

Kein Weg vorbei an der Natur: Natur als Gegenpart und Voraussetzung der Nanotechnologie

Gregor SCHIEMANN

Philosophisches Seminar / FB A, Bergische Universität Wuppertal
schiemann@uni-wuppertal.de

Abstract. Two criteria are proposed for characterizing the diverse and not yet perspicuous relations between nanotechnology and nature. They assume a concept of nature as that which is not made by human action. One of the criteria endorses a distinction between natural and artificial objects in nanotechnology; the other allows for a discussion of the potential nanotechnological modification of nature. Insofar as current trends may be taken as indicative of future development, nanotechnology might increasingly use the model of nature as a point of orientation, while many of its products will continue to be clearly distinguished from nature.

1. Einleitung¹

Das Verhältnis von Nanotechnologie und Natur ist in zweifacher Hinsicht problematisch. Um diese Problematik einführend zu charakterisieren, möchte ich für „Nanotechnologie“ und „Natur“ jeweils eine Definition vorgeben, die ich später näher erläutern werde. Nach diesem Verständnis gehören nanotechnologische Gegenstände zu denjenigen technisch hergestellten Gegenständen, die aus Prozessen hervorgehen, „that exhibit fundamental control of the physical and chemical attributes of molecular-scale structures“ (Stix 2001, S. 9). Mit der Nanotechnologie hält eine präzise planbare Naturveränderung in der Größenordnung von mehreren Atomen Einzug. Nanotechnologie umfasst nicht nur die Manipulation von natürlichen Molekülen, sondern auch die Schaffung von Molekülen, die in der Natur nicht vorkommen. In dem hier gemeinten Sinn sind Moleküle oder andere Objekte natürlich, wenn sie nicht vom Menschen gemacht sind bzw. kein Anlass besteht, einen künstlichen Ursprung ihrer Entstehung anzunehmen.

Insofern sich einige nanotechnologische Gegenstände deutlich von vergleichbaren natürlichen unterscheiden, andere aber mit natürlichen Gegenständen identisch sind, kann man das Verhältnis zwischen Nanotechnologie und Natur als uneinheitlich bezeichnen. Ich beginne mit einigen Beispielen für die Nichtnatürlichkeit nanotechnologischer Produkte, die – wie bei anderen menschlichen Herstellungen – am offenkundigen künstlichen Ursprung erkennbar ist:

- Für medizinische Zwecke werden beispielsweise nicht in der Natur vorkommende Moleküle synthetisiert, die sich dafür eignen, Medikamente gezielt an bestimmte Körperstellen zu transportieren.

¹ Dieser Text ist aus der ins Deutsche übersetzten und überarbeiteten Fassung von Schiemann 2005b hervorgegangen.

- Die Werkstoffwissenschaften sind an der nanotechnologischen Herstellung von Materialien interessiert, weil sie für den Bau von makroskopischen Produkten wesentlich bessere Eigenschaften (z.B. der Festigkeit) aufweisen als aus Naturstoffen gewonnene Materialien.
- Im Nanobereich sollen kleinste elektrische oder mechanische Systeme strukturanalog zu den heute verwendeten makroskopischen Systemen konstruiert werden (z.B. Schalter, Motoren, Getriebe), die nicht an Vorbildern der Natur orientiert sind.

Nanotechnologische Produkte, die in der Natur nicht vorkommen, bilden eine künstliche Welt, deren Verhältnis zur Natur insofern problematisch ist, als ihre *Naturverträglichkeit* noch weitgehend ungeklärt ist. Zum einen könnten unkontrollierte Freisetzungen solcher Nanoobjekte eine neuartige Dimension von lebensbedrohlichen Umweltverschmutzungen darstellen. Zum anderen kann man nicht ausschließen, dass auch die kontrollierte Einbringung von nichtnatürlichen Nanoprodukten in die Natur, insbesondere in den menschlichen Körper, mit erheblichen Risiken verbunden wäre. In beiden Fällen würden die Gefahren mit der Kleinheit und der damit verbundenen Reaktivität dieser Produkte zusammenhängen. Sie vermögen tief und irreversibel in biotische Systeme einzudringen und deren Lebensfunktionen nicht nur positiv zu beeinflussen, sondern auch zu stören bzw. zu zerstören. Gegenüber den bisher üblichen makroskopischen Technologien steht die Nanotechnologie insofern in einem anderen Verhältnis zur Natur als sie in kleinsten Dimensionen die Funktionsweisen von natürlichen Systemen beeinflussen kann. Aber die Nanotechnologie schafft nicht nur eine von der Natur unterschiedene Kunstwelt. Sie ist auch eine auf neue Weise auf Naturprozesse und -stoffe bezogene Technologie.² In dieser Hinsicht ist ihre *Abgrenzung* gegenüber der Natur problematisch. Auch hierfür möchte ich Beispiele anführen:

- Im abiotischen Bereich verspricht man sich von der Entwicklung der Nanotechnologie nicht nur die Herstellung maßgeschneiderter künstlicher Werkstoffe, sondern auch verbesserte Bedingungen für den künstlichen Nachbau von Stoffen, die nur in aufwändigen Verfahren aus der Natur gewonnen werden können (analog zur biotechnologischen Herstellung z.B. von menschlichem Interferon, Insulin usw.). Je perfekter es möglich ist, Moleküle im Nanobereich nach dem Vorbild der Natur zusammenzusetzen, desto unanwendbarer wird die Unterscheidung von Natur und Technologie in diesem Bereich.
- Schon jetzt setzt die Nanotechnologie bei der Bottom-Up-Herstellung von Stoffen Verfahren der Selbstorganisation ein, die einige Ähnlichkeit mit in der Natur vorkommenden Prozessen aufweisen (z.B. die spontane Bildung von GaAs-Quantenpunkten, vgl. Wevers & Wechsler, S. 11).
- In einigen nanotechnologischen Systemen werden Elemente biotischer Herkunft verwendet. So kommen in elektronischen Bauteilen DNA-Moleküle zum Einsatz. Sie gehören ihrem Ursprung, nicht aber ihrer Funktion nach zur Natur. Andere nanotechnologische Produkte sollen neuartige biokompatible (z.B. Beschichtungen von künstlichen Gelenken) oder bioanalogue (z.B. hydrophobe) Eigenschaften aufweisen.

Die Problematik der Naturverträglichkeit kann bei den nanotechnologischen Gegenständen und Techniken, die eine enge Verwandtschaft zu Natürlichem aufweisen oder mit ihm gar identisch sind, ebenso auftreten wie bei den deutlich von Natürlichem un-

² Negrotti 2002, S. 4: „Nanotechnology (...) can be oriented either to reproduce natural things or processes, exhibiting different features, or to produce new objects or materials“.

terschiedenen. Der Grad der Lebensbedrohlichkeit eines künstlich hergestellten Stoffes steht beispielsweise in keiner eindeutigen Beziehung zum Grad seiner Strukturähnlichkeit mit natürlichen Stoffen. Die Einbringung von künstlich erzeugten naturidentischen Stoffen in natürliche Kreisläufe kann – um einen weiteren Aspekt exemplarisch zu benennen – zu erheblichen Störungen dieser Kreisläufe führen. Trotz der Bedenken, die auch gegenüber den am Vorbild der Natur orientierten Stoffen und Prozessen berechtigt sind, besteht doch die Hoffnung, dass eine größere Naturnähe der Nanotechnologie ihre Gefahren vermindern könnte.³

Die *praktische* Relevanz der Gefahren, die möglicherweise von der Nanotechnologie für Lebensprozesse ausgehen und ausgehen werden, bildet die wohl wichtigste Motivation für die Frage nach den Beziehungen von Nanotechnologie und Natur. Bei einer Technik, die die synthetische Herstellung von naturidentischen Gegenständen erlaubt und kleinste Veränderungen von Natur auf der Molekülebene wunschgemäß auszuführen vermag, stellt sich die Frage ihrer Beziehungen zur Natur aber auch in *theoretischer* Hinsicht. Ist es überhaupt noch möglich, zwischen Natur und Technik zu unterscheiden, wenn Natur für technische Zwecke bereits in den Dimensionen von Molekülen veränderbar wird? Setzt Natur, wenn sie sich von Technik denn überhaupt abheben lässt, dieser noch Grenzen? Diese Fragestellungen haben vor dem Hintergrund des abendländischen Kulturkreises, in dem Technik zu den Gegenbegriffen der Natur zählt, eine nicht zu überschätzende Bedeutung. In ihrem Gegensatz zur Technik gilt Natur als Inbegriff dessen, was auch ohne den Menschen da ist bzw. da sein könnte. Während Technik als Menschenwerk im Prinzip vollkommen durchschaubar ist, entzieht sich Natur in ihrer Eigenständigkeit dem menschlichen Erkennen. Bis heute kommt dem Naturbegriff eine orientierungsleitende Funktion zu, die untergraben würde, wenn sich seine Differenz zur Technik nicht mehr aufrechterhalten ließe.

Können aber diese Fragestellungen beantwortet werden, wenn sich die Beziehungen zwischen Nanotechnologie und Natur selbst unterschiedlich gestalten? Man könnte versucht sein anzunehmen, dass eine Einengung des Begriffes der *Nanotechnologie* zu eindeutigeren Aussagen führen würde. Gegen diese Vermutung spricht aber der noch geringe Entwicklungsstand der Nanotechnologie, die nach übereinstimmendem Urteil ihrer AnalystInnen weniger schon im Stadium einer funktionierenden Technologie als vielmehr noch im Stadium der Erforschung ihres noch wenig klar umrissenen Gegenstandsbereiches liegt, weswegen die betreffenden Disziplinen auch meist zur Grundlagenforschung zu rechnen sind.⁴ Die kaum erschlossenen Strukturen dieses Bereiches versuchen die unterschiedlichsten Disziplinen aufzuklären. Eine Präzisierung des Begriffes wird deshalb die Vielfalt der unter ihn fallenden Objekte nur bedingt begrenzen. Auch eine Reduzierung des Umfangs des *Naturbegriffes* ist vermutlich nicht geeignet, die verschiedenen Möglichkeiten, mit denen sich die Nanotechnologie auf Natur beziehen kann, einzuschränken. Die von mir vorausgesetzte Bedeutung entspricht, wie ich zeigen möchte, durchaus in der Nanotechnologie selbst und zu Recht verbreiteten Verwendungsweisen. *Man muss deshalb konstatieren, dass das Verhältnis von nanotechnologischen und natürlichen Objekten unter den gegenwärtigen Umständen insgesamt nicht eindeutig zu charakterisieren ist.*

Aus der Vielfalt der Beziehungen zwischen Nanotechnologie und Natur folgt aber nicht, dass auch eine Vielfalt von Kriterien zur Beschreibung dieser Beziehungen he-

³ Zu den mit der Verwendung von nanotechnologischen Produkten verbundenen Risiken vgl. auch: Hansson 2004 und Grinbaum und Dupuy 2004.

⁴ Z.B. Siegel *et al.* 1999, S. 11-12; Stix 2001; Jopp 2004, S. 36.

rangezogen werden muß. Meine These ist vielmehr, dass sich die unterschiedlichen Beziehungen durch einheitliche Kriterien charakterisieren lassen, die auch erste Antworten auf die angesprochenen Fragestellungen gestatten. Dabei kann man sich nicht auf die bisher nur wenig entwickelte philosophische Diskussion der Nanotechnologie stützen.⁵ Einen geeigneten Ansatzpunkt bildet der vorgestellte Naturbegriff, aus dem sich zwei grundlegende Bestimmungen des Verhältnisses von Nanotechnologie und Natur ableiten:

- Erstens lässt sich aus der Präzision des Naturbegriffes als dem nicht vom Menschen Hervorgebrachten ein Kriterium gewinnen, das zwischen *natürlichen und künstlichen* Objekten der Nanotechnologie unterscheidet (Abschnitt 3).
- Zweitens gestattet der Naturbegriff die Grenze der *Reichweite der Nanotechnologie* zu charakterisieren (Abschnitt 4).

Diese zwei Kriterien erlauben außerdem eine Diskussion der Beziehungen zwischen den nanotechnologischen Objekten und den Objekten der *lebenden Natur*. Letztere sind die Paradigmen eines Verständnisses von Natur als nicht vom Menschen hervorgebracht. Keines der bekannten Naturgesetze schließt aber die Möglichkeit aus, dass Leben zukünftig künstlich mit den Mitteln der Nanotechnologie hergestellt wird. Eine auf diesem Wege herbeigeführte Auflösung des Unterschiedes zwischen den künstlichen Nanoobjekten und den lebenden Naturobjekten wäre die größte denkbare Veränderung im Verhältnis von Nanotechnologie und Natur (Abschnitt 5).

Bevor ich die Kriterien ausführe, möchte ich wie angekündigt den von mir einführend verwendeten Begriff der Nanotechnologie erläutern, um deutlich zu machen, welche seiner Bestimmungen in das Verhältnis zur Natur eingehen.

2. Zur Definition der Nanotechnologie

Die einführende Kennzeichnung der Nanotechnologie ist nur ein Teil einer von Mihail C. Roco stammenden Definition, nach der die nanotechnologischen Materialien und Systeme die folgenden „key properties“ besitzen:⁶

they have at least one dimension of about one to 100 nanometers, they are designed through processes that exhibit fundamental control of the physical and chemical attributes of molecular-scale structures, and they can be combined to form larger structures. (Stix 2001, S. 9)

Nanotechnologie ist die Gewinnung und Anwendung von Wissen zum Zweck der Herstellung solcher Materialien und Systeme. In der gegenwärtigen Phase der Erkundung

⁵ Die philosophische Diskussion beschränkt sich vor allem auf ethische und technikphilosophische Fragestellungen, bei denen die begriffliche Bestimmung des Verhältnisses von Nanotechnologie und Natur allenfalls eine untergeordnete Rolle spielt. Vgl. die Nano-STS Bibliographie der University of South Carolina (<http://www.cla.sc.edu/cpeccs/nirt/bibliography.html>), die „scholarly publications in the history, philosophy, and sociology of nanoscience and technology“ enthält. Zu den Ausnahmen gehört Lee 1999, die die Differenz zwischen den Kategorien des Künstlichen und des Natürlichen auf ontologischer Basis begründet und gegen die nanotechnologischen Möglichkeiten ihrer nahezu vollständigen Beseitigung verteidigt (vgl. insb. S. 114-123). Eine erste philosophische Diskussion des Naturbegriffes mit Bezug auf die öffentliche Darstellung der Nanotechnologie bietet Schiemann 2004a.

⁶ Die gegenwärtig relevanten Definitionen der Nanotechnologie werden ausführlich diskutiert in Schmidt *et al.* 2003, zu den Schwierigkeiten einer adäquaten Definition der Nanotechnologie vgl. Fogelberg und Glimell 2003, S. 48-51, Malsch 1997.

der elementaren Herstellungsbedingungen gehen technologische und naturwissenschaftliche Grundlagenforschung ineinander über. Wo ich den Ausdruck „Nanotechnologie“ nicht ausdrücklich von Naturwissenschaft unterscheidet, umfasst er auch diese.

Rocos Bestimmung möchte ich mit zwei Ergänzungen übernehmen. Die erste betrifft den *Ursprung und Zweck der Nanotechnologie*. Nanotechnologie ist wie alle Technologie (ich unterscheidet auch nicht zwischen Technik und Technologie) eine menschliche Unternehmung. Das Verhältnis der Nanotechnologie zur Natur reduziert sich auf Verhältnisse des Menschen und seiner Handlungen zur Natur. Als menschliche Unternehmung ist die Nanotechnologie ein kulturhistorisches Phänomen, das sachgemäßes und wissensbasiertes Können zum Einsatz bringt, um Zielsetzungen zu erreichen (von einer von Zielsetzungen abgelösten, sich verselbständigenden Technologieentwicklung sehe ich hier ab), und sich nur analogisch oder metaphorisch auf die nichtmenschliche Natur übertragen lässt. Strenggenommen gibt es in der nichtmenschlichen Natur keine nanotechnologischen Prozesse oder Objekte. Dafür, dass dies viele NanotechnologInnen allerdings anders sehen, wird der nächste Abschnitt einige Beispiele anführen.

Meine zweite Ergänzung betrifft das *Verhältnis der Nanotechnologie zu anderen Technologien*. Unter „fundamental control“ von Eigenschaften verstehe ich eine Realisation von gewünschten Eigenschaften, die über die Beeinflussung von vorgegebenen Eigenschaften hinausgeht. Damit grenzt sich die Definition zusätzlich von der der Bio- und Gentechnologie ab, die insofern schon nicht in den Bereich der Nanotechnologie fallen, als sie es mit Objekten zu tun haben, die größtmäßig typischerweise oberhalb dieses Bereiches liegen.⁷ Die Eigenschaften bio- und gentechnologischer Gegenstände werden nicht qua Herstellung erzeugt, sondern qua Einflussnahme verändert. Ohne diese Disziplinendifferenzierung könnte zwischen den Transferrichtungen von Nanotechnologie und Biotechnologie nicht unterschieden werden (vgl. Abschnitt 4).

Die Definition schließt weder die zukünftige Möglichkeit einer nanotechnologischen Herstellung von biotischen Stoffen oder Lebewesen noch die bereits bestehenden Übergänge und Überschneidungen zwischen Nano-, Bio- und Gentechnologie aus. Ihre Anwendung auf die gegenwärtigen technologischen Möglichkeiten führt aber zu einer Teilung in die wesentlich abiotischen Produkte der Nano- und die wesentlich biotischen Produkte der Bio- und Gentechnologie. *Von einer Natur, die die Lebewesen mit umfasst, ist die gegenwärtige Nanotechnologie insofern deutlich abgehoben.*

3. Natur als nicht vom Menschen Hervorgebrachtes

Der Naturbegriff ist in der Nanotechnologie so wenig wie in den Naturwissenschaften und den meisten Technologien thematisch. Grundlegende Kategorien werden auch in der Nanotechnologie allenfalls noch und mit entsprechenden Unschärfen in Publikationen explizit verwendet, die sich an das Publikum anderer Disziplinen oder an die breitere Öffentlichkeit wenden. Diesen Verwendungen lassen sich verschiedene Bedeutungen des Naturbegriffes entnehmen, von denen ich annehme, dass sie auch in der wissenschaftlichen Praxis wirksam sind. Exemplarisch habe ich drei repräsentative und elektronisch erfasste Publikationen nach dem Vorkommen des Ausdrucks „Na-

⁷ Biotechnologie meint allgemein die technische Nutzbarmachung von Fortschritten in der Entwicklung der Verfahren und der Instrumente der biologischen Wissenschaften. Gentechnologie kann als Teilgebiet von Biotechnologie und Molekularbiologie verstanden werden.

tur“ untersucht: Den vom National Science and Technology Council (NSTC) der USA 1999 veröffentlichten Prospekt „Nanotechnology. Shaping the World Atom by Atom“, den von der Zeitschrift *Scientific American* 2001 zusammengestellten Band *Understanding Nanotechnology* und das von B. Bhushan 2004 herausgegebene *Springer Handbook of Nanotechnology*.⁸

In diesen Texten lassen sich eine adjektivische und eine substantivistische Verwendung als die zwei Hauptvarianten der Bedeutung unterscheiden. Sie entsprechen auch den beiden vom *The New Oxford Dictionary of English* angeführten Bedeutungen von Natur. Die *adjektivische* Verwendung bezeichnet „the basic or inherent features of something, especially when seen as characteristic of it“ (*The New Oxford Dictionary of English* 1999). Typische Beispiele wären hierfür etwa „the wave nature of electrons“ (NSTC 1999, S. 1) oder „the cyclic nature of this process“ (Bhushan 2004, S. 156). Da diese Bedeutung auf keine bestimmten Eigenschaften referiert und sich erst aus dem jeweiligen Kontext erschließt, werde ich sie nicht weiter berücksichtigen.

Die *substantivistische* Verwendung gliedert sich in eine extensive und eine intensionale Bedeutung, die sich auch im *The New Oxford Dictionary of English* nachweisen lassen, ohne dass dort explizit zwischen ihnen unterschieden wird:⁹ Natur als „the phenomena of the physical world collectively [...] as opposed to humans or human creations“ meint die *extensionale*, als „the physical force regarded as causing and regulating these phenomena“ meint die *intensionale* Bedeutung (*The New Oxford Dictionary of English* 1999). Während die *extensionale* Bestimmung den Umfang des Begriffes *negativ* gegen menschliche Handlungen abgrenzt, nimmt die *intensionale* charakteristische Eigenschaften wie z.B. physikalische Kräfte als *positive* Merkmale auf.

Exemplarisch für die *extensionale* Verständnisweise ist die in allen Publikationen vorkommende Rede von „nature’s own nanotechnology, which emerged billions of years ago when molecules began organizing into the complex structures that could support life“ (NSTC 1999, S. 1, entsprechend z.B. *Scientific American* 2001, S. 9, Bhushan 2004, S. 2). Hieran schließt sich die Unterscheidung zwischen natürlichen und synthetischen Objekten an, wenn etwa davon gesprochen wird, „that nature constructs its objects“ (Bhushan 2004, S. 246), oder eine künstlich hergestellte Funktion dadurch gekennzeichnet wird, dass sie „unprecedented in nature“ ist (Bhushan 2004, S. 283). Die *intensionalen* Verwendungen weichen von der genannten Lexikonbestimmung darin ab, dass die von ihnen genannten charakteristischen Eigenschaften auch menschliche Handlungen und ihre Produkte mit einbeziehen. So zitiert die NSTC-Broschüre aus Richard Feynman’s berühmter Rede „There is Plenty of Room at the Bottom“ von 1959: „But we must always accept some atomic arrangement that nature gives us“ (NSTC, S. 4). Im gleichen Sinn bezieht sich Michael L. Roukes auf den Begriff der Natur, wenn er feststellt „Nature has already set the rules for us“ (Roukes 2001a, S. 32).

Die angeführten Beispiele folgen einem intuitiven technologischen Naturverständnis, das Natur als Ressource für die Realisierung von Zwecksetzungen begreift. Es lässt begriffliche Präzision, auf die es allerdings im Kontext des ausgewählten Veröffentlichungstyps nicht ankommt, vermissen. Zu den terminologischen Unschärfen gehört auch die Vieldeutigkeit des Begriffes der Technologie, der nicht durchgängig als Kontrast zu dem der Natur aufgefasst wird, sondern teilweise metaphorisch auf Naturvor-

⁸ NSTC 1999, *Scientific American* 2001, Bhushan 2004.

⁹ „Extension“ heißt die Klasse der Gegenstände, auf die sich ein Begriff bezieht, „Intension“ die Klasse der Merkmale, die in einer vollständigen konjunktiven Definition des Begriffes auftreten. Zur näheren Bestimmung von extensionalen und intensionalen Bedeutungen des Naturbegriffes vgl. Schiemann 2005a, S. 4 f. und 436 f.

gänge übertragen wird. Ferner bleiben Beziehungen zwischen intensionalen und extensionalen Bedeutungen von Natur unberücksichtigt. Zudem fehlt ein Kriterium für die Unterscheidung von natürlichen und künstlichen Objekten. Diese Desiderata sollen durch eine Präzisierung des von mir vorgestellten Begriffes behoben werden.

Der Naturbegriff, den ich nun erläutern möchte, schließt an das intuitive Naturverständnis an, indem er nicht von einer positiven Kennzeichnung der Natur ausgeht, sondern von Zwecksetzungen: *Natur ist das nicht vom menschlichen Handeln Hervorgebrachte*. Dieser Begriff grenzt sich gegenüber traditionellen Bestimmungen ab, die Natur durch positive Eigenschaftszuschreibungen – wie Selbstbewegung bei Aristoteles oder Ausdehnung bei Descartes – definieren.¹⁰ Den Ausdruck „nicht vom menschlichen Handeln hervorgebracht“ verwende ich in einer engen und einer weiten Bedeutung. Während die *enge Bedeutung* sich auf Gegenstände bezieht, deren Dasein nicht auf menschliches Handeln zurückgeht (Gegenpart der Technik), bezeichnet die *weite Bedeutung* den empirischen Gehalt von Naturgesetzen, der sich menschlicher Verfügung entzieht (Voraussetzung der Technik).¹¹ Die weite Bedeutung umfasst damit auch die dem menschlichen Handeln vorausliegenden Naturbedingungen. In den folgenden Absätzen dieses Abschnittes werde ich mich auf die enge, im nächsten auf die weite Bedeutung beschränken.

Unter den heutigen Bedingungen einer hoch entwickelten Technologie lässt sich normalerweise nur mit wissenschaftlichen Methoden feststellen, ob sich das Dasein eines Objekts menschlichen Handlungen verdankt. Ich führe deshalb ein *epistemisches Kriterium* ein, nach dem ein Objekt zur Natur gehört, *wenn sich (mit allen zu einer Zeit verfügbaren wissenschaftlichen Methoden) nicht ermitteln lässt, dass es von menschlichem Handeln hervorgebracht wurde*.¹² Umgekehrt ist ein Objekt als künstlich anzusehen, wenn es (wissenschaftlich nachgewiesen) durch menschliches Handeln entstand. Die Unterscheidung zwischen natürlichen und künstlichen Objekten erhält mit der Anwendung dieses Kriteriums den Charakter einer empirischen Untersuchung. In Laborexperimenten kann die Natürlichkeit von technologischen Objekten durch Verfahren, die dem Turing-Test der künstlichen Intelligenz ähnlich sind, beurteilt werden.¹³ Ein künstlich hergestelltes Objekt würde demnach zur Natur gehören, wenn es (mit allen zu einer Zeit verfügbaren wissenschaftlichen Methoden) nicht gelänge, es von einem aus Naturstoffen bestehenden identischen Objekt zu unterscheiden. Diese Anwendung des Kriteriums setzt das Wissen über alle vorhandenen Naturstoffe und -prozesse bzw. das Wissen über alle spezifischen Merkmale menschlicher Herstellungen voraus.¹⁴

¹⁰ Historisch wird die Bestimmung der Natur als das nicht vom Menschen Hergestellte im 19. Jahrhundert bedeutsam. Von herausragender wirkungsgeschichtlicher Bedeutung ist Mill 1991. Eine neuere Formulierung ist Passmore 1974.

¹¹ Die Extension der engen Bedeutung kann entweder intensional durch die Eigenschaft, nicht auf menschliches Handeln zurückzugehen, oder extensional durch Aufzählung von entsprechenden Gegenständen bestimmt werden. Die weite Bedeutung ist nur intensional durch den empirischen Gehalt von Naturgesetzen, die sich auf die gesamte Wirklichkeit (die Extension dieser Bedeutung) beziehen, definiert.

¹² Würde sich ein künstlicher Gegenstand in keiner seiner phänomenalen Eigenschaften von vergleichbaren natürlichen Gegenständen unterscheiden, dürfte er dennoch nicht zur Natur gerechnet werden, wenn man seinen künstlichen Herstellungsursprung noch weiß (z.B. naturidentische und von entsprechenden natürlichen Molekülen getrennte Moleküle).

¹³ Dieser Test dient der Untersuchung der Fähigkeit von Computern, menschliche Intelligenz nachzuahmen: Eine Person stellt zwei unsichtbaren Objekten, von denen das eine ein Mensch und das andere ein Computer ist, Fragen und soll prüfen, ob spezifische Unterschiede in den jeweiligen Antworten bestehen.

¹⁴ In dem Maß, wie sich die von Lee 1999 zur Unterscheidung der Kategorien des Künstlichen und Natürlichen verwendenden verschiedenen Bedeutungen des Naturbegriffes durch unterschiedliche „degrees of

Ich möchte dieses Kriterium mit einigen *Beispielen* erläutern: Ihm zufolge hat es die Nanotechnologie mit natürlichen Atomen zu tun, wenn diese aus natürlichen Substanzen stammen (was in der Regel der Fall ist) oder ihre künstliche Herstellung wissenschaftlich nicht mehr nachweisbar ist. Insofern die Nanotechnologie natürliche Stoffe auf andere Weise gestaltet, als sie in der Natur vorkommen, sind nanotechnologische Objekte Hybride von Natur und Kunst. Das Kriterium streitet einem Gegenstand seine Natürlichkeit nicht ab, wenn er durch menschliches Handeln beeinflusst wird. So verlieren die Atome ihre Natürlichkeit nicht dadurch, dass man sie zuerst isolieren muss, um sie später neu zusammensetzen.¹⁵ Bei der Zusammensetzung kann man verschiedene Formen der Einflussnahme unterscheiden. Eine schwache Form würde in der Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen für einen unter diesen Bedingungen von selbst ablaufenden Synthetisierungsprozess bestehen. Beispiel hierfür sind Selbstorganisationsprozesse zur Herstellung von Quantenpunkten.¹⁶ Eine stärkere Form der Beeinflussung würde die Erzeugung eines Gegenstandes darstellen, in der jeder Herstellungsschritt einen gesonderten Eingriff erfordert, wie es für die Verschiebung der Atome zutrifft, mit der M. Eigler 1989 das IBM-Logo im Nanomaßstab herstellte.

Das Kriterium lässt sich auf alle einleitend angeführten Beispiele für die Problematik der Unterscheidung von künstlichen und natürlichen Objekten anwenden. Wo der Nanotechnologie ein perfekter Nachbau von natürlich vorkommenden Molekülen gelingt, rechnet das Kriterium sie in dem Moment zur Natur, wo der künstliche Ursprung nicht mehr nachweisbar ist (z.B. ununterscheidbare Vermischung mit den entsprechenden natürlich vorkommenden Molekülen). Bei Selbstorganisationsprozessen zur Erzeugung von Nanoprodukten und bei fertigen Nanoprodukten kann jeder Bestandteil und jede ihrer Eigenschaften auf Zugehörigkeit zu Natur oder Technik überprüft werden.

Es mag befremdlich anmuten, dass nach der obigen Definition nanotechnologische Objekte, z.B. synthetische Moleküle, ihren künstlichen Charakter in dem Augenblick verlieren, wo sie nicht mehr (wissenschaftlich) von Objekten unterscheidbar sind, die auch in der Natur vorkommen.¹⁷ Aber dies entspricht nicht nur einem traditionellen Naturverständnis¹⁸ und dem von mir diskutierten gegenwärtigen Sprachgebrauch in der Nanotechnologie, sondern zeigt auch den Punkt an, wo die Unterscheidung des menschlich Hergestellten von Natur sinnlos wird.

Drei Argumente lassen allerdings vermuten, dass die meisten nanotechnologischen Gegenstände nicht nur gegenwärtig, sondern auch bis auf weiteres *von natürlichen Gegenständen unterscheidbar bleiben*. Erstens geht es der Nanotechnologie vor allem um die Herstellung von künstlichen Produkten, die für die Menschen nützlicher sind als andere Produkte, unter die auch die in größerem Umfang aus Naturstoffen gewonnenen

artefacticity“ ineinander überführen lassen (Lee 1999, S. 82-84), können sie durch das von mir vorgeschlagene epistemische Kriterium reproduziert werden.

¹⁵ Strenggenommen gilt dies nur, wenn die entsprechenden Atome auch ohne menschliches Zutun isoliert vorkommen.

¹⁶ Wevers and Wechsler 2002, S. 11.

¹⁷ Damit auf der Erde hergestellte synthetische Moleküle ihren künstlichen Charakter auch nicht in dem (praktisch uninteressanten) Fall verlieren würden, wenn ihr extraterrestrisches Vorkommen nachgewiesen wäre, muss das Kriterium entsprechend ergänzt werden.

¹⁸ Beispielsweise geht bei Aristoteles ein ursprünglich kranker menschlicher Körper im Moment seiner vollendeten Gesundung von einem künstlichen in einen natürlichen Zustand über, wenn letzterer der ärztlichen Kunst zu verdanken ist. Nach Aristoteles gehört nämlich die ärztliche Therapie von Krankheiten zur Technik: Der Arzt ist ein Techniker, der künstliche Zustände im Körper herstellt, die zur Gesundheit und damit wieder zur Natur führen (vgl. Schiemann 2005a, S. 65).

fallen. Da die Herstellung von nanotechnologischen Produkten deshalb darauf abzielt, sich im Ergebnis von natürlichen Objekten abzuheben, steht zu erwarten, dass die Differenz dieser zu jenen ermittelbar bleibt. Zweitens ist die Entwicklung der wissenschaftlichen Methoden zur Feststellung, ob ein künstlicher Ursprung eines Objektes vorliegt, weit vorangeschritten. Drittens unterscheiden sich die nanotechnologischen Herstellungsprozesse immer noch deutlich von den natürlichen Entstehungsprozessen, wie ich in Abschnitt 5 am Beispiel der lebenden Natur ausführen werde.

Das epistemische Kriterium folgt aus der engen Bedeutung von Natur als dem nicht vom Menschen Gemachten. Es fragt nach dem Wissen über die Entstehungsgeschichte von beliebigen hergestellten Gegenständen, entfaltet aber seine Wirksamkeit erst bei denjenigen, bei denen die Feststellbarkeit des künstlichen Ursprungs problematisch ist. Für diese Gruppe sind nanotechnologische Gegenstände beispielhaft. Indem die Nanotechnologie den größtmöglichen Einfluss auf die Eigenschaften ihrer Materialien hat, vermag sie auch am umfassendsten die Spuren ihrer Eingriffe in die Natur zu verwischen.

4. Die Gesetzlichkeit der Natur in der Nanowelt

Die weite Bedeutung, auf die ich in diesem Abschnitt zu sprechen komme, rekurriert nicht notwendig auf die Genese von Gegenständen, sondern allgemein auf diejenigen ihrer regelmäßigen Eigenschaften, auf die der Mensch keinen Einfluss hat und die die Naturwissenschaft in Form von *Gesetzen* ausspricht.

Naturgesetze stellen in allgemeingültiger Form die Verknüpfung von Bedingungen dar, unter denen ein Ereignis oder ein Zustand regelmäßig eintritt. Als revidierbare, meist mathematisch formulierte Konstruktionen sind Naturgesetze vom Menschen gemacht. Die von ihnen vorhergesagten (nicht logisch) wahren Beobachtungssätze, die ihren *empirischen Gehalt* ausmachen, gehören aber zu den Voraussetzungen, die menschlichen Handlungen vorausliegen. Der empirische Gehalt gilt unabhängig von den Bedingungen, unter denen die Phänomene, auf die er sich bezieht, erzeugt oder gefunden werden, und bildet den vorgegebenen Spielraum, in dem sich die Technologie entfalten kann.¹⁹

Zwischen dieser Bedeutung von Natur und der Nanotechnologie besteht ein Spannungsverhältnis, das in verschiedenen Veröffentlichungen zu den konstruktiven Möglichkeiten der Naturgestaltung im Nanometerbereich in jüngster Zeit diskutiert worden ist. Dabei geht es vor allem um physikalische und chemische Gesetzmäßigkeiten, die gegenwärtig geplante oder von einigen NanotechnologInnen zukünftig für möglich gehaltene Konstrukte berücksichtigen müssen. Ich werde mich im Folgenden auf die *physikalischen Gesetzmäßigkeiten* konzentrieren, mit denen sich die gegenwärtigen Planungen auseinanderzusetzen haben. Auf die Diskussion von technischen Konstrukten (z.B. Eric Drexlers *Assembler*), deren zukünftige Realisierungsbedingungen umstritten sind, werde ich im nächsten Abschnitt zu sprechen kommen.

¹⁹ Anders als die enge Bedeutung des Naturbegriffes, die von einer negativen Abgrenzung vom menschlichen Handeln ausgeht (vgl. Abschnitt 3), erlaubt die weite Bedeutung eine positive Bestimmung der Natur als gesetzmäßig verfasste. Gesetze lassen sich aber auch in der Form der Negation (eines universellen Es-gibt-Satzes) formulieren (vgl. Popper 1989, S. 39). Durch diese Umformulierung tritt das Natürliche als Grenze der menschlichen Handlungsmöglichkeiten hervor. Ein Beispiel wäre der Energieerhaltungssatz als Postulat von der Unmöglichkeit der Konstruktion eines Perpetuum mobiles erster Art.

Viele Entwürfe der Nanotechnologie verfolgen das Ziel, die Miniaturisierung der Technik voranzutreiben. Besonders ausgeprägt ist diese Tendenz in der Elektronik (Fahmer 2003, S. 1-3). Nanoelektronische Konstruktionen sollen die makroskopischen elektronischen Bauelemente (Schalter, Dioden, Transistoren usw.) im Nanometerbereich strukturanalog realisieren. Damit ist vor allem beabsichtigt, neue Dimensionen der Datenverarbeitung, namentlich der Speicherung großer Datenmengen auf kleinstem Raum (die British Library im Zuckerwürfelformat), zu eröffnen. Diese Pläne sehen sich mit dem Umstand konfrontiert, dass im Nanometerbereich mit *neuartigen Gesetzmäßigkeiten* zu rechnen ist, da dieser Bereich zwischen den atomaren und subatomaren Quantenphänomenen auf der einen und den kontinuierlichen Phänomenen von Systemen mit großen Anzahlen von Atomen auf der anderen Seite liegt. Wegen der besonderen Bedingungen, die auf die intermediäre Lage des Nanometerbereiches zurückgehen, bezeichnet man ihn auch als „mesoworld“. In ihr treten nicht nur sowohl die bekannten Quantenphänomene (z.B. die Unschärferelation oder der Tunneleffekt) als auch die bekannten Phänomene der Kontinuumsphysik (z.B. thermischer Fluss) auf. Teilweise kommt es auch zu neuen Regelmäßigkeiten, von denen ich exemplarisch die Phänomene der elektrischen und thermischen Leitungsquantisierung nennen möchte. Die Quantisierung der elektrischen Leitfähigkeit hat sich als grundlegende Eigenschaft kleiner Leiterstrukturen herausgestellt. Die Quantennatur der Wärmeleitung wurde erstmals im Jahr 2000 an schmalen Brücken aus Siliziumnitrid beobachtet und stellt eine fundamentale Grenze für den Wärmefluss dar (Roukes 2001a, 2001b).

Diese Phänomene begrenzen die technischen Handlungsspielräume im Nanometerbereich (Fogelberg & Glimell 2003, S. 18; Goldhaber-Gordon *et al.* 1997). Ein quantisierter Stromfluss ist nur bedingt für die Vorhaben der Nanoelektronik verwertbar; die Quantennatur des Wärmeflusses könnte die unerlässliche Kühlung elektronischer Nanobauteile verhindern. M.L. Roukes bemerkt zu den jetzt entdeckten Regelmäßigkeiten der Meso- bzw. Nanowelt:

The nanoworld is often portrayed by novelists, futurists and the popular press as a place of infinite possibilities. But this domain is not some ultraminiature version of the Wild West. *Not* everything goes there; there are *laws*. (Roukes 2001a, S. 26)

Dem Spannungsverhältnis von Natur als der gesetzmäßigen Verfassung der Wirklichkeit und Nanotechnologie entspricht eine Differenz zwischen den Standpunkten des naturwissenschaftlichen Erkenntnisinteresses und des ingenieurwissenschaftlichen Anwendungsinteresses. Michael L. Roukes vertritt den *naturwissenschaftlichen* Standpunkt, der das Begreifen des Gesetzeswissens als Voraussetzung technologischer Anwendungen auffasst: „Much exotic territory awaits exploration. As we delve into it, we will uncover a panoply of phenomena that we must understand before practical nanotechnology will become possible“ (Roukes 2001a, S. 21). Demgegenüber ist der *ingenieurwissenschaftliche* Standpunkt weniger an der Aufklärung von gesetzlichen Zusammenhängen als an ihrer Ausnutzung für technische Zwecke interessiert. P. Chaudhari vom IBM Watson Research bringt diese Position zum Ausdruck, wenn er feststellt: „The engineers were not so much concerned with understanding the laws of nature but rather in using them to build something useful for mankind“ (in: Roco and Bainbridge 2002, S. 86).

5. Das Verhältnis von lebender Natur und Nanotechnologie

Bis heute ist der Inbegriff des vom Menschen nicht Gemachten die lebende Natur. So sehr die organischen Strukturen von Lebewesen durch menschliche Eingriffe auch schon verändert wurden: Dem Menschen ist es bisher nicht gelungen, Leben selbst herzustellen. *Lebensprozesse spielen sich in Dimensionen ab, die wegen ihrer Komplexität und Kleinheit technologisch bisher nur bedingt zugänglich gewesen sind.* In diesem Bereich eröffnet die Nanotechnologie neue Möglichkeiten. Sie gehört zu den Disziplinen, die Mittel entwickeln können, um Leben künstlich zu schaffen – sei es als eine Nachbildung der vorhandenen oder durch die Konstruktion davon unterschiedener Lebensformen.

Tabelle 1: Differenzen von technischen Systemumgebungen und biologischen Systemen (nach Wevers & Wechsler 2002, S. 3).

	Typische Realisierung in technischer Systemumgebung	Typische Realisierung in biologischen Systemen
Herstellungsprozess	- Top-Down (Bottom-Up und Selbstorganisation teilweise in der Nano- und Biotechnologie) - technische Verfahren für große Mengen	- nur Bottom-Up - Selbstorganisationsprozesse (inkl. Selbstreplikation und -reparatur), langsames Wachsen funktioneller Einheiten auf molekularer Ebene, Verbindung zu größeren Systemen
Kontrollierbarkeit	- nur in kleinen Ausschnitten auf molekularer bzw. atomarer Ebene oder als statistisches Ensemble möglich	- durch Vielzahl spezialisierter und in einem Netzwerk zusammenarbeitender Systeme auf molekularer Ebene
Materialien	- generalisierter Bausatz (breite Palette an Elementen und Verbindungen mit unterschiedlichsten Eigenschaften) - Biokomposite auf der Nano- bzw. Mikroskala	- flexibler Grundbausatz (wenige Klassen von Biomaterialien, für unterschiedliche Funktionen optimierbar) - Biokomposite auf der Nano- bzw. Mikroskala
Energieaufwand	- hoch (oft Hochtemperaturbereich), vergleichsweise geringe Wirkungsgrade, Verlust durch Abwärme	- gering (höchst effiziente Umwandlungskette mit chemischen Trägerstoffen, dadurch aber auch molekulare Abfallprodukte)
Umweltverträglichkeit	- häufig problematisch	- biologisch abbaubare Produkte, unter natürlichen Bedingungen i.d.R. kein Problem
Haltbarkeit, Stabilität, Veränderbarkeit	- über einen sehr breiten Bereich von (extremen) Umgebungsbedingungen (Temp., Druck, pH, etc.) existieren technische Lösungen - i.d.R. langzeitstabil, aber keine Selbstreparatur und eher unflexibel	- vergleichsweise empfindlich - aber: nachwachsend, flexibel, regenerationsfähig, natürliche Abbauprozesse, selbstkorrigierend

Umso bemerkenswerter ist es, dass sich nicht nur die gegenwärtigen nanotechnologischen Forschungen, sondern auch die kühneren nanotechnologischen Zukunftsvisionen im Wesentlichen auf nicht lebende Konstruktionen beschränken. So ist etwa in den futuristischen Büchern von Eric Drexler oder in dem von Mihail C. Roco and William Sims Bainbridge herausgegebenen zukunftsoptimistischen Bericht „Converging Technologies for Improving Human Performance“ im Zusammenhang mit der Nanotechno-

logie nicht von künstlichem Leben die Rede (Drexler 1986, Drexler *et al.* 1991, Roco & Bainbridge 2002).

Ich werte die Beschränkung der Praxis der Nanotechnologie auf die Konstruktion von nicht lebenden Systemen als Ausdruck des auch im Nanobereich wirksamen *Abstandes zwischen technologischen und biologischen Gegenständen*. Im Anschluss an Wevers und Wechsler 2002 sind einige der Differenzen von technischen Systemumgebungen und biologischen Systemen in Tabelle 1 zusammengestellt. Von den aufgeführten Unterschieden möchte ich die Fähigkeit der Organismen zur Selbstreplikation bzw. -reparatur, die für technische Systeme noch nicht einmal ansatzweise umgesetzt ist, hervorheben. Außerdem möchte ich auf die abweichenden Charakterisierungen im jeweiligen Energieaufwand aufmerksam machen: In lebenden Organismen sorgen Stoffwechselprozesse dafür, dass Energie durch den Abbau körpereigener Stoffe gewonnen wird. Bei technologischen Systemen wird hingegen die Energie in der Regel von außen zugeführt. Der relativ hohe Energieaufwand technischer Systeme erfordert die Notwendigkeit ihrer gesonderten Kühlung. Im Vergleich der Materialien müssen auf der Nano- und Mikroebene keine signifikanten Differenzen bestehen.

Eric Drexler sieht einen Ursprung für die Differenz zwischen der lebenden Natur und der nichtlebenden Nanotechnologie darin, dass Erstere sich bereits in ihren kleinsten Dimensionen bei der Gewinnung ihrer Produkte den *Bedingungen des Überlebenskampfes* unterordnen muss. Er zitiert zustimmend Ralph Merkle:

It's both uneconomical and more difficult to design a self-replicating system that manufactures every part it needs from naturally occurring compounds. Bacteria do this, but in the process they have to synthesize all twenty amino acids and many other compounds, using elaborate enzyme systems tailored specifically for the purpose. For bacteria facing a hostile world, the ability to adapt and respond to a changing environment is worth almost any cost, for lacking this ability they would be wiped out. (Drexler *et al.* 1991)

Unter den Bedingungen des Überlebenskampfes haben die Organismen eine Anpassungsfähigkeit entwickelt, die technisch hergestellten Systemen typischerweise nicht zukommt. Merkle bemerkt an anderer Stelle:

Die von Menschen hergestellten Maschinen haben kaum Ähnlichkeit mit lebenden Systemen, und bei den molekularen Produktionssystemen wird es höchstwahrscheinlich genauso sein. [...] Maschinen besitzen nicht die wunderbare Anpassungsfähigkeit lebender Systeme. (Merkle 2001, S. 184)

Technisch hergestellten Systemen fehlt das Adaptionvermögen, weil sie nicht aus Evolutionsprozessen resultieren und für die Verwirklichung menschlicher Zwecksetzungen entworfen werden. Erkennbar ist der technische Anpassungsmangel durch die Anwendung des epistemischen Kriteriums, das sich aus der *engen Bedeutung* des Naturbegriffes ergibt. Bis auf weiteres zeugt dieses Defizit vom künstlichen Ursprung eines Produktes. Die Entwicklung von adaptiven nanotechnologischen Produkten – etwa von Stoffen mit einer kontextabhängigen Anpassung ihrer Oberflächeneigenschaften an die Umgebung – bedeutet einen Schritt in Richtung der Aufhebung der Differenz von Natur und Nanotechnologie.

Die Differenz von natürlichen Lebewesen und toter Technologie gehört zu den Voraussetzungen einer Auseinandersetzung um die zukünftigen nanotechnologischen Möglichkeiten, die in den letzten Jahren vor allem zwischen Richard E. Smalley und

Eric Drexler stattgefunden hat.²⁰ Dabei ging es u.a. um die Frage, in welchem Maß nanotechnologische Herstellungen *ohne Bezug auf die schon vorhandenen biologischen Prozesse* möglich sein werden. Drexler schließt an das Programm von Richard Feynman an, nach dem „nanotechnology [...] fundamental mechanical, not biological“ ist (Drexler 2003). Nach Drexlers Plänen sollen Roboter im Nanomaßstab, sogenannte Assembler bzw. „Nanobots“, einzelne Moleküle mit atomarer Präzision zusammensetzen, um nach vorgegebenen Programmen sich selbst und andere Gegenstände herzustellen. Smalley hält hingegen eine mechanische Selbstreplikation und Herstellung von Gegenständen im Nanometerbereich physikalisch für ausgeschlossen. Um stabile chemische Verbindungen zu schaffen, reiche es nicht, einzelne Moleküle zu verschieben. Der gesamte Reaktionsbereich müsse kontrolliert werden. Dafür sei aber auch der kleinste Roboter noch zu groß.²¹ Außerdem würden die zu bewegendenden Moleküle an den Armen der Roboter haften bleiben, wenn die ganze Produktion nicht in einer geeigneten wässrigen Lösung stattfindet.²² Die Herstellung von Produkten im Nanometerbereich sei nicht ohne „something very much like an enzyme“ möglich:

Any such system will need a liquid medium. For the enzymes we know about, that liquid will have to be water, and the types of things that can be synthesized with water around cannot be much broader than the meat and bone of biology. (Smalley 2003)

Smalley kommt zu dem Schluss: „such a nanobot will never become more than a futurist's daydream“ (Smalley 2001).²³

Smalleys Argumente illustrieren die Anwendung des zweiten von mir vorgestellten Kriteriums, das aus der *weiten Bedeutung* des Naturbegriffes folgt und sich auf Naturgesetze bezieht. Es dient nicht der Gegenstandsunterscheidung, sondern steckt einen Spielraum für die nanotechnologischen Möglichkeiten der Gegenstandsgestaltung ab. Die Herstellung von Nanobots hält Smalley für ausgeschlossen, weil sie physikalischen und chemischen Gesetzen widerspricht. Der naturgesetzliche Rahmen erzwingt ihm zufolge eine Orientierung der Nanotechnologie an den vorgegebenen biologischen Systemen.

Einen etwas größeren Spielraum für die Nanotechnologie sieht George M. Whitesides. Er geht ebenfalls vom bestehenden Unterschied zwischen biologischen und technologischen Systemen und der Unmöglichkeit einer Realisierung von Drexlers Assemblervision aus. Für die Herstellung von Nanomaschinen bleiben seiner Auffassung nach dann nur zwei Möglichkeiten:

The first is to take existing nanomachines – those present in the cell – and learn from them. [...] The second is to start from scratch and independently to develop fundamental new types of nanosystems. [...] It will be a marvelous challenge to see if we can outdesign evolution. It would be a staggering accomplishment to mimic the simplest living cell. (Whitesides 2001)

Aber dieser Weg sei, da er viel beschwerlicher als der erste Weg wäre, nicht der wahrscheinliche. Insofern legt es sich auch für Whitesides nahe, vom Vorbild der biotischen Natur auszugehen.

Die Auseinandersetzung zwischen Drexler, Smalley und Whitesides ist repräsentativ für *gegensätzliche Positionen zu zwei möglichen Entwicklungspfaden* der Nano-

²⁰ Vgl. zu dieser Debatte auch: Bueno 2004 und Bensaude-Vincent 2004.

²¹ Smalley 2001, entsprechend Whitesides 2001 und Jones 1995.

²² Smalley 2001, Smalley 2003.

²³ Ein zusätzliches, auf das Gesetz von der Entropie bezogenes Argument bietet Jones 1995.

technologie. Sie könnte zukünftig einen eigenständigen oder einen an der Natur orientierten Weg nehmen. Der erste Pfad würde die Schaffung einer zunehmend künstlichen, der Natur fremd gegenüberstehenden Welt bedeuten; der zweite würde auf eine neue Dimension der Verbindung von Technologie und Natur hinauslaufen. Beide Entwicklungsmöglichkeiten würden sich von den gegenwärtigen Formen des Verhältnisses von makroskopischen Technologien und Natur deutlich abheben. „Makroskopisch“ nenne ich Technologien, deren Verfahren und Instrumente nur oberhalb des Mikrobereiches kontrollierbar sind (z.B. Hochbau, Fahrzeugbau, Chemietechnologie). Sie zeichnen sich durch eine Unterscheidbarkeit und zugleich bestehende (z.B. ökologische) Wechselbeziehungen von Technologie und Natur im Makroskopischen aus. Zukünftig könnte entweder das Element der Wechselbeziehung (bei zunehmender Künstlichkeit) oder das der Unterscheidbarkeit (bei neuen Formen der Verbindung von Natur und Nanotechnologie) in den Hintergrund treten.

6. Schluss

Ich habe die Nanotechnologie als kulturhistorisches Phänomen bestimmt. Mit dem *Ursprung ihrer Verfahren* ist sie damit von der Natur als dem nicht vom Menschen Hervorgebrachten abgehoben. Viele nanotechnologische *Objekte* unterscheiden sich von den natürlichen, weil sie für menschliche Zwecke hergestellt werden. Nanotechnologisch produzierte Werkstoffe, die sich als industrielle Materialien eignen, kommen ebenso wenig in der Natur vor, wie Schalter der Nanoelektronik und Getriebe der Nanomechanik. Andererseits verfügt die Nanotechnologie aber über einzigartige Möglichkeiten, sich natürlicher Prozesse zu bedienen und natürliche Objekte nachzubauen oder funktionsäquivalent zu ersetzen. Große Moleküle können künstlich aus Atomen so zusammengesetzt werden, dass sie von den natürlich vorkommenden Molekülen nicht mehr unterscheidbar sind. Da beide Aspekte für das Verhältnis von Nanotechnologie und Natur gegenwärtig eine Rolle spielen, lässt sich dieses Verhältnis *nicht einheitlich* charakterisieren.

Dass die Vielfalt der Beziehungen zwischen Nanotechnologie und Natur jedoch nicht die *Anwendung einheitlicher Kriterien* zu ihrer Charakterisierung verhindert, habe ich am Beispiel eines auch von NanotechnologInnen verwendeten *Naturbegriffs* gezeigt. Dieser Begriff versteht unter Natur in zweifacher Hinsicht das nicht vom Menschen Gemachte: Die enge Bedeutung nimmt auf die Objektherkunft Bezug und findet folglich auf Objekte Anwendung, deren Existenz sich keinem humanen Eingriff verdankt (Natur als Gegenpart der Technik); die weite Bedeutung versteht die Unabhängigkeit von menschlichen Herstellungen systematisch und bezeichnet den empirischen Gehalt von Naturgesetzen, der sich menschlicher Verfügung entzieht (Natur als Voraussetzung der Technik).

Von der engen Bedeutung habe ich ein epistemisches Kriterium abgeleitet, nach dem ein Objekt (Gegenstand oder Eigenschaft) zur Natur gehört, wenn sich (mit allen zu einer Zeit verfügbaren wissenschaftlichen Methoden) nicht ermitteln lässt, dass es von menschlichem Handeln hervorgebracht wurde. In Analogie zum Turing-Test der künstlichen Intelligenz kann mit dem Kriterium zwischen den natürlichen und künstlichen Komponenten der meisten nanotechnologischen Herstellungsverfahren und -produkten unterschieden werden. In der Vielfalt der Beziehungen zwischen Nanotechnologie und Natur kommen zwar auch Fälle vor, in denen es problematisch wird, zwischen den beiden Komponenten zu unterscheiden. Ich vermute aber, dass diese Fälle

die Ausnahme bilden. Überwiegend sind nanotechnologische Prozesse und Produkte Hybride von Natur und Technik, seltener gehören sie schon als Ganzes zur Natur, weil sich ihr künstlicher Ursprung nicht mehr feststellen lässt.²⁴

Die *weite Bedeutung* des Naturbegriffs führte zu einem Kriterium für die *Charakterisierung der Reichweite* der Nanotechnologie. Wie sich auch zukünftig das Verhältnis von Nanotechnologie und Natur entwickeln mag, wird es Natur als die gesetzmäßige Verfassung der Wirklichkeit zur Voraussetzung haben. Gesetze referieren ihrem empirischen Gehalt nach auf das allen menschlichen Handlungen Vorausliegende. Diese Bedeutung hat für die Nanotechnologie schon jetzt eine besondere Relevanz, weil ihre gegenwärtigen Möglichkeiten entscheidend von den noch wenig erforschten Gesetzen des Mesobereiches zwischen quantisierten und kontinuierlichen Phänomenen abhängen. Es könnte sein, dass eine genauere Bestimmung dieser Gesetze die technischen Spielräume im Mesobereich deutlich einschränken wird. So wie es in der makroskopischen Welt Gegenden gibt, die für menschliches Leben eher ungeeignet sind (Gebirge, Eis- oder Sandwüsten, Tiefsee usw.), könnte sich der Mesobereich als ein Bereich herausstellen, dessen Strukturen für technische Zwecksetzungen nur bedingt tauglich sind.

Die beiden Kriterien stehen in einem polaren Verhältnis zueinander: Während das erste erlaubt, *variable* Grenzen zwischen natürlichen und künstlichen Eigenschaften in der Nanotechnologie festzustellen, benennt das zweite *invariante* Eigenschaften der Natur, die der Nanotechnologie vorausgesetzt sind. Das erste hat die Dynamik verschiebbarer Grenzen zur Natur, das zweite die Statik feststehender Grenzen der Natur zum Gegenstand. Das erste Kriterium erfasst, was im Entwicklungsrahmen, der durch das zweite bestimmt ist, möglich ist.

Ein wichtiges Beispiel für Anwendung beider Kriterien ist die *Beziehung zwischen Nanotechnologie und lebender Natur*, die ich im letzten Abschnitt diskutiert habe. Das Leben ist derjenige Teil der Natur, der – metaphorisch gesprochen – gegenwärtig den größten Abstand von der Technik hat. Die Möglichkeit einer zukünftigen nanotechnologischen Konstruktion von künstlichem Leben (ähnlich oder unterschieden von den bestehenden Formen) ist im Prinzip nicht auszuschließen. Die aktuelle Diskussion über die zukünftigen Möglichkeiten hat es aber wahrscheinlich erscheinen lassen, dass die Nanotechnologie zukünftig weniger eigene Wege zur Schaffung von Leben gehen wird, als vielmehr in eine engere Beziehung zur vorhandenen Natur rücken wird, um bessere Ausgangsbedingungen zur Herstellung künstlicher Produkte für menschliche Zwecke zu haben.

Literaturverzeichnis

- Bensaude-Vincent, B. (2004): „Two Cultures of Nanotechnology?“, *Hyle*, 10, 65-82.
- Bhushan, B. (Ed.) (2004): *Springer Handbook of Nanotechnology*, Berlin/Heidelberg/New York: Springer.
- Bueno, O. (2004): „The Drexler-Smalley Debated on Nanotechnology: Incommensurability at Work?“, *Hyle*, 10, 83-98.
- Chaudhari, P. (2001): „Future Implications of Nanoscale Science and Technology: Wired Humans, Quantum Legos, and an Ocean of Information“, in: Roco and Bainbridge (Eds.), S. 75-78.
- Drexler, E. (1986): *Engines of Creation. The Coming Era of Nanotechnology*, New York: Anchor Press Doubleday [<http://www.foresight.org/EOC/Engines.pdf>] (besucht: 03.01.2006).

²⁴ Solange die Nanotechnologie keine Atome verwendet, die aus nicht natürlichen Elementarteilchen bestehen, sind ihre Produkte nicht vollständig künstlich.

- Drexler, E. (2003): „(Two Letters to R.E. Smalley)“, in: R. Baum (Ed.), *Nanotechnology, Chemical & Engineering News*, 81 (48), 37-42.
- Drexler, E.; Peterson, C. & Pergamit, G. (1991): *Unbounding the Future: the Nanotechnology Revolution*, New York: Morrow [http://www.foresight.org/UTF/Unbound_LBW/download.html word-document without page reference] (besucht: 03.01.06).
- Fogelberg, H. & Glimell, H. (2003): *Bringing Visibility to the Invisible: Towards a Social Understanding of Nanotechnology*, Göteborg: Göteborgs Universitet.
- Grinbaum, A. & Dupuy, J.-P. (2004): „Living with Uncertainty: Toward the Ongoing Normative Assessment of Nanotechnology“, *Techné*, 8-2, 4-25.
- Jones, D.E.H. (1995): „Technical boundless optimism“, *Nature*, 374, 835-837.
- Jopp, K. (2004): *Nanotechnologie – Aufbruch ins Reich der Zwerge*, Wiesbaden: Gabler.
- Malsch, I. (1997): *Nanotechnology in Europe: Experts' Perceptions and Scientific Relations between Sub-areas*. European Commission, Seville: JRC, Institute for Prospective Technology Studies.
- Merkle, R.C. (2001): „Schwerter zu Nanowaffen. Der Aufbruch der Nanotechnologie“, in: Schirmmacher (Hg.), S. 181-189.
- Mill, J.S. (1991): „Three Essays on Religion“ [1874], in: *Collected Works of John Stuart Mill*, London: Routledge, Vol. 10, S. 369-489.
- National Science and Technology Council (NSTC) (1999): *Nanotechnology. Shaping the World Atom by Atom*. [www.wtec.org/loyola/nano/IWGN.Public.Brochure/](besucht: 10.7.2004).
- Negrotti, M. (2002): *Naturoids: On the Nature of the Artificial*, New Jersey: World Scientific.
- Passmore, J. (1974): *Man's Responsibility for Nature*, London: Duckworth.
- Popper, K.R. (1989): *Logik der Forschung [1935]*, Tübingen, Mohr.
- Roco, M.C. & W.S. Bainbridge (Eds.) (2002): *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*, Arlington [http://wtec.org/ConvergingTechnologies/] (besucht: 10.7.2004).
- Roukes, M.L. (2001a): „Plenty of Room, Indeed“, in: *Scientific American, Understanding Nanotechnology (E-Book Edition)*, New York: Warner Books, S. 18-35.
- Roukes, M.L. (2001b): „Nanoelectromechanical systems face the future“, *Physics World*, 14(2), 25-31.
- Schiemann, G. (2004a): „Dissolution of the Nature-Technology Dichotomy? Perspectives on nanotechnology from an everyday understanding of nature“, in: Baird et al. (Eds.), S. 209-213.
- Schiemann, G. (2005a): *Natur, Technik, Geist. Kontexte der Natur nach Aristoteles und Descartes in lebensweltlicher und subjektiver Erfahrung*, Berlin/New York: De Gruyter.
- Schiemann, G. (2005b): „Nanotechnology and Nature. On the Criteria of their Relationship“, *Hyle*, 11, 77-96.
- Schmid, G.; Decker, M.; Ernst, H.; Fuchs, H.; Grünwald, W.; Grünwald, A.; Hofmann, H.; Mayor, M.; Rathgeber, W.; Simon, U. & Wyrwa, W. (2003): *Small Dimensions and Material Properties. A Definition of Nanotechnology*, Bad Neuenahr-Ahrweiler: Europäische Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen.
- Siegel, R.W.; Hu, E. & Roco, M.C. (Eds.) (1999): *Nanostructure Science and Technology. A Worldwide Study*, Dordrecht/Boston: Kluwer Academic Publishers, [wtec.org/loyola/nano/IWGN.Worldwide.Study/nano.pdf] (besucht: 10.7.2004).
- Smalley, R.E. (2001): „Of Chemistry, Love and Nanobots“, in: *Scientific American*, 285 (9), 76-77 [http://weblinks1.epnet.com/citation.asp] (besucht: 10.7.2004).
- Smalley, R.E. (2003): „(Two Letters to E. Drexler)“, in: R. Baum (Ed.) *Nanotechnology, Chemical & Engineering News* 81(48), 37-42.
- Stix, G. (2001): „Little Big Science“, in: *Scientific American, Understanding Nanotechnology (E-Book Edition)*, New York: Warner Books, S. 6-17.
- The New Oxford Dictionary of English* (1999): Oxford: Clarendon Press.
- Wevers, M. & Wechsler, D. (2002): *Nanobiotechnologie 1: Grundlagen und technische Anwendungen molekularer, funktionaler Biosysteme* (Zukünftige Technologien, Band 38). Düsseldorf: VDI- Technologiezentrum.
- Whitesides, G.M. (2001): „The Once and Future Nanomachine“, *Scientific American*, 285 (9), 78-84 [http://weblinks1.epnet.com/citation.asp] (besucht: 10.7.2004).

Nanotechnologien im Kontext

Philosophische, ethische und gesellschaftliche Perspektiven

Herausgeber

Alfred Nordmann

Institut für Philosophie, Technische Universität Darmstadt

Joachim Schummer

Institut für Philosophie, Technische Universität Darmstadt

und

Astrid Schwarz

Institut für Philosophie, Technische Universität Darmstadt

