationale Akademie der Wissenschaften (Leopoldina) in einer gemeinsamen Stellungnahme zu dem Thema (Synthetische Biologie, Stellungnahme, Wiley VCH Verlag, 2009). Auch in der bioethischen Forschung entwickelt sich momentan eine lebhaftere Diskussion. Die meisten ethischen Herausforderungen sind allerdings nicht genuin für die synthetische Biologie. Sie haben ihre Parallelen in ethischen Diskursen zur Gentechnik, Nanotechnologie oder Neuroprothetik und beinhalten zum Beispiel die Fragen, ob es sich bei der synthetischen Biologie um einen unzulässigen Eingriff in die Integrität der Natur handelt oder ob der Mensch gesundheitlichen Schaden nehmen kann. Dennoch wird es eine wichtige Aufgabe sein, diese Diskurse auf Fragen der synthetischen Biologie konkret zu übertragen. Zudem gibt es auch ethische Herausforderungen, die spezifisch für die synthetische Biologie sind und sich vor allem auf die Erschaffung neuen Lebens beziehen. In der gesellschaftlichen Diskussion spielt die Frage, ob die synthetische Biologie als ein

unzulässiger – sprich sündhafter – Eingriff in die Schöpfung zu werten ist, ebenfalls eine prominente Rolle. Dabei handelt es sich im strengen Sinn allerdings nicht um eine ethische Frage, sondern um eine moraltheologische Frage, die in dem nachfolgenden Artikel von Peter Dabrock und Jens Ried behandelt wird. Die wichtigsten ethischen Herausforderungen der synthetischen Biologie können in Fragen zur biologischen Sicherheit, zu Missbrauchsrisiken, zur menschlichen Selbstkonzeption und Gerechtigkeit eingeteilt werden.

Sicherheitspolitische Aspekte der synthetischen Biologie

Bei der Diskussion über die gesellschaftlichen Folgen der synthetischen Biologie stehen Fragen über sicherheitspolitische Aspekte im Zentrum der Diskussion. Dabei werden im Deutschen unter dem Begriff Biosicherheit sowohl ungewollte Risiken (*biosafety risks*) als auch Fragen zum gezielten Missbrauch der Technologie (*biosecurity risks*) zusammengefasst. Bei den ungewollten Risiken handelt es sich um das Risiko, dass Menschen oder ihre natürliche Umwelt durch synthetische Organismen unbeabsichtigt zu Schaden kommen, beispielsweise durch die ungewollte Freisetzung bei einem Unfall. Bei der Bewertung dieser Risiken gilt es, die grundsätzlichen Unterschiede zur klassischen Gentechnologie herauszuarbeiten und daraus eventuell regulatorischen Handlungsbedarf abzuleiten. Das größte Problem bei der Bewertung der ungewollten Risiken ist die starke Abweichung der synthetischen Organismen von bekannten und gut untersuchten natürlichen Organismen. Anders als bei der Gentechnologie können deshalb etablierte Methoden der Risikobewertung häufig nicht oder nur schwer angewandt werden, da die natürlichen Referenzen und Vergleichswerte fehlen. Zudem steigt der Unsicherheitsfaktor bei Progno-

sen über die Sicherheit der neu entwickelten Organismen, je weiter die Eingriffstiefe und je größer die Komplexität der Veränderungen sind. Bei der Gentechnik werden typischerweise nur einzelne Gene oder kleine Gencluster verändert. Bei der synthetischen Biologie werden hingegen vollständige Synthesewege bis hin zu ganzen Organismen neu konstruiert. Die hierbei verwendeten Gene stammen aus einer Vielzahl natürlicher Quellen oder wurden ganz neu entwickelt. Im letzteren Fall unterscheidet sich die synthetische Biologie wiederum von der klassischen Gentechnologie, weil nicht in der Natur vorkommende Gene oder ein künstliches genetisches Alphabet (XNA = Xeno-Nucleinsäuren) verwendet werden und in den natürlichen Genpool gelangen könnten. Die Auswirkungen von synthetischen Genen oder von XNA auf die natürliche Umwelt sind noch unerforscht. Bei gezielten Freisetzungen wird derzeit diskutiert, vermehrt auf Organismen zu setzen, die auf XNA basieren, da zu erwarten sei, dass sich in einer Art Parallelwelt diese mit natürlichen Organismen nicht austauschen könnten. Allerdings ist diese These noch nicht experimentell validiert. Angesichts dieser Unterschiede gegenüber der Gentechnik kann bei dem gegenwärtigen Kenntnisstand für den Umgang mit dieser neuen Technologie abgeleitet werden, dass die synthetische Biologie nicht automatisch wie die Gentechnik behandelt werden kann. Vor allem in Fällen mit hoher Komplexität und unsicherer Prognose ist demnach das Vorsorgeprinzip verstärkt anzuwenden. Dies bedeutet zunächst, auf Freisetzungen zu verzichten und in Fällen, in denen XNA zum Zuge kommt, auch über ein Moratorium zu diskutieren.

Ein wichtiges Anliegen der synthetischen Biologie ist es, Arbeitsabläufe zu vereinfachen und dafür einen Werkzeugkasten mit standardisierten Bausteinen zu entwickeln. Diese Vereinfachung wird

voraussichtlich zu einem Innovations-schub führen, da immer mehr Menschen außerhalb der traditionellen Biotechnologiegemeinschaft Zugang zu der Technologie erhalten und sich so Synergien entwickeln können. Allerdings bringt diese Entwicklung auch Risiken für die Biosicherheit mit sich. Synthetische Organismen können dann auch von Menschen entwickelt und hergestellt werden, die nur eine geringe biologische Ausbildung haben und nicht über die biologische Weitsicht verfügen, Risiken zu beurteilen oder potenzielle Risikoszenarien zu entwickeln. Bereits jetzt gibt es eine kleine Bewegung, die Garagenbiologie, *Do-it-yourself*-Biologie oder Biohacken betreibt. In diesen Fällen finden die Experimente vollkommen losgelöst vom akademischen Umfeld und den Selbstkontrollmechanismen der Wissenschaft statt. Die Agenda zur Vereinfachung der Arbeitsabläufe und Möglichkeiten des *dual-use* führt auch zu einem erheblichen Biosicherheitsproblem im Fall von vorsätzlichem Missbrauch (*biosecurity risk*). Verbrecherische Staaten, terroristische Organisationen oder Einzelpersonen haben dadurch einen einfachen Zugang zu der Technologie und könnten so die synthetische Biologie für ihre feindseligen Zwecke ausnutzen. Es wird momentan darüber diskutiert, in welcher Form der Zugang zu Informationen und Material für diese Personen eingeschränkt werden kann, ohne dabei gleichzeitig die Wissenschaft zu behindern.

Konzeptionelle ethische Fragestellungen

Neben den Biosicherheitsfragen stellen sich bei dem ethischen Diskurs auch konzeptionelle ethische Fragen. Die synthetische Biologie bewegt sich mit schnellen Schritten darauf zu, neues Leben im Reagenzglas zu kreieren. Dass die Erschaffung von Leben – zumindest von einem niederen Organismus – zu einer realisti-

schen Option in der Biologie geworden ist, ist neu für die Philosophie. Durch diese Entwicklung wird eine Reihe von philosophischen Konzepten infrage gestellt wie zum Beispiel das Konzept des Lebens, unser Verständnis von der Natur oder die menschliche Selbstkonzeption (als Kreator/Schöpfer). In vielen ethischen Theorien werden lebenden Daseinsformen ein anderer moralischer Status und andere Werte zugeschrieben als Artefakten oder Maschinen. Dementsprechend hat die Art und Weise, wie neu geschaffene Organismen konzeptionalisiert werden, auch einen Einfluss darauf, wie Leben ganz generell verstanden und bewertet wird. Semantische Probleme entstehen durch die von einigen Vertretern der synthetischen Biologie verwendeten Metaphern wie zum Beispiel „lebende Maschinen“ oder „künstliche Zellen“, die die Grenzen zwischen Lebendigem und Nicht-Lebendigem verwischen. Für eine effiziente und verlässliche Kommunikation über die Herausforderungen der synthetischen Biologie bedarf es deshalb einer dem Problem angemessenen und möglichst einheitlichen Bestimmung des Lebendigen und einer weitgehend klaren Abgrenzung zu nicht lebender Materie.

Soziale Gerechtigkeit und geopolitische Implikationen

Anwendungen der synthetischen Biologie bringen Herausforderungen für die soziale Gerechtigkeit mit sich. Der Bedarf an landwirtschaftlichem Ausgangsmaterial wird vor allem mit den großindustriellen Anwendungen der synthetischen Biologie – wie der Herstellung von Biotreibstoffen oder Petrochemikalien – weiter steigen. Dies kann wiederum zu Konflikten mit der Lebensmittelproduktion führen, eine weitere Abholzung von Wäldern verursachen oder den großflächigen Ausverkauf von Land in Entwicklungsländern, sogenanntes *land grabbing*, verstärken. Zudem wird die synthetische

Produktion von ursprünglich natürlich hergestellten Produkten, vor allem in betroffenen Entwicklungsländern, große Effekte auf den Handel und die damit verbundenen Strukturen haben. Wie das historische Beispiel Kautschuk zeigt, kann dies zur Destabilisierung der Wirtschaft mit den entsprechenden sozialen Folgen in den produzierenden Ländern führen. Auf der anderen Seite führt eine solche Technologie zu einer erhöhten Unabhängigkeit der Länder, in die die Produktion verlegt wurde, und wird von diesen häufig als wichtige Frage der nationalen Sicherheit eingestuft. Dieser geopolitische Aspekt der synthetischen Biologie wird zum Beispiel von der amerikanischen Politik sehr ernst genommen und zeigt sich in den massiven Investitionen, die das amerikanische Energieministerium in die synthetische Biologie vornimmt. In diesem Zusammenhang steht auch der Kampf um möglichst weitreichende Patente auf synthetische Organismen und die durch sie ermöglichten Anwendungen, um eine Vormachtstellung in diesem Bereich zu erzielen. Auch Fragen nach einem gerechten Zugang zu dem potenziellen Nutzen von Anwendungen der synthetischen Biologie stellen sich.

Vor dem Hintergrund der rasanten Entwicklung der synthetischen Biologie und den potenziell weitreichenden ge-

ellschaftlichen Folgen dieser neuen Technologie ist es besonders wichtig, eine ausgewogene Balance zwischen Selbstregulierung der Wissenschaft und gesellschaftlicher Kontrolle zu finden.

Balance zwischen Selbstregulierung und Kontrolle

Vor allem durch die Geschwindigkeit der wissenschaftlichen Entwicklung ist die Politik auf ein gewisses Maß an Selbstkontrolle durch die Wissenschaft angewiesen, da sie nicht in der Kürze der Zeit regulatorisch reagieren kann. Die Selbstkontrolle der Wissenschaft könnte zum Beispiel durch Schaffung geeigneter interdisziplinärer Diskussionsplattformen unterstützt werden. Außerdem sollten frühzeitige ethische Begleitforschung und kritische Reflexion auf die verantwortungsvolle Wahrnehmung der Forschungsfreiheit in der Wissenschaft gefördert werden. Parallel dazu gilt es, regulatorische Lücken zu schließen. Es ist zum Beispiel momentan unklar, ob *de novo* synthetisierte Organismen unter das Gentechnikrecht oder das Chemikalienrecht fallen. Nur ein kontinuierlicher und enger Austausch zwischen Biowissenschaften, Ethik, Politik und Öffentlichkeit kann dazu beitragen, potenziell fruchtbare Anwendungen der synthetischen Biologie zu fördern und gesellschaftliche Risiken zu minimieren.

Was ist synthetische Biologie?

Die synthetische Biologie ist eine junge und sehr dynamische Technologie, die sowohl konzeptionell als auch methodisch weit über die Gentechnik hinausgeht. Organismen werden nicht mehr lediglich manipuliert, sondern von Grund auf neu konzipiert und konstruiert. Ziel ist es, biologische Systeme zu entwickeln, die so nicht in der Natur vorkommen und die nützliche Eigenschaften besitzen. Die wichtigsten Anwendungsbereiche sind die Entwicklung neuer und kostengünstiger Medikamente, hochwertiger Biotreibstoffe und Herstellungsalternativen für Feinchemikalien in der Postpetroleum-Ära. Außerdem wird an der vollkommenen De-novo-Synthese von Leben im Reagenzglas gearbeitet, um grundlegende Lebensprozesse zu erforschen.