



# Philosophie der Nanotechnowissenschaft

Alfred Nordmann

Stefan Gammel, Andreas Lösch, Alfred Nordmann (eds.)

*Jenseits von Regulierung: Zum politischen Umgang mit der Nanotechnologie*

Heidelberg: Akademische Verlagsgesellschaft, 2009, pp. 122-148

## ABSTRACT<sup>1</sup>

Nanoscientific research has been characterized as an “engineering way of being in science.” This mode of research calls for a philosophy of technoscience that investigates the four questions: i) What is the role of theory and theory-development in nanoscale research, and what kinds of theories are needed for nanotechnological development? ii) What are the preferred methods and tools and the associated modes of reasoning in nanoscientific research? iii) What is nanotechnoscience and how are its objects constituted? iv) What kind of knowledge do technoscientific researchers typically produce and communicate? The consideration of these questions yields a survey of nanotechnoscience in terms of disciplinary questions (a complex field partially disclosed by stretching closed theories), of methodology (constructions and qualitative judgments of likeness), of ontology (a thin conception of nature as unlimited potential), and of epistemology (acquisition and demonstration of capabilities). In all four cases, the strictly philosophical discussion leads to societal dimensions and questions of value.

## EINFÜHRUNG: WISSENSCHAFTSPHILOSOPHIE UND PHILOSOPHIE DER TECHNOWISSENSCHAFT

Auf verschiedene Art und Weise reflektiert und beeinflusst Wissenschaftsphilosophie stets die Entwicklung der Wissenschaften. Sie taucht inmitten von theoretischen und methodischen Streitfragen auf, im reflexiven Nachdenken der Wissenschaftler und, seit dem späten 19. Jahrhundert, auch in den Analysen der sogenannten Wissenschaftstheoretiker.

Vor allem vier philosophische Fragen werden durch jedes wissenschaftliche Unterfangen entweder implizit beantwortet oder aber explizit herausgefordert:

Wie definiert sich eine bestimmte Wissenschaft, und welches sind ihre Gegenstände und Probleme?

---

<sup>1</sup> For an English version of this text see „Philosophy of Nanotechnoscience“ in G. Schmid, H. Krug, R. Waser, V. Vogel, H. Fuchs, M. Grätzel, K. Kalyanasundaram, L. Chi (eds.) *Nanotechnology*, vol . 1: G. Schmid (ed.) *Principles and Fundamentals*, Weinheim: Wiley, 2008, pp. 217-244. – Die deutsche Übersetzung stammt von Reinhard Heil.

Was ist der methodologisch richtige oder spezifisch wissenschaftliche Weg, sich diesen Gegenständen und Problemen anzunähern?

Welche Art von Wissen wird erzeugt und vermittelt? Wie wird Objektivität, wenn nicht gar Gewissheit, erzeugt? Und wie werden die konkurrierenden Ansprüche zwischen allgemeiner Gültigkeit und Darstellung des je besonderen Einzelfalls ausbalanciert?

Wo ist ihr Platz in Relation zu den anderen Wissenschaften? Woher stammen ihre Instrumente und Methoden, Konzepte und Theorien, und müssen ihre Ergebnisse auf einer tiefer liegenden Ebene durch eine Grundlagenforschung ergänzt werden?

Sobald Forscher ihre Ergebnisse veröffentlichen, die Ergebnisse ihrer Kollegen bewerten und diskutieren, Forschungsgelder beantragen oder Studierende ausbilden, liefern sie Beispiele dafür, was sie als gute wissenschaftliche Praxis erachten und beziehen dadurch Stellung zu den genannten vier Fragen. Wenn beispielsweise in einem bestimmten Bereich mehr Grundlagenforschung verlangt wird, kann man die vorgebrachten Argumente untersuchen und aufdecken, inwiefern diese von einer bestimmten Wissenschaftskonzeption und einer bestimmten Vorstellung von dem Verhältnis zwischen Wissenschaft und Technik geprägt sind. Beispielsweise beinhaltet der Ruf nach mehr Grundlagenforschung oft die Idee, dass die Grundlagenforschung eher allgemeine Kausalgesetze aufdeckt. Diese allgemeinen Gesetze können dann in einer Vielzahl von Kontexten angewandt werden. Auch kann die bewusste Beherrschung der von diesen Gesetzen beschriebenen Ursachen und Wirkungen zur Entwicklung neuer technischer Geräte führen. Angesichts dieses Arguments lässt sich natürlich fragen, ob das unterstellte Bild von Grundlagenforschung vs. angewandter Wissenschaft richtig ist oder nicht. Während es hier und da zutreffend sein mag, besonders in der Physik, ist es für die Chemie vielleicht völlig unangemessen. Dem entsprechend lässt sich zeigen, dass das unterstellte Bild weniger mit der Wissenschaftspraxis und der Wissenschaftsgeschichte als vielmehr mit einem gewissen Selbstverständnis der Wissenschaftler zu tun hat. Diesem Selbstverständnis gemäß ist Grundlagenforschung reine Wissenschaft, die interesselos die Welt so erfasst, wie sie ist, während die Ingenieurwissenschaften dieses Wissen anwenden, um die Welt den menschlichen Bedürfnissen anzupassen.

Wissenschaft und wissenschaftliche Praxis wandeln sich immer wenn neue Instrumente erfunden werden, neue Probleme auftauchen oder neue Disziplinen entstehen. Auch das mehr oder weniger idealisierte Selbstverständnis von Wissenschaftlern kann sich ändern. Ein typisches Beispiel ist die Beziehung zwischen Wissenschaft und Technik. Ist die molekulare Elektronik nun eine Grundlagenwissenschaft oder nicht? Ist die Nanotechnologie angewandte

Nanowissenschaft? Sind die optischen Eigenschaften von Kohlenstoff-Nanoröhrchen Teil der Welt, wie sie ist, oder erscheinen sie nur inmitten eines groß angelegten technischen Strebens, die Welt menschlichen Bedürfnissen anzupassen? Auf diese Fragen gibt es keine einfachen oder direkten Antworten. Dies mag dem Umstand geschuldet sein, dass die traditionellen Unterscheidungen zwischen Wissenschaft und Technik, zwischen Grundlagenforschung und angewandter Forschung nicht mehr länger greifen. Einige Autoren legen daher nahe, dass wir zutreffender von „TechnoWissenschaft“ sprechen sollten [1,2]. Diese ist im Wesentlichen durch die wechselseitige Abhängigkeit von theoretischer Beobachtung und technischem Eingriff definiert [3].<sup>2</sup> Dem entsprechend ist die Bezeichnung „NanoTechnoWissenschaft“ mehr als eine Abkürzung für „Nanowissenschaft und Nanotechnologien“. Sie bezeichnet vielmehr eine von der traditionellen Wissenschaft und dem Ingenieurwesen unterschiedene Forschungskultur. Peter Galison schreibt beispielsweise, dass „[n]anoscientists aim to build – not to demonstrate existence. They are after an engineering way of being in science“ [5]. Andere nehmen die Idee einer Schlüsseltechnologie oder „general purpose technology“ auf und behaupten daher, NanoTechnoWissenschaft sei Grundlagenforschung, die in ihrer Gesamtheit neue technologische Entwicklungen ermögliche. Richard Jones schärft diesen Begriff, wenn er zumindest einen Teil nanotechnowissenschaftlicher Forschung kurz und bündig als „basic gizmology“<sup>3</sup> bezeichnet.

Häufig wird Nanowissenschaft als die Erforschung größenabhängiger diskontinuierlicher Eigenschaften und Phänomene definiert [6]. Im Kielwasser dieser klaren Definition von Nanowissenschaft folgt aber eine vage Konzeption und somit schlechte Definition der Nanotechnologie: Diese umfasst nun alle möglichen technischen Funktionalisierungen dieser Eigenschaften und Phänomene. In ihrem Bericht über Nanowissenschaft und Nanotechnologien von 2004 definiert die *Royal Society und Royal Academy of Engineering* die beiden Begriffe wie folgt:

Nanoscience is the study of phenomena and manipulation of materials at atomic, molecular and macromolecular scales, where properties differ significantly from

---

<sup>2</sup> Dies bezieht sich auf Ian Hacking's Unterscheidung zwischen „representing“ und „intervening“ [4]: *In der techno-wissenschaftlichen Forschung ist es nicht einmal im Prinzip möglich, die theoretische Darstellung von den materiellen Bedingungen der Wissensproduktion zu trennen* und somit von den Eingriffen, die nötig sind, um das Phänomen zu erzeugen und zu stabilisieren. Mit anderen Worten: Die TechnoWissenschaft kennt nur einen Weg, neues Wissen zu gewinnen, nämlich die Erzeugung einer neuen Welt. Ist die Aufgabe der Wissenschaft die Darstellung einer gegebenen, ewigen und unveränderlichen Natur und die Aufgabe der Technologie, in den „natürlichen“ Lauf der Welt verändernd einzugreifen, so ist die TechnoWissenschaft ein Hybrid, in der theoretische Darstellung und technischer Eingriff miteinander verschränkt sind.

<sup>3</sup> Jones nutzt diesen Begriff in Gesprächen (und auf seiner Website [www.softmachines.org](http://www.softmachines.org)) und bezieht sich dabei beispielsweise auf Nadrian Seeman's systematische Untersuchung von DNS-Molekülen als Bausteinen oder Komponenten zukünftiger technischer Systeme.

those at a larger scale. Nanotechnologies are the design, characterisation, production and application of structures, devices and systems by controlling shape and size at the nanometre scale. [7]

Der Begriff „NanoTechnoWissenschaft“ steht zwar nicht im Widerspruch zu solchen Definitionen, nimmt aber eine andere Perspektive ein: Er geht von einer Orientierung der Forschung aus, in der grundlegende Fertigkeiten typischerweise im Kontext finanzierter Projekte mit einem mehr oder weniger konkreten technischen Ziel erworben werden. Dies bezeichnet Galison als die ingenieurwissenschaftliche Art, Wissenschaft zu betreiben. Auch wenn ein großer Anteil wissenschaftlichen Wissens und wissenschaftlicher Erfahrung in den Erwerb solcher Fertigkeiten und in die Untersuchung neuer Phänomene eingeht, handelt es doch nicht so richtig um „Wissenschaft“, da das Ziel dieser Untersuchungen normalerweise weder das Infragestellen bestehender Auffassungen und das Etablieren neuer Wahrheiten, noch das Aufstellen und Falsifizieren neuer Vermutungen oder das Schließen wichtiger Lücken unseres Weltverständnisses ist. Und auch wenn umgekehrt die Praktiken der Nanoforschung wesentlich aus spielerischem Probieren und Basteln bestehen und es um die Bewältigung technischer Herausforderungen und das Verwirklichen technologischer Versprechen geht, so ist all dies doch keine bloße Entwicklungsarbeit, Konstruktion oder „Ingenieurskunst“: Die Forschung besteht nämlich nicht darin, Geräte für den mehr oder weniger direkten Gebrauch zu bauen. Bestenfalls legt sie das Fundament für zukünftige konkrete Ingenieursprojekte. Nanotechnologische Forschung ist also weder „Wissenschaft“ noch „Ingenieurskunst“, sondern befindet sich in einem Zwischenraum, der nun als Technowissenschaft oder ingenieurwissenschaftliche Art, Wissenschaft zu betreiben, vorläufig bezeichnet ist.

Um diese Forschung nun genauer zu charakterisieren, wird eine Philosophie der TechnoWissenschaften benötigt, die die vier oben angeführten Fragen für die nanotechnologische und biomedizinische Forschung oder für die Halbleiterforschung stellt: Was ist die Rolle von Theorie und Theorieentwicklung in der Nanoforschung, und welche Arten von Theorien werden für nanotechnologische Entwicklungen benötigt? Was sind die in der nanowissenschaftlichen Forschung bevorzugten Methoden und Werkzeuge und die mit ihnen verknüpften Denkweisen? Was ist NanoTechnoWissenschaft und wie sind ihre Objekte konstituiert? Welche Art von Wissen erzeugen und vermitteln Technowissenschaftler? Die vier Hauptabschnitte dieses Beitrags behandeln diese Fragen. In jedem Abschnitt werden

grundsätzliche philosophische Überlegungen in gesellschaftliche Dimensionen und Wertfragen übergehen. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass es zwar so etwas wie „reine Wissenschaft“ gegeben haben mag, aber niemals eine „reine Technowissenschaft“. In der Tat ist die Berücksichtigung der Tatsache, dass akademische Laborforschung nicht mehr lediglich den Wissenschaftsstandards gerecht werden muss, sondern durch ihre Verantwortlichkeit gegenüber den Ansprüchen von Auftraggebern, Kunden, Entwicklern und Nutzern in den Bereich der Ethik vorgezogen ist, ein Kennzeichen der Technowissenschaft [8,9].

## 1. VON „ABGESCHLOSSENEN THEORIEN“ ZU DEN GRENZEN DES VERSTEHENS UND KONTROLLIERENS

### *1.1 Abgeschlossen in Bezug auf den Nanobereich*

Der Physiker Werner Heisenberg hat 1948 den Begriff der „abgeschlossenen Theorie“ eingeführt. Er bezieht sich im Besonderen auf vier abgeschlossene Theorien: „neben der Newton’schen Mechanik die Maxwell’sche Theorie mit der speziellen Relativitätstheorie, dann Wärmelehre und statistische Mechanik, und schliesslich die (unrelativistische) Quantenmechanik mit Atomphysik und Chemie“ [10]. Diese Theorien betrachtet er als abgeschlossen in drei komplementären Hinsichten:

1. Ihre geschichtliche Entwicklung ist abgeschlossen, sie haben ihre Endform erreicht. Sie konstituieren einen hermetisch geschlossenen Bereich, in dem die Theorie die Bedingungen ihrer Anwendung so definiert, dass sie überall, wo sie angewendet werden kann, auch gültig ist.

2. Sie sind jeglicher Kritik gegenüber immun. Probleme, die im Kontext ihrer Anwendung auftreten, werden auf Hilfstheorien und Hypothesen oder auf Besonderheiten des Versuchsaufbaus, der Instrumente etc. verlagert und der Differenz zwischen vereinfachter Laborsituation und komplexer Realsituation angelastet.

3. Sie sind für immer gültig. Wann und wo auch immer Erfahrungen mit den Konzepten einer solchen Theorie beschrieben werden können, bestätigen sie die von dieser Theorie postulierten Gesetze. [10]<sup>4</sup>

All dies gilt auch für die NanoTechnowissenschaft. Sie bezieht sich auf ein verfügbares Repertoire von Theorien, die abgeschlossen sind oder in Bezug auf den Nanobereich als abgeschlossen betrachtet werden. Sie befasst sich weder mit der Kritik oder der weiteren

---

<sup>4</sup> Heisenbergs Begriff der abgeschlossenen Theorien beeinflusste Thomas Kuhns Paradigmenkonzept [11]. Auch die so genannte Finalisierungsthese, eine der ersten systematischen Darstellungen der Technowissenschaft, schuldet diesem Begriff einiges [12]. Heisenberg hebt einen fünften und besonders umstrittenen Aspekt abgeschlossener Theorien hervor: Eine Ausweitung ihres Anwendungsbereichs führt zu keiner Veränderung der Theorie. Dieser Aspekt und Heisenbergs Liste abgeschlossener Theorien spielt im Folgenden keine Rolle.

Ausarbeitung dieser Theorien, noch mit der Entwicklung eigener Theorien.<sup>5</sup> Das heißt jedoch nicht, dass abgeschlossene Theorien in der NanoTechnoWissenschaft schlicht „angewendet“ würden.

Wenn sich Heisenberg auf den hermetisch geschlossenen Charakter abgeschlossener Theorien bezieht, so konstatiert er lediglich, dass diese Theorien überall dort gültig sind, wo ihre Konzepte angewandt werden können und lässt ziemlich offen, wie groß oder klein ihr tatsächlicher Anwendungsbereich ist. Allerdings weist er darauf hin, dass dieser Bereich so klein ist, dass eine „abgeschlossene Theorie [...] keine völlig sichere Aussage über die Welt der Erfahrungen“ [10] enthält. Selbst für eine abgeschlossene Theorie bleibt demnach zu bestimmen, wie und in welchem Umfang ihre Konzepte auf die Erfahrungswelt angewandt werden können.<sup>6</sup> Es gibt also keinen einfach gegebenen Phänomenbereich, auf den eine abgeschlossene Theorie anwendbar ist. Stattdessen ist es „eine Frage des Erfolgs“ [10], nämlich des Kalibrierens, Abstimmens oder wechselseitigen Abgleichens, in welchem Umfang Erfahrungsphänomene einer Theorie so angepasst werden können, dass deren Konzepte auf sie anwendbar werden.

### *1.2 Passen vs. Dehnen*

Die Frage nach Art und Weise der Anwendung von Theorien auf konkrete Gegenstandsbereiche war in letzter Zeit Gegenstand vieler philosophischer Diskussionen zum Thema Modellierung.<sup>7</sup> Auf die Nanotechnologie jedoch ist der Anwendungsbegriff gar nicht erst anwendbar. Im Falle der Nanotechnologie versuchen Wissenschaftler nämlich nicht, nanoskalige Phänomene mittels der Quantenchemie, der Strömungslehre oder anderer Theorien zu erfassen. Sie benutzen keine Modelle, um den Anwendungsbereich einer abgeschlossenen Theorie oder eines allgemeinen Gesetzes zu erweitern und sie sind auch nicht damit beschäftigt, die Theorie an die Realität anzupassen und umgekehrt die Realität an die Theorie. Stattdessen verstehen sie nanoskalige Phänomene als Teile eines hochkomplexen

---

<sup>5</sup> Im Falle der NanoTechnoWissenschaft besteht dieses Repertoire aus wesentlich mehr als den von Heisenberg genannten Theorien. Es ist eine vielleicht gewagte Behauptung, dass die NanoTechnoWissenschaft nicht mit der Entwicklung eigener Theorien befasst sei. Als Gegenbeispiel wird manchmal die Entdeckung des „giant magnetoresistance effect“ und die daran anschließende theoretische Arbeit genannt [13]. Auch gibt es vereinzelte Stimmen die die Entwicklung von speziell an die Komplexität des Nanokosmos angepassten Theorien fordern [14,15]. Diese Stimmen sind allerdings isoliert und es scheint Konsens darüber zu bestehen, dass die Nanotechnologien ohne solche – wenn überhaupt – nur schwer entwickelbaren, Theorien auskommen [16].

<sup>6</sup> Hierzu wurde Heisenberg wohl von Heinrich Hertz inspiriert, der die Prinzipien der Mechanik als abgeschlossene Theorie formulierte [17]. Er definierte als mechanische Probleme alle Bewegungsphänomene, die, wenn auch mit Hilfe zusätzlicher Annahmen, von seinem Grundgesetz als solche ausgewiesen werden können. Phänomene, die nicht auf diese Art ausgewiesen werden können, sind keine mechanischen Probleme und liegen schlicht außerhalb des Bereichs der Mechanik (beispielsweise die Probleme des Lebens).

<sup>7</sup> Vgl. die Arbeiten von Nancy Cartwright, Margaret Morrison und Mary Morgan [18, 19].

Mesokosmos, der zwischen der klassischen Physik und der Quantenmechanik angesiedelt ist. Den Nanoforschern stehen keine Theorien zur Verfügung, die diese komplexe Welt beschreiben. Es existiert beispielsweise keine Theorie, die die Abhängigkeit gewisser Eigenschaften von Merkmalen der molekularen Struktur erfasst.<sup>8</sup>

Nanotechnikforscher wissen, dass die ihnen überlieferten abgeschlossenen Theorien für klarer definierte Phänomene unter wesentlich leichter zu kontrollierenden Laborbedingungen formuliert wurden. Statt zu behaupten, dass die komplexen Phänomene des Nanobereichs so beschrieben werden könnten, dass sich die Konzepte der abgeschlossenen Theorien unmittelbar auf sie anwenden ließen, ziehen sie die abgeschlossenen Theorien eklektisch heran und dehnen sie über den intendierten Bereich ihrer Anwendung aus, um Teilerklärungen für den Nanobereich zu erhalten.<sup>9</sup> Beispielsweise kann die Messung des Stromflusses durch einen organisch-anorganischen Molekülkomplex entweder quantenchemikalisch oder in den klassischen Begriffen der Elektrotechnik nachvollzogen werden. Die beiden unterschiedlichen Zugänge stehen zueinander aber nicht in Konkurrenz um eine bessere oder gar beste Lösung [20]. Bewaffnet mit Theorien, die bezüglich der Nanotechnologie abgeschlossen sind, sind die Forscher gut gerüstet, um erklärungsbedürftige Phänomene zu handhaben. Sie sind sich jedoch auch stets bewusst, dass sie grobe Instrumente zum Einsatz bringen, die nicht speziell für diese feingliedrige Arbeit entwickelt wurden und deshalb in Kombination genutzt werden müssen. In der Tat ist die Nanotechnologieforschung durch eine stillschweigende Übereinstimmung charakterisiert, der zufolge drei Aussagen gleichzeitig zutreffen:

1. Es gibt eine fundamentale Differenz zwischen den klassischen Theorien und dem Quantenbereich: Klassische Theorien sind nicht angemessen für Quantenphänomene und die Quantentheorien nicht angemessen für klassische Phänomene.

---

<sup>8</sup> Anzumerken ist, dass der Begriff „Komplexität“ hier absichtlich nicht in technischer Art und Weise gebraucht wird. Er bezieht sich nicht auf Phänomene, die in die Bereiche der Nichtlinearen Dynamik, der „Komplexitätstheorie“ oder ähnliche fallen. Die Komplexität auf der Nanoebene ist einfach nur eine große Unordnung, da es zu viele relevante Variablen, Eigenschaften und komplizierte vielfache Wechselbeziehungen gibt. Dies wird besonders deutlich im Kontrast zur vergleichsweise ordentlichen Welt der Laborphänomene der klassischen Physik und der Quantenphysik. In ihrer Komplexität befindet sich die „real world situation“ der Nanowelt in prekärer Weise zwischen dem Bereich der klassischen Physik und der Quantenphysik.

<sup>9</sup> Der Unterschied zwischen dem „Anwenden“ einer Theorie mittels „anpassen“ und mittels „dehnen“ lässt sich auch wie folgt verdeutlichen: Im Normalfall geht es beim Anpassen einer Theorie an die Realität (und umgekehrt) darum, die Idealisierungen und Abstraktionen zu kompensieren, die nötig waren, um eine Theorie zu formulieren und ein Modell zu konstruieren. Klassische Theorien verallgemeinern jedoch weder nanoskalige Eigenschaften und Prozesse, noch beziehen sie sich auf eine Idealisierung von nanoskaligen Phänomenen. Die Herausforderung liegt in diesem Fall im Übergang von dem vorgesehenen Bereich einer klassischen Theorie in einen völlig anderen Bereich. – Wie alle Versuche, die neue NanoTechnoWissenschaft systematisch von der altmodischen „Wissenschaft“ und den „Ingenieurwissenschaften“ abzugrenzen, ist auch dieser anfällig für die Kritik, dass sich die beiden Bedeutungen von „Anwendung“ (Phänomen in den Anwendungsbereich übertragen / den Anwendungsbereich auf Gebiete ausdehnen, für den die Theorie nicht entworfen wurde) nicht kategorial, sondern nur graduell unterscheiden. Ich danke Eric Winsberg für diesen Hinweis.

2. Der Nanobereich ist von intellektuellem und technischem Interesse da er ein „exotisches Gelände“ [14] ist, in dem klassische Eigenschaften wie Farbe und Leitfähigkeit entstehen, wenn man von der Quantenebene aufsteigt, und Phänomene wie die gequantelte Konduktanz, wenn man auf die Quantenebene absteigt.

3. Nanotechnologieforscher können eklektizistisch oder opportunistisch aus einer Vielzahl von Theorien aus dem klassischen wie auch aus dem Quantenbereich wählen, um Erklärungen für neue Eigenschaften, Verhaltensweise und Prozesse zu gewinnen.

Zusammengenommen drücken diese drei Aussagen eine die Nanotechnologie betreffende Spannung aus; nämlich, dass diese einerseits ungewöhnlich, neu und überraschend, andererseits vertraut und beherrschbar ist. Bedeutsamer ist aber, dass sie eine analoge Spannung hinsichtlich der verfügbaren Theorien ausdrücken: Sie sind einerseits unangemessen, andererseits hinreichend. Die tiefgehende Differenz zwischen dem Bereich der klassischen Physik und der Quantenphysik macht deutlich, was den Nanokosmos so besonders und interessant macht. Diese Differenz reduziert sich aber auf Fragen des Geschmacks und der Zweckdienlichkeit, wenn es darum geht, entweder Werkzeuge aus der klassischen Physik oder der Quantenphysik zu wählen. Anders gesagt: Was nanoskalige Phänomene wissenschaftlich interessant macht, ist, dass sie aus keiner der beiden Perspektiven adäquat beschrieben werden können. Möglich wird Nanotechnologie aber erst dadurch, dass beide Perspektiven ausreichende Mittel an die Hand geben, um mit den Phänomenen zurechtzukommen.

Die verfügbaren Theorien müssen gedehnt werden, um mit der Spannung zwischen den drei oben genannten Aussagen umgehen zu können. Wie dieses Dehnen in der Forschungspraxis aussieht, müsste mit Hilfe detaillierter Fallstudien gezeigt werden. Beispielsweise kann man untersuchen, wie Theorien „angeklebt“ werden, um ein von außen kommendes Erklärungsbedürfnis zu befriedigen.<sup>10</sup> Ein prominenterer Fall ist die Konstruktion eines Simulationsmodells, in dem unterschiedliche theoretische Beschreibungsebenen integriert und auf das tatsächliche Verhalten von nanoskaligen Systemen oder Prozessen abgestimmt werden [22, 23]. Damit wird die ursprüngliche Bedeutung von Theorien

---

<sup>10</sup> Ein Beispiel hierfür ist ein Artikel in der Zeitschrift *Science*, der einen an einem „molecular device“ beobachteten Effekt darstellt. Auf die Bitte der Herausgeber, sie mögen doch eine Erklärung für den beobachteten Effekt anbieten, wiesen die Autoren auf einen etwas beliebigen, aber plausiblen Mechanismus hin und auf weitere Theorien und zukünftige Experimente „to elucidate the transport mechanisms“ [21]. Diese Diskussion wurde von den Autoren nur widerstrebend geführt, da ein Erklärungsmechanismus für ihre eigentliche Pointe unnötig ist – dass sie nämlich verlässlich Strom dort fließen lassen können, wo dies bisher niemandem gelang. Darüber hinaus besteht auch keine besondere Leistung darin, da die Autoren es offenbar für einfach halten, einen hinreichend glaubwürdigen Mechanismus mit Hilfe bereits verfügbarer Theorien zu entwickeln. Damit erkennen sie implizit auch an, dass für ihre Erklärung problemlos eine Alternative gefunden werden kann.



ausgedehnt, insbesondere wo diese darin bestand, die Strukturebene hinter den beobachteten Phänomenen aufzuklären: Da diese Theorien jetzt unter weit komplexeren Bedingungen angewendet werden, als jenen, für die sie entwickelt wurden, tritt die theoretische Leistung einer kausalen Herleitung der Phänomene gegenüber der Beschreibung der Phänomene in den Hintergrund. So lösen sich Algorithmen, die bestimmte Dynamiken beschreiben, von der Kausalerklärung ab, die sie ursprünglich anboten, denn gerade die Anfangs- oder Strukturbedingungen, für die sie formuliert wurden, halten sich im Übergang vom Makro-, zum Nano- und Quantenbereich nicht durch.<sup>11</sup>

Es gibt noch ein ganz anderes Anzeichen dafür, dass Theorien und Konzepte bei der Anwendung auf den Nanobereich gedehnt werden. Von der Nanowelt wird angenommen, dass sie komplex, selbstorganisierend und überraschend ist. Diese Welt ist durch chemische und biologische Aktivität gekennzeichnet. Die mit den Nanotechnologien verbundenen Erwartungen setzen deshalb auf die Konstruktion von aktiven statt passiven Werkzeugen oder Geräten.<sup>12</sup> Nur die so genannte erste Generation der Nanotechnik sei daher auf die Herstellung neuer Materialien (passiver Strukturen) beschränkt, und schon die zweite Generation soll in der Lage sein, molekulare Aktivität in nanotechnische Systeme einzubetten.<sup>13</sup> Aus der Sicht von Theorien, die bezüglich des Nanobereichs abgeschlossen sind, kann man von dieser neuen Aktivität und Lebendigkeit jedoch nichts „sehen“, sondern immer nur das, was in den Formeln und Formulierungen dieser Theorien stabilisiert werden kann. Eine Reihe beschreibender oder programmatischer Begriffe für nanoskalige Phänomene strecken und recken sich deshalb über ihre eigentliche Bedeutung hinaus. Ein Paradebeispiel hierfür ist der Begriff „selective surface“, der einer völlig passiven Sache Aktivität zuschreibt: So mögen sich Zellen zwar auf unterschiedliche Weise an einer Oberfläche anlagern, aber es ist nicht die Oberfläche selbst, die bestimmte Zellen bevorzugt oder benachteiligt; die Auswahl liegt vielmehr ganz in der Hand des Ingenieurs, der die Oberfläche auswählt, um eine bestimmte

---

<sup>11</sup> In der Sektion „Ontologies of Technoscience“ der im Oktober 2006 in Bielefeld abgehaltenen Tagung „Science in the Context of Application“ hat Bernadette Bensaude-Vincent gezeigt, dass die Fokussierung auf Struktur-Funktion-Beziehungen aufgegeben wurde und damit die als Crick’s Dogma bekannte Forderung, Funktionen auf die ihnen zugrunde liegenden Strukturen zurückzuführen. An ihre Stelle sei die selbstgenügsame Analyse dynamischer Muster in den Beobachtungen von Funktionen und Eigenschaften getreten. Davis Baird diskutierte als Beispiel hierfür ein nanotechnologisches Analyseinstrument, das eine materielle Faktorenanalyse durchführt und somit statistisch die zugrundeliegenden Ursachen aus beobachteten Eigenschaften ableitet. (Mit anderen Worten: Es führt keine physikalische oder chemische Analyse durch, um die Anwesenheit dessen was gemessen wird, festzustellen.) Nicole Karafyllis [Quelle?] hob hervor, dass die (Nano)Technologien in eine neue Beziehung zur Biologie eintreten, indem sie Funktionen nicht (beispielsweise von Strukturprinzipien her) konstruieren, sondern wachsen lassen wollen (beispielsweise durch Nutzbarmachung der Selbstorganisation).

<sup>12</sup> Vgl. Nordmann [42, 23a] zum technischen Prestige von Geräten gegenüber dem bloßen Material.

<sup>13</sup> Die übliche Rede von einer ersten (passiven), zweiten (aktiven) und möglichen weiteren Generationen wurde namentlich von Mihail Roco (National Nanotechnology Initiative) im Sprachgebrauch etabliert. Dieser Beitrag hält es für fraglich, ob es jemals zu einer Nanotechnologie der zweiten Generation kommen wird.

Funktionalität zu erzeugen. Dasselbe gilt für „selbst-reinigende Oberflächen“, „intelligente Materialien“, „autonome (selbst-angetriebene) Bewegung“, die verschiedenen Spielarten von „self-assembly“ oder „weicher Maschinerie“<sup>14</sup>. Alle diese Begriffe haben eine konkrete Bedeutung und beziehen sich gleichzeitig auf etwas visionäres, genuin „nanotechnologisches“, das ihre Abstammung aus der Alltagssprache oder aus bekannten Theoriezusammenhängen übersteigt.<sup>15</sup>

### *1.3. Sprachlose Komplexität*

Bis hierher wurde die Dehnung von Wissen über einen Phänomenbereich zu einem ganz anderen Phänomenbereich nur beschrieben, um die Nanoforschung von einer Forschungspraxis abzugrenzen, in der neue Phänomene in bestehende Wissensstrukturen nur eingepasst werden. Die Beschreibung bietet aber Anlass für Wissenschaftler, Bürger und zuständige Entscheidungsträger, kritische Fragen zu stellen: Da die spezifische Komplexität der Nanowelt sich nicht vollständig aus dem Blickwinkel von Theorien erfassen lässt, die in Bezug auf die Nanoebene abgeschlossen sind, werden insbesondere die mit dem Verstehen und Kontrollieren nanoskaliger Phänomene verbundenen Schwierigkeiten durch diese Theorien nicht adäquat ausgedrückt. Durch das Dehnen abgeschlossener Theorie erhält man lediglich perspektivisch erschlossene Erklärungen der Phänomene, also gewissermaßen eine Auswahl von Teilerfolgen bei der Phänomenbeherrschung. Die Beteuerung, dass halbwegs stabilisierte Phänomene der Erklärung durch verfügbare Theorien immer zugänglich seien, findet hinreichend Ausdruck. Dabei bleibt die Tatsache, dass es keine theoretische Rahmung und gesetzmäßige Regelmäßigkeit für nanoskalenabhängige Eigenschaften und für das Beherrschen und Kontrollieren der technologisch interessanten nanoskaligen Phänomene gibt, hinter verschlossenen Labortüren. Für das technische Geschick und die Anstrengung, Phänomene so weit zu stabilisieren, dass sie überhaupt erst einmal dem erklärenden Zugriff zugänglich werden, gibt es keine Sprache.<sup>16</sup> Zugespitzt formuliert: Es kann passieren, dass

<sup>14</sup> Seit der Veröffentlichung von Richard Jones' Buch über „soft machines“ ist dieses Konzept Gegenstand einer aufkommenden Diskussion [25, 26]. Es geht um die Frage, ob der Ausdruck „machine“ in dem Begriff „soft machine“, wenn diese als nicht mechanische biologische Maschine gedacht wird, irgendeine Bedeutung behält. (Sicher ist, dass er eine Bedeutung behält, wenn man ihn als „konkrete“ Maschine im Sinne Simondons denkt.)

<sup>15</sup> Das gilt ganz besonders für „self-assembly“, einen Begriff den George Whitesides [27] sorgfältig differenziert hat, der aber immer wieder über einen genau begrenzten Gebrauch hinaus auf „Ordnung aus dem Chaos“ oder „spontane Neuordnung auf höherer Ebene“ verweisen soll.

<sup>16</sup> Es ist schon lange bekannt, dass die Laborpraxis komplexer ist, als es die Darstellung des Forschungsverlaufs in wissenschaftlichen Artikeln vermuten lassen. Traditionellerweise versucht die wissenschaftliche Forschung, bestimmte Kausalbeziehungen zu isolieren, in dem sie sie von der komplexen makroskopischen Welt des Labors abschirmt. Ob es leicht oder schwer ist, diese Beziehungen zu isolieren, ob sie beständig oder unbeständig sind, ist nur von geringer Relevanz für die wissenschaftliche Darstellung. Die Situation stellt sich jedoch anders dar, wenn es um die NanoTechnoWissenschaft geht: Ihre Aufgabe ist es, unter den Bedingungen nicht reduzierbarer Komplexität zukünftigen Technologien den Boden zu bereiten. Unter diesen Umständen wird es problematisch, dass tendenziell immer nur Erfolgsgeschichten publiziert werden.

jemand jahrelang interessante Forschung betreibt, nur um zu entdecken, dass der größte Teil der Phänomene, mit denen er herumbastelt, die er im Labor stabilisiert und prüft, niemals robust genug sein werden, um in einem nanotechnischen Gerät als Komponente dienen zu können. Anders gesagt: Es gibt keine begrifflichen Ressourcen, um die spezifischen Grenzen nanotechnologischen Wissens und die Grenzen technischer Kontrolle zu benennen.

Der erkenntnistheoretische Weg über die Rolle von Theorien und Modellen in der Nanoforschung hat an einen Punkt geführt, an dem Reflexionen über die Grenzen von Verstehen und Kontrolle eingefordert werden. Eine Abkürzung auf diesem Weg hätte darin bestanden, unmittelbar vom aufschlussreichen Beispiel der Nanotoxikologie auszugehen. Diese ist mit der Tatsache konfrontiert, dass die physikalisch-chemische Bestimmung nicht weit genug reicht, um Nanopartikel in den Einzugsbereich der Chemikalienverordnung REACH zu bringen – und dass selbst die besten Methoden zur Bewertung chemischer Substanzen nicht dehnbar genug sind, um eine Gefährdungs- und Risikoanalyse von Nanopartikeln zu leisten [28].<sup>17</sup> Mit anderen Worten: Die Methoden der chemischen Toxikologie können nur einen kleinen Teil der toxikologischen Geschichte erzählen. Allerdings gelten zumindest für den Aspekt der chemischen Zusammensetzung allgemeine Regeln, die angewendet werden können. Dagegen gibt es in Bezug auf Oberflächenmerkmale oder die Gestalt von Partikeln einer bestimmten Größe zunächst nur Anekdoten, wie etwa die nur ansatzweise zutreffende Analogie mit dem Asbest. Da es offenbar keine besseren Ansätze gibt, wird vom Blickwinkel der chemischen Toxikologie ausgegangen. Mehr oder minder zuversichtlich werden die ihr verfügbaren Theorien und Methoden so weit wie möglich auf den Nanobereich ausgedehnt, während die mit der Feststellung möglicher Gefährdungen oder gar einer vollwertigen Risikoabschätzung verbundenen Schwierigkeiten eher unterschlagen werden.<sup>18</sup>

Es gibt noch eine weitere, allgemeinere Möglichkeit, dies zu verdeutlichen. Theorien, die in Bezug auf die Nanoebene abgeschlossen sind, legen nur die äußeren Grenzen der Nanowelt fest und spezifizieren das physische Geschehen in dieser Welt nicht. Die mit den

---

<sup>17</sup> Dass "REACH" (Registration, Evaluation, Authorisation of Chemicals) nicht weit genug reicht, ist ein Wortspiel, das auf englisch besser funktioniert. Dabei bezieht sich REACH auf das noch relativ neue Regulierungsverfahren der EU für chemische Substanzen. Es herrscht weitgehende Übereinstimmung, dass es nicht anwendbar ist, wenn Eigenschaften nicht nur von der chemischen Zusammensetzung, sondern auch von Oberflächeneigenschaften, Größe, Gestalt und vielleicht auch von der konstruierten Funktionalität und den Umgebungsbedingungen abhängen. (Ähnlich Schummer [29], der darlegt, dass REACH nicht einmal die Produkte der konventionellen synthetischen Chemie abdeckt.)

<sup>18</sup> Sabine Maasen und Monika Kurath haben gezeigt, dass die Schwierigkeiten der chemischen Toxikologie interessante neue Möglichkeiten für die Nanotoxikologie eröffnen [30, 30a]. – Zur weiteren Illustration der misslichen Lage mag man sich in Erinnerung rufen, dass Kohlenstoff-Nanoröhrchen zwar in den 1980ern „entdeckt“ wurden und dass sie seit einigen Jahren kommerziell hergestellt werden, dass Forscher aber immer noch deren mangelnde Standardisierung beklagen: jede Produktionseinheit auch des gleichen Herstellers weise andere Eigenschaften auf.

Nanotechnologien verbundenen Möglichkeiten und Hoffnungen werden also nur negativ bestimmt: Alles wird als möglich betrachtet, was mit den abgeschlossenen Theorien oder den bekannten Naturgesetzen vereinbar ist. Dies jedoch zwingt uns einen Begriff der technischen Möglichkeit auf, der kaum substanzieller ist als der der bloß logischen Möglichkeit. Ganz offensichtlich jedoch reicht das bloße Faktum, dass etwas mit keinem bekannten Gesetze in Widerspruch steht, nicht aus, um seine technische Realisierbarkeit unter den komplexen Bedingungen der Nanowelt beanspruchen zu können. Auch hier zeigt sich, dass spezifische Theorien und das begriffliche Rüstzeug fehlen, um eine Unterscheidung zwischen physischer Möglichkeit (logische Vereinbarkeit mit verfügbarem Wissen) und technischer Möglichkeit zu treffen. Die Besonderheiten und Schwierigkeiten der Nanowelt und die damit einhergehende Beschränkung technischer Möglichkeit können nicht thematisiert werden, da sich die Nanoforschung immer nur auf einen Fundus von Theorien beruft, die an anderer Stelle entwickelt wurden und nun eklektisch angeeignet und gedehnt werden, um sie punktuell mit nanoskaligen Phänomenen in Einklang zu bringen. Theorien dienen der Nanoforschung somit als Ressource für Zwecke der Erklärung und Modellierung von Phänomenen; sie dienen nicht der Bestimmung und Begrenzung des Geschehens in der Nanowelt. Daraus ergibt sich das mangelhaft entwickelte Verständnis für die Grenzen des Verstehens und der Kontrollierbarkeit auf der Nanoebene. Dieser Mangel hat seinen Preis, da die Vorstellung anscheinend fast unbegrenzter technischer Möglichkeiten Erwartungen, öffentliche Debatten und vermutlich auch die Forschungsfinanzierung in die falsche Richtung lenkt.<sup>19</sup>

## 2. VON ERFOLGREICHEN METHODEN ZUR ÜBERMACHT DER BILDER

### 2.1 (Techno)Wissenschaftliche Methodologie: quantitativ vs. qualitativ

Wie oben gezeigt wurde, betrachtet Heisenberg als „Frage des Erfolgs“ in welchem Ausmaß Erfahrungsphänomene von abgeschlossenen Theorien erfasst werden können [10]. Dies wirft die Frage auf, was „Erfolg“ in der Nanoforschung bedeutet: Was ist nötig, um sich selbst davon zu überzeugen, dass man ein zu erforschendes Phänomen ausreichend gut verstanden und/oder unter Kontrolle hat?

Für Heisenberg und jeden Wissenschaftsphilosophen, der sich an der theoretischen Physik orientiert, reduziert sich diese Frage auf den Voraussageerfolg quantitativer Wissenschaft.

---

<sup>19</sup> Ich dränge darauf, den Grenzen des Verstehens und der Kontrolle auf der Nanoebene mehr Aufmerksamkeit zu schenken. Wenn ich mit diesen abschließenden Bemerkungen zum Thema Recht habe, handelt es sich hier nicht um ein bloßes Versäumnis, sondern um eine grundsätzliche Schwierigkeit der Nanoforschung, diese Grenzen überhaupt in den Blick zu bekommen. Meine Forderung kann also nicht auf direktem Wege, sondern nur über (wissenschaftsphilosophische) Selbstreflexion der Nanoforschung erfüllt werden.

„Quantitativ“ heißt hier mehr als die Verwendung von Formeln und Zahlen und auch mehr als exaktes Messen. Quantitative Ansätze zeichnen sich durch zweierlei aus. Erstens werden prognostizierte numerische Werte mit durch Messung erhaltenen Werten verglichen: die möglichst exakte Übereinstimmung zweier Zahlen verbürgt die Übereinstimmung von Theorie und Wirklichkeit. Zweitens kommt diese quantitative Übereinstimmung ausdrücklich ohne Bezug auf Ähnlichkeit aus: es bedarf keiner Annahme, derzufolge die zur Vorhersage benutzten theoretische Modelle der wirklichen Welt, die sie repräsentieren, ähnlich wären. Die quantitative Forschung ist zufrieden, wenn sie verlässlich von gegebenen Ausgangsbedingungen zu akkuraten Vorhersagen gelangt; es ist nicht nötig, dass alle Details des Begriffsapparats (alle Terme seiner Algorithmen und Modelle) eine Entsprechung in der Realität haben. Beide Charakteristika der quantitativen Wissenschaft sind besonders aus der theoretischen Physik des 19. und 20. Jahrhunderts bekannt. Können sie aber auch zur Beschreibung der NanoTechnoWissenschaft dienen? [31].

Angesichts der extrem heterogenen Forschungspraktiken, die unter der Überschrift „Nanowissenschaft und Nanotechnologien“ firmieren, ist es kaum möglich, eine allgemeine Antwort auf diese Frage zu geben. Trotzdem lässt sich die Aussage rechtfertigen, dass ein Großteil nanotechnowissenschaftlicher Forschung qualitativ ausgerichtet ist. Ihr erkenntnistheoretischer Erfolg besteht in der Konstruktion von Ähnlichkeiten.<sup>20</sup>

Diese Verschiebung mag zunächst harmlos klingen, hat aber bedeutende Konsequenzen: Die Übereinstimmung von vorhergesagten und gemessenen Quantitäten wird durch die Übereinstimmung von errechneten und experimentell generierten Bildern ersetzt. Die letztere, qualitative Übereinstimmung setzt die Abwesenheit und somit die bewusste Unterdrückung visueller Hinweise voraus, die eine Simulation auf den ersten Blick von einem sondenmikroskopisch gewonnenen Bild unterscheiden würde. In der Tat vergleichen (Nano)Technowissenschaftler häufig zwei Displays oder Computerbildschirme. Das eine

---

<sup>20</sup> Der Fall des berüchtigten „Datenfälschers“ Jan Hendrik Schön könnte hier als aufschlussreiche Fallstudie dienen. Seine Geschichte erweist sich womöglich als die eines jungen Forschers, der fast tragisch zwischen den Anforderungen quantitativer und qualitativer Methodologien gefangen war. Schön wurde entlarvt, da er in Publikationen zu unterschiedlichen Experimenten den beobachteten Verlauf des Experiments mittels des exakt gleichen Diagramms darstellte. In quantitativer Hinsicht würde dies bedeuten, dass er in verschiedenen Experimenten die exakt gleichen Messwerte erhielt – und dies ist so unwahrscheinlich, dass berechnete Zweifel entstanden, ob er diese unterschiedlichen Experimente überhaupt erfolgreich durchgeführt hatte. Das fragliche Diagramm hat aber nicht nur quantitative Bedeutung als Dokumentation einer Abfolge von Messwerten. Im Gebiet der molekularen Elektronik hat es gleichzeitig eine symbolische Bedeutung: die charakteristische Gestalt der Kurve ist die qualitative Kurzform für den gesuchten Effekt, dass nämlich Strom fließt. In einer Forschungskultur, die sich zunehmend für das Produzieren von Effekten interessiert, könnte es sein, dass Schön das Diagramm so verwendet oder „geschrieben“ hat, wie es allgemein „gelesen“ wird, nämlich ohne Bezug auf besondere numerische Messwerte als Symbol für einen bestimmten Ereignistyp. Insgesamt ist der Fall Schön komplizierter [32]; er steht vermutlich auch in anderer Hinsicht für die Ambivalenzen einer einerseits transdisziplinär und qualitativ verfassten Nanoforschung, die andererseits von der Physik und Chemie abstammt und weiterhin an den methodisch strengen Maßstäben traditionell quantitativer Disziplinen gemessen wird.

Display zeigt die visuelle Interpretation der Daten, die während einer Messreihe ermittelt wurden (beispielsweise mittels eines Elektronen- oder Rastersondenmikroskops), das andere zeigt die dynamische Simulation des Prozesses, der der Messreihe entsprechen soll. Damit die Simulation als solche überhaupt lesbar wird, erzeugt die Simulationssoftware eine visuelle Ausgabe, die aussieht wie die Ausgabe eines Elektronen- oder Rastersondenmikroskops. Die Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung der beiden Bilder erlaubt den Forschern Rückschlüsse auf mögliche kausale Prozesse. Anhand der Differenz lässt sich auch erkennen, wie weit der Prozess bisher verstanden wurde. Die Ähnlichkeit der Bilder erscheint hier als Garant für den Rückschluss vom simulierten Mechanismus auf den Mechanismus, der tatsächlich für die experimentell ermittelten Daten verantwortlich ist. Dementsprechend müsste wissenschaftsphilosophisch rekonstruiert werden, wie Nanowissenschaftler sich wechselseitig bestätigende Ähnlichkeiten erzeugen. Es ließe sich zeigen, dass sie nicht nur Simulationen und Beobachtungen und visuelle Repräsentationen physikalischer Systeme aufeinander abstimmen, sondern auch ihre eigene Arbeit mit der von anderen und aktuelle Ergebnisse mit Langzeitvisionen. Solche Studien würden auch noch einmal bestätigen, dass die Vereinheitlichung von Theorien nur eine geringe Rolle spielt, so lange ein Werkzeugkasten von Theorien verfügbar ist, der die Forschergemeinschaft eint. Anstatt Theorien sind es Instrumente (STM, AFM, etc.), Modelle, die zugehörige Software, Methoden und exemplarische Artefakte (Fullerene, Nanoröhrchen, molekulare Drähte, Nanopartikel), die als Gemeinsamkeit stiftende Bezugspunkte dienen [33, 34, 35].

## 2.2. „Ontologische Indifferenz“: Repräsentation und Substitution

Dies ist nicht der Ort, um die qualitative Methode einer Kritik zu unterziehen. Aus der Perspektive einer streng quantitativen und methodologisch reflektierten Wissenschaft würde eine solche Kritik leicht fallen und der Nanoforschung den Rückfall in ein Ähnlichkeitsdenken vorwerfen, das vorschnelle Schüsse aus qualitativer Übereinstimmung zieht, methodologisch naiv und nicht sonderlich reflexiv erscheint [31]. Wesentlich interessanter ist die Frage, warum der qualitative Ansatz für die Absichten der Nanoforschung trotz dieser Kritik angemessen zu sein scheint. Wie Peter Galison gezeigt hat, ist es weder die Absicht der Nanoforschung, die Nanoebene adäquat abzubilden, noch zu entscheiden, was existiert und was nicht oder was grundlegend und was abgeleitet ist. Er bezeichnet dies als die „ontologische Indifferenz“ der NanoTechnoWissenschaft [5]. Warum kann sich die nanotechnologische Forschung diese Indifferenz erlauben? Ein Beispiel hierfür: Die molekulare Elektronik bedient sich mehr oder weniger grob vereinfachender Darstellungen

des Elektronentransports, aber sie muss die Existenz von Elektronen nicht begründen. Elektronen sind den Forschern konzeptionell so vertraut, dass sie sie wie einfache makroskopische Gegenstände behandeln, die sich durch ein Molekül bewegen als ob es ein normaler materieller Gegenstand wäre, durch den ein Tunnel verläuft [20]. Einige Physiker und die meisten physikalisch orientierten Wissenschaftsphilosophen lehnen eine derart eklatante Missachtung des merkwürdig immateriellen und probabilistischen Charakters der Quantenwelt mit ihren Elektronen, Orbitalen und stehenden Elektronenwellen strikt ab [36, 37]. Und in der Tat mag es nötig sein, einen raffinierteren Ansatz in Betracht zu ziehen, um ein brauchbares Verständnis des Elektronentransports zu erzielen. Jedoch ist es das Privileg der ontologisch indifferenten Technowissenschaft, dass sie komplexere Ansätze immer dann entwickeln kann, wenn sie benötigt werden. Fürs Erste kann sie sehen, wie weit sie mit eher simplen Darstellungen kommt.<sup>21</sup>

Ontologische Indifferenz bedeutet ein Desinteresse an Fragen der Repräsentation und stattdessen ein Interesse an Fragen der Substitution.<sup>22</sup> Statt mit einfachen und nachvollziehbaren Modellannahmen auf sparsame Weise wesentliche Kausalbeziehungen in wirklichen Systemen herauszuarbeiten, produzieren Nanoforscher im Labor und in ihren Modellen eine so reiche, übersättigte Ersatzrealität, dass sie ihre diversen Techniken der Datenreduktion nicht mehr auf die „Welt da draußen“, sondern auf das im Labor gezähmte Stück Wirklichkeit anwenden. Diese Datenreduktions- und Modellierungstechniken nutzen wiederum Algorithmen, die anhand von wirklichen Systemen entwickelt wurden. Diese Algorithmen sind gut bewährte Bauteile für Ersatzrealitäten, die wirkliche physikalische Systeme nachahmen können [38].<sup>23</sup> Mit anderen Worten: Die Simulationen oder

---

<sup>21</sup> Ein besonders interessantes und faszinierendes Beispiel ist Don Eigler's bekanntes Bild eines Quantengeheges, das eine stehende Elektronenwelle begrenzt. Der scheinbare Photorealismus des Bildes legt nahe, dass das Quantengehege genauso dinghaft ist wie ein makroskopischer Teich. Dreist umgeht Eighlers Bild alle Diskussionen über die Interpretation der Quantenmechanik und erweist damit seine ontologische Indifferenz. Gleichwohl ist das Bild eine Ikone der NanoTechnoWissenschaft, Zeugnis der neuen Manipulations- und Visualisierungsmöglichkeiten, und eine Anzahlung auf die Verheißung, dass technische Kontrollierbarkeit nicht an der Schwelle der Quanteneffekte endet.

<sup>22</sup> Vergleiche hierzu Peter Galison's Vorschlag, dass der relevante Unterschied der zwischen dem Nachweis, dass es etwas gibt, und dem Bauen von Dingen sei. Doch ist, wie im 4. Abschnitt gezeigt wird, „bauen“ ein zu enger und zu „technischer“ Begriff. Er wird dem intellektuellen Aufwand, gar der Leidenschaft für die Herausforderungen der Nanowelt, nicht gerecht.

<sup>23</sup> Rom Harré kontrastiert wissenschaftliche Instrumente, die zur Untersuchung kausaler Prozesse dienen und Modellierungssysteme (inkl. Simulationen), die Phänomene domestizieren oder erzeugen. Es sind die Modellierungssysteme, die dem epistemischen Erfolg bei der Herstellung von Ähnlichkeit zugrunde liegen. Die typischerweise mit Instrumenten erhobenen Messergebnisse lassen sich entlang einer Kausalkette auf einen physikalischen Zustand, Prozess oder eine physikalische Eigenschaft zurückführen. Die Instrumente sind von der Natur getrennt, sie sagen uns etwas *über* die Welt. Dagegen sind materielle Modelle Teil der Natur, die relevanten kausalen Beziehungen der Phänomene werden innerhalb der Apparatur und dem größeren Komplex von Apparat-und-Welt gewonnen. Ganz gleich ob sie ein bekanntes Phänomen (wie den Regenbogen) domestizieren oder einen nicht „natürlich“ auftretenden Prozess hervorbringen, erlauben materielle Modelle keine direkten kausalen Rückschlüsse auf die Welt, in die sie eingebettet sind [38]. Wie die Metapher der Domestikation und Harré's Konzeption eines Apparat-Welt-Komplexes andeutet, sind solche Schlüsse auf

experimentellen Systeme enthalten so viel Wirklichkeit und sind so mit an der Wirklichkeit gewonnenen Wirkmechanismen gesättigt, dass Nanotechnikforscher sie als die Wirklichkeit selbst behandeln können [39]. Sie untersuchen diese Ersatzsysteme und finden in ihnen bereits vage Prototypen für technische Geräte oder Anwendungen vor: eine organische Zelle wird als eine Fabrik gesehen, in der Nanomaschinen zusammenarbeiten, deren Funktionalitäten nur noch herauspräpariert und handhabbar gemacht werden müssen. Während die Öffentlichkeit noch immer darauf wartet, dass bedeutende nanotechnologische Produkte die Labore verlassen, setzen die Forscher in den Laboren bereits nanotechnologische Werkzeuge ein, um mehr oder weniger eigenständig funktionierende nanotechnologische Systeme zu identifizieren und zu manipulieren. Ehe diese sich als nützliche Geräte außerhalb des Labors beweisen können, muss ihre Funktionalität nur noch technisch optimiert werden. Dann jedoch würden diese Geräte natürliche Eigenschaften und Prozesse nicht nur nachahmen oder ersetzen, sondern könnten sie sogar verbessern.

### *2.3 Bilder als Anfang und Ende der Nanotechnologien*

Auch hier war es ein langer Weg, der von der qualitativen Methodologie und der Konstruktion von Ähnlichkeit zu der Auffassung führte, dass Modelle nanoskaliger Phänomene nicht Teile der Realität repräsentieren, sondern diese ersetzen und deshalb eben die Art von konstruktiver Arbeit verlangen, die auch für die Entwicklung nanotechnischer Systeme und Geräte benötigt wird. Für eine direktere Erläuterung dieses Umstands müssen wir nur die Rolle betrachten, die Bildgebungsverfahren in der Geschichte der nanotechnologischen Forschung gespielt haben.<sup>24</sup> Viele würden behaupten, dass alles überhaupt erst begann, als Don Eigler und Erhard Schweizer ein Bild aus 35 Xenonatomen formten. Sie haben, indem sie die Atome so anordneten, dass sie den Schriftzug „IBM“ ergaben, nicht eine gegebene Realität repräsentiert, sondern ein Bild erzeugt, das eine zufällige Anordnung von Atomen durch ein technisch geordnetes Proto-Nanosystem ersetzte. Seitdem gilt die Fähigkeit, Bilder zu erzeugen und Wörter zu schreiben, als Vorhut des Bestrebens, den Nanobereich technisch kontrollierbar zu machen. Der Fortschritt der nanotechnologischen Forschung lässt sich nicht von der Entwicklung bildgebender Verfahren trennen, die oftmals zur gleichen Zeit Eingriffstechniken sind. In der Tat gilt das von Eigler

---

wirkliche Kausalität auch nur für bestimmte theoretische Zwecke erforderlich, wenn sich nämlich die Frage aufdrängt, wie die Dinge wirklich sind – also wenn zum Beispiel etwas schief geht und der Grund dafür gefunden werden muss. Gleichzeitig gewährt der Umstand, dass der Apparat in die Welt eingebettet ist, eine Kontinuität zwischen Welt und Modell. Beide werden von den gleichen Prinzipien und Mächten beherrscht. Als Teil der Wirklichkeit, sagt das Modell schon darum nichts *über* sie aus, weil es von vornherein mit ihr konform ist. Auf Grund dieses Umstands dürfen sich Nanoforscher leisten, ontologisch indifferent zu sein.

<sup>24</sup> Es ist kein Zufall, dass dies der wohl am besten untersuchte und erforschte Aspekt der Nanotechnologien ist.



und Schweizer erzeugte Bild als Machbarkeitsnachweis für das kontrollierte Bewegen von Atomen. Es wird in der Web-Galerie des IBM Labors Almaden unter dem sehr passenden Titel „The Beginning“ ausgestellt. Ein Anfang, der das Ende, bzw. den Endzweck der Nanotechnologie antizipiert; nämlich das direkte und willentliche Einschreiben menschlicher Absichten in den Bereich der Atome und Moleküle.

Bilder aus dem Nanokosmos sind bisher (Anfang 2009) sowohl die eindrucksvollsten als auch bekanntesten nanotechnologischen Produkte. Tatsächlich deutet schon die bisherige Charakterisierung nanotechnologischer Forschung darauf hin, dass sie sich der Macht des Bildhaften verschrieben hat: Dafür spricht einerseits die Verschiebung von der quantitativen Einordnung numerischer Werte zur Konstruktion qualitativer Ähnlichkeit, andererseits der Übergang von der konventionellen Repräsentation der Realität zur symbolischen Ersetzung einer Realität durch eine andere. Den Bezug zur Macht der Bilder stellen Kunsthistoriker und Bildwissenschaftler wie William Mitchell und Hans Belting her. Sie untersuchen den Unterschied zwischen konventionellen Zeichen, die der Repräsentation dienen, und den Bildern und Darstellungen, die Visionen und Wünsche verkörpern. Letztere sind mehr als bloße Informationsvehikel, da sie einen Überschuss an Bedeutung erzeugen, die sich nicht auf eine konventionellen Mitteilung beschränken lässt [40, 41].

Die Macht der Bilder ist ein großes Problem für Nanowissenschaft und Nanotechnologien. Dies zeigt sich schon an „The Beginning“. Wie oben erwähnt, dient es als Zeichen für die erstmals gelungene willkürliche Manipulation einzelner Atome durch den Menschen und somit auch schon als Machbarkeitsnachweis für die gewagtesten nanotechnologischen Visionen, wie sie beispielsweise Eric Drexler vertritt. Das war natürlich nicht das, was Eigler und Schweizer erreichen wollten. Ihr Bild ist ja auch Zeugnis der Schwierigkeiten, womöglich sogar der Grenzen, die mit der Kontrolle einzelner Atome verbunden sind. Aber die Macht dieses Bildes übermannt jedes solche Zeugnis.

Hier taucht ein ähnliches Problem auf wie oben in Abschnitt 1.3 beschrieben. Für die Besonderheit, die Komplexität und die Schwierigkeiten, die das Arbeiten auf der Nanoebene mit sich bringen, gibt es keine Sprache – sie finden keinen Ausdruck. Die aus anderen Größenbereichen importierten Theorien können nur einen Raum unbegrenzten Potentials und grenzenloser Neuheit und Möglichkeit abstecken. Desgleichen zeigen uns die Bilder aus dem Nanokosmos eine Welt, die bereits an unsere visuellen Erwartungen und technischen Praktiken angepasst ist.<sup>25</sup> Ontologisch indifferent, darf die NanoTechnoWissenschaft mit simplifizierten Konzepten des Elektronentransports arbeiten und vereinfachte Bilder von

---

<sup>25</sup> Vgl. Fußnote 21.

Atomen, Molekülen und stehenden Elektronenwellen produzieren, die in Widerspruch zum Lehrbuchwissen stehen. So ist beispielsweise allgemein bekannt, dass Nanopartikel quasi nur aus Oberfläche bestehen und fast kein Körpervolumen („bulk“) besitzen. Das ist es, was sie intellektuell und technisch interessant macht. Aber Bilder aus dem Nanokosmos zeigen unvermeidlich Objekte mit sehr vertrautem Verhältnis von Oberfläche zu Körpervolumen; sie zeigen eine Welt, die aussieht, als wäre sie perfekt für konventionelle technische Konstruktionen geeignet. Und wieder befinden wir uns in der misslichen Lage, dass uns nicht gesagt oder gezeigt wird, wo die Grenzen nanotechnologischer Konstruktionsmöglichkeiten und der technischen Kontrolle von Nanostrukturen und ihren Eigenschaften liegen.

Die Macht der Bilder birgt jedoch noch ein weiteres Problem. Im Gegensatz zu konventionellen Zeichen und realisierten Vorstellungsbildern („images“) rückt der totemistische, fetischistische und magische Charakter der Bildkörper („pictures“) in den Vordergrund. Da nanotechnologisch produzierte und den Zugang zur Nanowelt bezeugende Bilder eine Präsenz aufrufen und eine Abwesenheit ersetzen, lässt sich eine Verwandtschaft mit Voodoofiguren konstatieren. Dies ist nicht der Ort, um die Analogie zwischen Simulationen und Voodoofiguren [31] zu untersuchen, wohl aber, um darauf hinzuweisen, dass nanotechnowissenschaftliche Forschungspraxis auf verschiedenen Ebenen eine magische Beziehung zur Technologie produziert. Ihre Bilder bekräftigen dies.

Sehr vereinfacht lässt sich dieser Gedanke so erläutern. Menschheitsgeschichtlich haben wir mit einer verzauberten und unheimlichen Natur begonnen, die durch Gebete an die in Felsen und Bäumen hausenden Geister besänftigt werden musste. Wissenschaft und Technik gingen aus dem Staunen über die Natur hervor, also aus dem Gewahrwerden unseres begrenzten Verstehens. Und so zähmten und rationalisierten sie die Natur Stück für Stück. Die uns zur Verfügung stehende Technik belegt das Ausmaß, in dem es uns gelang, die beseelte, verzauberte Natur zu besiegen und sie unserer Kontrolle zu unterwerfen. Wir haben die Natur technologisiert. Heute allerdings werden die Besucher von Wissenschaftsmuseen eingeladen, die Nanotechnologien zu bestaunen, sich technologische Handlungsfähigkeiten jenseits der menschlichen Grenzen von Wahrnehmung, Erfahrung und Einbildungskraft vorzustellen und mit technologischen Neuheiten verbundene gesellschaftliche Hoffnungen nicht am intellektuellen Verstehen festzumachen, sondern an simulierten Ersatzwirklichkeiten, die sich dynamische Prinzipien natürlicher Selbstorganisation zu Nutze machen. Wir naturalisieren also die Technologie, ersetzen die rationale Kontrolle roher Umwelten durch die magische Abhängigkeit von „smart environments“, und wir könnten damit enden, dass uns die Technologie genauso unheimlich wird wie die Natur mit ihren Erdbeben, Krankheiten und

Gewitterstürmen [42, 43].<sup>26</sup>

### 3. VON DEN DEFINITIONEN ZU DEN VISIONEN

#### *3.1 Fassbare und unfassbare Vorstellungen*

Die ersten beiden Abschnitte führten zur selben Beschwerde. Nach der Untersuchung der Rolle, die Theorien und Methodologien für die Erzeugung technischer Systeme spielen, die in der Lage sind, als Ersatz für die Realität zu dienen, wurde angemerkt, dass uns dies nichts über die Besonderheit, Komplexität und Schwierigkeit der Beherrschung des Nanobereichs verrät. Der Nanokosmos erscheint hauptsächlich als der Ort, dem die nanotechnologischen Innovationen entspringen, und es scheint so, als ob er nur mit vagen vielversprechenden Begriffen beschrieben werden könnte: Was die Nanowissenschaft und Nanotechnologien interessiert, ist ein exotisches Territorium, das alles umfasst, was im Grenzgebiet zwischen klassischer und Quantenphysik liegt, für verfügbare Theorien unvorhersehbar (aber erklärbar) ist, und was größenabhängig, diskontinuierlich, komplex, voller Neuheit und Überraschung ist.<sup>27</sup>

Sobald man jedoch versucht, eine positive Definition der NanoTechnoWissenschaft, ihrem Phänomenbereich oder ihrer Anwendungsmöglichkeiten zu geben, lernt man schnell, was auf dem Spiel steht. Definitionen von „Nanotechnologie“ fassen in einem vereinheitlichenden Begriff so heterogene und vielfältige Ansätze zusammen, dass dieser Begriff intellektuell nicht erfasst werden kann. Indem sie den Verstand systematisch überfordern, machen es diese Definitionen einer leichtgläubigen Öffentlichkeit, aber auch Entscheidungsträgern unmöglich, sich in sinnvoller Weise mit „Nanotechnologie“ zu beschäftigen statt in Ehrfurcht zu erstarren. Die Suche nach einer verständlichen und intellektuell fassbaren Definition ergibt sich somit aus einem Interesse an Bestimmtheit, aber auch aus einer politischen Wertvorstellung: Es geht darum, einen sachkundigen Umgang mit klar begrenzten Problemen zu ermöglichen. Deshalb sollte man in öffentlichen Zusammenhängen am besten gar nicht von Nanotechnologie im Singular, sondern nur von bestimmten Nanotechnologien oder nanotechnologischen Forschungsprojekten sprechen [44]. Im Zusammenhang mit der auf diesen Seiten entwickelten Grundlagenreflexion wird jedoch

---

<sup>26</sup> Dies ist keine Anklage bestimmter Nanotechnologien, sondern ein starker Einwand gegen bestimmte Arten, unsere nanotechnologische Zukunft zu propagieren. Anders betrachtet ist es einfach eine Herausforderung an die Ingenieurwissenschaft, Nanotechnologie so zu gestalten, dass sie menschlichen Maßstäben gerecht wird.

<sup>27</sup> Aufschlussreich ist, dass die anspruchsvollste Definition der Nanowissenschaft sehr darauf bedacht ist, nichts über den „Nanokosmos“ als solchen zu sagen. Tatsächlich ist diese Definition nicht auf nanoskalige Phänomene oder Effekte beschränkt, sondern sie definiert eine allgemeine Nanowissenschaft des größenabhängigen, diskontinuierlichen Verhaltens auf allen Ebenen: Nanowissenschaft hat ihren Ort überall dort, wo eine bestimmte Art von Neuheit oder Überraschung auftritt [6].

die Anstrengung unternommen, den Umfang oder Bereich der NanoTechnoWissenschaft zu bestimmen, d.h. die Bandbreite der Phänomene ins Auge zu fassen, mit der sich Nanowissenschaft und die Nanotechnologien befasst. Dies erweist sich als eine beachtliche Herausforderung.

### *3.2 Unbegrenzte Möglichkeiten*

Es gibt einen einfachen Weg, die negative Charakterisierung des Phänomenbereichs der NanoTechnoWissenschaft und der Nanotechnologien in eine positive zu wandeln. Statt davon zu sprechen, dass es sich hier um ein weder ganz klassischen, noch ganz quantenphysikalischen Grenzbereich handelt, könnte man sagen, dass NanoTechnoWissenschaft und die Nanotechnologien mit der Untersuchung und Manipulation molekularer Architektur befasst sind, somit auch mit den Eigenschaften und Funktionen, die von dieser Architektur abhängig sind.

Alles, was aus Atomen besteht, wäre damit Untersuchungsgegenstand und mögliches Gestaltungsobjekt der Nanoforschung. Diese Definition postuliert einen homogenen und unbegrenzten Möglichkeitsraum und steht am Ursprung einer allmächtigen Nanotechnologiekonzeption: Nanotechnologie wird als kombinatorische Tätigkeit verstanden, die zum „little BANG“ [45] führt, da Bits, Atome, Neuronen und Gene sämtlich aus Atomen bestehen, die für Nanowissenschaftler und -ingenieure alle gleich aussehen und von ihnen willkürlich konfiguriert werden können. Mit dieser Konzeption eines schier unendlichen Raums kombinatorischer Möglichkeiten ist auch die des grenzüberschreitenden und tabubrechenden Charakters der NanoTechnoWissenschaft verbunden: Die kategorialen Unterscheidungen zwischen lebend und unbelebt, organisch und anorganisch, biologisch und technisch, natürlich und kulturell werden anscheinend bedeutungslos. Obwohl kaum ein Wissenschaftler buchstäblich an die unendliche Plastizität alles Molekularen glaubt, erweist sich der an den Molekülen orientierte Standpunkt in vielen nanotechnologischen Forschungsprogrammen als grenzüberschreitend. Besonders offensichtlich wird dies, wenn biologische Zellen mit Fabriken gleichgesetzt werden, in denen zahlreiche molekulare Nanomaschinen zusammenarbeiten. Damit werden nicht nur kulturell sensible Einstellungen in Frage gestellt und alle systematischen Versuche unterlaufen, den speziellen Charakter von Lebewesen und Lebensprozessen zu erfassen, sondern darüber hinaus erscheint die NanoTechnoWissenschaft hier auf fast naive Weise reduktionistisch. Sie scheint zu behaupten, dass der Zusammenhang keine Rolle spielt, bzw., dass es keinen top-down Kausalzusammenhang zwischen den Eigenschaften und Funktionalitäten der physischen Umgebung und den Eigenschaften und

Verhaltensweisen der beitragenden Moleküle gibt.<sup>28</sup>

Dieser sparsam positive und daher unbegrenzte Blick auf nanoskalige Objekte und ihre kombinatorischen Möglichkeiten unterfüttert auch die Vorstellung vom unbegrenzten technischen Potential, die mit den Visionen nanotechnologischer Grenzüberschreitungen einhergeht. Diese Konzeption des Phänomenbereichs der Nanowissenschaft leidet darunter, dass sie intellektuell nicht fassbar ist – im politischen Diskurs kann sie nur an allgemeine Voreinstellungen wie traditionale Technophobie und experimentelle Technophilie appellieren [46].

Wenigstens drei weitere Probleme ergeben sich aus der allgemeinen Bereichsbestimmung „alles was molekular ist“ – und wie zuvor sind interne wissenschaftliche Probleme mit Fragen des öffentlichen Interesses verflochten. Erstens zeigt sich das mittlerweile vertraute „wissenschaftliche“ und gleichermaßen „gesellschaftliche“ Problem, dass keine Kenntnis der Grenzen des Verstehens und der Kontrollierbarkeit erkennbar werden (der scheinbar naive Reduktionismus belegt dies). Zweitens begegnen wir dem mittlerweile ebenfalls vertrauten Problem, dass technowissenschaftliche Errungenschaften und Konzeptionen einen Bedeutungsüberschuss aufweisen, der weit über das hinausreicht, was die Forschungsgemeinschaft verantworten kann – die schon Besorgnis erregende Macht der Bilder wird noch von der Macht der (positiven oder negativen) Visionen überschattet, die mit der Vorstellung unbegrenzten Potentials verbunden sind. Und drittens ergibt sich das Problem des Verhältnisses von Technik und Natur.

Martin Heidegger, einer der schärfsten Kritiker der modernen Technik, stellt heraus, dass diese die Natur insgesamt als bloße, wissenschaftlich und industriell ausbeutbare Ressource betrachtet [47]. Die Kraft dieses Arguments ergibt sich daraus, dass Heidegger alle moderne Technowissenschaft als ein einziges Projekt behandelt, als „Gestell“. Das Gestell bindet Menschen und Natur in ein allgemeines Produktionsschema ein. Anstatt als Geschenk anzunehmen, was Natur, Poesie oder Handwerk hervorbringen, fordert oder beansprucht diese Art von Technowissenschaft die Erfüllung der Erwartungen, die sich bei der Erforschung der Natur als ein kalkulierbarer Kräftezusammenhang herausgebildet haben. Wenn die Nanotechnologie als ein einheitliches Unterfangen verstanden wird, das sich unbegrenzt auf „alles Molekulare“ bezieht, entspricht sie genau dieser von Heidegger kritisierten, allumfassenden modernen Technik. Sie entspricht diesem Bild, weil sie sich, wie man sagen

---

<sup>28</sup> Ich kann diese Ansprüche nicht beurteilen. Aber selbst Richard Jones, der in *Soft Machines* [32] die Komplexität „biologischer Nanotechnologie“ klar anerkennt, reflektiert nicht auf die Erkenntnisse der Entwicklungsbiologen hinsichtlich des Einflusses von Umweltstimuli auf die Genexpression. Jüngste Arbeiten über adulte Stammzellen scheinen deutlich zu machen, dass diese zwar auf frühere Zustände zurückgeführt werden können, sich aber trotzdem daran „erinnern“, was sie waren. Solche Ergebnisse qualifizieren die Verheißung, dass alle Probleme mittels Nanotechnologie auf der Ebene der Moleküle gelöst werden könne.

könnte, auf ein sehr dünnes Naturkonzept stützt: Mit Natur sind die physikalischen Naturgesetze gemeint und alles, was mit diesen Gesetzen übereinstimmt, ist natürlich. Darum kann die Nanotechnologie allzu mühelos für sich in Anspruch nehmen, dass sie immer nur die Natur nachahmt und dass nanotechnische Konstruktionen genauso verfahren wie die Natur beim Schaffen lebender Organismen. Diese Vorstellung ist jedoch zu „dünn“ oder oberflächlich, um glaubwürdig zu sein, und krankt vor allem daran, dass sie den speziellen Bedingungen für (menschliches) Leben keinen besonderen Wert zuweist: Aus der Sicht der Physik und der ewigen unveränderlichen Naturgesetze ist das Leben auf der Erde zufällig und keinesfalls notwendig. Die Gesetze sind der menschlichen Spezies vorgängig und werden sie überleben. Im Gegensatz dazu begreift eine substantielle, detaillierte oder „dichte“ Naturkonzeption die speziellen Bedingungen, die das Leben auf der Erde ermöglichen, als Norm. Hiernach zählt als biomimetische, die Natur nachahmende Forschung nur, was durch Fürsorge und Respekt gekennzeichnet ist und das Bestreben, diese besonderen Überlebensbedingungen zu erhalten. Das verlangt ein Verständnis dafür, wie sich diese Bedingungen historisch entwickelt haben. In einer solchen Konzeption spielen physische Umgebungen eine Rolle: Ein Molekül in einem technischen System ist nicht dasselbe wie eines in einem biologischen System, selbst wenn es dieselbe chemische Zusammensetzung hat.

Es ist eine offene Frage und schwierige Herausforderung für Nanowissenschaft und die Nanotechnologien, ob sie sich eine solche dichte oder substantielle Naturkonzeption zu Eigen machen können.

### *3.3 Entwicklungslinien im Möglichkeitsraum*

Obwohl es einfach ist, vier große Probleme auszumachen, die mit der landläufigen Vorstellung verbunden sind, dass der Bereich der nanotechnologischen Forschung „alles Molekulare“ umfasst, heißt dies keineswegs, dass es einen überzeugenden Weg gibt, diese Probleme zu vermeiden. Insbesondere scheint es dem gesunden Menschenverstand und naturwissenschaftlichen Erkenntnissen zu widersprechen, dass Moleküle eine Geschichte haben sollen und dass sie durch ihre spezifische Umgebung charakterisiert werden. Ist es nicht die wesentliche Errungenschaft der physikalisch orientierten Chemie seit Lavoisier, dass sie von der lokalen Herkunft ihrer Substanzen absieht und sie als Verbindungen beschreibt, die analysiert und synthetisiert werden können [48]? Und sind Nanowissenschaft und die Nanotechnologien nicht nur eine Erweiterung der traditionellen Physik, physikalischen Chemie und Molekularbiologie, die nur dadurch über sie hinaus geht, dass sie neue

Komplexitätsgrade bewältigt? All dies ist einsichtig genug und doch gibt es gute Gründe, die schwierige Herausforderung anzunehmen und den Bereich der nanowissenschaftlichen Objekte zu differenzieren.<sup>29</sup>

Wie oben angemerkt, werden chemische „bulk“-Substanzen auf Grund einer physiko-chemischen Beschreibung registriert und bewertet. Wenn eine Substanz zugelassen ist, kann sie in unterschiedlichsten Produktions- und Konsumptionszusammenhängen zum Einsatz kommen. In diesem traditionellen Rahmen gibt es keinen Bedarf, ihre unterschiedlichen Wechselbeziehungen in unterschiedlichen bio-chemischen Umgebungen zu berücksichtigen [vgl. aber 30]. Obwohl der Werkzeugkasten der Nanotoxikologie noch entwickelt werden muss, zeichnet sich die Tendenz ab, derzufolge ein Kohlenstoff-Nanoröhrchen vielleicht doch nicht einfach ein Kohlenstoff-Nanoröhrchen ist. Was es ist, hängt von seiner Umgebung ab: Ob in Wasser gelöst oder in einer Oberfläche gebunden, ob beschichtet oder unbeschichtet, ob funktionalisiert oder nicht – all das ist toxikologisch relevant. Darüber hinaus würde eine umfassende physiko-chemikalische Charakterisierung von Nanopartikeln eine überkomplexe Taxonomie ergeben, wenn nämlich außer der chemischen Zusammensetzung auch Oberflächeneigenschaften, Größe und Form berücksichtigt werden müssten. In dieser Taxonomie würde es so viele Arten von Partikeln geben, dass dies letztendlich auf die absurde Aufgabe hinauslaufen würde, jedes einzelne Partikel charakterisieren und toxikologisch bewerten zu müssen. Ein alternativer Weg könnte darin bestehen, den Spieß umzudrehen, und Nanopartikel nach dem in der Fertigung erreichbaren Grad der Standardisierung zu klassifizieren. Mit dem erreichten Standardisierungsgrad sind die notwendigen Fehlertoleranzen für nanotechnologische Anwendungen gegeben, die die Variabilität von Nanomaterialien und je nach Nutzungszusammenhang unterschiedliche Sensibilitäten gegenüber Umweltbedingungen einkalkulieren müssen. Hiervon ausgehend würde die Nanotoxikologie mit Produktsicherheit, nicht aber mit den isolierten Eigenschaften aller beteiligten Stoffe befasst sein. Auf diese Art würden die Partikel tatsächlich auf „dichte“ Weise durch ihre Geschichte und ihre Stellung in der Welt definiert und durch ihren Einfluss auf die Natur als Gesamtheit der spezifischen Bedingungen für menschlichen Lebens auf der

---

<sup>29</sup> Man könnte argumentieren, dass eine Definition, die skalenabhängige Diskontinuitäten verlangt, bereits die geforderte Differenzierung leistet [6]. Dies ist jedoch nicht der Fall; es ist bestenfalls ein Anfang. Wie oben gezeigt, schließt eine solche Definition zwar bestimmte Phänomene und Prozesse aus dem Bereich der Nanowissenschaft aus, und beansprucht deshalb spezifisch zu sein, aber was Nanotechnologie ist, bleibt völlig unterbestimmt: Nanowissenschaft interessiert sich für bestimmte neue und überraschende Eigenschaften und Prozessen; Nanotechnologie hingegen ist all das (*was auch immer*), was man aus diesen Eigenschaften und Prozessen machen kann. Bedeutsamer ist jedoch, dass das Auftreten skalenabhängiger neuer Eigenschaften verallgemeinerbar ist. Nicht jede Eigenschaft im Nanobereich ist skalenabhängig diskontinuierlich; aber man kann für jede Substanz behaupten, dass sie *einige* solche Eigenschaften haben wird – allein aufgrund des Anteils von Atomen an den Grenzflächen und der Dominanz von Heterogenität gegenüber homogener Verteilung.

Erde.<sup>30</sup>

Es gibt ein weiteres, grundlegendes Argument für eine dichte und differenzierende Beschreibung der Gegenstände, die den Phänomenbereich von Nanowissenschaft und Nanotechnologien ausmachen. Das unbegrenzte Gebiet „alles Molekularen“ schließt nicht nur die Gegenstände und Eigenschaften ein, zu denen wir jetzt Zugang haben, und die wir jetzt messen und kontrollieren können. Es schließt auch jene Gegenstände und Eigenschaften ein, zu denen man allenfalls irgendwann in der Zukunft Zugang gewinnen kann. Diese Art des Denkens verhält sich gleichgültig gegenüber der Frage des tatsächlichen technischen Zugangs. Beispielsweise beachtet es nicht, wie Beobachtungsinstrumente und -techniken ihre Gegenstände strukturieren, formen und vielleicht verändern. Für diesen Zugang scheint der Phänomenbereich darum offen und unbegrenzt zu sein, weil er sich implizit auf einen imaginären (zukünftigen) Zustand bezieht, in dem sich die ganze Nanowelt einem nicht instrumentell eingreifenden, trotzdem alles wahrnehmenden Beobachter erschließt. Im Gegensatz hierzu, würde eine andere Art des Denkens den Phänomenbereich konkreter begrenzen und seinen visionären Überschuss eindämmen, wenn sie sich nicht auf alles Nanoskalige bezieht, sondern auf das, was gegebene Instrumente und Techniken erschließen und der Nanoforschung überhaupt erst zugänglich machen. Entsprechend würde der Phänomenbereich von Gegenständen und Prozessen aus gerade jenen Beobachtungen und Effekten bestehen, die mittels Rastertunnelmikroskopie und anderer spezifisch nanotechnologischer Verfahren ermöglicht werden [50, siehe auch 51].

Der soeben referierte Vorschlag stammt von Peter Janich, der damit allerdings einen zu stark vereinheitlichenden Standpunkt gegenüber der NanoTechnoWissenschaft einnimmt. Paradigmatische instrumentelle Praktiken etwa der Rastersondenmikroskopie legen hiernach die Grundlagen und konstituieren die Objekte für die Nanowissenschaft und Nanotechnologie. Janichs philosophisches Programm systematisiert die Operationen, durch die nanoskalige Gegenstände für Messungen und Beobachtungen zugänglich werden. Es muss aber bezweifelt werden, dass die nanotechnowissenschaftliche Forschungspraxis vereinheitlicht ist. Selbst die Rastersondenmikroskopie – für viele ein Markenzeichen oder Ausgangspunkt der Nanotechnologien – spielt in der Arbeit vieler Nanoforscher nur eine untergeordnete Rolle [52]. Außerdem bezeugt etwa die oben erwähnte Anstrengung, zu standardisierten Charakterisierungen von Nanomaterialien zu gelangen, die Widerspenstigkeit der Forschungsgegenstände. Sie werden nicht mittels methodischer Prozeduren erzeugt, die Gegenstände individualisieren und ihre Vergleichbarkeit für die Forschung sicherstellen.

---

<sup>30</sup> Nanotechnologische Forschung im Allgemeinen und die Nanotoxikologie im Besonderen könnten so zu einer „Sozialwissenschaft der Natur“ [49] werden.



Stattdessen scheint es eher, als ob sie mittels komplizierter und schwer reproduzierbarer Interaktionen erzeugt würden, die auf annähernder Ähnlichkeit beruhen.

Da dem Ansatz von Janich beträchtliche Schwierigkeiten entgegenstehen, bleibt uns vielleicht nichts anderes übrig, als die bisherigen Erkenntnisse aus der Nanotoxikologie zu verallgemeinern. Hiernach verdanken sich die Gegenstände der Nanoforschung ihren jeweils spezifischen Entstehungsgeschichten – dies sind die Geschichten ihrer Herkunft (aus einer Gewebeprobe, aus der Erde, aus einer chemisch-industriellen Fertigungsreihe), aber auch Geschichten der Eingriffstechniken und schließlich ihrer Stellung in einer technischen Anwendung. Das würde freilich die Fragmentierung „der Nanotechnologie“ in so viele „Nanotechnologien“ befördern, wie es nanotechnologische Geräte oder Anwendungen gibt. Auch wenn dies für einige eine Albtraum-Vision darstellt, mag es anderen als eine unausweichliche Zukunft erscheinen. Und wenn es dazu kommt, wird man auch nicht mehr von Kohlenstoff-Nanoröhrchen als breit einsetzbare Allzweckkomponenten reden können. Erst wenn sie zu einem Produkt beitragen, werden sie entsprechend individualisiert oder charakterisiert. Als Kohlenstoff-Nanoröhrchen-in-diesem-Produkt sind sie dann ebenso harmlos oder gefährlich wie das Produkt selbst. Aus dem gleichen Grunde würden sie dann auch nicht mehr als molekulare Artefakte aufgefasst, die im Prinzip mit allen derartigen Artefakten kombinierbar sind. Der offene Raum unbegrenzter Möglichkeiten teilt sich stattdessen in eine Mannigfaltigkeit spezifischer technologischer Entwicklungslinien.

Der oben genannten schwierigen Herausforderung wurde durch diesen Vorschlag nicht wirklich begegnet. Er hat jedoch die Spannung dramatisieren können, die zwischen einer ganz allgemeinen Auffassung nanotechnischer Gegenstände und den Schwierigkeiten der Vorhersage und Kontrolle im nanoskaligen Phänomenbereich herrscht.

#### 4. VON ERKENNTNISTHEORETISCHER GEWISSEIT ZUR SYSTEMISCHEN ROBUSTHEIT

##### *4.1 Was wissen Nanowissenschaftler?*

Die vorherigen Abschnitte betrachteten die Forschungspraktiken der NanoTechnoWissenschaft: Wie Theorien gedehnt werden, um den Komplexitäten der Nanowelt gerecht zu werden, wie qualitative Methodologien dazu dienen, Ähnlichkeiten zu erzeugen und aus ihnen Schlüsse zu ziehen, mit welchen Interaktionen Forschungsgegenstände bestimmt werden. All diese Praktiken tragen zur Erzeugung von Wissen bei, doch es bleibt zu klären, in welchem Sinne dieses Wissen „objektiv“ ist. Wie in der traditionellen Wissenschaft werden die Ergebnisse der nanotechnowissenschaftlichen Forschung in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht, so dass sich konkreter fragen lässt: Welche Art Wissen wird in

nanowissenschaftlichen Zeitschriftenartikeln ausgedrückt und mitgeteilt? Um diese Frage richtig beantworten zu können, müssen Unterschiede gemacht und einzelne Veröffentlichungen verglichen werden. An dieser Stelle muss eine Zusammenfassung ausreichen.

Ein typischer Forschungsartikel aus einer klassischen naturwissenschaftlichen Disziplin soll eine Hypothese aufstellen, die Methoden beschreiben, die Befunde aufweisen und die Hypothese im Licht dieser Befunde betrachten. Der Artikel ist Teil eines öffentlichen Verfahrens des Überprüfens von Behauptungen, des als wahr oder falsch Befindens von Meinungen und Annahmen und des Strebens nach Gewissheit selbst dort, wo diese nur ein unerreichbares Ideal darstellt. Im Gegensatz dazu belegt ein technowissenschaftlicher Forschungsartikel eine erworbene Fertigkeit. Er bietet einen Hinweis oder einen Beweis dafür, was im Labor vollbracht worden ist und erzählt, wie dies erreicht wurde. Durch das Lesen dieser Erzählung kann die Fertigkeit zwar nicht unmittelbar erlernt werden, aber sie bietet dem Leser Anhaltspunkte dafür, wie er diese Fertigkeit selbst erwerben kann. Im Gegensatz zu „epistemischem“ Wissen, das darin besteht, die Wahrheit oder Unwahrheit von Aussagen zu bestimmen, geht es der nanotechnowissenschaftlichen Forschung um Fertigkeitwissen. Es handelt sich dabei jedoch nicht um ein individuelles Können oder stillschweigendes, implizites Wissen: Die erworbenen Fertigkeiten können objektiv und öffentlich, spezifisch wissenschaftlich und kommunizierbar sein. Sie begreifen Kausalbeziehungen und etablieren Handlungsgewohnheiten. Sie erweisen ihre Gültigkeit nicht durch die Anwendung von Kriterien oder Normen, sondern durch ihre feste Einbettung in eine Praxis oder Kultur des Handelns. Man kann zwar nicht ihre Wahrheit oder Falschheit feststellen, da Fertigkeiten weder wahr noch falsch sind, dafür aber die Robustheit ihrer Demonstrierbarkeit bewerten: Hat man eine Fertigkeit erworben, so kann man im Zusammenhang eines Apparat-Welt-Komplexes [38] etwas mit ihr ausrichten. Im Gegensatz zu Wahrheit oder Falschheit, Gewissheit oder Unsicherheit von Hypothesen sind die Merkmale des technowissenschaftlichen Wissens die Robustheit, Zuverlässigkeit und Belastbarkeit technischer Systeme oder systematischer Handlungen.

#### *4.2 Die Wissensgesellschaft*

Diese Darstellung des Fertigkeitwissens erhöht den Druck auf die Frage, was die „Wissenschaft“ in der „Technowissenschaft“ ausmacht. Die Antwort auf diese Frage findet sich im ersten Abschnitt dieses Beitrags: Es sind die (abgeschlossenen) Theorien der Wissenschaft, die als Werkzeuge dienen, um eine teilweise Kontrolle und ein teilweises Verständnis zu erlangen. Die NanoTechnoWissenschaft versucht nicht, Theorien zu

verbessern oder unser Weltverständnis zu ändern, sondern konzentriert sich ganz darauf, Neuheit und Komplexität zu bewältigen. Insofern entspricht die NanoTechnoWissenschaft einem technischen Herumbasteln, dem Entwickeln von Produkten, dem Versuch gesellschaftliche Probleme technisch zu lösen oder die Welt zu gestalten und umzugestalten. Jedoch kommen die begrifflichen und physikalischen Werkzeuge, mit denen sie herumbastelt, nicht aus der Alltagserfahrung, dem gesundem Menschenverstand oder einer handwerklichen Tradition, sondern in ihnen ist die jahrhundertelange Arbeit der Wissenschaft konzentriert. Die Wissenschaft in der NanoTechnoWissenschaft ist das, was in sie eingeht; und was herauskommt, ist ein Fertigkeitwissen, das nicht auf ein ihm entsprechendes wissenschaftliches Verstehen angewiesen ist. So lange man eine Wirkung auf eine einigermaßen robuste Weise erzeugen kann, ist nicht wirklich von Bedeutung, ob das wissenschaftliche Verstehen aufholt oder nicht.<sup>31</sup>

Das Standardbeispiel dafür, wie die Technik der Wissenschaft vorhergeht, ist die Dampfmaschine, die ohne angemessenes Verständnis der Beziehung von Wärme und Arbeit entwickelt wurde [53]. Dieses Verständnis kam viel später und war an Beobachtungen unterschiedlich effizienter Dampfmaschinen geschult. Die Dampfmaschine selbst war also keineswegs angewandte Naturwissenschaft, sondern das Ergebnis eines wissensbasierten technischen Herumbastelns. Sie wurde aus Ventilen, Pumpen, Getrieben zusammengebaut und somit aus Teilen, die einem handwerklichen, nicht aber wissenschaftlichen Wissen entstammten: Die Dampfmaschine funktionierte vor dem Aufkommen der Thermodynamik. In einem gewissen Sinne musste sie nicht verstanden werden, um als wesentlicher Bestandteil der Industriegesellschaft fungieren zu können.

Im Gegensatz zur Dampfmaschine sind nanotechnologische Apparate (was immer wir uns auch darunter vorstellen mögen) Kinder der Wissensgesellschaft, ebenso wie es genetisch veränderte Organismen sind oder die „drug delivery“ Systeme, die pharmazeutische Wirkstoffe punktgenau verabreichen sollen. Sie bestehen nicht aus Ventilen, Pumpen und mechanischen Getrieben, sondern sind zusammengesetzt aus hoch „verwissenschaftlichten“ Bestandteilen wie Algorithmen, Mess- und Kontrollinstrumenten und den im Forschungsprozess angeeigneten Fähigkeiten – in all diese Bestandteile und nicht zuletzt die Forscher und Entwickler selbst ist viel wissenschaftliches Wissen eingebaut [39]. Die in die Bestandteile eingegangene Wissenschaft ist relativ gut, oft sehr gut verstanden – weniger gut dagegen

---

<sup>31</sup> Diese Feststellung ist nicht wirklich neu oder überraschend: Technik, schreibt Heidegger, ist immer der Wissenschaft voraus und Wissenschaft ist, in einem tiefen Sinne, nur angewandte Technik [47]. Damit meint er nicht nur, dass die Laborwissenschaft Instrumente und experimentelle Apparate benötigt, um Phänomene zu stabilisieren, sondern allgemeiner, dass es eine technische Erwartungshaltung ist, mit der die Wissenschaft darauf setzt, dass sich bei Erfüllung gewisser Anfangsbedingungen vorhergesagte Phänomene tatsächlich einstellen werden und sogar müssen.

das Zusammenspiel all dieser Komponenten und ihrer Empfindlichkeit gegenüber Bedingungen des System- und Umweltzusammenhangs. Und doch: Wie die Dampfmaschine können sie robust funktionieren, ohne völlig verstanden zu sein. Obgleich es kein positives Wissen gibt oder geben kann, um ihre Leistung aus komplexen Rahmenbedingungen ableiten oder voraussagen zu können, können wir doch lernen, ihre Robustheit zu bewerten.

#### *4.3 Gesellschaftliche Robustheit*

Der Übergang von Hypothesen in Form von Sätzen zu Handlungen innerhalb von technokulturellen Systemen, der Übergang somit von erkenntnistheoretischen Fragen der Gewissheit zur systemischen Prüfung von Robustheit, hat auch Implikation für die „Risikogesellschaft“, die von ihren Regierungen hauptsächlich vor Risiken geschützt werden will [54].<sup>32</sup>

Die Nanotechnologien entsprechen nicht den an sie gerichteten Gewissheits- und Sicherheitserwartungen. Schon jetzt werden auch andere Technologien diesen Erwartungen nicht wirklich gerecht. Aber relative Gewissheit beispielsweise über die Sicherheit eines neuen Medikaments vermittelt die etablierte Methode klinischer Versuche. Mit dieser Methode lassen sich die Wirkungen und Nebenwirkungen zumindest statistisch be- oder widerlegen. Ein wesentlich vielfältigeres und doch integrierbares Methodenarsenal ist erforderlich, wo derlei relative Gewissheiten unerreichbar sind, und es darum notwendig wird, die Robustheit eines technischen Systemzusammenhangs nachzuweisen. Hier müssen verschiedene Forschungsaktivitäten aufeinander abgestimmt werden – beispielsweise die traditionelle Toxikologie mit Arbeitsmedizin und Epidemiologie bis hin zu einer sozialwissenschaftlich fundierten „risk governance“ und einer politischen Willensbildung, die das verbleibende Risiko in ein Verhältnis zu den genauso ungewissen Versprechungen setzt. Wenn dieses Zusammenspiel gelingt, wird gesellschaftliche Robustheit zusammen mit der Robustheit erworbener Fertigkeiten, bewährter Algorithmen, sowie etablierter Mess- und Kontrollinstrumente in das technische System gewissermaßen mit eingebaut. Der Umstand, dass Nanoforscher erworbene Fertigkeiten demonstrieren, dass sie ein „bloßes“ Geschicklichkeitswissen hervorbringen, verlangt nach Fertigkeiten und Geschicklichkeitswissen auch in der gesellschaftlichen Arena, in der nanotechnologische Neuerungen in Frage gestellt, gerechtfertigt und verwendet werden.

---

<sup>32</sup> Das Vorsorgeprinzip verweist auf die Gewissheit oder Ungewissheit von Wissen in Bezug auf Risiken. Die Verschiebung innerhalb der Technikfolgenabschätzung vom Wahrheitsgehalt eines Satzes zur Robustheit oder Belastbarkeit neu entstehender technischer Systeme und ihrem Zusammenspiel mit anderen technischen Systemen führt dazu, dass das Vorsorgeprinzip nicht mehr angewendet werden kann, und ein anderer Ansatz, beispielsweise Dupuy and Grinbaum's „ongoing normative assessment“ [55], benötigt wird.

### *5. Was für Grundlagenforschung benötigt die Nanotechnologie?*

Die vorigen Abschnitte gaben einen Überblick über die NanoTechnoWissenschaft bezüglich disziplinärer Fragen (ein komplexes, durch das Dehnen abgeschlossener Theorien eröffnetes Feld), Fragen der Methodologie (Erzeugung und qualitative Bewertung von Ähnlichkeit), ontologischer Fragen (ein dünnes Naturkonzept als Garant unbegrenzter Möglichkeiten) und bezüglich erkenntnistheoretischer Fragen (Aneignung und Vorführung grundlegender Fertigkeiten). Dies reicht für eine erschöpfende philosophische Bestimmung des Feldes noch keineswegs aus. Notwendig dafür wäre beispielsweise eine ausführliche Untersuchung der Nanotechnologie als einer Eroberung des Raums oder einer Art territorialer Expansion.<sup>33</sup> Auch wurde die NanoTechnoWissenschaft bisher nicht als eine Schlüsseltechnologie diskutiert, die den Weg insbesondere zu einer Konvergenz mit den Lebens- und Informationstechnologien ebnet. Schließlich könnte es wichtig sein, die NanoTechnoWissenschaft als Element oder Symptom eines größeren kulturellen Übergangs von wissenschaftlicher zu technowissenschaftlicher Forschung zu betrachten.

Der vorliegende Überblick ist noch auf andere Weisen beschränkt. Er ignoriert die Heterogenität von Forschungsfragen und Forschungstraditionen. Und er konzentriert sich exklusiv auf die Art, wie sich die nanotechnologische Forschung bisher entwickelt hat. Es ist aber keineswegs ausgeschlossen, dass es zu einer tiefgreifenden Umorientierung der Nanowissenschaft und der Nanotechnologien kommen könnte. Tatsächlich könnte eine Umorientierung darin bestehen, dass das ganze Unternehmen in Stücke bricht und in eher traditionellen disziplinären Schienen weiterläuft: „Nano“ würde keine Einheit mehr suggerieren, sondern nur noch als Präfix funigieren, der innerhalb traditioneller „sektoraler“ Anwendungszusammenhänge einen bestimmten Ansatz bezeichnet. Demnach würde in den Bereichen „Nahrung und Landwirtschaft“, „Energie“, „Gesundheit“, „Herstellung“ oder „Umwelt“ Forschung mit dem Präfix „nano“ damit befasst sein, wie sich Probleme und Lösungen von der molekularen Ebene her entwickeln lassen. Ihre Beiträge würden dann in umfassendere Problemlösungsansätze integriert werden.

Alternativ könnten Nanoforscher die Einigung und Konsolidierung ihrer „Disziplin“ vorantreiben und fördern.<sup>34</sup> In diesem Fall würden sie die Frage stellen „Welche Art von Grundlagenforschung benötigt die Nanotechnologie?“. Von der Quantenmechanik und der Hydrodynamik leiten sich die (abgeschlossenen) Theorien her, die als Werkzeuge für das

---

<sup>33</sup> Eine Implikation hiervon wäre, dass die Nanotechnologie nicht als ein Zukunftsversprechen, sondern stattdessen als ein kollektives Experiment in und mit der Gegenwart verstanden werden sollte [56].

<sup>34</sup> Das Feld der „Nanomedizin“ scheint sich in diese Richtung zu bewegen, indem es seine Forschungsfragen und Paradigmen von den „medizinischen Nanotechnologien“ unterscheidet. Bisher ist noch nicht klar, ob die Nanomedizin eine eigene disziplinäre Identität und eventuell eine einheitliche Theorie hervorbringen wird.

dienen, worauf die Nanoforschung abhebt. Obwohl sie Grundlagenwissenschaften sind, stellen sie nicht die Grundlage der Nanoforschung dar. Was wäre dann aber die grundlegende wissenschaftliche Forschung, die die Grundlagen der Nanotechnologien erstellen oder die Nanowissenschaft als eine eigenständige Disziplin etablieren könnte? Bisher gibt es keine Versuche, diese Frage auf systematische Art und Weise anzugehen.<sup>35</sup> Und offensichtlich sollte man nicht erwarten, dass die folgende Liste möglicher Nanotechnikgrundlagenforschung konsensfähig sei.

In Bezug auf die empirische Begründung oder ein theoretisches Paradigma der NanoTechnoWissenschaft rufen einige Stimmen nach Theorien für die (supra-) molekularen Struktur-Eigenschafts-Beziehungen, andere stellen sich vor, dass es eine zukünftige Wissenschaft der molekularen und nanotechnologischen Selbstorganisation geben wird.<sup>36</sup> Im Anschluss an den Vorschlag von Peter Janich (siehe oben, Abschnitt 3.2), könnte man identifizieren und systematisieren, wie nanoskalige Phänomene durch Beobachtungs- und Messtechniken konstituiert werden. Dies könnte Instrumentationstheorien zur Grundlage der Nanowissenschaft machen.<sup>37</sup>

Eine völlig andere Art der Grundlagenforschung würde aus der Bildwissenschaft kommen, die eine Grundlage für die Bildproduktion und Visualisierungspraktiken innerhalb der NanoTechnoWissenschaft entwickeln könnte. Solche Untersuchungen würden dazu beitragen, anhand visueller Hinweise Animationen und Simulationen von Visualisierungen sondenmikroskopisch gewonnener Daten zu unterscheiden. Denkbar wären auch Untersuchungen von Text-Bild-Bezügen oder die Entwicklung von Konventionen, die den Informationsgehalt erhöhen und gleichzeitig der illusionären Anmutung von photographischem Realismus entgegenwirken.<sup>38</sup>

Schließlich könnte man fragen, ob die NanoTechnoWissenschaft als „Sozialwissenschaft der Natur“ konzipiert werden sollte. Als Querschnitts- oder Schlüsseltechnologie lässt sie

---

<sup>35</sup> Sicherlich gibt es fragmentarische Annäherungen. Man kann beispielsweise sagen, dass eine Theorie des Elektronentransports eine notwendige Voraussetzung der Molekularelektronik sei (vgl. aber [57]). Auch der „giant magnetoresistance effect“ kann als neues nanotechnologisches Phänomen betrachtet werden, das nach der Entwicklung einer „Grundlagen“theorie verlangt [13].

<sup>36</sup> Vgl. beispielsweise [15]. Michael Roukes [14] verlangt nach der Identifizierung spezieller Gesetze, die den Nanokosmos regieren. Selbstverständlich gibt es eine tiefe Skepsis innerhalb der Wissenschaftsgemeinde, ob es a) Gesetze für Struktur-Eigenschafts-Beziehungen geben kann und b) ob diese überhaupt benötigt werden, um die nanotechnologische Forschung voranzutreiben. Der letzteren Ansicht nach stellt der hier in den ersten vier Abschnitten aufgezeigte Zugang ein ausreichendes Fundament für die Nanotechnologie dar.

<sup>37</sup> Vgl. beispielsweise [58] zur Modellierung von Messungen auf der Nanoebene. Kann diese Form der Theorieentwicklung und -anpassung dazu dienen, eine Nanoforschungsgemeinschaft zu konstituieren, oder gehört sie einem speziellen Bereich der Instrumentenentwicklung an, mit dem sich andere Nanotechnologieforscher lediglich im Austausch befinden [59]?

<sup>38</sup> Vgl. den Vorschlag von Thomas Staley (auf der Imaging Nanospace Konferenz), dass man die quasi-photographischen Bilder wie Landkarten mit graphischen Elementen und sogar Text versehen könnte, um Daten zu visualisieren [60]. Das könnte den animistischen Zauber der machtvollen Bilder (s.o.) brechen und den Gebrauch der Bilder auf die wissenschaftliche Gemeinschaft beschränken.

unbestimmt, welche Anwendungen aus ihr folgen sollen.<sup>39</sup> Das unterscheidet sie von der Krebsforschung, dem Manhattan-Projekt, dem Wettrüsten, der Weltraumforschung, der KI-Forschung usw. So lange die NanoTechnoWissenschaft kein anderes gesellschaftliches Mandat besitzt, als innovativ zu sein, bleibt sie im Wesentlichen unvollständig und es bedarf gesellschaftlicher Einbildungskraft und öffentlicher Diskussion, um eine sinnvolle Nachfrage nach den von ihr entwickelten Fertigkeiten zu erzeugen. Wenn schon die Laborforschung so organisiert ist, dass sie auf gesellschaftliche Zielsetzungen etwa der Krebstherapie konvergiert [61], müssten die Nanoforschung dadurch vervollständigt werden, dass sie die Sozialwissenschaften, die Anthropologie und die Philosophie in ihr Programm, die Welt „Atom für Atom“ neu zu gestalten, mit einbezieht.

Die Nanotechnologien werden häufig damit beworben, dass sie große Transformationspotentiale besäßen und die nächste wissenschaftliche Revolution darstellten. Der vorliegende Artikel wollte keinen Überblick über eine revolutionäre Entwicklung bieten, sondern die pragmatische und problematische Integration von bestehendem wissenschaftlichen Wissen und den neuen Entdeckungen auf der Nanoebene diskutieren. Geht man davon aus, dass Wissenschaft gegenüber bestehenden Theorien kritisch sein und ein besseres Verständnis der Welt erzeugen soll, und geht man weiterhin traditionell davon aus, dass Technik Transparenz und Kontrolle verstärkt, indem sie die Natur entzaubert und rationalisiert, dann erscheint die von der Nanoforschung geleisteten pragmatischen Integrationen eher regressiv als revolutionär. Sobald man den Übergang von erkenntnistheoretischer Gewissheit zu systemischer Robustheit gemacht hat, hält andererseits diese pragmatische Integration das Versprechen einer gesellschaftlich robusten Technikentwicklung. Jenseits dieser durchaus nüchternen Feststellungen gibt es einstweilen wenig Anreiz und kaum Bewegung in Richtung auf eine disziplinäre Reorientierung und Konsolidierung von Nanowissenschaft und Nanotechnologien. Eine nanotechnologische Revolutionierung der Wissenschaft oder der Technik hat bisher jedenfalls noch nicht stattgefunden und wir warten vielleicht vergeblich auf sie – und das ist wahrscheinlich gar nicht so schlecht.<sup>40</sup>

<sup>39</sup> Vgl. Anmerkung 3 und 22. Der Begriff *Soziale Naturwissenschaft* wurde im Kontext der Finalisierungsthese geprägt: Wissenschaft einer Natur, die gesellschaftlich durch angewandte Wissenschaft, Technologie und menschliches Handeln geformt wurde. Sie ist also nicht Gesellschaftswissenschaft, sondern ein umfassender Ansatz, der die gesellschaftliche Verfasstheit der Welt anerkennt. Der Vorschlag geht in zwei Richtungen. Erstens sind durch ihre Geschichte und ihren Ort bestimmte Materialien (im Gegensatz zur Materie) und Moleküle gesellschaftliche Entitäten und als solche Gegenstand der Sozialen Naturwissenschaft. Zweitens ist die NanoTechnoWissenschaft ein Programm des Formens und Umformens, Gestaltens und Umgestaltens – sie reformiert die Welt. In dem Ausmaß, in dem sie ein gesellschaftliches Reformprojekt betreibt, bleibt sie systematisch unvollständig ohne eine gesellschaftliche Agenda: Was sind die Projekte, die zu lösenden Probleme, die Ziele und die Gestaltungsnormen der NanoTechnoWissenschaft?

<sup>40</sup> Einige warten nicht auf eine neue und fortschrittliche Art, Wissenschaft zu betreiben, sondern auf weit entfernte wissenschaftliche Durchbrüche, die zu Spekulationen über *human enhancement* und Gehirn-Maschine-Schnittstellen anregen. Jedoch ist im außer-philosophischen Zusammenhang der Technik(folgen)abschätzung das „revolutionäre“ *human enhancement* kein Thema, sondern lenkt nur von dringenderen Problemen ab [62].

## LITERATUR

- [1] B. Latour, *Science in Action*, Harvard University Press, Cambridge, 1987.
- [2] Donna Haraway, *Modest\_Witness@Second\_Millennium*, Routledge, New York, 1997.
- [3] A. Nordmann, „Was ist TechnoWissenschaft? - Zum Wandel der Wissenschaftskultur am Beispiel von Nanoforschung und Bionik“ in *Bionik: Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaften* (Eds.: T. Rossmann, C. Tropea), Springer, Berlin, 2004, 209-218.
- [4] I. Hacking, *Representing and Intervening*, Cambridge University Press, New York, 1983.
- [5] P. Galison, „The Pyramid and the Ring“, presentation at the conference of the Gesellschaft für analytische Philosophie (GAP), Berlin, 2006.
- [6] H. Brune, H. Ernst, A. Grunwald, W. Grünwald, H. Hofmann, H. Krug, P. Janich, M. Mayor, W. Rathgeber, G. Schmid, U. Simon, V. Vogel, D. Wyrwa, *Nanotechnology: Assessments and Perspectives*, Springer, Berlin, 2006.
- [7] *Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties*, The Royal Society and The Royal Academy of Engineering, London, 2004.
- [8] Javier Echeverría, *La revolución tecnoscintífica*, Fondo de Cultura Económica de Espana, Madrid, 2003.
- [9] A. Johnson „Ethics and the Epistemology of Engineering: The Case of Nanotechnology“, conference Nanotechnology: Ethical and Legal Issues, Columbia, SC. March 3, 2005.
- [10] W. Heisenberg, „Der Begriff ‘Abgeschlossene Theorie’ in der modernen Naturwissenschaft“, *Dialectica*, 1948, Vol. 2, Issue 3-4, 331-336.
- [11] A. Bokulich, „Heisenberg Meets Kuhn: Closed Theories and Paradigms“, *Philosophy of Science* 2006, 73(1), 90-107.
- [12] *Finalization in Science* (Ed.: W. Schäfer), Reidel, Dordrecht, 1983.
- [13] Wilholt, T. (2006) „Design Rules: Industrial Research and Epistemic Merit“, *Philosophy of Science*, 2006, 73(1), 66-89.
- [14] M. Roukes, „Plenty of Room Indeed“, *Scientific American*, 285 (3), 48-57.
- [15] M. Eberhart, „Quantum Mechanics and Molecular Design in the Twenty First Century“, *Foundations of Chemistry*, 2002, 4, 201-211.
- [16] A. D. Maynard et al., „Safe handling of Nanotechnology“, *Nature* 2006, 444, 267-269.
- [17] H. Hertz, *The Principles of Mechanics*, Dover Publications, New York, 1956.
- [18] N. Cartwright, *The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- [19] *Models as Mediators* (Eds.: M. Morgan, M. Morrison), Cambridge University Press, Cambridge, 1999.



- [20] A. Nordmann, „Molecular Disjunctions: Staking Claims at the Nanoscale“, in *Discovering the Nanoscale* (Eds.: D. Baird, A. Nordmann, J. Schummer), IOS Press, Amsterdam, 2004, 51-62.
- [21] J. Chen, M. A. Reed, A. M. Rawlett, J. M. Tour, „Large On-Off Ratios and Negative Differential Resistance in a Molecular Electronic Device“, *Science*, 1999, 286, 1550-1552.
- [22] Winsberg, E: (2006) „Handshaking your way to the top: simulation at the nanoscale“, in *Simulation: Pragmatic Constructions of Reality* (eds. J. Lenhard, G. Küppers, T. Shinn), Springer, Dordrecht (*Sociology of the Sciences Yearbook*, Vol. 25), 139-154.
- [23] Batterman, R.W. (2006) „Hydrodynamics versus Molecular Dynamics: Intertheory Relations in Condensed Matter Physics“, in *Philosophy of Science* 73, 888-904.
- [23a] Nordmann, A. (2006) „Unsichtbare Ursprünge: Herbert Gleiter und der Beitrag der Materialwissenschaft“, in *Nanotechnologien im Kontext: Philosophische, ethische und gesellschaftliche Perspektiven* (eds.: A. Nordmann, J. Schummer, A. Schwarz), Akademische Verlagsgesellschaft, Berlin, 2006, 81-96.
- [24] B. Bensaude-Vincent, „The Construction of a Discipline: Material Sciences in the United States“, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 2001, 31(2), 223-248.
- [25] B. Bensaude-Vincent, X. Guchet „Nanomachine: One Word for three different Paradigms“, *Techné*, 2007, 11(1), 71-89.
- [26] B. Bensaude-Vincent, „Two Cultures of Nanotechnology?“, in *Nanotechnology Challenges: Implications for Philosophy, Ethics and Society* (eds.: J. Schummer, D. Baird), World Scientific Publishing, Singapore, 7-28.
- [27] G. M. Whitesides, B. Grzybowski, „Self-Assembly at All Scales“, *Science*, 2002, 295, 2418-2421.
- [28] Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR), „Opinion on the appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies“, European Commission, Health & Consumer Protection Directorate-General, 2005.
- [29] J. Schummer, „Ethics of Chemical Synthesis“, *International Journal of Philosophy of Chemistry*, 2001, 7(2), 103-124.
- [30] M. Kurath, S. Maasen, „Toxicology as a nanoscience? – Disciplinary identities reconsidered“, *Particle and Fibre Toxicology*, 2006, 3:6.
- [30a] M. Kurath, S. Maasen, „Disziplinäre Identitätsbildung neu gedacht: Toxikologie als Nanowissenschaft?“, in *Nanotechnologien im Kontext: Philosophische, ethische und gesellschaftliche Perspektiven* (eds.: A. Nordmann, J. Schummer, A. Schwarz), Akademische Verlagsgesellschaft, Berlin, 2006, 397-418.
- [31] A. Nordmann, „Collapse of distance: Epistemic Strategies of Science and Technoscience“, *Danish Yearbook of Philosophy*, 2006, 41, 7-34.
- [32] R. Jones, *Soft Machines*, Oxford University Press, Oxford, 2004.

- [33] C. Mody, „How Probe Microscopists Became Nanotechnologists“, in *Discovering the Nanoscale* (Eds.: D. Baird, A. Nordmann, J. Schummer), IOS Press, Amsterdam, 2004, 119-133.
- [34] J. Hennig, „Lokale Bilder in globalen Kontroversen: Die heterogenen Bildwelten der Rastertunnelmikroskopie“, in *The Picture's Image. Wissenschaftliche Visualisierungen als Komposit.* (Eds.: I. Hinterwaldner, M. Buschhaus), Fink, München, 2006, 243-260.
- [35] A. Johnson „Modeling Molecules: From Computational Chemistry to Computational Nanotechnology“ submitted to *Perspectives on Science*, 2008.
- [36] E. Scerri, „Have Orbitals Really Been Observed?“, *Journal of Chemical Education*, 2000, 77, 1492-1494.
- [37] P. E. Vermaas, „Nanoscale Technology: A Two-Sided Challenge for Interpretations of Quantum Mechanics“, in *Discovering the Nanoscale* (Eds.: D. Baird, A. Nordmann, J. Schummer), IOS Press, Amsterdam, 2004, 77-91.
- [38] R. Harré, „The Materiality of Instruments in a Metaphysics for Experiments“, in *The Philosophy of Scientific Experimentation* (Ed.: H. Radder), The University of Pittsburgh Press, Pittsburgh, 2003, 19-38.
- [39] E. Winsberg, „A tale of two methods“, unpublished manuscript can be found under <http://www.cas.usf.edu/~ewinsb/papers.html>, 2007.
- [40] W. Mitchell, *What do Pictures Want? The Lives and Loves of Images*, University of Chicago Press, Chicago, 2005.
- [41] H. Belting, *Bildanthropologie. Entwürfe für eine Bildwissenschaft*, Fink, München, 2001.
- [42] A. Nordmann, „Noumenal Technology: Reflections on the Incredible Tininess of Nano“, in *Nanotechnology Challenges: Implications for Philosophy, Ethics and Society* (Eds.: J. Schummer, D. Baird), World Scientific Publishing, Singapore, 2006, 49-72; Originally in *Techné*, 2005, 8:3, 3-23.
- [43] A. Nordmann, „Technology Naturalized: A Challenge to Design for the Human Scale“, in *Philosophy and Design: From Engineering to Architecture* (Eds.: P. E. Vermaas, P. Kroes, A. Light, S. A. Moore), Springer, Dordrecht, 2008, 173-184.
- [44] A. Nordmann, „Entflechtung – Ansätze zum ethisch-gesellschaftlichen Umgang mit der Nanotechnologie“, in *nano – Chancen und Risiken aktueller Technologien* (Eds.: A. Gzásó, S. Greßler, F. Schiemer), Springer, Berlin, 2007, 215-229.
- [45] ETC Group, „The Strategy for Converging Technologies“, *ETC Communiqué*, 2003, 78, 1-8.
- [46] G. Gaskell, T. Ten Eyck, J. Jackson, G. Veltri, „Public Attitudes to Nanotechnology in Europe and the United States“, *Nature Materials* 2004, 3(8), 496.
- [47] M. Heidegger, *Die Technik und die Kehre*, Klett-Cotta, Stuttgart, 2002.
- [48] B. Bensaude-Vincent, „The Balance: Between Chemistry and Politics“, *The Eighteenth Century*, 1992, 33(2), 217-237.

- [49] G. Böhme, W. Schäfer „Towards a Social Science of Nature“, in *Finalization in Science* (Ed.: W. Schäfer), Reidel, Dordrecht, 1983, 251-269.
- [50] P. Janich, „Wissenschaftstheorie der Nanotechnologie“, in *Nanotechnologien im Kontext: Philosophische, ethische und gesellschaftliche Perspektiven* (Eds.: A. Nordmann, J. Schummer, A. Schwarz), Akademische Verlagsgesellschaft, Berlin, 2006, 1-32.
- [51] A. Grunwald, „Nanotechnologie als Chiffre der Zukunft“, in *Nanotechnologien im Kontext: Philosophische, ethische und gesellschaftliche Perspektiven* (Eds.: A. Nordmann, J. Schummer, A. Schwarz), Akademische Verlagsgesellschaft, Berlin, 2006, 49-80.
- [52] D. Baird, A. Shew, „Probing the History of Scanning Tunneling Microscopy“, in *Discovering the Nanoscale* (Eds.: D. Baird, A. Nordmann, J. Schummer), IOS Press, Amsterdam, 2004, 145-156.
- [53] D. Baird, *Thing Knowledge: A Philosophy of Scientific Instruments*, University of California Press, Berkeley, 2004.
- [54] U. Beck, *Risikogesellschaft. Auf dem Weg in eine andere Moderne*, Suhrkamp, Frankfurt, 1986. U. Beck, *Risk society: Towards a New Modernity*, Sage, London, 1992.
- [55] A. Dupuy, J.-P. Grinbaum, „Living with Uncertainty: Toward the Ongoing Normative Assessment of Nanotechnology“, in *Techné*, 2004, 8(2), 4-25.
- [56] A. Nordmann, „Design Choices in the Nanoworld: A Space Odyssey“, in *Nano Researchers Facing Choices* (Eds. M. Deblonde, L. Goorden et al.), vol. 10 of The Dialogue Series, Universitair Centrum Sint-Ignatius, Antwerp, 2007, 13-30. A. Nordmann, "Gestaltungsspielräume in der Nanowelt: Eine Space-Odyssee", in *Nanotechnologie: Erwartungen, Anwendungen, Auswirkungen* (Eds. D. Korczak, A. Lurf), Asanger, Kröning, 2007, 159-184.
- [57] N.J. Tao, „Electron Transport in Molecular Junctions“, *Nature Nanotechnology*, 2006, 1, 173-181.
- [58] C. A. Clifford, M. P. Seah, „Modelling of nanomechanical nanoindentation measurements using an AFM or nanoindenter for compliant layers on stiffer substrates“, *Nanotechnology*, 2006, 17, 5283–5292.
- [59] P. Galison, *Image and Logic: A Material Culture of Microphysics*, Chicago University Press, Chicago, 1997.
- [60] T. W. Staley, „The Coding of Technical Images of Nanospace: Analogy, Disanalogy, and the Asymmetry of Worlds“, *Techné*, forthcoming.
- [61] HLEG (High Level Expert Group „Foresighting the New Technology Wave“), *Converging Technologies: Shaping the Future of European Societies*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2004.
- [62] A. Nordmann, „If and Then: A Critique of Speculative NanoEthics“, *NanoEthics*, 2007, 1:1, 31-46.