

BERNHARD IRRGANG

SYNTHETISCHE BIOLOGIE UND KÜNSTLICHE ORGANISMEN

Irrgang, Bernhard, geb. 1953, Prof. Dr. phil. habil. Dr. theol., Lehramtsassessor; Institut für Philosophie der TU Dresden; Professur für Technikphilosophie; Studium der Philosophie, katholischen Theologie, Germanistik und Indologie Universität Würzburg 73/82, kath. Theologie und Philosophie Passau und München 83/86. Erstes Staatsexamen Lehramt Gymnasien 1979, Lehrbeauftragter in Philosophie Universität Würzburg 1982/83; Promotion in Philosophie (Würzburg) 1982; Zweites Staatsexamen 1985 (Landshut); 1985 TU Braunschweig wiss. Hilfskraft in Philosophie; 1986–1991 Akad. Rat a. Z. am Institut für Moralthologie der Universität München; Promotion in Theologie (Würzburg) 1991; Wiss. Mitarbeiter am Institut für Systematische Theologie der Universität Siegen u. Lehrbeauftragter des Genzentrums in München 1992/93; Dozent für Philosophie an der VHS München 1985–1998, an der VHS Siegen 1992/93. Professor für Technikphilosophie an der TU Dresden seit 1993; Habilitation in Philosophie (Bamberg) 1996; lehrt Technikethik auch fakultätsübergreifend an der TU in sechs Fakultäten; internationale Lehre mit Schwerpunkten in Süd-, Südost- und Ostasien, Südamerika und den USA über Kulturtheorie der Technik, Technologie- und Kulturtransfer, Technoscience und Technoresearch, hypermoderner Technologie (Gentechnologie, Biomedizin, Informationstechnologie, KI und Expertensysteme, Robotik) Neurophilosophie und Anthropologie; Grenzfragen Biologie/Philosophie; angewandte und hermeneutische Ethik.

Neuere Veröffentlichungen: *Posthumanes Menschsein? Künstliche Intelligenz, Cyberspace, Roboter, Cyborgs und Designer-Menschen – Anthropologie des künstlichen Menschen im 21. Jahrhundert*, Stuttgart 2005; *Einführung in die Bioethik*, München 2005; *Technologietransfer transkulturell. Komparative Hermeneutik von Technik in Europa, Indien und China*; Frankfurt u. a. 2006; *Hermeneutische Ethik. Pragmatisch-ethische Orientierung für das Leben in technologisierten Gesellschaften*; Darmstadt 2007; *Gehirn und leiblicher Geist. Phänomenologisch-hermeneutische Philosophie des Geistes*, Stuttgart 2007; *Technik als Macht. Versuche über politische Technologie*; Hamburg 2007; *Philosophie der Technik*; Darmstadt 2008; *Der Leib des Menschen. Grundriss einer phänomenologisch-hermeneutischen Anthropologie*; Stuttgart 2009; *Grundriss der Technikphilosophie. Hermeneutisch-phänomenologische Perspektiven*; Würzburg 2009; *Von der technischen Konstruktion zum technologischen Design. Philosophische Versuche zur Theorie der Ingenieurspraxis*; Münster 2010; *Homo Faber. Arbeit, technische Lebensform und menschlicher Leib*; Würzburg 2010; *Internetethik. Philosophische Versuche zur Kommunikationskultur im Informationszeitalter*; Würzburg 2011; *Projektmedizin. Neue Medizin, technologie-induzierter Wertewandel und ethische Pragmatik*; Stuttgart 2012.

Mit der synthetischen Biologie werden Forscher demnächst Organismen produzieren, die es bisher so in der Natur nicht gab. Die synthetische Biologie lässt sich nicht mehr nur als Manipulation von Lebewesen, sondern auch als Kreation von neuen Lebensformen verstehen. Der kulturell tief verwurzelte Topos von der künstlichen Erschaffung von Leben sowie der Lebensbegriff rücken damit generell in das Zentrum der Aufmerksamkeit. Ziel der synthetischen Biologie ist es, biologische Systeme, die in der Natur nicht vorkommen, von Grund auf zu entwerfen und herzustellen. Paradigmatisch dafür ist der Versuch, einen Organismus herzustellen. Der unter dem Begriff des Minimalen Bakteriengenoms eingereichte Patentantrag des amerikanischen J. Craig Venter-Instituts vom Mai 2007 ist Ausdruck für erste Erfolge auf diesem ehrgeizigen Weg. Der Organismus könne, so berichtete Venters Forschergruppe Anfang 2008, zwar wachsen und sich reproduzieren, darüber hinaus habe er aber keine spezifischen Fähigkeiten mehr.¹

1. Synthetische Lebewesen im öffentlichen Disput

Die gängige Meinung kann man wie folgt umschreiben: Die synthetische Biologie wird in der Öffentlichkeit wohl oder übel als Schöpfer von Homunculi wahrgenommen. Goethes Faust und Shelleys Frankenstein sind nun einmal kulturelle Chiffren, die hier durchschimmern, auch wenn der häufig als Todschlagargument verwendete Vorwurf des Gott-Spielens nicht fern liegt. Forscher und Öffentlichkeit sind der Suggestivkraft solcher Vergleiche gleichermaßen ausgesetzt. Mit dem Schritt von der Manipulation zur Kreation wird sich das Selbstbild des Baconschen Homo Faber wandeln, und zwar hin zum Homo Creator. Dieser wird nicht mehr lediglich Unzulänglichkeiten ausbügeln, sondern eine Natur erschaffen, die – jedenfalls dem Anspruch nach – keine Unzulänglichkeiten mehr aufweist. Die Nutzung der Natur als Ressource durch Kultivierung, Manipulation oder Ausbeutung lässt sich kaum vergleichen mit ihrer Neuerfindung. Zwar könnte dieses Vorgehen – entsprechende Sicherheitsmaßnahmen vorausgesetzt – in vielen konkreten Fällen gerechtfertigt sein. Aber das Paradigma des Homo Creator kann dazu führen, dass wir unser Verständnis von der Natur der Lebewesen überschätzen, wenn wir glauben, sie nicht nur manipulieren, sondern in besserer Form neu entwerfen zu können. Gerade dann, wenn man in Rechnung stellt, dass die synthetische Biologie einem Paradigma der Herstellung neuartiger maschinengleicher En-

¹ J. BOLDT/O. MÜLLER: Leben zum selber machen (2010), S. 42f.

titäten folgt, erscheint ein genauer Blick auf diese Arten von Risiken dringend erforderlich. Ethische Fragen zur synthetischen Biologie sind keine lästigen Pflichtübungen, die sich auslagern lassen. Vielmehr sollten sie Teil des Studiums sowie des Forschungsalltags werden.²

Leben herstellen – ist nicht schon das Zusammenspiel dieser beiden Worte ein Widerspruch? Gerade bezogen auf den Begriff des Lebens gibt es immer eine doppelte Perspektive: Die Perspektive der angemessenen naturwissenschaftlichen Beschreibung auf der einen Seite und die Perspektive des möglichen inneren Wertes auf der anderen Seite. Wenn sie sagen, wir wollen Leben schaffen, das aber absolut sicher und kontrollierbar ist, so liegt hierin ein Widerspruch. Wenn es Leben ist, dann ist es spontan weiterentwicklungsfähig und gerade nicht berechenbar – und absolut kontrollierbar. Wenn es absolut kontrollierbar ist, dann stellt sich die Frage, ob hier überhaupt von Leben im engeren Sinn gesprochen werden kann.³ Die Synthetische Biologie neigt dazu, das, was sie an Leben vielleicht ermöglicht, gar nicht als Leben, sondern nur als Maschine, nur als Produkt zu betrachten. Daher können die Gefahren der Synthetischen Biologie weniger im Machen als in der Grundhaltung angesehen werden, die dem Machen zu Grunde liegt. Die viel bescheidenere Position „Ich helfe bei der Selbstentstehung von Leben“ wäre insgesamt angemessener.⁴

2. Synthetische Biologie als hypermoderne Technologie: Transformation des Technologischen

Die synthetische Biologie ist die Fortsetzung der Gentechnik. Es handelt sich um technische Veränderungen der belebten Natur. Das Ziel besteht darin, die molekularen Grundlagen der Stoffwechsel- und Fortpflanzungsfunktion einfacher einzelliger Organismen so genau und vollständig zu verstehen, wie das aus der Natur nicht bekannt ist. Es geht um die Voraussetzungen des Lebens und Lebendigen und um die Entdeckung der molekularen Struktur des Genoms. Der molekulare Schlüssel zum Verständnis des Phänomens Leben in seiner ganzen Breite soll ebenfalls erforscht werden. Es gibt reduktionistische Erklärungsstrategien. Die Erschaffung von Leben im Labor ist ein zentrales Motiv des modernen Menschen.⁵ STEPHANE LEDUC schrieb 1912 ein Buch mit

² Ebd., vgl., S. 45.

³ G. MAIO: Der Mensch als Schöpfer (2010), S. 39–41.

⁴ Ebd., S. 41.

⁵ J. BOLDT/O. MÜLLER: Synthetische Biologie (2009), S. 9–11.

dem Titel *La Biologie Synthétique*, seine Überlegungen basierten auf der kontrollierten Reproduktion von Beobachtungen. Auch JACQUES LÖEB hat 1911 die praktische Kontrolle und Anwendung zur Schaffung biologischen Wissens herangezogen. Voraussetzung dieses naturwissenschaftlichen Verständnisses der Biologie ist, dass sich die Phänomene des Lebendigen restlos zurückführen lassen auf einfache Kräfte und Gesetze, die den Organismus beherrschen und in ihren Wirkungsweisen eindeutig vorher zu bewerten sind. Diese können angewandt werden auf die Frage, wie Leben entstehen kann. Es konstituierte sich eine erfolgreiche erzeugende Biologie, für welche die technische Umsetzung konstitutiver Bestandteil der naturwissenschaftlichen Praxis und keineswegs zufällig ist. Der Zufall war Teil des naturwissenschaftlichen Forschens, selbst seiner Kontrollpraxis. Die reproduzierbare Anwendung ist die Bestätigung für die durch Analyse gewonnenen Ergebnisse. Aufgabe ist es, die Entstehung des Lebens aus dem Unbelebten nachzuvollziehen. Nachbilden und Neubilden der Natur und der Fähigkeiten der Naturgesetze als Aufgabe: Kennzeichnend ist die ingenieurwissenschaftliche Grundidee. Es gibt eine ganze Reihe von Forschungsprojekten zu diesem Bereich, die in schneller Entwicklung sind. Wichtig darunter ist das Projekt des Minimalorganismus, der Minimalzelle, als Basis für die Erforschung weiterer Funktionen einer Zelle.

Synthetische Biologie überwindet die Artgrenzen der natürlichen Evolution, an welche die bisherigen Züchtungstechniken gebunden waren. Die neue Form der Biologie belegt das instrumentelle Potential einer biologischen Mikrotheorie. Das medizinische Modell biotechnologischer und biomedizinischer Forschung wurde im Verlauf des 18. und 19. Jahrhunderts entwickelt. Es beinhaltet eine isolierende, naturwissenschaftliche, organzentrierte Denk- und Vorgehensweise. Das biomedizinische Modell, das Krankheit auf die rein körperliche Seite einschränkt, ist gekennzeichnet durch den Zusammenhang von Krankheitserfahrung und -erleben, die Naturgeschichte der Krankheit und damit die Geist-Körper-Komplementarität. Das biomedizinische Modell reduziert die Krankheitsgeschichte auf einen Faktor, den biochemischen Defekt. Als Begründer des klassischen Konzepts einer „Bioingenieurkunst“ und eines genetischen Determinismus gilt CLAUDE BERNARDS *Introduction a l'étude de la médecine expérimentale* aus dem Jahr 1865. JACQUES LOEB bemühte sich um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert um eine experimentelle Physiologie der Entwicklung und um einen experimentellen Beweis für die Evolution. Mit dem Übergang von der Modellierung des Gens zur Rekombination von Genen in bislang unbekannter Form auch über Artgrenzen hinweg vollzog sich die erste Transformation im Leitbild der Bioingenieurkunst hin zur synthetischen

Biologie. Nun entsteht das Leitbild einer molekulargenetischen Bioingenieurkunst und die Transformation der Bioingenieurkunst in eine Technologie im Sinne von Technoresearch.⁶

Mit der Gentechnik ist die Biologie in ihre synthetische Phase eingetreten, so wie mit FRIEDRICH WÖHLERS Synthese des Harnstoffs im Jahre 1828 die synthetische Chemie entstand.⁷ Synthetische Biologie als Neukonzeption und Optimierung von Genen versteht sich nicht mehr als wie auch immer geartete Wiedergabe der Wirklichkeit, sondern schafft sich ihren Gegenstand, außer mit Theorien und Hypothesen, auch mit technischen Mitteln. Damit ist Gentechnik Technik und nicht mehr Naturwissenschaft, die Gesetze entdeckt. Allerdings ermöglicht für ERNST LUDWIG WINNACKER synthetische Biologie eine Beschreibung der Natur mit effektiveren Methoden und eröffnet eine neue Dimension der Mutationsanalyse.⁸ Das Protein-Engineering führt zu einer Neusynthese von Enzymen auf dem Reißbrett.⁹ Simulation und (Re-)Konstruktion sind Kennzeichen der synthetischen Biologie als neue Denkweise und Art zu handeln. Gentechnologie erweist sich damit als Hybrid von naturwissenschaftlicher und technischer Forschung, als neuer Wissens- und Handlungstyp, der sich erst im 21. Jahrhundert voll entfalten wird, als neue Forschungspraxis. Die Bioingenieurkunst verspricht die Synthese von Biologie und Technik. Das Leitbild aber gibt nicht die Biologie ab, sondern die Ingenieurkunst. Es handelt sich um ein Konstruktionsideal. Dafür sind wichtig (1) die genetische Codierung, (2) die epigenetische organismische Entwicklung und (3) die Konstruktionsziele für den Organismus. Die Übergänge zwischen herkömmlicher Züchtung, der Manipulation einzelner Gene bis hin zur Herstellung von Minichromosomen und synthetischem Leben sind fließend. Synthetisches Leben ist daher möglicherweise der falsche Ausdruck, besser wäre „synthetische Organismen“.

Die technologische Konstruktion artifizierender Lebensformen setzt in hohem Maße wissenschaftliches und technisches Know-that und Know-how voraus. Allerdings ist anzunehmen, dass artifizierende Lebensformen zumindest für eine gewisse Anfangszeit den Charakter von *black boxes* nicht ganz ablegen werden können. Man wird probieren müssen beim Entwerfen artifizierender Lebensformen und dabei auch Risiken eingehen. Aber es wird ein hohes Maß an Wissen erforderlich sein für das technische Konstruieren von Lebewesen,

⁶ B. IRRGANG: Von der Mendelgenetik zur synthetischen Biologie (2003).

⁷ E. L. WINNACKER: Am Faden des Lebens (1993), S. 121f.

⁸ E. L. WINNACKER: Grundlagen und Methoden der Gentechnologie (1985), S. 19.

⁹ E. L. WINNACKER: Gene und Klone (1985), S. 20.

wahrscheinlich mehr als bei einer genetischen Manipulation eines Organismus. Der Gebrauchswert technisch konstruierter Lebewesen entsteht durch die auf den Gebrauch hin entworfene Lebens- und Organisationsform eines Organismus. Allerdings werden sich nicht alle möglichen Gebrauchsformen im Voraus für alle Formen synthetischen Lebens bestimmen lassen. Für einen neu synthetisierten Organismus gibt es kein artgemäßes Leben, das vom Menschen unabhängig wäre. Kriterien für die Haltungsbedingungen dieses Organismus könnten nur aus seiner Organisationsform „abgeleitet“ werden. Zunächst muss aber expliziert werden, welche Bedingungen für die technische Konstruktion artifizierter Lebensformen erfüllt sein müssen, um von einer gänzlich artifizuell hergestellten Zelle sprechen zu können. Dazu muss ein Vergleich erstellt werden zwischen der Neukonstruktion eines artifizuellen Organismus und einer technischen Neukonstruktion eines technischen Mittels (Erfindung). Hierzu bedarf es einer Analyse gentechnischen Konstruktionshandelns. Voraussetzung dafür sind Fortschritte in der postgenomischen Ära der Gentechnologie. Funktionen von Genen und intrazelluläre Netzwerke müssen besser bekannt sein.¹⁰

Synthetisches Leben hat gegenüber normal mutiertem Leben spezielle Eigenschaften und spezielle Lebensbedingungen, die zu berücksichtigen sind. Eine solche Lebensform behält ihren artifizuellen Charakter. Zudem haben Transgene oftmals Eigenschaften negativer Art, die bisweilen erst im Alter auftreten und Kompensationen erforderlich machen. Diese Formen des Lebens behalten Elemente des Künstlichen. Daher ist auch der Unterschied zwischen Züchtung als technischem Handeln und der Konstruktion bzw. dem Design von Organismen als einem anderen Typus technischen Handelns herauszuarbeiten. Zur Konstruktion sind technische Mittel und Verfahren erforderlich, für den Gentransfer braucht man Vektoren. Begründet aber lebendes Material einen anderen Gebrauchswert als totes? Sind Organismen technische Mittel von anderer Art als mechanische, physikalische und chemische? Im Umgang mit höher und komplexer strukturierten Organismen machen wir Unterschiede zu unbelebten mechanisch-physikalischen Mitteln, auch wenn beide letztlich technische Artefakte sind. Eine detailliertere Antwort findet sich in meinem Artikel „Tierschutz“¹¹ und in meiner „Forschungsethik“.¹²

¹⁰ B. IRRGANG: Künstliches Leben (2002).

¹¹ B. IRRGANG: Tierschutz (1998).

¹² B. IRRGANG: Forschungsethik, Gentechnik und neue Biotechnologie (1997).

3. Auf dem Weg zum technisch erzeugten Organismus – der Ansatz der Life Sciences

Wer meint, heutzutage könnten Gentechniker synthetische Wunschorganismen leicht konstruieren, der irrt. Seit nunmehr 20 Jahren verpflanzen Wissenschaftler fremde Gene in Organismen. Dennoch gleicht die Gentechnologie immer noch eher einem Kunsthandwerk als einer ausgereiften technischen Disziplin. Synthetische Biologie entwirft und konstruiert lebende Systeme. Die neuen Schöpfungen sollen sich vorhersagbar verhalten. Zu diesem Zweck verpassen ihnen die Forscher definierte genetische Eigenschaften, die sich nach Bedarf austauschen lassen. Manche dieser Laborwesen könnten sogar mit einem erweiterten genetischen Code arbeiten, dessen Artung ihnen Dinge zu tun erlauben würden, die in der Natur noch nie da waren. Die synthetische Biologie verfolgt insbesondere drei Ziele: (1) Die beteiligten Wissenschaftler wollen Grundzüge des Lebens erkennen, indem sie es aus kleinen Bauelementen synthetisieren und nicht nach üblicher Art vorhandenes Leben in seine Bestandteile zerlegen. (2) Die Gentechnologie soll zu einer echten Ingenieurwissenschaft werden – also zu einer technischen Disziplin, in der Geningenieure standardisierte Komponenten verwenden, aus denen sie immer wieder neue, komplexere Systeme entwickeln. (3) Diese Wissenschaft möchte die Grenzen von lebenden und technischen Systemen einander annähern, bis sich deren natürliche und technische Eigenschaften überschneiden. Das ergäbe programmierbare Organismen, quasi lebende Maschinen.¹³

An einem bestimmten Punkt endet die Analogie zwischen Technik und Biologie allerdings. Elektrische und mechanische Maschinen sind im Prinzip abgeschlossene Einheiten. Gleiches gilt jedoch nur für wenige genetische Systeme oder gar biologische Organismen. Die Hälfte der 60 Module, die in den Jahren 2000 bis 2003 hergestellt wurden, konnten nicht verwendet werden. Die Zellen starben, wenn sie sich teilen wollten. Es überforderte sie, das zusätzliche genetische Material mitzuschleppen und zu vervielfältigen. Erträglicher wird die Bürde, wenn man sie nicht dem zelleigenen Genom auflastet, sondern das Kunstprodukt auf einem eigenen DNA-Ring, einem so genannten *Plasmid*, deponiert. Besonders haben die Forscher aber stets damit zu kämpfen, dass die artifizielle DNA über viele Zellgenerationen hinweg nicht unverändert bleibt, weil das Erbgut der Wirtszelle immerfort mutiert. Es gibt auch schon ein konkretes Projekt für die Anwendung solcher Minimalorganismen:

¹³ Vgl. W. GIBBS: Künstliche Biomachines (2004), S. 68.

das Aufspüren von Landminen: H. HELLINGA und RON WEISS würden gern ihre beiden Konstruktionen – Synthetische Mikroorganismen als Sensorsysteme für TNT (einen Sprengstoff) und als Leuchtanzeige – kombinieren. Sie möchten damit Bakterien schaffen, die Sprengstoff aufspüren und das gleichzeitig anzeigen können. Solche Organismen könnten helfen, Landminen zu orten.¹⁴ Die synthetische Biologie, zunächst nur dem Spieltrieb der Ingenieure und der Neugier von Biologen entsprungen, will neue Geschöpfe erschaffen – und sie für die Menschheit arbeiten lassen. Sie sollen Medikamente oder Werkstoffe hervorbringen, welche die Natur nicht oder nur widerwillig hergibt. Sie sollen wahlweise Krebs bekämpfen, schädliche Stoffe aufspüren und vernichten, Energieträger wie Wasserstoff produzieren oder Dinge hervorbringen, an die wir noch gar nicht denken. Manche der neuen Wesen werden Variationen der uns bekannten sein, andere aber werden auf neuen Makromolekülen und von Menschen erdachten Bauplänen beruhen. Sie könnten sich weiterentwickeln und neue evolutionäre Nischen besetzen, Wunder hervorbringen und vielleicht auch zur Bedrohung werden.¹⁵

Was die neue Disziplin am deutlichsten von den bisherigen Arbeiten der Biotechnologie abhebt, ist ein neues Selbstbewusstsein, eine neue Denk- und Herangehensweise: Nur was man auch selbst bauen kann, hat man wirklich verstanden, so lautet das Credo der Bioingenieure. Oft muss man akzeptieren, dass man das System nicht vollständig versteht und dass es trotzdem funktionieren kann. Das wäre der technologische Zugang. Eben damit wollen sich die Bottom-Up-Forscher nicht abfinden. Wir sollten aufhören, an komplizierten Systemen nur herumzuspielen und stattdessen die zugrunde liegenden Prozesse verstehen lernen. Dies ist der Research-Zugang. Die Kombination dieser beiden Zugänge macht Technoresearch aus.¹⁶ Noch immer hat die Arbeit der meisten Bioingenieure wenig von einer Ingenieurstätigkeit an sich. Einer der Gründe liegt in den Werkzeugen zum Bauen mit biologischen Teilen: Sie sind zu wenig standardisiert und zu wenig von breitem Nutzen. Hier besteht erheblicher Nachholbedarf gegenüber anderen Sparten der Ingenieurwissenschaften.¹⁷

So steht der Bio-FAB-Ansatz für Biofabrikation von synthetischen Lebewesen ohne jedes Vorbild auch in der Natur. Nun wird dazu übergegangen, synthetische biologische Baugruppen zunächst im Computer zu entwerfen

¹⁴ Ebd., S. 71–74.

¹⁵ B. HERDEN: Erstkontakt (2006), S. 35f.

¹⁶ Ebd.

¹⁷ D. BAKER: Baukasten für Biomachines (2007), S. 86f.

und zu modellieren und sie dann erst in biologische Fassungen zu bringen, ähnlich wie Halbleiterchips zunächst im Computer entworfen und dann lithographiert werden. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass wir ähnlich wie bei elektronischen Schaltkreisen die Interaktionen zwischen den Komponenten im Voraus optimieren und Fehler erkennen können. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass der Bioingenieur nicht jedes Bauteil selbst konstruieren, ja nicht einmal dessen Innenleben kennen muss – er muss nur wissen, was das angebotene Teil leistet, und sich ansonsten darauf verlassen können, dass es zuverlässig funktioniert. Die erste Generation von Ingenieur-Biologen, für die es von vornherein selbstverständlich sein wird, sich als beides zu begreifen, ist gerade im Entstehen begriffen. Der Aufbau einer biologischen Fabrikation fördert diese Entwicklung und ähnlich revolutionäre Fortschritte werden eingeleitet werden, falls es der Industrie gelingt, auch eine Biotechindustrie aufzubauen wie einst in der Halbleiterindustrie.

Die Entdeckung der Struktur der Erbsubstanz DNA vor fünfzig Jahren war eine kulturelle Zäsur. Mit ihr begann der Aufstieg der Biologie zur Leitwissenschaft unserer Zeit. Ein weiterer wichtiger Schritt in diesem Zusammenhang war das Humangenomprojekt. Die Schnittstelle von Genetik und Fortpflanzungsmedizin wurde immer mehr zum Ansatzpunkt der Biomedizin. Realisiert werden sollen Visionen des Zeitalters regenerativer Medizin. Es ist aber keine Selbstoptimierung oder Selbstabschaffung des Menschen, wenn es um medizinische Indikationen und ihre Realisierung geht. Als Konsequenz der neuen Möglichkeiten könnte sich der Mensch neu definieren. Der Körper ist nie gut genug, er kann immer optimiert werden. Lässt sich Fortschritt nur durch Tabubrüche erzielen? Die *Life Sciences* sind ein Produkt der Experimental- und Laboratoriumswissenschaften. Und Experimentalwissenschaften sind risikobehaftet, nicht nur, wenn sie vom Labor den Weg ins Freiland suchen. Die Alternative wäre, nicht mehr zu experimentieren, sondern nur noch zu beobachten. Die technische Simulation natürlicher Lebensweisen wird von Lebewesen natürlicher Art immer ununterscheidbarer. Daher bedarf es der Deklaration ihrer Herkunft. Möglicherweise sind Bioartefakte bald besser, gesünder oder funktionaler als natürliche Organismen.^{18,19} In der Bandbreite des Verhältnisses von Natur und Technik sind der Organismus bzw. das Lebewesen charakterisiert durch Genese (Wachstum, Morphogenese, Epigenese) und technische Artefakte durch Gemacht-Werden, Konstruiert-Werden,

¹⁸ B. IRRGANG: Posthumanes Menschsein? (2005).

¹⁹ B. IRRGANG: Einführung in die Bioethik (2005).

Entworfen-Werden. Synthetische Lebewesen entstehen durch die technische Rekonstruktion der Genese von Organismen durch Eingriff in den genetischen Code und in die Expression des genetischen Codes von Organismen. Insbesondere im Menschen und seiner Evolution vollzieht sich eine permanente Grenzüberschreitung des Natürlichen und Biologischen hin zum Künstlichen und Technischen.

Die neuen Life Sciences sind charakterisiert durch:

(1) Ein neues Wissen: Das Klonen von Säugetieren 1997, die Stammzellforschung 1998 und die Erkenntnis der Bedeutung nichtkodierender DNA und RNA im Jahre 2002 haben eine neue Sicht der Entwicklung von Leben vorbereitet. Epigenetik und Stammzellforschung zeigen nun ein anderes Bild des Lebendigen und die Ursachen für die Vielfalt und Verschiedenheit des Lebendigen und der Entstehung von Organismen, nicht mehr die Uniformität der belebten Natur. In der frühen Embryonalentwicklung bei Säugetieren liegt beispielsweise nicht nur Wachstum oder Ausdifferenzierung von Zellen vor, wie etwa nach der Geburt, sondern echter Gestaltwandel. So ist der Organismus als sich entwickelnde, jeweils momentan realisierte Struktur im Horizont des genetischen Codes als Steuerungsprogramm und Umwelt als gestaltender Realisierungsfaktor im Sinne der Neoepigenesiskonzeption zu verstehen.

(2) Ein neues Können: Die Anfänge der synthetischen Biologie liegen 25 Jahre zurück. Das Ziel der synthetischen Biologie besteht darin, aus definierten, wunschgemäß arbeitenden Modulen biologische Systeme zu konstruieren, die sich vorhersagbar verhalten. Die genetischen Versatzstücke oder Module werden *Biobricks* genannt, wobei der Name „brick“ auf das englische Wort für Ziegel oder Baustein anspielt. Standardisierte Biobricks erlauben zudem, damit funktionelle genetische Systeme zu bauen, ohne im Einzelnen zu wissen, wie man sie technisch zusammenfügen muss. An einem bestimmten Punkt endet die Analogie zwischen Technik und Biologie allerdings. Elektrische und mechanische Maschinen sind im Prinzip abgeschlossene Einheiten. Gleiches gilt jedoch nur für wenige genetische Systeme.²⁰ Der Züchtungsgedanke der klassischen Biotechnologie wie Eugenik wird in den Life Sciences immer mehr durch den der technischen Konstruktion ersetzt. Der Genpool tritt in den Hintergrund, das einzelne Individuum in den Vordergrund. Selektion im Sinne klassischer Züchtung und des Sozialdarwinismus wird aus den Life Sciences zunehmend verschwinden, wenn sich das Leitbild synthetischer Biologie stärker durchsetzt.^{21, 22, 23}

²⁰ Ebd.

4. Die Bedeutung philosophischer Reflexion für die Bestimmung des Status künstlichen Lebens und synthetischer Organismen

Die Rahmenordnung experimenteller Forschung wird nicht durch experimentelle Forschung abgesteckt, sondern durch naturphilosophische Reflexionen hermeneutisch-phänomenologischer Art. Die Unterschiede zwischen Leben und Materie, belebter Materie (Viren, Bakterien, Sinne,) und Pflanzen, Pflanzen und Tieren sowie Menschen können nicht experimentell, sondern nur durch hermeneutische Phänomenologie als Forschung herausgearbeitet werden. Dies gilt auch für die Unterscheidung von natürlichen und künstlichen Organismen. *Naturphilosophie* – das ist die Schlussfolgerung – ist in die Naturwissenschaften zu integrieren. Evolutionär-kausal stellt sich die Entwicklung als unterschiedsloses Kontinuum dar und führt zu der naturwissenschaftlich plausiblen Feststellung, dass Menschen und Schimpansen evolutionär nahezu gleich sind, während die naturphilosophische Reflexion auf deutliche Unterschiede zwischen Schimpansen und Menschen kommen kann. Wenn wir uns an naturwissenschaftlichem Wissen und naturwissenschaftlichen Methoden bzw. ihren Ergebnissen orientieren sollen, müssen wir die Ebene des Laboratoriums verlassen und Naturphilosophie betreiben, allerdings nicht über die Köpfe der praktizierenden Wissenschaft gleichsam hinweg, sondern im Dialog mit ihnen, denn sie wissen vermutlich zumindest besser, was sie tun, um Wissen über Überlebensprozesse zu erarbeiten. Aber Faktenwissen (wissen, dass) ist alleine noch nicht Wissenschaft; wir müssen auch wissen, wie und warum wir Leben als etwas Spezifisches und vielleicht sogar Wertvolles begreifen.

Spekulationen über das Leben und seine Kriterien sind kein unmittelbarer Output des Laboratoriums, aber ohne Spekulationen bleibt Biologie Bastelei und kann so zu keiner wirklichen Wissenschaft werden. Ohne die naturphilosophische Reflexion der grundlegenden Begriffe für eine wissenschaftliche Theorie bleibt Laboratoriumswissenschaft Forschung im Vorhof von Wissenschaft. Und tatsächlich ist *Technoscience* Wissenschaft vor der eigentlichen Wissenschaft. Wissenschaft gibt es nur dort, wo es große Theorie gibt. Trotz guter experimenteller Forschungsansätze in Evolutionstheorie und Genetik bedarf es in der Biologie dieses Impetus zur Theorie. Wenn wir uns an Wissenschaft orientieren sollen, wenn wir uns an einer wissenschaftlichen Welt-

²¹ B. IRRGANG: Humangenetik auf dem Weg in eine neue Eugenik von unten? (2002).

²² B. IRRGANG: Epistemologie der Bio- und Gentechnologie (2004).

²³ B. IRRGANG: Einführung in die Bioethik (2005).

anschauung ausrichten sollen, brauchen wir ein neues Philosophisch-Werden der Laboratoriumswissenschaften. Philosophie ist dann keine Wissenschaft im Sinne der Einzelwissenschaften, aber unverzichtbar zur Vollentwicklung der Einzelwissenschaften als jeweiliger Sachwalter des Ganzen, des Horizonts der eigenen Theorie. Das Methodenideal der Neuzeit waren Analyse und Synthese, Empirie und Phänomenologie für Forschung in den Naturwissenschaften und der Naturphilosophie. In der positivistischen Wende des 19. Jahrhunderts wurde die Analyse in den Vordergrund gestellt, die Synthese auf technische Leistungen in den Wissenschaften reduziert. Auf der DNA-Ebene unterscheiden sich physikalische und organische Dinge nicht wesentlich. Sie haben eine unterschiedliche Molekülstruktur – das ist alles. Aber auch Naturwissenschaft interessiert nicht nur die unterschiedliche Molekülstruktur, sondern schon auch das, was man damit machen kann, und die Unterschiede, die mit vielen unterschiedlichen Molekularstrukturen verbunden sein können.

Laborexperimente können als Hermeneutik der Natur verstanden werden, indem sie Modellbildung und Versprachlichung von Naturprozessen betreiben. Eigentlich geht es um eine Hermeneutik der Strukturinformation, mit deren Hilfe wir die Entwicklung der Lebewesen im Ökosystem wie die Entwicklung eines Lebewesens aus einer Samenzelle rekonstruieren und auch verstehen können. Das Charakteristische am Leben ist ihre Reproduktion und Selbstorganisation mittels einer materialisierten Informationsstruktur als vererbare Merkmale. Technik entsteht aus dem Umgang mit der Natur unter Verwendung von anderer Technik (technischem Wissen, technischem Können oder technischen Artefakten). Betrachten wir die Genese von Technik, so gibt es keine klare Grenze zwischen Natur und Technik. Im Menschen gehen Natur und Kultur ineinander über.²⁴ Nur rein logisch kann man Natur und Technik klar unterscheiden, denn sie lassen sich unterschiedlich definieren, nicht aber in der Realität.

Ein Schaf ist ein technisches bzw. kulturelles Produkt bereits vor seiner Klonierung. Die Verworrenheit der Meinungen über die neue Biotechnologie an den Grenzen zwischen Natur und Technik entsteht häufig weniger durch das, was die Biotechnologie macht, als durch das, was jene daraus machen, die über sie nachdenken. Echte Grenzen (z.B. naturgesetzlicher Art) können gar nicht überschritten werden. Glücklicherweise hat die Natur ihre Gesetzmäßigkeit und Technik zumindest ihre Regelmäßigkeit – nur die Gedanken sind frei.

²⁴ Vgl. B. IRRGANG: Der Leib des Menschen (2009).

Der technische Eingriff am Ursprung eines Lebewesens macht ein transgenes Schwein nicht zum Automobil. Die wissenschaftliche Beschreibung eines Lebewesens und überhaupt die technischen Überlegungen zu einem Lebewesen künstlicher Art bleiben unterschiedlich. Für ein Verständnis der synthetischen Biologie bedeutet dies: sie ähnelt eher Züchtungsergebnissen als einer Uhr. Wenn wir einen Organismus als Maschine betrachten, haben wir eine technologische Sichtweise der Natur. Der Natur ist das gleichgültig, sie „betreibt“ weiter Mutation und Selektion. Die Bioingenieurkunst erweist den technischen Umgang des Menschen mit der Natur, aber nicht der Natur selbst. Der technische Entwurf eines Prototyps eines Lebewesens mit modifiziertem Genotyp eines natürlichen Lebewesens und ein frei entworfener künstlicher Genotyp eines noch nicht natürlich vorhandenen Lebewesens sind zu unterscheiden. Die Eingriffsmöglichkeiten in die Entwicklung eines Lebewesens sind gewachsen, nicht nur, was das Genom selbst betrifft, sondern den Entwicklungsprozess an sich. Dabei spielen das Genom und das epigenetische System eine größere und teilweise andere Rolle als wir das erwartet hatten. Insbesondere Umweltfaktoren scheinen eine größerer Bedeutung zu haben.

5. Zur Anwendungsorientierung synthetischer Biologie – die Sicherheitsproblematik

Die konkreten Gefahren der neuen synthetischen Biologie werden häufig diskutiert im Kontext allgemeiner Gefahren im Verhältnis zur Künstlichkeit. Künstlichkeit oder Natürlichkeiten machen jedoch keine Aussagen über Biosafety bzw. Biosicherheit. Pathogene Viren oder Bakterien können Epidemien auslösen wie bei Polio oder dem Grippevirus, gleichgültig ob natürlichen oder künstlichen Ursprungs. Außerdem gibt es die Biowaffenkonvention von 1972, die den Vergleich von Produkten der synthetischen Biologie mit herkömmlichen Biowaffen erlauben soll. Dabei zeigt sich, dass es einen Bedarf an zusätzlichen Regelungen für dieses neue Feld der Ingenieurstechnik (wie in anderen Bereichen auch) gibt. Die Herstellung synthetischer Organismen erfordert keinen übermäßig großen technischen Apparat, anders als im Bereich der Atomwaffen. Entscheidend werden in diesem Zusammenhang die Lizenzierung des Möglichen in der synthetischen Biologie und die Einführung von Kontrollmechanismen sein. Wir haben in der Tat im Zusammenhang mit Biosafety das Risiko unkontrollierter Verbreitung möglicherweise schädlicher Mikroorganismen zu bewältigen. Die Risikobeurteilung von genetisch veränderten Organismen orientiert sich an dem Verhalten von Spender- und

Empfängerorganismus, wobei Unwägbarkeiten des Verhaltens berücksichtigt werden müssen. So ist das Konzept eines Gens mit automatischer Selbstzerstörung nicht völlig unplausibel. Etwas technisch zu schaffen, welches aufgrund der Fähigkeit zur Fortpflanzung und zur Mutation Fähigkeiten zum Gestaltwandel entwickeln und sich dadurch der Kontrolle entziehen könnte, das ist die paradoxe Form der Technik auf der Basis synthetischer Biologie. Es entwickelt sich hier eine Technologie qualitativ neuer Art wie auch bei der Künstlichen Intelligenz und in der Robotik, die herkömmliche Maschinentheorie überschreitet.^{25, 26}

Synthetische Biologie geht hinter die Gentechnik zurück und ist stark anwendungsorientiert. Anstelle der Veränderung einzelner bestehender Gene (z. B. von Herbizidresistenzen) geht es um den Zusammenbau von neuen Genomstrukturen und dadurch um die Erzeugung von Lebewesen mit einem Bauplan, der vorher nicht auf der Erde vorhanden war. Auf der Basis eines Sets von standardisierten Genen und den darauf beruhenden Bauplänen werden Lebewesen konstruiert bzw. technologisch designed, welche es in dieser Form in der Realität noch nicht gibt. Die natürlichen Gene werden re-designed für eine bessere Funktionsweise. Die synthetische Biologie geht von der Manipulation zur Kreation. In diesem Bereich manifestiert sich der Systemzugang zur Biologie, der einen Ingenieurszugang zur Biologie darstellt, und von einem Minimalzellenmodell ausgeht. Selbstverständlich bedarf es auch eines ethischen Rahmens für die synthetische Biologie. Wir haben parallele Probleme in anderen Techniken, insbesondere in den Ingenieurwissenschaften. Zum einen handelt es sich dabei um Sicherheitsfragen, wobei die Frage beantwortet werden muss, ob es spezielle Sicherheitsprobleme bei der Erschaffung von Lebewesen gibt. Außerdem bedarf es des Schutzes vor überlegtem und geplante Missbrauch.

Aus der Sichtweise des Wissenschaftlers ist die Erschaffung von synthetischen Lebewesen wohl etwas anders zu sehen als in der Öffentlichkeit sonst üblich. Charakteristisch für die genetische Forschung im 20. Jahrhundert ist die Arbeit mit Modellorganismen:

„Ein Modellorganismus ist ein – für Experimente zugerichtetes – Lebewesen aus dem Reich der Pflanzen, der Tiere oder der Bakterien, dessen Manipulation zu Einsichten in die Konstitution, das Funktionieren, die Entwicklung oder die Evolution einer ganzen Klasse von Organismen führen kann. Die operationalen Auswahlkriterien sind die einfache Haltung und Handhabung des Organismus, die

²⁵ Vgl. J. BOLDT/O. MÜLLER: Synthetische Biologie, S. 66–78.

²⁶ B. IRRGANG: Philosophie der Technik (2008).

Menge und Qualität des bereits über ihn gesammelten Wissens und die vergleichsweise leichte Zugänglichkeit des zu untersuchenden Phänomens.²⁷

Schon Anfang des 20. Jahrhunderts wurde das Experimentalsystem *Drosophila* von der Morgan-Schule benutzt, um wesentliche Erkenntnisse über die Molekularstruktur der Vererbungsträger herauszufinden. Damit war ein wesentlicher Schritt von der Mendel-Genetik zur synthetischen Biologie vollzogen worden.²⁸ Auch bei der Entdeckung der Struktur des Gens als Doppelhelix spielten Modelle, diesmal mechanische Modelle, eine zentrale Rolle. Heute sind Tier-Modelle gängige Praxis, insbesondere in der biomedizinischen Forschung, so die Krebsmaus oder die SCID- Maus, welche spezifische Krankheitsaspekte des Menschen in einem Tier abbilden, um Forschungen zur Entstehung und Behandlung dieser Krankheit am Menschen durch Tierversuche ersetzen zu können. Aus der Systematik der biotechnologischen Forschung heraus sind synthetische Lebewesen der nächste konsequente Schritt von Modellorganismen (die noch mit klassischen Mitteln gekreuzt wurden) über Tiermodelle, die bereits transgen verändert sind hin zu Organismen, deren Struktur vollständig (re-)konstruiert wird, um die genetische Steuerung der Entwicklung eines Organismus nachvollziehen zu können. Erst in zweiter Hinsicht sind praktische Anwendungen von Interesse. Zumindest bei synthetischen Lebewesen als materialisierten Methoden der Grundlagenforschung ist die Diskussion um das neue Schöpfertum des Menschen als Hybris unangemessen. Außerdem handelt es sich um Laborforschung, die aufgrund der Sicherheitsbestimmungen des Gentechnikgesetzes gefahrlos betrieben werden können. Allerdings stehen synthetische Lebewesen wie die synthetische Biologie überhaupt (eigentlich schon die Gentechnologie und die darauf aufbauende Biomedizin) für eine tief greifende Transformation moderner, genauer gesagt hypermoderner Technologie.^{29, 30} Anstelle des alten technologischen Paradigmas der Züchtung und biotechnologischer Verfahren wie der Fermentation und der Gärung, die alltägliche Kulturleistungen darstellen, tritt nun die biotechnologische Konstruktion auf der Basis von Technoscience und Technoresearch, also eines Hybrids aus Technologie und Wissenschaft.³¹ Als Philosophen mit einer ethischen Grundausrichtung sollten wir auch diese interessante und vielversprechende Entwicklungsmöglichkeit hypermoderner

²⁷ H.-J. RHEINBERGER: Epistemologie des Konkreten (2006), S. 14.

²⁸ Vgl. B. IRRGANG: Von der Mendelgenetik zur synthetischen Biologie.

²⁹ Vgl. B. IRRGANG: Philosophie der Technik.

³⁰ Vgl. B. IRRGANG: Projektmedizin (2012).

³¹ Vgl. B. IRRGANG: Züchtung als technisches Handeln (2003).

Technologie kritisch begleiten, um mögliche Schäden von der Menschheit abwenden zu können. Die Diskussion um das neue Schöpfertum des Menschen oder gar die Rede vom „Gott spielen“ scheint mir dagegen unangemessen, denn Gottes Schöpfertum kann aus dem Nichts erschaffen, menschliches auch mit der synthetischen Biologie und mit synthetischen Lebewesen nur aus vorhandener Materie.

Zusammenfassung

IRRGANG, BERNHARD: **Synthetische Biologie und künstliche Organismen.** ETHICA 20 (2012) 4, 345–361

Die synthetische Biologie ist die Fortsetzung der Gentechnik. Die technologische Konstruktion artifizierender Lebensformen setzt in hohem Maße wissenschaftliches und technisches *Know that* und *Know how* voraus. Die Rahmenordnung experimenteller Forschung wird nicht durch experimentelle Forschung abgesteckt, sondern durch philosophische Reflexionen. Die konkreten Gefahren der neuen synthetischen Biologie werden häufig diskutiert im Kontext allgemeiner Gefahren im Verhältnis zur Künstlichkeit. Künstlichkeit oder Natürlichkeiten machen jedoch keine Aussagen über Biosicherheit. Als Philosophen sollten wir auch diese interessante und vielversprechende Entwicklungsmöglichkeit hypermoderner Technologie kritisch begleiten, um mögliche Schäden von der Menschheit abwenden zu können. Die Diskussion um das neue Schöpfertum des Menschen oder gar die Rede vom „Gott spielen“ scheint mir dagegen unangemessen.

Biologie
Biomedizin
Gentechnik
Künstlichkeit
Nachhaltigkeit
Synthetische Biologie
Technikphilosophie

Summary

IRRGANG, BERNHARD: **Synthetic biology and artificial organisms.** ETHICA 20 (2012) 4, 345–361

Synthetic biology is the continuation of genetic engineering. The technological construction of artificial life-forms presupposes scientific and technical *Know that* and *Know how*. The framework of experimental research is not defined by experimental research itself but by philosophical reflections. The concrete dangers of new synthetic biology are frequently discussed in the context of general dangers in proportion to artificiality. However, neither artificiality nor naturalness can be considered a gauge of biosafety. From a philosophical point of view one should not refrain from keeping a critical eye on this interesting and promising possibility for development of hypermodern technology so as to be able to avert potential damage from mankind. On the other hand, discussions on man “playing the Creator” are considered inappropriate by the author.

Artificiality
biology
biomedicine
genetic engineering
philosophy of technology
sustainability
Synthetic biology

Literatur

- BAKER, DAVID u. a.: Baukasten für Biomachines. *Spektrum der Wissenschaft* (2007) 2, 86–93.
- BOLDT, JOACHIM/MÜLLER, OLIVER/MAIO, GIOVANNI: Synthetische Biologie. Eine ethisch-philosophische Analyse. Bern: Bundesamt für Bauten und Logistik, 2009.
- BOLDT, JOACHIM/MÜLLER, OLIVER: Leben zum selber machen. *Spektrum der Wissenschaft* (2010) 4, 42–45.
- GIBBS, W. WAYT: Künstliche Biomachines. Synthetische Biologie. *Spektrum der Wissenschaft* (2004) 10, 68–75.
- HERDEN, BIRGIT: Erstkontakt. *Technology Review* (2006) 7, 34–40.
- IRRGANG, B.: Forschungsethik, Gentechnik und neue Biotechnologie. Grundlegung unter besonderer Berücksichtigung von gentechnologischen Projekten an Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen. Stuttgart/Leipzig: Hirzel/Wiss. Verlagsges., 1997.
- Art. Tierschutz, in: Lexikon der Bioethik, hrsg. von Wilhelm Korff, Lutwin Beck, Paul Mikat. Gütersloh: Gütersloher Verlagshaus, Bd. III, 1998, S. 561–567.
- Humangenetik auf dem Weg in eine neue Eugenik von unten? Bad Neuenahr/Ahrweiler, 2002.
- Künstliches Leben – Natur und technische Grenzen, in: W. Högrefe (Hg.): Grenzen und Grenzüberschreitungen. 19. Deutscher Kongress für Philosophie. Bonn: Sinclair Press, 2002, S. 865–872.
- Züchtung als technisches Handeln, in: A. Schäfer/M. Wimmer (Hg.): Machbarkeitsphantasien. Opladen: Leske und Budrich, 2003, S. 67–87.
- Von der Mendelgenetik zur synthetischen Biologie. Epistemologie der Laboratoriumspraxis Biotechnologie. Dresden: Thelem, 2003 (Technikhermeneutik; 3).
- Epistemologie der Bio- und Gentechnologie, in: K. Kornwachs (Hg.): Technik – System – Verantwortung. Münster: Lit, 2004, S. 285–297.
- Posthumanes Menschsein? Künstliche Intelligenz, Cyberspace, Roboter, Cyborgs und Designer-Menschen – Anthropologie des künstlichen Menschen im 21. Jahrhundert. Stuttgart: Steiner, 2005.
- Einführung in die Bioethik. München: Fink, 2005.
- Philosophie der Technik. Darmstadt: WGB, 2008.
- Der Leib des Menschen. Grundriss einer phänomenologisch-hermeneutischen Anthropologie. Stuttgart: Steiner, 2009.
- Projektmedizin. Neue Medizin, technologie-induzierter Wertewandel und ethische Pragmatik. Stuttgart: Steiner, 2012.
- MAIO, GIOVANNI: Der Mensch als Schöpfer. *Technology Review* (2010) 7, 38–41.
- RHEINBERGER, HANS-JÖRG: Epistemologie des Konkreten. Studien zur Geschichte der modernen Biologie. Frankfurt: Suhrkamp, 2006.
- WINNACKER, E. L.: Gene und Klone. Eine Einführung in die Gentechnologie. Weinheim: VCH, 1985.
- Grundlagen und Methoden der Gentechnologie, in: Max-Planck-Gesellschaft (Hg.): Gentechnologie und Verantwortung. München, 1985, S. 14–21.
- Am Faden des Lebens. Warum wir die Gentechnik brauchen. München/Zürich: Piper, 1993.