

„Animation der Materie“? – Kritische Betrachtungen zur Nanotechnologie

Andreas Woyke

1. Einleitende Betrachtungen zum Verhältnis von „Natur“ und „Technik“

Aristoteles prägt eine bis heute wichtige Unterscheidung zwischen „Natur“ (φύσις) und „Technik“ (τέχνη), wenn er den Antrieb zu Bewegung, Veränderung und Ruhe in den natürlichen Dingen selbst verortet, den der technischen bzw. künstlichen Dinge aber in die Sphäre des menschlichen Planens und Gestaltens verlagert.¹ Das Verhältnis zwischen „Natur“ und „Technik“ ist in der gesamten Antike asymmetrisch, insofern alle technischen Dinge zumindest hinsichtlich ihrer materiellen Grundlage in die „Natur“ eingebunden sind und auch der Mensch nicht radikal aus dem Naturzusammenhang herausfällt.² Descartes verwirft die Vorstellung einer vorgängigen Natur und ebnet jede scharfe ontologische Differenz zwischen „Natur“ und „Technik“ ein. Er verfolgt das Projekt einer universellen mechanistischen Weltdeutung, in die auch alles Lebendige einschließlich des Menschen eingeordnet werden kann. Der einzige Unterschied zwischen natürlichen und technischen Maschinen besteht für Descartes darin, dass die Teile der künstlichen Maschinen dem menschlichen Gebrauch anpasst sind, während natürliche Maschinen oft mit so kleinen Teilen operieren, dass sie unserem unmittelbaren sinnlichen Zugriff entzogen sind.³ Darüberhinaus liegt es ebenso in der Natur einer Uhr, die Zeit anzuzeigen, wie in der eines Baumes, Früchte hervorzubringen. Die antike Vorstellung einer vorgängigen Natur, gegenüber der sich der Mensch nur nachahmend oder vollendend verhalten kann,⁴ wird verabschiedet und durch eine hypothetische Naturerklärung ersetzt.⁵ Die Naturordnung verliert ihre Verbindlichkeit: Nicht nur Gott als Schöpfer aller Dinge hätte sie auf ganz unterschiedliche Weise einrichten können,⁶ auch der Mensch ist in der Lage, sie für seine Zwecke zu gestalten und zu verändern. Das zentrale Motiv einer „Nachahmung der Natur“ tritt sukzessive in den Hintergrund,⁷ das technische Handeln emanzipiert sich zunehmend von seinen Bindungen an eine vorgängige Natur und der Erfolg der naturwissenschaftlichen Weltdeutung trägt maßgeblich dazu bei, dass die Unterschiede zwischen „Natur“ und „Technik“ unscharf werden. Die bis ins 20. Jahrhundert wirksame Vorstellung, dass die belebte Natur durch eine besondere *vis vitalis* bestimmt wird und sich insofern von allem Technischen grundsätzlich unterscheidet, wird zunächst durch chemische Synthesen von Stoffen biologischen Ursprungs problematisch. Die Synthese von Harnstoff durch Friedrich Wöhler im Jahre 1828 macht klar, dass es keine prinzipiellen materiellen oder naturgesetzlichen Differenzen zwischen organischer Produktion und künstlicher Herstellung gibt.⁸ Für einen modernen Biologen steht fest, dass die belebte Natur vor allem hinsichtlich der erreichten Grade an Komplexität weit über alles hinausgeht, was bisher technisch möglich ist, dennoch hält er es für evident, dass alle spezifischen Fähigkeiten von Organismen auf allgemeine materielle

¹ Aristoteles, Physik II 1, 192b,13ff.

² Cf. Blumenberg 2003, 255f.

³ Descartes, Principia philosophiae IV 203.

⁴ Physik II 8, 199a,15ff.

⁵ Cf. Blumenberg 1998.

⁶ „[...] ita non dubium est, quin summus rerum opifex omnia illa, quae videmus, pluribus diversis modis potuerit efficere.“ (Principia philosophiae IV 204).

⁷ Cf. Blumenberg, 1999.

⁸ Die Synthesen von Harnstoff und anderen Naturstoffen führen allerdings nicht zu einem abrupten Ende des Vitalismus (cf. Brooke 2007, 281ff.; Bensaude-Vincent et al. 1996, 145ff.).

Eigenschaften und Gesetzmäßigkeiten zurückzuführen sind.⁹ Insofern gibt es keine grundsätzlichen Einwände dagegen, organismische Synthesepotentiale in technologische Prozesse zu integrieren, gezielt zu designen oder gar durch die Erzeugung künstlicher Lebewesen hervorzubringen. Die beiden ersten Ziele werden seit den 1970er Jahren zunehmend erfolgreich in der modernen Bio- und Gentechnologie verfolgt. In der Synthetischen Biologie arbeitet man seit einigen Jahren daran, auch das dritte Ziel zu erreichen. Der Gruppe um den Genetik-Pionier Craig Venter ist es zwar entgegen der Berichterstattung in der Presse noch keinesfalls gelungen, ein künstliches Lebewesen zu erschaffen.¹⁰ Dennoch werden durch die Synthetische Biologie Wege zu einem gezielten Design von Lebewesen eröffnet,¹¹ wodurch scharfe Grenzen zwischen belebter und unbelebter Natur endgültig unterlaufen würden. Auch in der Nanotechnologie verschwimmen diese Grenzen zunehmend, wenn es um Hybridisierungen zwischen biologischen und artifiziellen Materialien und um die Herstellung nanoskaliger Maschinen geht. Angesichts verschiedener Ansätze eines technologischen Gebrauchs von Selbstorganisationsprinzipien gewinnt auch die Vorstellung einer „Animation der Materie“ immer größere Bedeutung, wodurch eine moderne Einlösung „alchemistischer Phantasien“ nahe gelegt wird. Die Nanotechnologie erscheint insofern als eine Technologie im Sinne von Arthur C. Clarkes „drittem Gesetz“: „*Any sufficiently advanced technology is indistinguishable from magic.*“¹²

2. „Animation der Materie“ – Was heißt das?

Scharfe Grenzziehungen zwischen „Natur“ und „Technik“ werden in der Nanotechnologie in zweierlei Hinsichten unscharf: Zum einen wird die Natur als „überlegener Ingenieur“ interpretiert und in dieser Perspektive zum großen Vorbild des technologischen Handelns stilisiert. Zum anderen unterliegen nanotechnologische Materialien und Prozesse einer Naturalisierung, da sie ja nach natürlichen Vorbildern hergestellt wurden.¹³ Diese seltsame Verschränkung zwischen einer „Technisierung der Natur“ und einer „Naturalisierung der Technik“ ermöglicht eine Restitution des klassischen Nachahmungsmotivs unter den Bedingungen einer vollständig objektivierten Natur.¹⁴ Der Begriff „Animation der Materie“ dient zusammen mit einigen Parallelbegriffen wie „*enhancing materials*“, „*empowerment of nature*“, „*smart materials*“ oder „*matériaux ingénieux*“ der Charakterisierung bestimmter Tendenzen, die nicht völlig neu sind, aber in der Nanotechnologie stark forciert werden. Moderne Technologien sind im besonderen Maße durch die Tendenzen der „Dematerialisierung“ und der „Automatisierung“ bestimmt. „Dematerialisierung“ meint das, was werbewirksam mit Slogans wie „*more from less*“ oder „*matter no longer matters*“ umrissen wird. Nanotechnologische Materialien verwirklichen die Forderung der Dematerialisierung in besonderer Weise, da der stoffliche Bedarf auf ein Minimum reduziert wird und sich spezifische Eigenschaften nicht primär material-gebunden, sondern durch die Wahl der nanoskaligen Dimensionierung ergeben. Sobald man, etwa im Bereich der Elektronik, mit einzelnen Atomen oder Molekülen arbeitet, verschiebt sich die Perspektive vollständig, da man jetzt nicht mehr mit materiellen Einheiten, sondern mit

⁹ „[...] *chemists and biologists are playing the same game with different balls between similar camps.*“ (Bensaude-Vincent 2009a, 42).

¹⁰ Cf. Groß 2010.

¹¹ „[...] *synthetic biologists have reopened the offensive against vitalism, breaking down any remaining barriers between the living and the inanimate. In their effort to make artificial life, they are not just trying to copy biological organisms, they now aim to improve on nature, creating their own novel species.*“ (Bensaude-Vincent et al. 2010, 228).

¹² Clarke 1983, 36.

¹³ Cf. Bensaude-Vincent 2010, 14ff.

¹⁴ Cf. Bensaude-Vincent, 2009b, 127ff.

Informations-Einheiten operiert. Auch „Automatisierung“ kann auf einem neuen Niveau expliziert werden, wenn nanotechnologische Systeme auf der Basis von Selbstorganisationsprinzipien multifunktional, autonom und über einfache Funktionalisierungen hinaus „intelligent“ zu produzieren vermögen. Beide Tendenzen stützen die Vorstellung, dass die Nanotechnologie eine Art von „Allianztechnik“ ist, die im Sinne von Ernst Bloch zu einer „Befreiung der Materie“ und einer „Humanisierung der Natur“ führen könne.¹⁵ Die Bezeichnung „Animation der Materie“ steht daher für einen neuen Modus der Aneignung der Natur, der aus menschlicher Perspektive völlig neue Potentiale erschließen kann und zugleich auch das, was Bloch als „Übertragung des Ausbeuter- und Tierbändigerstandpunktes auf die Natur“¹⁶ bezeichnet, zu überwinden oder zumindest zu relativieren vermag. Dies trifft sich mit den Visionen von Eric Drexler und anderen, dass die Nanotechnologie eine völlig neue Produktionsweise und effektive Lösungen ökologischer Probleme eröffnen wird.¹⁷

Sprachlich kann man „Animation der Materie“ sowohl als *genitivus subjectivus* als auch als *genitivus objectivus* verstehen: In der ersten Bedeutung begreift man die Materie selbst als „animiert“ und es geht darum, sie mit technologischen Mitteln zu „verbessern“ oder gar zu „befreien“.¹⁸ Die kontrovers diskutierten Möglichkeiten von *Human Enhancement* als einer technologischen Perfektionierung des Menschen erweisen sich in dieser Perspektive als konsequente Ausweitung einer umfassenden „Verbesserung der Natur“.¹⁹ In der zweiten Bedeutung wird die Natur implizit oder explizit mit einer „externen Determination“ verknüpft, die der Mensch durch die Förderung technologischer Entwicklungen gezielt verstärken und beschleunigen kann. Zum einen bezieht man sich auf eine zentrale naturphilosophische Idee, die angesichts der Evolutions- und Selbstorganisationstheorien neue Plausibilität gewonnen hat. Durch die betriebene Entdifferenzierung zwischen „Natur“ und „Technik“ werden allerdings die zentralen Fragen nach einer Einbettung und konkreten Bewertung des technologischen Handelns unangemessen marginalisiert. Zum anderen verwickelt man sich nicht nur in Widersprüche zu naturwissenschaftlichen Theorien, durch offene oder versteckte Bezüge zu „theologischen Zuschüssen“ und die fragwürdige Vorstellung eines technologischen Determinismus bezieht man Motive ein, die mit dem vorausgesetzten naturalistischen Rahmen unverträglich sind. Da moderne Technovisionäre wenig Interesse an Begriffsklärungen haben und mit recht simplen Konzepten von „Natur“ und „Technik“ operieren,²⁰ werden beide Perspektiven gewöhnlich miteinander vermischt. So verbindet etwa Ray Kurzweil eine teleologische Interpretation des Evolutionsgeschehens mit der Idee einer deterministischen „technologischen Evolution“, die unweigerlich in eine Singularität und zur Verschmelzung von Mensch und Maschine führen wird.²¹ Die rasante Beschleunigung der technischen Entwicklung wird für ihn durch das für die Informationstechnologie geltende Mooresche Gesetz bestätigt.²² Für andere Technologien versucht er durch empirische Studien ähnliche Ge-

¹⁵ Cf. Bloch 1968, 802ff.; Woyke 2008a, 234ff.

¹⁶ Bloch 1968, 813.

¹⁷ „Assemblers will be able to make virtually anything from common materials without labor, replacing smoking factories with systems as clean as forests.“ (Drexler 1986, 63).

¹⁸ Cf. Bensaude-Vincent 2004a; dies. 2009b; Nordmann 2008a.

¹⁹ Cf. Ferrari 2010; Woyke 2010a, 189ff.

²⁰ „Thus, nanotechnology can quickly and easily claim for itself that it always emulates nature, that it manufactures things nanotechnologically just as nature does when it creates living organisms. This conception, however, is too ‚thin‘ or superficial to be credible and it suffers from the defect that the conditions of (human) life on earth have non particular valence in it [...]“ (Nordmann 2008b, 233).

²¹ Cf. Hülswitt et al. 2010, 15ff.

²² Cf. Hartmann 2006, 19ff.

setzmäßigkeiten zu erschließen,²³ der nähere Charakter des behaupteten „technologischen Determinismus“ bleibt aber gänzlich unbestimmt. Einige Nanoforscher wie Cees Dekker und James M. Tour versuchen diese Lücke durch offene religiöse Bekenntnisse oder Bezüge zum Konzept eines *Intelligent Design* zu schließen.²⁴ Verschiedene Technovisionäre erkennen in der Nanotechnologie die Möglichkeit, technologisch „über die Natur hinauszugehen“.²⁵ Die Natur wird zu einem „Lego-Kasten“ stilisiert,²⁶ über den der Mensch zunehmend besser verfügen und so eine sukzessive Neu- und Umgestaltung erreichen kann. Von zentraler Bedeutung ist der Bezug auf Konzepte von „Selbstorganisation“, wobei natürliche Selbstorganisationsprozesse zum Vorbild einer effektiven Nanotechnologie stilisiert werden. Es erscheint allerdings fraglich, ob uns das Studium der „molekularen Evolution“ grundsätzlich über ein gezieltes Materialdesign, eine effektivere Funktionalisierung und eine Erhöhung der Komplexität molekularer Strukturen hinausführen kann. Drexler und andere Technovisionäre gehen demgegenüber davon aus, dass uns die Generierung von Nanomaschinen zu einer völlig neuen Produktionsweise führen wird. Entgegen der Ansicht, dass diese Visionen in der Forschung als erledigt gelten können, wird in vielfältiger Weise an einer Realisierung von Nanomaschinen gearbeitet. Im Vordergrund steht das Ziel, ihre Möglichkeit zu erweisen, ohne ernsthafte Anwendungen aufzeigen zu können. Wenn Dinge und Funktionen wie Räder, Autos oder Förderbänder auf der Nanoebene gleichsam neu erfunden werden, dann erscheint dies zunächst nicht nur rätselhaft zu sein, es unterstützt auch den Eindruck, die Nanotechnologie könnte uns eine völlig neue Art von Naturbeherrschung ermöglichen. Sie soll nicht nur Wege für eine Steigerung natürlicher Potentiale eröffnen, sondern auch zu einer „technologischen Befreiung“ der Natur beitragen. Eine solche technologische „Animation der Materie“ kann man zunächst als „Light-Version“ von Blochs „Allianztechnik“ begreifen und hinsichtlich ihrer konkreten Möglichkeiten diskutieren. Im Blick auf die großen technologischen Visionen steht jedoch fest, dass hier nicht nur Blochs Interesse an „gesellschaftlicher Emanzipation“²⁷ ausgeblendet wird, sondern auch die schon bei Bloch selbst bestehende Aporie völlig unbedacht bleibt:

„Das von Bloch nicht gesehene Paradox ist, dass gerade die vom Menschen [...] nicht genutzte, die ‘wilde’ Natur die ‘humane’ [...] ist, und die ihm ganz dienstbar gemachte die schlechthin ‘inhumane’. Nur das geschonte Leben offenbart sich.“²⁸

3. Überlegungen zu Clarkes „drittem Gesetz“

Für die Nanotechnologie scheint noch deutlicher als für andere Technologien jene von Clarke behauptete „Ununterscheidbarkeit“ zwischen Technologie und Magie zu gelten. Prophezeiungen über den Fortgang der technologischen Entwicklung leiden nach Clarke einerseits unter einem „Mangel an Mut“, andererseits unter einem „Mangel an Phantasie“. Der erste Fall liegt vor, wenn trotz umfassender Kenntnis eine bestimmte Technik oder Erfindung als unmöglich angesehen wird. Clarke verweist auf die ersten Lokomotiven, die Einführung

²³ Cf. Kurzweil 2006.

²⁴ Cf. hierzu die Homepages von Dekker (www.ceesdekker.net) und Tour (www.jmtour.com), zu Dekkers Bezug auf *Intelligent Design* cf. Asendorf 2006.

²⁵ „Rather, nanotechnology, seems to proceed from a will for the empowerment of nature, in the precise meaning that access to its building blocks would re-open indefinite potential [...]. Just as alchemists were convinced that the access to the minima naturalia would give access to all possible transmutations, [...] nanotechnologists see the ultimate units of matter and of living organisms as a well of unlimited potential.“ (Bensaude-Vincent 2010, 19).

²⁶ „Qui, le Lego c’est clairement le modèle qu’utilise Drexler. Le Lego suppose des pièces préfabriquées, standard et moulées qu’un ingénieur (ou un enfant) agence selon sa volonté.“ (Bensaude-Vincent 2004a, 65).

²⁷ „[...] menschliche Freiheit und Natur als ihre konkrete Umgebung (Heimat) bedingen sich wechselseitig.“ (Bloch 1968, 1080).

²⁸ Jonas 1995, 372f.

elektrischen Lichts und die Bereiche der Luft- und Weltraumfahrt. Der zweite Fall liegt vor, „*when the really vital facts are still undiscovered, and the possibility of their existence is not admitted*“.²⁹ Ein wichtiges Beispiel ist die Skepsis von Ernest Rutherford und anderen Physikern gegenüber der Möglichkeit einer technologischen Nutzung der in der Materie eingeschlossenen Energie. Die technischen Errungenschaften der modernen Welt lassen sich nach Clarke in zwei scharf unterschiedene Klassen einteilen: Einerseits Erfindungen wie der Dieselmotor oder die Dampfmaschine, deren prinzipielle Funktionsweise auch Denkern und Wissenschaftlern früherer Zeiten zugänglich ist, andererseits Erfindungen wie der Computer oder der Atomreaktor, deren Aufbau und Funktion früheren Menschen völlig unverständlich erscheinen muss. Dies liegt nicht primär an ihrer Kompliziertheit, sondern vor allem am Fehlen neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse. Die prinzipielle Funktionsweise einer Atombombe müsste auch einem Wissenschaftler des späten 19. Jahrhunderts als Magie und nicht als Wissenschaft erscheinen. Auf diesen Zusammenhang bezieht Clarke sein Gesetz von der „Ununterscheidbarkeit“ zwischen Technologie und Magie. Modernen Technovisionären wie Drexler und Kurzweil kann man zunächst „zu viel Phantasie“ attestieren, die offene Frage besteht allerdings darin, ob man dies eher im Sinne Clarkes als kühne Prognose oder eher als Ausdruck von fragwürdigen und wissenschaftlich unseriösen Spekulationen nimmt. Die Nanotechnologie und die mit ihr verknüpften Visionen rücken aus zwei Gründen in eine besondere Nähe zu Clarkes „drittem Gesetz“: Zum einen ist die nanotechnologische Forschung im starken Maße an konkreten Anwendungen orientiert und zeigt wenig Interesse, ihre im Vergleich mit anderen Technologien auffällige „theoretische Unterbestimmtheit“ zu relativieren.³⁰ Der berühmte Vortrag von Richard Feynman *There's Plenty of Room at the Bottom* aus dem Jahre 1959 wurde zum Gründungsdokument der Nanotechnologie stilisiert und suggeriert, dass „dort unten“ nicht nur „viel Platz“, sondern Raum für unbegrenzte Möglichkeiten ist. Demgegenüber steht fest, dass auch der Nanobereich von Gesetzen bestimmt wird, die es zu erforschen und zu verstehen gilt, um auch auf der Anwendungsebene besser vorankommen zu können.³¹ Grundlegend neue theoretische Ansätze sind jedoch eher die Ausnahme in der nanotechnologischen Forschung.³² Zum anderen ist die Nanotechnologie von Anfang an stark durch überzogene Visionen bestimmt, die wenig mit ernsthaften Prognosen zu tun haben und durch Grundmotive der Science Fiction Literatur angeregt wurden.³³ Die „großen“ nanotechnologischen Visionen einer Transformation der Welt, der menschlichen Konstitution und der Gesellschaft³⁴ gehen nicht nur im Sinne Clarkes ein kleines Stück über das Mögliche hinaus, sie überschätzen das technologisch Mögliche und verwickeln sich in grundlegende Widersprüche mit naturwissenschaftlichen Theorien. Der „magische Nimbus“ der Nanotechnologie hat insofern viel damit zu tun, dass diese und andere Visionen zumindest z. T. forschungsleitende Funktionen übernehmen und sowohl zu fragwürdigen Zielsetzungen als auch zur Verschleierung wissenschaftlich-technologischer Zusammenhänge beitragen. Ein Ausloten wissenschaftlicher Hintergründe kann daher diesen Nimbus einschränken und so insgesamt realistischere Bewertungen ermöglichen. Außerdem basiert die Relation zwischen Technologie und Magie auf einem Zerrbild: Traditionelle Formen von Magie haben nämlich wenig mit modernen Vorstellungen von absoluter

²⁹ Clarke 1983, 27.

³⁰ Cf. Woyke 2007.

³¹ Cf. Roukes 2002.

³² Cf. Nordmann 2006a.

³³ Cf. Schummer 2009, 48ff.

³⁴ Cf. Woyke 2010b.

Machbarkeit zu tun und sind stets auf Einbettungen in größere kosmologische oder theologische Zusammenhänge bezogen.³⁵

4. „Selbstorganisation“ und Nanomaschinen – Beispiele aus der Forschung

Grundlegende Einwände gegen die Realisierbarkeit einer „molekularen Technologie“ werden häufig mit dem Argument zurückgewiesen, dass es doch bereits „molekulare Maschinen“ in der Natur gibt. Der erfolgreichste und effektivste Weg zu einer funktionsfähigen „molekularen Technologie“ wird darin gesehen, die biologischen Vorbilder zu studieren und daraus Folgerungen für technologische Anwendungen abzuleiten. Die Natur, die hier gemeint ist, ist eine umfassend objektiviert Natur, die ihre ontologische Vorgängigkeit verloren hat und insofern auch keinen Rahmen für eine Integration technischer Dinge liefert. Der beinahe selbstverständliche Gebrauch von Nachahmungsmotiven in der Nanoforschung ergibt sich aus der seltsamen Verschränkung zwischen einer als „überlegener Ingenieur“ verstandenen Natur und einer Naturalisierung der technologischen Produkte. Ebenso fragwürdig erscheint es, den technologischen Gebrauch von Selbstorganisationsprozessen mit einer Überwindung oder Relativierung von Kontrolle über die Natur zu verknüpfen. Wenn der wesentliche Unterschied zwischen belebter und unbelebter Materie darin besteht, dass Lebewesen sich selbst organisieren und über sich selbst bildende Kräfte verfügen,³⁶ dann wird er endgültig verwischt, wenn technologische Systeme entsprechende Fähigkeiten erlangen. Artefakte, die sich selbst organisieren, reparieren und letztlich reproduzieren könnten, wären wie Lebewesen ein immanenter wechselseitiger Zusammenhang von Zwecken und Mitteln³⁷ und würden sich daher jedem starkem Anspruch auf Kontrolle entziehen.³⁸ Die Nanotechnologie soll uns einerseits Kontrolle über die basalen Bausteine der Materie ermöglichen und dabei helfen, bisherige Probleme technologischer Anwendungen zu vermeiden. Andererseits wird die Herstellung nanotechnologischer Produkte durch Selbstorganisationsprozesse mit der Erwartung neuer Eigenschaften und Funktionalitäten verknüpft. Zunächst einmal ist Kants starker Begriff von „Selbstorganisation“ nicht deckungsgleich mit jenen wissenschaftlichen Konzepten, die seit den 1960er Jahren in verschiedenen Disziplinen entwickelt wurden. Das naturwissenschaftliche Verständnis von „Selbstorganisation“ ist nicht auf den biologischen Bereich beschränkt, sondern bezieht sich allgemein auf offene Systeme fern vom Zustand thermodynamischen Gleichgewichts, die eine nichtlineare Dynamik aufweisen und durch Rückkopplungsprozesse vernetzt sind. Selbstorganisationsphänomene reichen vom Kristallwachstum über chemische und biochemische Strukturbildungen bis in den Bereich der biologischen Evolution. Auf Überraschungseffekte und Grenzen technologischer Kontrolle stoßen wir ganz allgemein in den Natur- und Technikwissenschaften, in der Chemie und der Chemischen Technologie spielen sie aufgrund der Dispositionalität chemischer Stoffeigenschaften seit jeher eine zentrale Rolle. So schreibt etwa Friedlieb Ferdinand Runge in einem Aufsatz zur Farbenchemie aus dem Jahre 1850:

„Hier zeigte sich nun mit einem Male eine neue Welt von Bildungen [...], wie ich sie mir [...] nicht gedacht hatte und [...] deren Wirklichkeit daher umso mehr überraschte.“³⁹

³⁵ Cf. Woyke 2011.

³⁶ Kant, Kritik der Urteilskraft, B 293; Werkausgabe, Bd. 10, 322.

³⁷ *ibid.*, B 296; 324.

³⁸ Cf. Bensaude-Vincent 2010, 16f.

³⁹ Runge 1999, 51.

Die Produktion, Funktionalisierung und Implementierung von Nanomaterialien durch Selbstorganisationsprozesse mögen in einem besonderen Maße zu Überraschungseffekten führen, es ist aber zweifellos zu einfach, hier eine Art von gesuchtem Kontrollverlust zu erkennen. Entgegen der Ansicht, dass Nano-Objekte eine neue Technikethik erforderlich machen,⁴⁰ bietet sich hier ein Bezug auf die allgemeine „Unauslotbarkeit“ stofflicher Eigenschaften und die damit verknüpfte Forderung eines besonders verantwortlichen Umgangs mit neuen Stoffen an.⁴¹

Eric Drexlers Visionen einer universellen Assembler-Technologie wurden von verschiedenen Seiten einer grundlegenden wissenschaftlichen Kritik unterworfen.⁴² Die verschiedenen Einwände haben viele Nanoforscher dazu veranlasst, sich klar von diesen Visionen zu distanzieren. Vielfach wird aber auch auf die wichtigen Funktionen visionärer Entwürfe verwiesen.⁴³ Auch in der Forschung sind Drexlers Visionen keinesfalls erledigt.⁴⁴ Eine wichtige Rolle spielt der Einsatz von Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskopen (STM und AFM), mit denen einzelne Atome nicht nur visualisiert, sondern auch manipuliert werden können. Eindringlich zeigten dies Eigler und Schweizer 1990 durch die Generierung des IBM-Logos mit 36 Xenon-Atomen.⁴⁵ Die vielen bunten Bilder aus dem Nano-Kosmos, die im Anschluss daran produziert wurden, vermitteln den Eindruck, mit Hilfe der neuen Techniken wäre ein unmittelbarer Zugriff auf Atome und Moleküle in Analogie zur mechanischen Konstruktion von Maschinen möglich. Der Übergang zu einer „molekularen Technologie“ scheint völlig neue Anwendungen zu eröffnen und unsere Macht über die Natur so zu erweitern, dass wir sukzessive auch die basale materielle Ebene zu beherrschen vermögen. Dieser Eindruck basiert allerdings auf einigen grundlegenden Verschleierungen und Simplifikationen, die vor allem die öffentlichkeitswirksame Präsentation der Nanotechnologie bestimmen. Verschleiert werden nicht nur der Charakter der Phänomene und ihre naturwissenschaftlichen Grundlagen, sondern auch der große technische Aufwand für ihre Realisierung und die Fragwürdigkeit bzw. der geringe Ertrag solcher Experimente.⁴⁶ Der manipulative Zugriff auf einzelne Atome wird so dargestellt, als würde man Konstruktions- und Funktionsprinzipien makroskopischer Dinge einfach auf die atomare Welt übertragen. Demgegenüber gilt es aber die grundlegenden Unterschiede zwischen kontinuierlichen Dingen einerseits und der diskontinuierlichen Struktur der Materie andererseits zu bedenken. So beruht die Manipulation einzelner Atome mit der Spitze eines Rastertunnelmikroskops nicht auf mechanischer Wechselwirkung, sondern auf dem quantenphysikalischen Tunneleffekt.⁴⁷ Auch der große technische Aufwand und die speziellen Bedingungen für solche Manipulationsexperimente sowie die Abhängigkeit der Visualisierungen von den verwendeten Computerprogrammen werden verschleiert. Schließlich ist auch ihr wissenschaftlicher Ertrag fraglich, da es häufig nicht um theoretische Fragen oder die Verbesserung technischer Anwendungen, sondern um das Erzeugen neuer Phänomene und ihre Visualisierung geht. Dies wird auch daran deutlich, dass z. T. die Grenzen zwischen wissenschaftlicher und künstlerischer Produktion verschwimmen und so ein Verständnis für das Zustande-

⁴⁰ *“Therefore nano-objects will require a redefinition of the ethics of design and engineering.”* (Bensaude-Vincent 2010, 17).

⁴¹ Cf. Schummer 1996a, 290ff.; ders. 1996b, 154ff.; Woyke 2007, 759ff.; ders. 2008b, 152ff.

⁴² Cf. Smalley 2001; Whitesides 2001; Jones 2004, 154ff.

⁴³ Cf. Heckl 2006; Binnig 2007.

⁴⁴ Cf. Boeing 2007.

⁴⁵ Eigler et al. 1990.

⁴⁶ Cf. Woyke 2006, 256ff.

⁴⁷ Cf. Hartmann 2006, 68ff.; Rubahn 2004, 26ff.

kommen der Bilder zusätzlich erschwert wird.⁴⁸ Eine Technologie, die uns wie Magie erscheint, wirkt auf uns nicht unbedingt besonders fortschrittlich, wir halten sie eher für unseriös und hinterfragen ihren „magischen Nimbus“. Dieser Eindruck vertieft sich, wenn sie ihre Produkte zu „Kunst“ stilisiert, ohne zu bedenken, dass es echter Kunst nicht nur um „schöne Bilder“, sondern vor allem um eine kritische Reflexion der Realität geht.

Viele nanotechnologische Forschungsprojekte sind primär nicht an der Klärung theoretischer Fragen oder der Entwicklung konkreter Anwendungen orientiert, sondern im Sinne eines *proof of principle* am Nachweis der Möglichkeit einer „molekularen Technologie“. Die umrissenen Tendenzen zur Verschleierung bzw. Simplifizierung prägen insofern nicht nur die öffentliche Präsentation der Nanotechnologie, sie bestimmen auch das Selbstverständnis von Wissenschaftlern und den Charakter des gesamten Forschungs- und Technologiefeldes. 2007 feierte man die „Neuerfindung des Rades“ auf molekularer Ebene.⁴⁹ Wir gewinnen den Eindruck, dass ein zentrales Element herkömmlicher Technik nun auch im Nanokosmos realisiert wird, was uns als ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu zunehmend komplexeren Nanomaschinen präsentiert wird. Auch die sogenannten „Nanoautos“ wurden zu einem großen Durchbruch stilisiert⁵⁰ und in populären Medien als Beleg für die großen Potentiale der Nanotechnologie verwendet. Trotz der langwierigen Forschung zur Realisierung der „Nanocars“ und der im Einzelnen durchaus interessanten Synthesen geht es auch hier nicht um theoretische Erkenntnisinteressen oder konkrete technologische Innovationen, sondern vor allem um das Schaffen von Tatsachen, die der öffentlichkeitswirksamen Präsentation und der Legitimierung weiterer Forschung dienen können.

Der Chemiker Nadrian C. Seeman arbeitet daran, DNA-Moleküle als Speicher für molekulare Informationen zu nutzen und so eine effektive Kontrolle von Selbstorganisationsprozessen zu ermöglichen.⁵¹ In den letzten Jahren wurden erste Ergebnisse einer DNA-Nanotechnologie vorgestellt.⁵² In der Arbeitsgruppe von Hao Yang wurde gezeigt, dass sich die Informationen für das Verhalten einer solchen DNA-Nanomaschine auch durch eine geeignet gestaltete Umgebung zuführen lassen. So kann sich ein „Nanoroboter“ aus einem Protein über eine Fläche aus DNA-Strängen bewegen und wie ein „molekularer Rasenmäher“ gezielt bestimmte Einheiten abschneiden. Diese Resultate sind faszinierend und auch hier drängt sich ein Bezug auf Clarkes „drittes Gesetz“ auf. Dennoch scheint es auch hier vor allem darum zu gehen, Möglichkeitserweise für eine „molekulare Technologie“ und ihr unerschöpfliches Anwendungspotential zu liefern.

In der Arbeitsgruppe von Alex Zettl arbeitet man daran, klassische mechanische und elektronische Funktionen auf der Nanoebene zu realisieren und „nanoelektromechanische Systeme“ (kurz: NEMS) zu konstruieren. Beispiele sind ein „Nanomotor“ und ein „Nano-Förderband“.⁵³ Die erfolgreichen Positionierungsexperimente mit einzelnen Atomen liefern für Zettl einen wichtigen Einwand gegen die Auffassung, dass eine gezielte Produktion mit Nanomaschinen im Sinne von Drexlers Assembler-Technologie illusorisch ist. Das Problem eines Transports von Atomen und Molekülen in den Bereich des Produktionsprozesses kann möglicherweise mit einem geeigneten Fördermechanismus wie dem *Nanoscale Mass Conveyor* gelöst werden.

⁴⁸ Cf. Nordmann 2006b ; ders. 2008b, 229f.; Schummer 2009, 113ff.

⁴⁹ Cf. Hla 2007; Grill et al. 2006.

⁵⁰ Cf. Koumura et al. 1999; Shirai et al. 2006; Osgood et al. 2005.

⁵¹ Cf. Seeman et al. 2002; ders. 2003; ders. 2007; Jones 2004, 124f.; Bath et al. 2007.

⁵² Cf. Gu et al. 2010; Lund 2010; Gast 2010.

⁵³ Cf. Regan et al. 2004.

Die Forscher der *Nanoscience Group* an der University of Nottingham widmen sich einem noch komplexeren Problem und arbeiten daran, die Generierung größerer Nanostrukturen durch Rastersondenmikroskope mit einer Steuerung von Selbstorganisationsprozessen zu kombinieren und so eine Nanomaschine zu designen, die anhand eines internen Programms zu produzieren vermag.⁵⁴ Drexlers Vision einer universellen Assembler-Technologie ist zwar ergänzungsbedürftig, aber keineswegs *per se* unrealistisch. Das visionäre Modell von Nanoassemblern, die prinzipiell alles zu produzieren vermögen, muss zwar aufgegeben werden, aber eine spezifischere Nanofabrikation könnte durchaus in den nächsten zehn Jahren verwirklicht werden.

An diesen wenigen Beispiele wird m. E. deutlich, dass eine einfache Grenzziehung zwischen seriöser und visionär bestimmter Forschung in verschiedenen Bereichen der Nanotechnologie *per se* schwierig ist. Es ist beeindruckend, wenn Strukturen aus einzelnen Atomen erzeugt, nanoskalige Analoga zu Rädern, Autos, Motoren und Förderbändern hergestellt, DNA als Baustoff für molekulare Architekturen und eine mögliche neue Elektronik erschlossen und die Möglichkeiten nanotechnologischer Produktionsprozesse erforscht werden. Grundlegende theoretische und praktische Innovationen aus diesen verschiedenen Forschungslinien sind keinesfalls ausgeschlossen, aber vieles erscheint doch reichlich spielerisch und in vieler Hinsicht sind die öffentliche Präsentation und auch das Selbstverständnis der Wissenschaftler durch Simplifikationen und einen Mangel an kritischer Reflexion bestimmt. Eindringlich zeigt sich dies am unreflektierten Gebrauch des Begriffs „Maschine“,⁵⁵ der die Visionen Drexlers ebenso bestimmt wie konkrete Forschungsprojekte. Die vorgestellten Beispiele aus der aktuellen Forschung wirken faszinierend und beinahe magisch. Dies liegt zunächst sicher daran, dass vielen die naturwissenschaftlichen Hintergründe unbekannt oder zumindest wenig vertraut sind. Vor allem aber liegt es an dem Missverhältnis zwischen „visionärer Überbestimmtheit“ und „theoretischer Unterbestimmtheit“ in der Nanotechnologie,⁵⁶ an der Übermacht bildhafter Veranschaulichungen und am Mangel differenzierter Begriffsbestimmungen. Das Hinterfragen nanotechnologischer Visionen, das Aufzeigen wissenschaftlicher Zusammenhänge, das Eindämmen verführerischer Bilder und das Klären relevanter Begriffe sind wichtige Motive, um die seltsame Nähe der Nanotechnologie zu Clarkes „drittem Gesetz“ zu beleuchten und kritisch zu hinterfragen.

5. Abschließende Betrachtungen

Technologische Anwendungen von Selbstorganisationsprozessen sind nicht nur möglich, sondern werden in unterschiedlichen Feldern bereits eingesetzt. So werden etwa die Prinzipien „molekularer Erkennung“ verwendet, um komplexere Reaktionen zu steuern, zur Erhöhung der Komplexität nutzt man Matrizen nach biologischem Vorbild, die eine Aufteilung in verschiedene Reaktionsschritte ermöglichen und das immer bessere Verständnis der Synthese funktionaler Biomoleküle und Zellorganellen hilft dabei, die Abfolge von Selbstorganisationsprozessen zu planen und zu kontrollieren. Der Chemie-Nobelpreisträger Jean-Marie Lehn spricht von „*programmed supramolecular systems*“, also von Systemen, bei denen wir über das molekulare Design ihrer

⁵⁴ Cf. Moriarty 2005.

⁵⁵ „Maschine“ wird erst in der Neuzeit zu einer allgemeinen „Hintergrundmetapher“ und zu einem zentralen Element des Weltverstehens (cf. Blumenberg 1998). Man kann zelluläre Organellen und andere funktionale Strukturen biologischer Systeme als „Nanomaschinen“ beschreiben, sollte aber stets bedenken, dass dies eine Übertragung von der technischen auf die natürliche Sphäre ist. Wenn wir demgegenüber davon sprechen, dass in der Natur „Maschinen“ vorkommen, die wir lediglich nachahmen müssten, leisten wir einem äußerst dünnen Naturkonzept Vorschub.

⁵⁶ Cf. Woyke 2007.

Komponenten gewisse Festlegungen über Strukturen und Funktionalitäten treffen können.⁵⁷ Er erkennt an, dass die mikroskopische Manipulation einzelner Atome und Moleküle eine Art von „letzter Grenze“ bei der Herstellung nanoskaliger Elemente bildet. Gegenüber einer fortgesetzten Miniaturisierung betont er allerdings die Bedeutung fortgesetzter Komplexifikation, da es weniger auf die konkreten Dimensionen von Strukturen, sondern auf die in Strukturen gespeicherten Informationen ankommt: „[...] *it is clear that through supramolecular chemistry, there's even more room at the top!*“⁵⁸ Lehn sieht die Potentiale eines technologischen Gebrauchs von Selbstorganisationsprinzipien durchaus optimistisch, plädiert aber für eine realistische Bewertung jenseits visionärer Perspektiven. Die Möglichkeiten chemischer Synthesen sind im Vergleich mit der Komplexität biologischer Systeme nach wie vor ziemlich primitiv. Deshalb erscheinen alle Visionen abwegig und unseriös, die ein baldiges Überbieten natürlicher Synthesepotentiale und die Realisierung einer „molekularen Technologie“ im großtechnischen Maßstab versprechen. Dennoch kann der Chemiker mit einer viel größeren Variation hinsichtlich von Stoffen, Reaktionswegen und Herstellungsverfahren operieren und explizit Neues hervorbringen.⁵⁹ Die technologische Anwendung von Selbstorganisationsprozessen kann daher nicht als schlichte und ethisch unbedenkliche „Nachahmung der Natur“ begriffen werden, sondern führt zu einer Radikalisierung von Innovation, die neben den gewünschten Effekten auch neuartige Gefährdungen von Mensch und Umwelt zur Folge haben kann.

In philosophischer Perspektive gilt es zu bedenken, dass „Selbstorganisation“ nicht nur als technologisches, sondern auch als „antireduktionistisches“ Paradigma begriffen werden kann. Vorstellungen einer Kontrolle und eines gezielten Designs von Stoffen und stofflichen Eigenschaften sind keineswegs neu, sie bestimmen die Chemie seit ihrer Konstitution als neuzeitliche Wissenschaft. Der beinahe inflationäre Gebrauch von „Maschinen-Metaphorik“ wirkt im Blick auf moderne Theorien anachronistisch und blendet sowohl ihre historische Konturierung als auch Ansätze einer zeitgemäßen Naturphilosophie aus. Evolutions- und Selbstorganisationsprozesse lassen sich anhand verschiedener Theorien beschreiben, aber für ein angemessenes Verständnis sollten wir über rein naturwissenschaftliche Konzepte hinausgehen und philosophische Naturverständnisse einbeziehen. Eine starke „metaphysische Subjektivierung“ der Natur ist nicht nötig, aber es liegt nahe, ihr in einem regulativen Sinne „eigendynamische Potentiale“ zuzuerkennen, die dann auch mit dem problematischen Begriff „Animation der Materie“ bezeichnet werden könnten. Solche naturphilosophischen Perspektiven könnten dazu beitragen, andere Formen des Umgangs mit der Natur zu stärken und Ansätze der Restitution eines technokratischen Naturverständnisses zurückzuweisen.

In metaphysischer Sicht kann man mit Schelling die problematischen Folgen der forcierten Entfremdung des Menschen von der Natur darauf zurückführen, dass er sich durch ein Übermaß an „Selbstsucht“ von seiner Einbettung in die übergreifenden kosmischen Zusammenhänge abgetrennt hat und somit gegen sich ebenso wie gegen den Kosmos und seinen Grund arbeitet:

„Hieraus entsteht der Hunger der Selbstsucht, die in dem Maß, als sie vom Ganzen und von der Einheit sich lossagt, immer dürftiger, armer, aber eben darum begieriger, hungriger, giftiger wird.“⁶⁰

⁵⁷ Lehn 1995, 143f.

⁵⁸ *ibid.*, 197; Hervorh. i. Orig.

⁵⁹ Lehn verweist hierzu auf eine Äußerung von Marcellin Berthelot: *„La chimie crée son objet“* (1860; zit. n. *ibid.*, 206; cf. hierzu Bensaude-Vincent et al. 2010, 99ff.; dies. et al. 1996, 152ff.).

⁶⁰ Schelling 1997, 62.

Konkreter kann man mit Werner Heisenberg betonen, dass das Bemühen der Menschen um ein affirmatives Verhältnis zur Weltordnung der beste Garant dafür ist, neue Formen und Stufen der Barbarei der Menschen untereinander und der Menschen gegenüber der Welt zu verhindern:

„Wenn einmal die magnetische Kraft ganz erloschen ist, die diesen Kompass gelenkt hat – und die Kraft kann doch nur von der zentralen Ordnung her kommen –, so fürchte ich, dass sehr schreckliche Dinge passieren können, die über die Konzentrationslager und die Atombomben noch hinausgehen.“⁶¹

Die Ordnung, von der Schelling und Heisenberg jeder auf ihre Weise sprechen muss m. E. nicht in ein dichotomisches Verhältnis zu naturwissenschaftlichen Beschreibungen gesetzt werden, sie kann in einen engen Zusammenhang mit ihnen gebracht werden, wenn wir die sukzessive Höherentwicklung im Ausgang von der basalen materiellen Ebene als eine Vernetzung zunehmend komplexerer emergenter Prozesse interpretieren. Überlegungen zu ontologischen Grenzen unseres Naturverständnisses und phänomenologische Charakterisierungen dynamischer Prozesse sind wichtige Elemente einer zeitgemäßen holistischen Naturphilosophie, die eine Grundlage für die kritische Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Reduktionismen und technologischen Machbarkeitsphantasien liefern kann, wie sie aktuell insbesondere die Nanotechnologie bestimmen.

Literatur

Aristoteles, *Physics*, a revised text with introduction and commentary by W. D. Ross, Oxford 1998².

D. Asendorf, Nano in Gottes Namen, *DIE ZEIT* 40 (2006), 46.

J. Bath et al., DNA Nanomachines, *Nature Nanotechnology* 2 (2007), 275-284.

B. Bensaude-Vincent, *Se libérer de la matière*, Paris 2004a.

-, *Two Cultures of Nanotechnology?*, *HYLE* 10 (2004b), 65-82.

-, *Biomimetic Chemistry and Synthetic Biology: A Two-way Traffic Across the Borders*, *HYLE* 15/1 (2009a), 31-46.

-, *Les vertiges de la technoscience*, Paris 2009b.

-, *Objects in Nanotechnology*, in: U. Fiedeler et al. (Eds.), *Understanding Nanotechnology. Philosophy, Policy and Publics*, Heidelberg 2010 9-21.

- et al., *Chemistry. The Impure Science*, London 2010.

- et al., *A History of Chemistry*, Cambridge, MA/London 1996.

G. Binnig, Nanotechnologie könnte die Computer viel intelligenter machen, *DIE ZEIT* 26 (2007), online unter : www.forum-chemie-macht-zukunft.de/Seiten/Interviews/InterviewDrBinnig.aspx.

E. Bloch, *Das Prinzip Hoffnung*, Bd. 2, Frankfurt a. M. 1968.

H. Blumenberg, *Das Verhältnis von Natur und Technik als philosophisches Problem* [1951], in: ders., *Ästhetische und metaphorologische Schriften*, ausgewählt von A. Haverkamp, Frankfurt a. M. 2003, 253-265.

-, „Nachahmung der Natur“. Zur Vorgeschichte der Idee des schöpferischen Menschen [1957], in: ders., *Wirklichkeiten, in denen wir leben*, Stuttgart 1999, 55-103.

-, *Organische und mechanische Hintergrundmetaphorik*, in: ders., *Paradigmen zu einer Metaphorologie* [1960], Frankfurt a. M. 1998.

N. Boeing, Abschied von der Nanovision, *DIE ZEIT* 32 (2007), 29.

J. H. Brooke, *Overtaking Nature? The Changing Scope of Organic Chemistry in the Nineteenth Century*, in: B. Bensaude-Vincent et al. (Eds.): *The Artificial and the Natural. An Evolving Polarity*, Cambridge MA/London 2007, 275-292.

A. C. Clarke, *Profiles of the Future*, London 1983.

L. Daston et al., *Objektivität*, übers. von Ch. Krüger, Frankfurt a. M. 2007.

⁶¹ Heisenberg 1971, 337.

- R. Descartes, *Die Prinzipien der Philosophie*, lat./dt., übers. und hg. von Ch. Wohlers, Hamburg 2005.
- E. K. Drexler, *Engines of Creation*, New York 1986.
- S. A. Edwards, *The Nanotech Pioneers. Where are they taking us?*, Weinheim 2006.
- D. M. Eigler et al., Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope, *Nature* 344 (1990), 524-526.
- A. Ferrari, Die Verbesserung der Natur in der Vision konvergierender Technologien, in: Ch. Coenen et al. (Eds.), *Die Debatte über „Human Enhancement“*. Historische, philosophische und ethische Aspekte der technologischen Verbesserung des Menschen, Bielefeld 2010, 287-306.
- R. Gast, Molekulare Spinne auf dem Vormarsch, *Spektrum der Wissenschaft* 9 (2010), 12-15.
- L. Grill et al., Rolling a Single Molecular Wheel at the Atomic Scale, *Nature Nanotechnology* 2 (2006), 95-98.
- M. Groß, Erstes künstliches Lebewesen?, *Spektrum der Wissenschaft* 8 (2010), 14-16.
- H. Gu et al., A proximity-based programmable DNA nanoscale assembly line, *Nature* 465 (2010), 202-205.
- U. Hartmann, *Faszination Nanotechnologie*, München 2006.
- W. Heckl, Panorama der Nanotechnologien, in: Hessische Staatskanzlei (Hg.), *Dokumentation „Nano – Hier ist die Zukunft“*. Hessen im Dialog, 9. November 2006, Kongresshalle Giessen/Wiesbaden 2007, 29-32.
- W. Heisenberg, *Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik* [1969], Frankfurt a. M./Wien/Zürich 1971.
- S.-W. Hla, Molecular Machines: Reinventing the Wheel, *Nature Nanotechnology* 2 (2007), 82-84.
- T. Hülschwit et al., Werden wir ewig leben? Gespräche über die Zukunft von Mensch und Technologie, Frankfurt a. M. 2010.
- F. Jacob, *Die Logik des Lebenden. Von der Urzeugung zum genetischen Code* [1970], übers. von J. und K. Scherrer, Frankfurt a. M. 1972.
- H. Jonas, *Das Prinzip Verantwortung*, Frankfurt a. M. 1995¹².
- R. A. L. Jones, *Soft Machines. Nanotechnology and Life*, Oxford 2004.
- I. Kant, *Werkausgabe* in 12 Bd., hg. von W. Weischedel, Frankfurt a.M. 1984.
- N. Koumura et al., Light-driven Monodirectional Molecular Rotor, *Nature* 401 (1999), 152-155.
- R. Kurzweil, Der Mensch, Version 2.0, *Spektrum der Wissenschaft* 1 (2006), 100-105.
- J.-M. Lehn, *Supramolecular Chemistry. Concepts and Perspectives*, Weinheim/New York 1995.
- P. Levi, *Das periodische System* [1975], übers. von E. Plackmeyer, Frankfurt a. M. 2004.
- K. Lund et al., Molecular robots guided by prescriptive landscapes, *Nature* 465 (2010), 206-210.
- Ph. Moriarty, Nanotechnology: radical new science or plus ça change?, *Nanotechnology Perceptions* 1 (2005), 115-118.
- S. Müller-Wille et al., *Das Gen im Zeitalter der Postgenomik. Eine wissenschaftshistorische Bestandsaufnahme*, Frankfurt a. M. 2009.
- A. Nordmann, Mit der Natur über die Natur hinaus?, in: K. Köchy et al. (Hg.), *Nanobiotechnologien. Philosophische, anthropologische und ethische Fragen*, Freiburg/München 2008a, 131-147.
- , *Philosophy of Nanotechnoscience*, in: G. Schmid (Ed.), *Nanotechnology. Vol. 1: Principles and Fundamentals*, Weinheim, 2008b, 217-244.
- , *Unsichtbare Ursprünge: Herbert Gleiter und der Beitrag der Materialwissenschaft*, in: A. Nordmann et al. (Hg.), *Nanotechnologien im Kontext. Philosophische, ethische und gesellschaftliche Perspektiven*, Berlin 2006a, 81-96.
- , *Vor-Schrift und Visualisierungskunst*, in: W. Krohn (Hg.), *Ästhetik in der Wissenschaft: Interdisziplinärer Diskurs über das Gestalten und Darstellen von Wissen*, Hamburg 2006b, 117-129.
- NSTC (Ed.), *Nanotechnology. Shaping the World Atom by Atom*, Washington 1999.
- A. J. Osgood et al., Directional Control in Thermally Driven Single-Molecule Nanocars, *Nano Letters* 5 (2005), 2330-2334.
- B. C. Regan et al., Carbon Nanotubes as Nanoscale Mass Conveyor, *Nature* 428 (2004), 924-927.
- H.-J. Rheinberger et al., *Vererbung. Geschichte und Kultur eines biologischen Konzepts*, Frankfurt a. M. 2009.

- M. Roukes, Plenty of Room, Indeed, in: Editors of Scientific American (Eds.), Understanding Nanotechnology, New York, 2002, 18-33.
- F. F. Runge, Zur Farbenchemie [1850], in: L. Kuhnert et al. (Hg.), Selbstorganisation chemischer Strukturen, Frankfurt a. M. 1999², 48-57.
- F. W. J. Schelling, Philosophische Untersuchungen über das Wesen der menschlichen Freiheit und die damit zusammenhängenden Gegenstände [1809], hg. von Th. Buchheim, Hamburg 1997.
- J. Schummer, Nanotechnologie. Spiele mit Grenzen, Frankfurt a. M. 2009.
- , Realismus und Chemie. Philosophische Untersuchungen der Wissenschaft von den Stoffen, Würzburg 1996a.
- , Philosophie der Stoffe, Bestandsaufnahme und Ausblicke: Von der philosophischen Entstofflichung der Welt zur ökologischen Relevanz einer Philosophie der Stoffe, in: N. Psarros et al. (Hg.), Philosophie der Chemie. Bestandsaufnahme und Ausblick, Würzburg 1996b, 143-164.
- N. C. Seeman, DNA: Not Mereley the Secret of Life, in: Hessische Staatskanzlei (Hg.), Dokumentation „Nano – Hier ist die Zukunft“. Hessen im Dialog, 9. November 2006, Kongresshalle Giessen, Wiesbaden 2007, 33-34.
- , Biochemistry and Structural DNA Nanotechnology: An Evolving Symbiotic Relationship, Biochemistry 42 (2003), 7259-7269.
- et al., Emulating Biology: Building Nanostructures from the Bottom Up, Proceedings of the National Academy of Sciences, USA 99 (2002), 6451-6455.
- Y. Shirai et al., Recent Progress on Nanovehicles, Chemical Society Reviews 35 (2006), 1043-1055.
- R. E. Smalley, Chemie, Liebe und dicke Finger, Spektrum der Wissenschaft Spezial, Nanotechnologie, 2 (2001), 66-67.
- G. M. Whitesides, Lernen von der ältesten Nanomaschine, Spektrum der Wissenschaft Spezial, Nanotechnologie, 2 (2001), 68-73.
- A. Woyke, Verflüssigung der Grenzen zwischen Technologie und Magie? – exemplarische Betrachtungen im Blick auf die Nanotechnologie, in: A. Dunshirn et al. (Hg.), Crossing Borders. Grenzen (über)denken. Beiträge zum 9. Internationalen Kongress der Österreichischen Gesellschaft für Philosophie in Wien, Wien 2011 (in Vorbereitung).
- Naturwissenschaftliche Weltdeutung und technologische Weltgestaltung im Blick auf die Konstitution der Biotechnologie – Exemplarische Analysen und Folgerungen für die Gegenwart, in: Ch. Coenen et al. (Hg.), Die Debatte über „Human Enhancement“. Historische, philosophische und ethische Aspekte der technologischen Verbesserung des Menschen, Bielefeld 2010a, 171-196.
- , Philosophische Überlegungen zum Status und zur Charakteristik nanotechnologischer Visionen, in: A. Ferrari et al. (Hg.): Visionen der Nanotechnologie, Berlin, 2010b, 51-77.
- , Nanotechnologische Visionen zur Transformation der Natur. Wichtige Beispiele und kritische Einwände, in: K. Köchy et al. (Hg.), Nanobiotechnologien. Philosophische, anthropologische und ethische Fragen, Freiburg/München 2008a, 229-263.
- , Konkrete Risiken der Nanotechnologie im größeren Kontext - wissenschaftsgeschichtliche, wissenschaftsphilosophische und ethische Perspektiven, in: R. J. Busch (Hg.): Nano(bio)technologie im öffentlichen Diskurs, München, 2008b, 140-165.
- , "Nanotechnologie" als neue "Schlüsseltechnologie"? - Versuch eines historischen und systematischen Vergleichs mit anderen Technologien, Journal for General Philosophy of Science 38 (2007a), 329-345.
- , Die Entwicklung einer aprozessualen Welt- und Naturdeutung. Von einem Problem der Chemiedidaktik zu einer Rekonstruktion der abendländischen Geistesgeschichte vom Mythos bis zur Moderne, Saarbrücken, 2007b.
- , Was an der Nanotechnologie ist von philosophischem Interesse? Diskussion ausgewählter Fragestellungen, Facta Philosophica 8 (2006), 253-273.

