

---

# Synthetische Biologie – ein neuer innovativer Ansatz für die Medizin

Norbert Arnold

Fortschritte in der Medizin sind ohne Grundlagenforschung undenkbar. Besonders die *biologische* Grundlagenforschung spielt in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle. Die Molekularbiologie beispielsweise – vor allem in ihrer anwendungsorientierten Ausprägung in Form der Gentechnologie – führt zu grundsätzlichen Veränderungen in fast allen Disziplinen der Medizin; ohne sie ist weder Diagnostik noch Therapie denkbar, und auch bei der Krankheitsursachenforschung und bei der Herstellung von Medikamenten ist sie unverzichtbar. Weitere Beispiele, wie etwa die Stammzellforschung oder die Genomics, ließen sich ergänzen. Gleichwohl darf nicht vergessen werden, dass nicht immer alle Erwartungen und Hoffnungen, die mit diesen „Zukunftstechnologien“ verbunden werden, in Erfüllung gehen. So hat zum Beispiel das in der Molekularbiologie begründete Konzept der Gentherapie bisher noch nicht zu dem erwarteten medizinischen Durchbruch geführt. Daher ist bei aller Freude über die Fortschritte in den Biowissenschaften und ihre erfolgreichen Anwendungen in der Medizin immer ein realistisches Maß an kritischer Distanz notwendig, will man bezüglich der „Chancen und Risiken“ keinen Fehleinschätzungen erliegen.

Von der Öffentlichkeit weitgehend unbeachtet, entwickelt sich seit den 1980er Jahren ein neues Forschungsgebiet, das derzeit noch fast ausschließlich der Grundlagenforschung zuzurechnen ist, von dem aber ein

überaus großes Innovationspotenzial, besonders auch für die Medizin, erwartet wird: die sogenannte „Synthetische Biologie“.

*Welche Aufgaben und Ziele hat die Synthetische Biologie?*

Die Synthetische Biologie baut auf den inhaltlichen Konzepten und den Methoden der Gentechnologie bzw. Molekularbiologie auf, geht aber weit über diese hinaus.<sup>1</sup> Während es bei der Gentechnologie um die Neu-Kombination (auch über Art-Grenzen hinweg) von DNA geht, die ausschließlich oder doch zumindest größtenteils aus natürlichen Quellen stammt, hat die Synthetische Biologie zum Ziel, DNA (auch in großen Stücken) sowie andere molekulare Bestandteile von Lebewesen künstlich zu synthetisieren und so – als Fernziel – Zellstrukturen, Zellen, Gewebe, Organe und schließlich Organismen nachzubauen und sogar neue zu entwerfen, die es so in der Natur nicht gibt.<sup>2</sup>

Eine synthetische Re- oder Neukonstruktion von Organismen oder von organismischen Bestandteilen ist eine überaus ambitionierte Aufgabe. Dahinter verbirgt sich ein wissenschaftlicher Ansatz mit einem hohen inhaltlich-konzeptionellen Anspruch und mit methodisch-technischen Voraussetzungen, die heute erst ansatzweise verfügbar sind. Die Synthetische Biologie ist daher derzeit tatsächlich noch eine „Zukunfts“-Technologie, von der man schnelle Anwendungserfolge, etwa in der Medizin, nicht erwarten darf; dennoch sind ihre Fortschritte im Bereich der Grundlagenforschung beachtlich.

Aus der Fülle der Projekte der Synthetischen Biologie lassen sich folgende besonders wichtige, aktuelle Forschungsansätze und -ziele herausheben<sup>3</sup>

- Synthese von Genen und vollständigen Genomen;
- Herstellung von „Minimalzellen“, die lediglich eine „Mindestausstattung“ haben, um unter definierten Bedingungen leben zu können;
- Herstellung von „Protozellen“, d. h. künstlicher zellulärer Gebilde, die Eigenschaften natürlicher Zellen besitzen;
- Identifizierung und Charakterisierung von „BioBricks“, die zum Aufbau definierter Synthesewege für Makromoleküle genutzt werden können.<sup>4</sup>

Diese Forschungsansätze dienen bisher in erster Linie dem Erkenntnisgewinn. Der „Nachbau“ biologischer Strukturen und die anschließenden Funktionstests zeigen, ob die Bedeutung dieser biologischen Strukturen richtig verstanden wurde (Richard Feynman: „What I cannot create, I do not understand.“). Die künstliche Reduktion auf minimalistische Strukturen oder die Isolierung von Funktionseinheiten, die dann wieder – wie in einem Baukastensystem – zusammengesetzt werden können, dienen dazu, die Lebensvorgänge in Organismen und letztlich die Grundfrage „Was ist Leben?“ auf molekularer Ebene besser zu verstehen. Die Synthetische Biologie stellt damit eine zusätzliche und vertiefende Möglichkeit zur Verfügung, Hypothesen der Biologie zu überprüfen.

Wissenschaftstheoretisch kann dies als ein weiterer Schritt der Biologie hin zu einer „harten“ Naturwissenschaft verstanden werden. Nach einer ersten Phase des Sammels und Beschreibens (z. B. Systematik in Zoologie und Botanik) und einem zweiten – analytischen – Ansatz (z. B. Physiologie, Zellbiologie, Molekularbiologie) kommt nun ein synthetischer Ansatz hinzu – ähnlich wie in der Chemie mit ihren Analysen und Synthesen.

### *Medizinisch relevante Innovationspotenziale*

Außer dem Erkenntnisgewinn, der mit der Synthetischen Biologie auch für die Medizin verbunden ist, hofft man auch auf neue medizinisch relevante Anwendungsmöglichkeiten.

Dies betrifft vor allem die (einfachere und sicherere) Herstellung von (neuen) Arzneimitteln, z.B. durch die Nutzung von „BioBricks“, die gezielt in Mikroorganismen (oder aus ihnen hergestellte Minimalzellen) eingebracht werden, um dort Medikamente oder deren Vorstufen zu synthetisieren. Ein Beispiel dafür ist die Synthese einer Vorstufe eines Malaria-Wirkstoffes in Hefe.<sup>5</sup> Die pharmazeutische Industrie hofft auf weitere Fortschritte, die über die derzeitigen Gentechnik-basierten Verfahren bei der Herstellung von Biopharmaka hinausgehen.<sup>6</sup>

Mit der Synthetischen Biologie verbinden sich Möglichkeiten, Proteine gezielt so zu konstruieren und zu synthetisieren, dass sie im pharmazeutisch-medizinischen Bereich als neuartige Enzyme, Medikamente oder Impfstoffe verwendet werden können.

Ein besonders interessanter Ansatz wird mit der Weiterentwicklung von DNA-Vakzinen verfolgt. Da es mittlerweile gelingt, auch sehr lange DNA-Sequenzen zu synthetisieren, eröffnet die Synthetische Biologie neue Perspektiven für die Herstellung und den Einsatz von DNA-Impfstoffen.

Schließlich könnte die Synthetische Biologie die bisher wenig erfolgreiche Gentherapie befruchten, etwa indem sie neue und bessere Vektoren, aber auch geeignetere Regulatorsequenzen für eine Genexpression zur Verfügung stellt.

## Stand der Forschung

Die Synthetische Biologie entwickelt sich mit einer großen Dynamik. Der Stand der Forschung<sup>7</sup> sowie die daraus erkennbaren Perspektiven werden im Folgenden an wenigen ausgewählten Beispielen skizziert.

### DNA-Synthese und Austausch von Genomen

Einer Arbeitsgruppe um Craig Venter ist es gelungen, ein vollständiges Bakteriengenom *in vitro* zu synthetisieren und anschließend so in eine Bakterienzelle einzubringen, dass diese ausschließlich durch das neue, synthetisch hergestellte Bakteriengenom gesteuert wurde.<sup>8</sup> Das synthetisierte Genom enthielt die genetische Information von *Mycoplasma mycoides* und umfasste 1.080.000 bp. Es wurde aufgrund der seit Längerem verfügbaren Sequenzierungsdaten chemisch synthetisiert, und zwar zunächst in Teilstücken, die dann in einem komplizierten Verfahren unter Zuhilfenahme von Klonierungsschritten in *Escherichia coli* und in Hefe zusammengefügt wurden. Eine *Mycoplasma-capricolum*-Zelle wurde durch das Einbringen des synthetisch hergestellten Genoms in eine *Mycoplasma-mycoides*-Zelle umgewandelt. Zu Recht wurde diese im Mai 2010 publizierte Leistung nicht nur in Fachkreisen, sondern auch in der Öffentlichkeit gewürdigt.<sup>9</sup>

Sowohl die *In-vitro*-Synthese eines relativ großen Bakteriengenoms als auch die Einbringung eines solchen Genoms in eine Bakterienzelle (unter Wahrung seiner Funktionsfähigkeit) sind schon jeweils allein für sich genommen herausragende wissenschaftliche Leistungen. Das Team von Craig Venter hat in den letzten Jahren dazu systematisch die Vorarbeit geleistet: 2008 wurde erstmals die erfolgreiche *In-vitro*-Synthese eines großen Bakteriengenoms<sup>10</sup> und 2007 und 2009 die „Transplantation“<sup>11</sup> eines (damals allerdings

„natürlichen“) Bakteriengenoms in eine andere Bakterienzelle publiziert.

### Minimalzellen und Protozellen

Schon lange ist bekannt, dass auch vergleichbare Organismen sehr unterschiedliche DNA-Gehalte haben können. Daraus und aus anderen Hinweisen lässt sich schließen, dass es neben der für die jeweils spezifische Lebensweise notwendigen genetischen Ausstattung auch DNA-Abschnitte gibt, die Gene enthalten, die für das Überleben des betreffenden Organismus nicht unbedingt notwendig sind, und dass es darüber hinaus auch DNA-Abschnitte gibt, die keinen erkennbaren Informationsgehalt haben. Die Sequenzierungsprojekte der letzten Jahrzehnte haben diese Vermutung bestätigt.

Ein Ziel der Synthetischen Biologie ist es, „Minimalzellen“ herzustellen, die lediglich die unbedingt notwendige zelluläre „Grundausrüstung“ besitzen und bei denen alle „überflüssigen“, d. h. aus Sicht des Experimentators unter den Lebensbedingungen im Labor nicht unbedingt notwendigen DNA-Abschnitte eliminiert wurden. Bei einem für die Biotechnologie besonders wichtigen Organismus, dem Bakterium *Escherichia coli*, gelang es beispielsweise das Genom auf 3.700.000 bp zu reduzieren.<sup>12</sup>

An einer weiteren Verminderung der genetischen Ausstattung – bei *E. coli* und anderen für die Biotechnologie wichtigen Mikroorganismen – wird gearbeitet. Ziel ist es, Minimalzellen zu erhalten, die sich durch das Fehlen langer, nicht notwendiger DNA-Abschnitte und infolgedessen durch eine minimale Proteinausrüstung auszeichnen und die dadurch in der Lage sind, gezielt eingebrachte fremde Gene (die etwa für ein medizinisch nützliches Protein codieren) besonders gut zu exprimieren. Auch unter Aspekten der biologischen Sicherheit haben solche Zellen

Vorteile: Aufgrund ihrer minimalistischen Ausstattung sind sie außerhalb der definierten Lebensbedingungen im Labor kaum überlebensfähig und stellen daher, etwa bei einer unbeabsichtigten Freisetzung, ein sehr viel geringeres Risiko dar.

Im Gegensatz zu „Minimalzellen“ handelt es sich bei den sog. „Protozellen“ nicht um natürliche, sondern um künstliche Gebilde, die zellulären Strukturen nachempfunden werden, indem etwa reproduktionsfähige Membran-Vesikel-Systeme hergestellt werden. Auch diese künstlichen Kompartimente können für biotechnische Zwecke genutzt werden. Für die Grundlagenforschung sind sie deshalb interessant, weil mit ihnen Vorstufen lebender Zellen experimentell erstellt und damit Modelle der Entstehung des Lebens untersucht werden können.

### Gezielte Veränderungen molekularer Strukturen

In den letzten Jahren sind immer wieder zum Teil spektakuläre Eingriffe in die molekularen Strukturen von Zellen gelungen. Sie lassen erahnen, welche Optionen der geplanten und gezielten Veränderung die Synthetische Biologie künftig eröffnen könnte.

Einer kalifornischen Arbeitsgruppe gelang es beispielsweise, RNA-Moleküle, die nicht nur die Fähigkeit haben, genetische Informationen zu speichern, sondern gleichzeitig auch als Enzyme zu wirken, so zu verändern, dass ein selbstreplizierendes RNA-System entsteht.<sup>13</sup> Dieses Experiment ist u. a. auch deshalb interessant, weil es Hinweise auf die Entstehung des Lebens geben könnte. Es besteht nämlich Grund zu der Annahme, dass die ersten Organismen nicht DNA, sondern RNA als Informationsträger (und in der Doppelfunktion auch als Katalysatoren) besaßen.

Ein weiteres Beispiel, das die weitreichenden Möglichkeiten der Synthetischen Biologie, zelluläre Strukturen von

Organismen gezielt zu verändern, erahnen lässt, betrifft den genetischen Code und die Translation in Proteine. Normalerweise ist die kleinste Informationseinheit auf der DNA und der RNA ein Triplet, d. h. jeweils drei Nukleotide (der DNA oder RNA) codieren für eine Aminosäure (eines Proteins). Einer Forschergruppe aus Cambridge gelangen gezielte Veränderungen, sodass statt der Triplets Quadruplets als kleinste Informationseinheiten gelesen und dadurch der gezielte Einbau von normalerweise in der Natur nicht vorkommenden Aminosäuren in Proteine (besser) ermöglicht wird.<sup>14</sup> Dies erforderte an mehreren Stellen der molekularen Ausstattung der Zellen (Ribosomen, tRNA etc.) gezielte Eingriffe. Durch diese Veränderung des Leserasters wird die genetische Speicherkapazität wesentlich erweitert, nämlich von maximal 64 (=  $4^3$ ) auf 256 (=  $4^4$ ) Kombinationsmöglichkeiten. Dieses Experiment eröffnet die Perspektive, in Zellen neben dem normalen Translationssystem ein Parallelsystem (orthogonales System) zu etablieren, das sich zum Beispiel für die *In-vivo*-Synthese nicht natürlich vorkommender Polymere eignet. Ein verändertes Leseraster, ein nicht-natürlicher genetischer Code, könnte außerdem auch zu einer höheren biologischen Sicherheit von biotechnischen Maßnahmen beitragen.

### *Was ist Leben?*

Die jüngste Veröffentlichung von Craig Venter führte nicht nur zu einer verstärkten Diskussion in Fachkreisen, sondern löste auch in der breiten Öffentlichkeit wieder einmal eine Debatte über die moderne Biologie aus. In vielen Zeitungen und Zeitschriften wurden die aktuellen Forschungsergebnisse thematisiert:

Die *Bild*-Zeitung<sup>15</sup> titelt „Hier spielt Craig Venter Gott“ und spricht von einem „göttlichen Experiment“, in dem



„das erste künstliche Lebewesen“ geschaffen worden sei. Auch *Der Spiegel*<sup>16</sup> scheut sich nicht, die Biologie zu einer „Konkurrenz für Gott“ hochzustilisieren und alte Klischees – wie z. B. „Frankensteins Monster“ – zu bemühen, um das Interesse der Leser zu wecken. Ebenso spricht *Die Zeit*<sup>17</sup> von einem „Schöpfungsakt“, einer „Art zweite(r) Schöpfung im Labor“ und davon, dass „ein Stoff aus Retorten und Maschinen ... erstmals zum Leben“ erwacht sei. Als positives Beispiel, wie Medien differenzierter mit diesem zugegebenermaßen komplizierten und wenig leserfreundlichen Thema umgehen können, kann dagegen die *Frankfurter Allgemeine Zeitung*<sup>18</sup> zitiert werden. Sie bewertet die Forschungsergebnisse nüchtern: „Die Suggestion, mit der funktionierenden Implantation der synthetischen DNA sei nun endgültig die Schwelle zur gelungenen Nachbildung von Leben überschritten, ist definitiv falsch.“

In der Öffentlichkeit wird meist nicht wahrgenommen, dass nicht ein „künstliches Lebewesen“ von Craig Venter erzeugt wurde, sondern nur ein sehr langes DNA-Molekül. Dieses Molekül wurde wohl chemisch synthetisiert, aber die darin enthaltene genetische Information entstammt noch nicht einmal der menschlichen Kreativität, sondern einem natürlichen Vorbild. Ohne die Leistung Craig Venters schmälern zu wollen, muss deutlich darauf hingewiesen werden, dass die Biologie noch sehr weit von einer Erzeugung „künstlicher Lebewesen“ entfernt ist.

Auch wenn in vielen (englischsprachigen) Fachartikeln der Begriff „creation“ verwendet wird, steht doch völlig außer Frage, dass das Erzeugen von Artefakten im Labor in keiner Weise mit dem göttlichen Schöpfungsakt verglichen werden kann. In jedem Fall bleibt das, was im Labor hergestellt wird, immer ein Teil der Schöpfung und kann diese niemals transzendieren.

Die grundsätzliche Frage, was Leben ist, können die „Lebenswissenschaften“ nicht mit hinreichender Präzision be-

antworten. Es lassen sich wohl für Lebewesen typische Kriterien benennen, in Grenzfragen<sup>19</sup> reichen sie jedoch nicht aus. Die Forschungsergebnisse der Synthetischen Biologie erhärten die Vorstellung, dass Leben eine „Systemeigenschaft“ ist, die komplexen Strukturen (Organismen), aber nicht ihren molekularen Bestandteilen (DNA, RNA, Proteinen, Molekülkomplexen, Organellen ...) zukommt. Die DNA ist ein chemisches Molekül und „lebt nicht“. Daher kann sie, wie Craig Venter gezeigt hat, im großen Stil künstlich hergestellt werden, ohne dass sie – in Zellen eingebracht – ihre biologische Funktionsfähigkeit verlieren würde. Wäre die *vis vitalis* nicht schon längst als wissenschaftliche Hypothese verworfen, dann würde sie durch die Synthetische Biologie endgültig widerlegt.

### *Gesellschaftliche Herausforderungen*

Innovationen sind notwendig, weil sie zur Lösung von wichtigen Problemen (z. B. in den Bereichen Ernährung, Gesundheit, Umwelt, Energie) beitragen. Innovationen für die Medizin erhalten durch den hohen Wert, der der Gesundheit zugemessen wird, eine besondere Legitimation. Die damit verbundenen (gesellschaftlichen, religiösen, weltanschaulichen, ethisch-moralischen, rechtlichen) Grenzüberschreitungen werden daher oft (als „notwendiges Übel“) akzeptiert.

Bei medizinisch relevanten Innovationen, die aus den Biowissenschaften kommen, ist besondere Sorgfalt und Vorsicht angebracht, zumal nicht nur ihre „Chancen“, sondern auch ihre „Risiken“ (gesundheitliche, soziale, ethische, rechtliche Probleme) den Menschen unmittelbar betreffen. Dies gilt auch für die Synthetische Biologie. Daher müssen alle Standards in Bezug auf Sicherheits- und ethische Fragen, die für die moderne Biologie und Medizin ent-

wickelt wurden, bei der Synthetischen Biologie Anwendung finden.

Nach dem aktuellen Kenntnisstand scheint die Synthetische Biologie keine grundsätzlich neuen ethischen Fragen aufzuwerfen, die über die der Molekularbiologie und Gentechnologie hinausgehen. Die Brisanz der (oben skizzierten) Fragen bezüglich des Lebens („unzulässige Eingriffe in die Schöpfung“, Verwischung der Grenzen zwischen „toter Materie“ und Lebewesen usw.) sowie die im Zusammenhang mit der wirtschaftlichen Nutzung entstehenden Fragen der Bio-Patentierung wird jedoch voraussichtlich zunehmen.

Bezüglich der biologischen Sicherheit scheinen die für das Arbeiten mit gentechnisch veränderten Organismen entwickelten Sicherheitsstandards ausreichend zu sein. Dennoch muss die weitere Entwicklung der Synthetischen Biologie von einer Sicherheitsforschung begleitet werden. Ein besonderes Augenmerk sollte auf den Missbrauchspotenzialen der Synthetischen Biologie liegen.<sup>20</sup> Vor dem Hintergrund neuer, weitreichender Möglichkeiten der DNA-Synthese besteht die latente Gefahr des terroristischen Missbrauchs.<sup>21</sup>

Die Abwägung zwischen den Chancen und Risiken der Synthetischen Biologie bedarf wie in anderen innovativen Forschungsdisziplinen der gesellschaftspolitischen Begleitung, obwohl derzeit kein akuter Regelungsbedarf erkennbar ist. Auch für dieses neue innovative Forschungsfeld gilt die Mahnung, „die menschendienliche Perspektive nicht aus den Augen zu verlieren“.<sup>22</sup>

### *Anmerkungen*

<sup>1</sup> Die Idee einer „Synthetischen Biologie“ lässt sich bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts zurückverfolgen. Mit der Entwicklung der Gentechnologie wurde das Konzept der Synthetischen Biologie zunächst auf diese bezogen – vgl. dazu *Hobom, Barbara: Surgery of ge-*

nes: At the doorstep of synthetic biology. In: *Medizinische Klinik* 75 (1980), 14–21 – erhielt jedoch in der Folgezeit andere Schwerpunkte, die nicht mit denen der Gentechnologie deckungsgleich sind.

<sup>2</sup> Weitere Informationen zur Definition der Synthetischen Biologie: <http://syntheticbiology.org.FAQ.html>.

<sup>3</sup> Vgl. *Deutsche Forschungsgemeinschaft / Deutsche Akademie der Technikwissenschaften / Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (Hrsg.): Synthetische Biologie. Stellungnahme. Juli 2009.* [http://www.dfg.de/download/pdf/dfg\\_im\\_profil/reden\\_stellungnahmen/2009/stellungnahme\\_synthetische\\_biologie.pdf](http://www.dfg.de/download/pdf/dfg_im_profil/reden_stellungnahmen/2009/stellungnahme_synthetische_biologie.pdf).

<sup>4</sup> Eine Forschergruppe des MIT (Massachusetts Institute of Technology) erstellt eine Sammlung derartiger „BioBricks“. Der Katalog „Registry of Standard Biological Parts“ ist im Internet zu finden unter <http://partsregistry.org>.

<sup>5</sup> *Ro, Kyun / Paradise, Eric M. / Ouellet, Mario / Fisher, Karl J. / Newman, Karyn L. / Ndungu, John M. / Ho, Kimberly A. / Eachus, Rachel A. / Ham, Timothy S. / Kirby, James / Chang, Michelle C. Y. / Withers, Sydnor T. / Shiba, Yoichiro / Sarpong, Richmond / Keasling, Jay D.:* Production of antimalarial drug precursor artemisinic acid in engineered yeast. In: *Nature* 440 (2006), 940–943.

<sup>6</sup> Vgl. <http://www.vfa.de/vfa-bio-de/vb-forschung/biobricks-bausteine-der-synthetischen-biologie.html>.

<sup>7</sup> Vgl. die Review-Artikel *Haseloff, Jim / Ajioka, Jim:* Synthetic biology: history, challenges and prospects. In: *Journal of the Royal Society Interface* 6 (2009), S389–S391 (<http://rsif.royalsocietypublishing.org>); *Alterovitz, Gil / Muso, Taro / Ramoni, Marco F.:* The challenges of informatics in synthetic biology: from biomolecular networks to artificial organisms. In: *Briefings in Bioinformatics* 11 (2010), 80–95; *Marguet, Philippe / Balagadde, Frederick / Tan, Cheemang / You, Lingchong:* Biology by design: reduction and synthesis of cellular components and behaviour. In: *Journal of the Royal Society Interface* 4 (2007). 607–623; *Forster, Anthony C. / Church, George M.:* Synthetic biology projects in vitro. In: *Genome Research* 17 (2007), 1–6.

<sup>8</sup> *Gibson, Daniel G. / Glass, John I. / Latigue, Carole / Noskov, Vladimir N. / Chuang, Ray-Yuan / Algire, Mikkel A. / Benders, Gwynedd A. / Montaguier, Michael G. / Ma, Li / Moodie, Monzia M. / Merryman, Chuck / Vashee, Sanjay / Krishnakumar, Radha / Asad-Garcia, Nacyra / Andrews-Pfannkoch, Cynthia / Denisova,*

Evgeniya A. / Young, Lei / Qi, Zhi-Qing / Segall-Shapiro, Thomas H. / Calvey, Christopher H. / Parmar, Prashanth P. / Hutchison, Clyde A. III / Smith, Hamilton O. / Venter, J. Craig: Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. In: Science ([www.sciencexpress.org](http://www.sciencexpress.org), 20.5.2010).

<sup>9</sup> Zur kritischen Auseinandersetzung seitens der Wissenschaft vgl. z. B. Social Report: Where next for synthetic life? In: New Scientist ([www.newscientist.com/article/mg20627622.600-special-report-where-next-for-synthetic-life.html](http://www.newscientist.com/article/mg20627622.600-special-report-where-next-for-synthetic-life.html), 26.5.2010).

<sup>10</sup> Gibson, Daniel G. / Benders, Gwynedd A. / Andrews-Pfannkoch, Cynthia / Denisova, Eveniya A. / Baden-Tillson, Holly / Zaveri, Jayshree / Stockwell, Timothy B. / Brownly, Anushka / Thomas, David W. / Algire, Mikkel A. / Merryman, Chuck / Young, Lei / Noskov, Vladimir N. / Glass, John I. / Venter, J. Craig / Hutchison, Clyde A. III / Smith, Hamilton O.: Complete chemical synthesis, assembly, and cloning of a *mycoplasma genitalium* genome. In: Science 319 (2008), 1215–1220.

<sup>11</sup> Lartigue, Carole / Glass, John I. / Alperovich, Nina / Pieper, Rembert / Parmar, Prashant P. / Hutchison, Clyde A. III / Smith, Hamilton O. / Venter, J. Craig: Genome transplantation in bacteria: changing one species to another. In: Science 317 (2007), 632–638; Lartigue, Carole / Vashee, Sanjay / Algire, Mikkel A. / Chuang, Ray-Yuan / Benders, Gwynedd A. / Ma, Li / Noskov, Vladimir N. / Denisova, Evgeniya A. / Gibson, Daniel G. / Assad-Garcia, Nacyra / Alperovich, Nina / Thomas, David W. / Merryman, Chuck / Hutchison, Clyde A. III / Smith, Hamilton O. / Venter, J. Craig / Glass, John I.: Creating bacterial strains from genomes that have been cloned and engineered in yeast. In: Science 325 (2009), 1693–1696.

<sup>12</sup> Pósfai, György / Plunkett, Guy III / Fehér, Tamás / Frisch, David / Keil, Günther M. / Umenhoffer, Kinga / Kolisnychenko, Vitaliy / Stahl, Buffy / Sharma, Shamik S. / de Arruda, Monika / Burland, Valerie / Harcum, Sarah W. / Blattner, Frederick R.: Emergent properties of reduced-genome *Escherichia coli*. In: Science 312 (2006), 1044–1046.

<sup>13</sup> Lincoln, Tracey A. / Joyce, Gerald F.: Self-sustained replication of RNA enzyme. In: Science 323 (2009), 1229–1232.

<sup>14</sup> Neumann, Heinz / Wang, Kaihang / Davis, Lloyd / Garcia-Alai, Maria / Chin, Jason W.: Encoding multiple unnatural amino acids

via evolution of a quadruplet-decoding ribosome. In: *Nature* 464 (2010), 441–444.

<sup>15</sup> <http://www.bild.de/BILD/news/2010/05/21/genforscher-craig-venter/darf-er-gott-spielen.html>.

<sup>16</sup> <http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-68525307.html>.

<sup>17</sup> <http://www.zeit.de/2010/22/N-Biologie?page0all&print=true> und <http://www.zeit.de/2006/08/N-Bio-Bricks>.

<sup>18</sup> <http://www.faz.net/s/RubC3FFBF288EDC421F93E22EFA74003C4D/Doc~EAE2DA1ECEA324761A372640881C88AD9~ATpl~E-common~Scontent.html>.

<sup>19</sup> Vgl. *Deplazes, Anna / Huppenbauer, Markus*: Synthetic organisms and living machines. Positioning the products of synthetic biology at the borderline between living and non-living matter. In: *Systems and Synthetic Biology* 3 (2009), 55–63.

<sup>20</sup> Vgl. *DFG / acatech / Leopoldina* (wie Anm. 3), 26–29.

<sup>21</sup> *Konrad-Adenauer-Stiftung (Hrsg.)*: Vernetzte Sicherheit und öffentliche Gesundheit. Von „natürlichen“ Pandemien und „willkürlichem“ Bioterrorismus. Sankt Augustin / Berlin 2010.

<sup>22</sup> *Die deutschen Bischöfe*: Der Mensch: sein eigener Schöpfer? Zu Fragen der Gentechnik und Biomedizin (Bonn, 7.3.2001), 13.