

Nanotechnologien im Kontext

Philosophische, ethische und gesellschaftliche Perspektiven

Herausgeber

Alfred Nordmann

Institut für Philosophie, Technische Universität Darmstadt

Joachim Schummer

Institut für Philosophie, Technische Universität Darmstadt

und

Astrid Schwarz

Institut für Philosophie, Technische Universität Darmstadt



Integrierte Innovation in der Entwicklung der Nanotechnologie: Von der Regulierung durch Definitionen zur Orientierung an Dritten Größen

Wolfgang NETHÖFEL

Philipps-Universität Marburg, nethoefel@staffuni-marburg.de

Abstract. The varying definitions of 'nanotechnology' constitute a shaky basis for the dialogue between scientific communities and society. The attempt of the European Academy to define this term introduces a new, constructive approach. By evaluating the more or less certain candidates for 'nanotechnology', this approach inductively develops a limiting criterion: discontinuity at the nanoscale. Critical acknowledgment of this approach, however, necessitates orientation on third terms rather than on definitions. Inside and outside of nanotechnology these third terms provide a sound basis for communication across system boundaries. Developments within nanotechnology can thus, in both inter- and intradisciplinary dialogue, become productive for dealing practically with innovations.

1. Noch einmal: Definitionen der Nanotechnologie ¹

„Alles Nano oder was?“, fragt sich ein erstauntes Publikum, während die Definitionen skeptischer Fachleute nahe legen, dass unter dem Namen „Nano“ lediglich Wissen oder Technik aus anderen Bereichen neu kombiniert, vielleicht auch nur besser verkauft wird. Angesichts der großen gesellschaftlichen Bedeutung der Nanotechnologie ist das Nebeneinander sehr schwacher und sehr starker Definitionen auffällig. Noch merkwürdiger ist, dass sie sich beim näheren Hinsehen vor allem als charakteristisch verschieden erweisen. Sie liegen in ganz unterschiedlicher Form vor. Bei den intensionalen Merkmalen kann man Phänomen-, Produkt- und Verfahrensmerkmale einerseits, paradigmatische Orientierungshinweise andererseits unterscheiden. Dort soll sich die Nanowelt durch das erschließen, was man in ihr entdecken und herstellen kann und man findet hier auch leichter zu klassischen Definitionsformen. Hier soll man umgekehrt besser sammeln, jagen und anbauen können, wenn man zuvor gelernt hat, sich in der Nanowelt zurechtzufinden, und da kann man auch schon einmal statt eine Definition zu

¹ Vorfassungen dieses Textes habe ich in der interdisziplinären Marburger NanoGroup vorgestellt und in unsere von der Volkswagenstiftung geförderten Tagung „Nanotechnology in Science, Economy, and Society“ (Marburg 2005) eingebracht („Enabling Europe. Nanotechnology and the Shaping of the Union“; vgl. Jungmichel & Nethöfel 2005). Das Ergebnis ist in Form von Arbeitshypothesen und strukturierenden Elementen eingegangen in einen Projektantrag der Gruppe. Ich verarbeite mehr als nur Anregungen aus Gesprächen mit den Kolleginnen und Kollegen Wolfgang Drechsler, Andreas Greiner, Peter Janich, Angela Krewani, Christian Lüthje, Elmar Mand, Alfred Nordmann, Jochen Röpke und Cornelia Storz sowie mit unseren „Young Scientists“. Doch ich gebe nicht überall ihre Meinung wieder und für die hier vorliegenden Formulierungen trage ich allein die Verantwortung.

geben eine Geschichte erzählen. Einige der Führer durch diese Welt geben allerdings für diejenigen, die länger bleiben möchten, ebenfalls Bau- und Anbautipps. Und andere warnen jetzt schon davor, dieses Gebiet überhaupt zu betreten.²

Je wichtiger Nanotechnologie und die in ihr enthaltene Nanowissenschaft werden, umso häufiger kommen Menschen, die sich intensiver damit beschäftigt haben, in die Verlegenheit, anderen erklären zu müssen, was Nanotechnologie eigentlich ist. Die vorliegenden Definitionen sind meist so kurz oder so voraussetzungsreich, dass sie kaum eine Anschauung vermitteln. Gelegentlich gehen sie so ins Detail, dass man sie ohne technische Spezialkenntnisse nicht versteht. Dabei kann man Definitionen nicht einfach durch Aufzählungen interessanter Einzelfälle oder durch allgemeine Beschreibungen ersetzen, die sich irgendwie auf die Sache beziehen. Der Streit um Definitionen verselbständigt sich zwar vor allem in den jeweiligen Reflexionswissenschaften. Aber auch ein vertieftes Verständnis der Forschergemeinschaft selbst schlägt sich in Krise und Neuverständnis der Grundlagenbegriffe und in einer Neudefinition eines Wissensgebietes nieder. Schließlich aber und vor allem: Definitionen sind gesellschaftliche Orientierungsmuster. Wenn sich Wirtschaft und Politik, das Rechts- und das Bildungssystem und die Presse auf nanotechnologische Innovationen einstellen, orientieren sich Rollen- und institutionelles Handeln an Definitionen. Definitionen hören sich manchmal ganz ähnlich an, aber kleine Unterschiede können große institutionelle Auswirkungen haben. Sie bündeln Wirkungen, sie lösen aber auch systemische Rückwirkungen aus, die wiederum zu Entwicklungsvoraussetzungen künftiger Nanotechnologie werden.

Daher lohnt es sich immer wieder zu fragen: Was ist (nach allem was wir wissen) eigentlich Nanotechnologie - und was nicht? Der von der Studiengruppe „Miniaturization and Material Properties“ der Europäischen Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklung vorgelegte Definitionsvorschlag lautet:

Nanotechnology is dealing with functional systems based on the use of subunits with specific size-dependent properties of the individual sub-units or of a System of those.

Die Hauptfunktion dieser Definition ist erklärtermaßen, „to divide the world of technology into Nanotechnology and non Nanotechnology“.³ Dies bestätigt eine Kreuztabelle, in die das eigentliche Arbeitsergebnis der Gruppe eingegangen ist. Sie hat sämtliche Technologiekandidaten im Nanometerbereich jenen Eigenschaftsklassen zugeordnet und dann die Extension größenabhängiger Eigenschaften in Metallen, Isolatoren und Halbleitern, Hybrid- und Compositstrukturen aufgelistet sowie in molekularen Arrangements und bei Grenzoberflächen. Das eigentliche Ergebnis ist dann nach Meinung der Autoren die Möglichkeit, bestimmte Technologien auszusondern, weil sich die beobachtbaren Eigenschaften beim Überschreiten der Schwelle zum Nanobereich weiterhin kontinuierlich statt in Sprüngen verändern. Das verbleibende Tableau listet dann diejenige Besetzung von Eigenschaftsklassen und Systemen auf, die als Nanotechnologie definiert werden sollten. Es ist lesbar entweder als Aufzählung der im Einzelnen genauer analysierten Technologien oder als Feld von Eigenschaftsklassen und denkbaren technologischen Systemen, die wiederum entweder einzeln im Analogieschluss beurteilt oder eigens auf das Vorkommen diskreter Zustände untersucht werden

Eine ausführliche Fassung des vorliegenden Textes verdeutlicht, dass von der Definition der Nanotechnologie auch die Konzeption ihrer Entwicklungsdynamik abhängt (Nerhöfel 2006a). Schmid *et al.* 2003, S. 25. Diese Veröffentlichung markiert ein Zwischenergebnis im Arbeitsverfahren der Gruppe. Das Arbeitsgruppenmitglied M. Decker berichtet darüber in Decker *et al.* 2004 und in diesem Buch. Die folgenden deutschen Übersetzungen sind Decker *et al.* 2004 entnommen.

müssten. Folglich sind dann schließlich auch jene Einzeluntersuchungen konstitutiv für die Definition, oder anders: Diese Definition ist eigentlich ein Algorithmus, der beschreibt wie jeder Kandidat für das Prädikat „x ist Nanotechnologie“ in endlichen Schritten mit eindeutigem Ergebnis untersucht werden kann.

Das eigentliche Verdienst dieses Definitionsvorschlages der Europäischen Akademie besteht darin, wie er präzise auf weiterführende Fragen verweist. Zum einen gelingt es diesem Ansatz offensichtlich nicht, die paradigmatischen Definitionsansätze zu integrieren:

Offensichtlich ist, dass diese Definition einen stark physikalisch-materialwissenschaftlichen Fokus aufweist und dadurch ganze Teile der in Fachdiskussion und öffentlicher Wahrnehmung als Nanotechnologie angesprochenen Entwicklungen außen vor lässt. So repräsentiert diese Definition nicht mehr die so genannte molekulare (Drexlersche) Nanotechnologie, was angesichts der Kontroverse darum (und der Skepsis oder Abneigung vieler Nanowissenschaftler) vielleicht sogar ein gewünschter Effekt gewesen sein könnte. (Decker et. al. 2004, S. 15)

Durch das definierende Verfahren selbst werden nun aber alle Merkmalsbestimmungen der vorliegenden Definitionen auf die Frage reduziert, ob jenes Neue, das die Aufmerksamkeit auf sich zieht, durch diskrete Zustände auf der Nanoskala lokalisierbar ist oder nicht. Damit stellt sich zum anderen die Frage, was es den nun mit diesen diskreten Zuständen auf sich hat, die dadurch zum entscheidenden Kriterium werden. Verweisen nun gerade sie auf das, was der Nanotechnologie eigentümlich ist? Ich vermute, dass mit dem Ausblenden paradigmatischer Definitionen einerseits und der Konzentration auf diskrete Zustände andererseits zwei Aspekte auseinandergerissen werden, die sich bei näherer Betrachtung wechselseitig voraussetzen. Vor dem Hintergrund des Definitionsversuchs der Europäischen Akademie werde ich empfehlen, sich intern wie extern nicht an Definitionen, sondern an Dritten Größen zu orientieren. Sie verknüpfen bereits intrasystemisch qualitative und quantitative Aspekte, synthetische und analytische Verfahren, als Hintergrund- und Vordergrundkonstellation auch über Systemgrenzen im Objektbereich hinweg (2). Im inter- und intradisziplinären Dialog lassen in der Konzentration auf Dritte Größen Entwicklungen innerhalb der Nanotechnologie fruchtbar machen für das Nachdenken über und für den praktischen Umgang mit Innovationen (3).

2. Messen, Zählen oder Werten? Orientierung an kritischen Größen im Nanobereich

Ich vermute, dass die Definition der Europäischen Akademie, soweit sie funktioniert, deshalb funktioniert, weil sie die technische Intendiertheit diskreter Zustände thematisiert. Im Zentrum dieses Versuchs stehen Effekte auf der Grenze zwischen Zähl- und Messbarkeit und die Notwendigkeit, daraus Schlüsse zu ziehen. Im Bereich der Nanotechnologie werden somit wissenschaftstheoretische Fragestellungen in exemplarischer Weise praktisch interessant: auch interdisziplinär. Ich zeige das zunächst am Problem der Grenzoberfläche und argumentiere dann für eine Orientierung an kritischen Größen im Schnittpunkt zwischen nanotechnologischer Binnendifferenzierung und möglichen Außenabgrenzungen der Nanotechnologie.

2.1 Diskrete Zustände und poröse Grenzen

Kommt die Top-Down-Strategie an ihr Ende, wenn eigenschaftstypische diskrete Zustände erreicht werden? Mit Blick auf das Banach-Tarski-Paradoxon möchte man das verneinen⁴ Es scheint vielmehr die Nanotechnologie zu ermutigen, immer weiter zu machen. Nach jenem mathematischen Paradoxon kann eine Kugel derart in Teile zerlegt werden, dass man daraus anschließend zwei Kugeln von der Originalgröße erhält - wenn man bei der Abbildung „nahe genug“ herangeht. Gerade wegen der anfänglichen Unanschaulichkeit dieser Volumenverdoppelung bietet sich dieses Paradoxon als Verstehensbrücke und zur Hypothesenformulierung bei nanotechnologischen Oberflächenphänomenen an. Denn bei genauerer Betrachtung nähert man sich jedem Einzelstück in einem definitorischen Zoom, erkennt dabei immer komplexere Formen und fliegt dann daran vorbei durch unendliche Räume - komplexen Formen anderer Ordnung entgegen. In erläuternden Darstellungen werden die jeweils erfassbaren Punktmengen als „unendlich filigran und porös bzw. staubwolkenartig“ beschrieben.⁵ Sie sind nicht mehr messbar, und sie sind auch nur durch Gödelverfahren zählbar. Wir stoßen letztlich wieder auf die sich prinzipiell verzweigenden, sich auflösenden oder sich „verschleifenden“ Spencer-Brownschen Ur-Entscheidungen der Formbildung.

Nun lässt sich diese Paradoxie auf die Anwendung des Auswahlaxioms der Mengenlehre zurückführen, das eben deshalb gerade in der theoretischen Physik mit Skepsis betrachtet oder genauer: zur Abgrenzung verwendet wird. Während man in der Mathematik auch noch mit irgendwie ausgewählten Phantasiekonstrukten weiter rechnen kann, so lautet das Standardargument, misst man dagegen in der Physik reale Größen, die man daran erkennt, dass sie mathematisch sauber (re-) konstruierbar sind. Aber das Auswahlaxiom hat sich wie der Wohlordnungssatz oder das Zornsche Lemma nicht nur in der Relativitätstheorie, sondern auch in der Quantenmechanik bewährt. Wenn sich aber nanotechnologische Grenzen stets als porös erweisen, dann würde die nanotechnologische Binnendifferenzierung schließlich auch die Kontaktgrenze des Gesamtsystems immer neu gestalten. Eine Fixierung der nanotechnologischen Gestalt auf dem von der Arbeitsgruppe der Europäischen Akademie eingeschlagenen Weg wäre dann schon prinzipiell unmöglich.

Entsprechende Indizien finden sich, wenn man sich der Systemgestalt der Nanotechnologie von der anderen Seite: von außen nähert. Hier soll ja der „diskrete Zustand“ jedenfalls im Einzelfall eine definitorische Ausgrenzung ermöglichen. Er markiert eindeutig einen Punkt auf der Grenze der Nanotechnologie, so dass bei wiederholten Messungen ihre Gestalt so deutlich hervortritt, dass die Gesellschaft sich darüber verständigen kann bzw. dass die Partner auch auf beiden Seiten der Grenze sich bei offenkundigen Missverständnissen wieder auf solche Messungen beziehen können. Recht verstanden, ist die Definition eine Anweisung, solche Messungen durchzuführen und sich dann daran zu orientieren. Betrachtet man diesen Punkt jedoch so, wie er präzise definiert ist: als Dual auf einem Näherungsweg, so liegt es nahe, jenes von der vorbereitenden Bifurkation her, das ganze Gebilde also katastrophentheoretisch zu verstehen^b.

Vgl. Jech 1973; Konsequenzen zeigt anschaulich Winkler 2001. Eine grundsätzlich kritische Position entwickelt Orthuber 2004 (ausführlicher Orthuber 2000).

Artikel „Banach-Tarski-Paradoxon“ [<http://de.wikipedia.org/wiki/Banach-Tarski-Paradoxon>] (besucht 14.01.2006).

Thom 1972; van der Maas & Molenaar (1992) diskutieren im Detail Anwendungsfälle und -probleme, die bei einer ausgeführten Theorie Dritter Größen zu berücksichtigen sind; s.u. in 2.3.

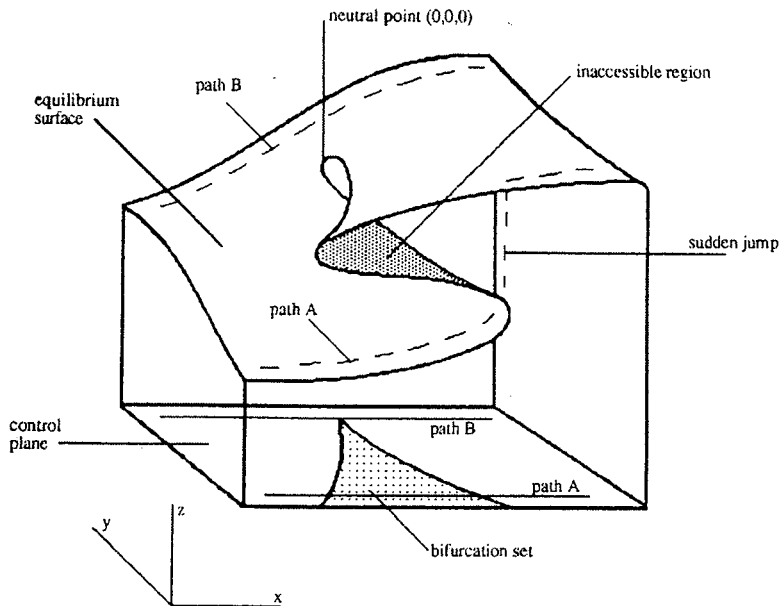


Abbildung 1: Kontrollebene und Katastrophenraum nach van der Maas & Molenaar 1992, S. 397 (reproduziert mit Erlaubnis der American Psychological Association).

Da jede Bifurkation als Projektion einer Kontinuitäts-, „Falte“ in einem höher dimensionierten Katastrophenraum interpretiert werden kann, könnte jeder diskrete Zustand, den wir in nanotechnologischen Grenzbereichen beobachtbar machen, auf eine kontinuierliche Grenzfläche höherer Ordnung verweisen. Die Oberfläche des nanotechnologischen Systems weicht an jener scheinbar eindeutig definierten Stelle also zurück und stülpt sich gleichsam nach innen. Sie wird diffus, während sie für diese Annäherung undurchdringlich bleibt und insofern weiterhin als Grenze funktioniert. Die Messebene wird also als Kontaktebene untauglich, da sie als kontrollierende Ebene missverstanden wird. Sie schreibt die in Nachbarsystemen fest stehenden Abgrenzungen fest, während sie selbst als Grenzfunktion Binnendifferenzierungen nicht mehr zuverlässig abbildet. Damit ist ein zweites kommunikatives Definitionsrisiko markiert, das der Unmöglichkeit einer Fixierung der nanotechnologischen Gestalt genau korrespondiert.

Dass dies keine leere Spekulation ist, bestätigen die auch nach Auffassung der definierenden Arbeitsgruppe gesicherten Nanoeffekte. Sie unterlaufen das Diskontinuitätskriterium von innen her. Beim Unterschreiten einer gewissen Größe treten sie ja nicht schlagartig auf, sondern kündigen sich vorher an. Wenn man z.B. vom Ferromagnetismus ausgeht, tritt der Superparamagnetismus mit zunehmender Kleinheit der Partikel zuerst bei hohen Temperaturen auf, dann bei immer niedrigeren Temperaturen mit abnehmender Größe bis man im gesamten Temperaturbereich (speziell im Bereich der Gebrauchstemperatur) nur noch Superparamagnetismus hat. Ähnliche Kontinuitäten gelten für andere Effekte etwa bei Halbleitern. Warum das „oben“ mal so, mal so ist, weiß man freilich erst dann genauer, wenn man sich „unten“ besser auskennt.

So könnte gerade die Ausgrenzung des Lotuseffektes durch die Definition der Europäischen Akademie diesen Kir den Nanoforscher interessant machen. Die scheinbar kontinuierlichen Abhängigkeiten dieses Oberflächenphänomens könnten nanotechno-

logisch relevant werden, wenn man die entsprechenden Systeme verkleinert, d.h. sie an der Grenze des zur Zeit labortechnisch Machbaren genauer zu bestimmen oder in Untereinheiten aufzuteilen versucht. Und dort wo in den definierenden Tableaus solche Diskontinuität scheinbar trennscharf nachgewiesen ist, wird er wiederum aufmerksam werden. Hier könnte der nanotechnologische Zoom nämlich neue Differenzierungen ermöglichen. Der Ärger eines Beteiligten, der sich mit seiner Lieblingstechnik ausgegrenzt sieht, ist also tief begründet, und er wird stets gute Gegenargumente finden. Grenzen ziehen ihn an, und er kennt sich dort aus. Jener Definitionsversuch mag also zwar durch seine Abgrenzungsfunktion in die Irre führen Aber er orientiert hin auf das innere Zentrum nanotechnologischer Differenzierungsaktivitäten, zu denen er ja auch geradewegs einlädt. Und dort, durch die Mitte, geht es auch weiter.

Die Natur macht Sprünge - aber von jener besonderen Art, die für das Forschungsgebiet der Nanotechnologie charakteristisch sind. Dort werden diskrete Zustände im Umfeld jener ankündigenden Ereignisse jedoch nur deshalb als „Katastrophen“ verstanden, damit man auf der Spur jener ersten Daten oder Wirkungen den Katastrophenraum immer genauer definieren kann, bis er unerreichbar klein bzw. bis seine Oberfläche glatt ist „nach allem, was man weiß“. Die Messebene hat sich gleichsam an die Oberfläche angeschmiegt. Man erkennt das daran, dass die vektoriellen Anschlüsse auf der bislang unzugänglichen Seite eindeutig werden und dass an ihnen entlang der Ausgangsraum erweitert werden kann, ohne dass Informationsverluste auftreten. Die alten Ausdrücke können nun auch „von der anderen Seite“ her verstanden werden. Allerdings befinden wir uns in einem neuen Raum. Die alten Ausdrücke werden im Rahmen eines vertieften, weil intern ausdifferenzierten Verständnisses von „Nanotechnologie“ verwendet. Missverständnisse der alten Art sollten jedenfalls nicht mehr auftreten können.

Die von der Europäischen Akademie als unsicher identifizierten Kandidaten bestätigen diesen Befund von außen. Die Akademie begründet in ihrer „Remark an Nanobiotechnology“ in erhellender Weise, warum sie dieses ganze Teilgebiet aus den Tableaus und damit aus ihrem Definitionsversuch ausblendet (Schmid *et al.* 2003, S. 31). Nanobio erfülle zwar eigentlich alle Voraussetzungen eines Nanotechnologie-Kandidaten. Es sei aber eben noch ein sehr junges und schwer zu überschauendes Arbeitsfeld. Folgt man den Argumenten weiter, ahnt man den wahren Grund für diese Unsicherheit. Zwar sind in diesem Bereich Quantenphänomene wichtig, zwar spielen sich viele interessante Phänomene im Nanobereich ab, zwar gibt es die vom Obersatz der Definition geforderte durchgehende Überlagerung der in Frage kommenden Systeme. Aber es sind eben tatsächlich verschiedene Systeme mit jeweils ganz anderen: nicht mehr nur quantenphysikalisch zu kategorisierenden Effekten, und deren charakteristische Größen führen weit über die Nanoskala hinaus. In einer für die katalogisierende Arbeitsgruppe offensichtlich irritierenden Weise bleiben aber dabei sowohl die forschungspraktische Intendiertheit diskreter Zustände als auch die darauf abzielenden Verfahren typisch nanotechnologisch - wie übrigens auch beim Umgang mit den Lotuseffekt. Die Ausgrenzung wäre hier nicht nur kontraintuitiv, sie würde ganz eindeutig nanotechnologische Verfahrenszusammenhänge und Innovationskreisläufe durchbrechen. Im Fall der Nanobiotechnologie retten sich die Autoren bei den beschreibenden Beispielen in physikalisch-biologische Hybride. Aber was ist mit rein biologischen Nanoeffekten, und was wird mit Nanoeffekten sein, in denen Selbstreplikation über die Nanoskala hinausführt? Sollen sie per Definition ausgeschlossen werden? Mit welcher nichttautologischen Begründung?

Wenn man den dennoch fruchtbaren Ansatz dieses Definitionsversuches weiter verfolgen will, lassen sich zwei Wege einschlagen. Der eine eröffnet sich, wenn man die messtheoretisch willkürliche nanoskalare Größenbegrenzung wegfällen lässt und sich auf diskrete Zustände als solche konzentriert. Man fragt dann letztlich [bzw. in](#) der theoretischen Physik zuerst nach den Referenzunterschieden zwischen Theoriesystemen mit und ohne Verwendung des Auswahlaxioms und arbeitet sich dann vor bis zu Nachweis- oder Konstruktionsverfahren, die im Bereich der Nanotechnologie tatsächlich verwendet werden. Auf diesem Wege werden Größenordnungen zu Variablen. Ähnliche Erscheinungen, analoge Verfahrensweisen in größeren und ganz großen Bereichen wie in der Astrophysik könnten hervortreten.

Hier soll zunächst ein anderer Weg eingeschlagen werden. Wir akzeptieren die Tatsache, dass sich sowohl innerhalb der Nanotechnologie als auch an deren Rand anfangs auf einer relativ zum jeweiligen Messursprung glatten Oberfläche Messpunkte finden lassen, die eindeutig identifizierbar sind, obwohl sie im Schnittpunkt zweier verschiedener Intentionen liegen. Vor der Bifurkations-Irritation kann man sich genau deshalb an ihnen orientieren, weil man sich ihnen auf verschiedenen Wegen immer weiter annähert. Danach gibt es überraschenderweise oder weil eben dies bereits die nanotechnologische Meta-Intention ist, nur noch die Verständigung über zunehmende, vor allem aber rätselhafte Abweichungen. Den Messzahlen auf der einen Seite „entsprechen“ springende Werte oder verschwindende und wieder auftauchende Referenzpunkte auf der anderen Seite. Tatsächlich verweisen sie in einer Krisenphase nur noch auf jenes intendierte System im Ganzen. Erst die Klärung, welche Wertekonstellationen nun doch noch auf beiden Seiten äquivalent sind, lässt einen gemeinsamen Attraktor hervortreten. Dieser selbst ist allerdings stabil nur in als neue Interpretation der Messgrößen des umfassenderen Systems. Sei es, dass diese sich als die beste Interpretation konvergierender Erfahrungen und Intentionen erweist, sei es, dass man sich vorläufig auf sie einigt, weil man sich so in einem neu erschlossenen gemeinsamen Erfahrungsraum zuverlässig orientieren kann.

Was haben wir zuvor eigentlich gemessen, was messen wir jetzt? Welche neuen Möglichkeiten eröffnen sich in dem neu erschlossenen Handlungsraum? Dies sind die Fragen innerhalb der Nanotechnologie. Aber jene Schwellenwerte, die im Umfeld diskreter Zustände auftreten, können genau betrachtet auch zu Ansatzpunkten einer Orientierung werden, die auf die ausgrenzende Funktion von Definitionen nicht nur innerhalb, sondern auch in Bezug auf die Nanotechnologie verzichten kann. Es geht durchgängig um systemische Kopplung, die neue Handlungsmöglichkeiten eröffnet, und in Bezug auf diese orientiert.

2.2 Kritische Nano- Werte als Kennzahlen

Wie funktionieren solche kritische Größen? Blickt man von so einer schlagartigen Dimensionserweiterung und Entgrenzung begrenzter Erfahrung, einem erfolgreich etablierten Verfahren oder von einer gelösten Aufgabe im Bereich der Nanotechnologie aus zurück, so erkennt man, dass es sich „vorher“ um eine wegweisende Singularität oder um eine grenznahe Konstellation gehandelt hat, der man sich auf verschiedene Weise genähert hat. Auf jedem dieser Wege treten dann Koordinationsschwierigkeiten auf, die sich nur als solche eindeutig lokalisieren lassen. Selbst wenn ein Beobachter oder ein Selbstbeobachter genügend Distanz hat, konstatiert er anfangs nur deren Abhängigkeit von zwei unterschiedlichen Referenzsystemen. Das eine kann vom anderen nun nicht mehr ohne Zeit-, Energie- oder Informationsverlust erreicht werden. Auch

wenn er den Eindruck von Ereigniskorrespondenzen hat, kann er Erfahrungen aus dem einen Bereich nicht mehr in den anderen übertragen. Er kann allerdings die Differenz zwischen zwei unterschiedlichen Ordnungssystemen immer präziser benennen.

Angesichts der "überwältigenden Wirkung die der folgende Schritt bei den Praktikern, spätestens aber in den Reflexionswissenschaften auslöst, ist am Vorrang des nanotechnologischen Messens und Basteins und am Rückbezug hypothetischer Interpretationen an die Näherungswege festzuhalten. Die Erinnerung an sie droht in Vergessenheit zu geraten, wenn der (Selbst-) Beobachter erkennt, dass die Kontrollebene der einen Seite und die Verhaltensebene der anderen Seite wechselseitig einander entsprechen, wenn er selbst die Perspektive ändert und er nun von einem anderen Standort aus den Ausschnitt eines insgesamt schärferen, differenzierteren Gesamtbildes vor Augen hat. In der Fusion am neuen Konvergenzpunkt scheinen sich schlagartig die Interpretationen zu vereinfachen, und der Ingenieur glaubt sofort neue technische Nutzungsmöglichkeiten zu erkennen. Am Vereinigungspunkt schränkt die Nichtbeliebigkeit der Konstellation rückwärts alle vorangehenden Interpretationsmöglichkeiten ein. Auf beiden Seiten der Grenze werden die Intensionen trennschärfer, weil die jeweiligen Ordnungsstrukturen als „marked“ und „unmarked space“ einer tiefer liegenden Differenz interpretiert werden können. Die Extension ist aber eigentlich zunächst nur ein gemeinsamer Ausdruck zweier Geschichten, die sich an genau einer Stelle überschneiden. Als Kennzahl oder als Grenzwert „macht“ die Konstellation als Element einer dritten Ordnung vorerst aber nur „Sinn“, wenn sie im Kontext einer der beiden Näherungswege sorgfältig interpretiert wird.

Es ist aus zwei Gründen wichtig, das festzuhalten. Zum einen leuchtet der Blitz jener Fusion als im Grunde kontextlose Erfolgsmeldung aus der Wissenschafts- in die Medienwelt. Zum anderen überschreitet der jeweilige Entdecker ja gar keine Grenze, sondern er betritt eine neue Welt, als ob er durch die Tür ins Weihnachtszimmer ginge. Überall warten Überraschungen auf ihn, selbstvergessen macht er sich ans Auspacken. Man sollte ihn gerade jetzt nicht interviewen, mit ihm ist vorerst nicht ernsthaft zu rechnen, Im Nachhinein aber wird gerade er bezeugen, dass es gerade jetzt um genaue Verständigung und gemeinsames Basteln, die Kombinierbarkeit von Versuchsanordnungen, den Vergleich von Konstruktionszeichnungen und den Austausch von Erfahrungen geht. Nur bestimmte Wege führen zum Erfolg. Beispiele sind die Zusammenführung verschiedene Entwicklungen aus Materialforschung, Chemie und Halbleitertechnik beim kontrollierten Wachstum von Kohlenstoff-Nanoröhrchen oder bereits Don Eiglers und Erhard Schweizers Zusammenführung instrumenteller, industrieller und oberflächenwissenschaftlicher Entwicklungen, als sie mit dem Rastertunnelmikroskop 35 Atome zu „IBM“ anordneten. Diese demonstrierten mit der Möglichkeit nanotechnologischer Konstruktionen allerdings auch deren intersystemischen Interpretationsbedarf. Kennzahlen und Grenzwerte orientieren aber jetzt eindeutig. Während die vorbereitenden Beschreibungen überkohärent, aber unterkonvergent bleiben mussten, können jetzt unterschiedliche und je für sich irritierende Erfahrungen konzentriert und koordiniert interpretiert werden. „Verstehen“ wird der Entdecker das Ganze vielleicht erst draußen vor der Tür. Aber er weiß, dass es überhaupt nicht gleichgültig ist, wie und von wo man gekommen ist.

Wenn man mit der wachen Erinnerung daran weiter zurückgeht und die Nanotechnologie als Ganzes ins Auge fasst, wird deutlicher, warum der Definitionsversuch der Europäischen Akademie in die Irre weist. Nanotechnologie kann nicht extensional nach dem Containerprinzip definiert werden. Mit der Merkmalkombination „Größe“ und „diskreter Zustand“ lässt sich der Deckel nicht schließen. Nicht einmal spezifisch nano-

technologische Variable lassen sich erkennen. Konstant charakterisiert ist die Nanotechnologie durch Verfahren, die in verschiedenen Grenzbereichen die Erzeugung diskreter Zustände und kritischer Größen (oder diskreter Zustände) intendieren. Allerdings reicht das noch nicht aus, um sich im Bereich der Nanotechnologie untereinander und über sie hinreichend genau zu verständigen. Denn jene interessanten Grenzphänomene, die man katastrophentheoretisch erfassen kann, lenken auch in anderen natürlichen wie gesellschaftlichen Systemen die Aufmerksamkeit auf sich: beim Aussterben der Arten, bei der „Flucht-“ oder „Beißkatastrophe“, beim Zusammenbruch von Märkten oder beim „Meinungsumschwung“ - überall lohnt der Weg zur Grenze, weil man dort überall auch wieder erleben kann, wie sich zwei unterschiedlich bestimmte Objekte als Ziel gemeinsamen Handelns erweisen. Aber dieses wäre damit noch nicht überlebens- und konkurrenzfähig gegenüber einer Strategie, die sich dauerhaft an erfolgreicher Nanotechnologie orientiert und andere Technologien, Verfahren, schließlich sogar institutionelle Abläufe in anderen Funktionssystemen und gesellschaftliche Zielsetzungen daran ausrichtet.

Wie entsteht auf dieser Achse jener scharfe Blick, jener gelingende Zugriff im Grenzbereich, an dem sich jedenfalls die nanotechnologische Praxis ausrichtet? Anfangs blicken die Akteure auf ihr Forschungsfeld wie durch eine Polfilterbrille, die mit jedem Halbbild eine von zwei unterschiedlichen Messintentionen ausblendet. Kritische Größen ermöglichen in dieser Phase die Orientierung an interessanten Punkten: dichte Konstellationen oder dunkle Flecke können angesteuert werden. Sind diese näher fixiert, zeigt sich, dass während der Annäherung „in Wirklichkeit“ jeweils die Topologie eines von zwei benachbarten Systemen unterschiedlicher Dichte ausgeblendet wurde. Überlagern diese sich, stimmt also die Perspektive, treten wie durch Drehen an einer Rändelschraube in der einen Richtung neue Objekte im Grenzbereich hervor, in der anderen zeigt sich eine deutliche Grenzlinie - jedenfalls kann sie durch das Protokoll der Drehung markiert werden. Und jedenfalls als Ergebnis bildgebender Verfahren wird aus der einen Ordnungsstruktur eine durchgängig eigenschaftsbestimmte glatte Darstellungs- oder Manipulationsoberfläche, aus der nun tiefenscharf topologische Netzstrukturen einer bestimmten Größenordnung hervortreten.

Kritische Größen orientieren auch dadurch, dass sie eine Gruppe solcher Figur-Hintergrund-Konstellation festschreiben. Sie werden zu Kennzahlen als Werte, die Systemgrenzen markieren und zunächst deren relative Zuordnung ermöglichen. Es ist zwar richtig, dass jedes definierte, d.h. als Ordnung oder Form beschriebene System eine poröse Grenzoberfläche hat, auf der sich diskrete Zustände nachweisen lassen. Aber diese diskreten Zustände können durch Näherungsverfahren auch zur hinreichenden Charakterisierung des Systems genutzt werden - so wie wir von den zwei volumengleichen Kugelabbildern auf ihr gemeinsames Urbild zurückgeführt werden. Katastrophentheorie und Auswahlaxiome mögen zwar je für sich hinken, aber sie erlauben zusammen jedenfalls den aufrechten Gang und eine orientierte Bewegung. Wir werden die Nanotechnologie auf einer Skala lokalisieren können, auf der Systemgrenzen inner- und außerhalb der Nanotechnologie einander zugeordnet sind.

Die orientierte Gesamtbewegung rehabilitiert nun zwar den paradigmatischen Definitionsansatz der Nanotechnologie, den jene von der Europäischen Akademie eingesetzte Arbeitsgruppe ausgeblendet hatte, allerdings in ambivalenter Weise. Kritische Größen sind auf allen Ebenen auf verschiedene Weise anzusteuern, eindeutig identifizierbare Konstellationen im Grenzbereich, die auf allen Ebenen und zwischen ihnen Nicht-Vertauschbarkeit sichern, Axiologie, Skalierbarkeit und kohärente Topologie dokumentieren und durch zu- oder abnehmende Komplexität sowohl innerhalb dieser

Grenzen als auch in Bezug auf verschiedene Grenzschichten Orientierung ermöglichen. Aber die Nanotechnologie selbst verschimmt dadurch. Sie gerät erst wieder in den Blick, sobald aus den Zahlen auf diesen Skalen jene Kennzahlen werden, die innerhalb dieses durchgehenden Rahmens bestimmte Gestalten vor nur je einem Hintergrund erkennbar werden lassen.

Nanotechnologische Kennzahlen sind kritische Größen, die auf nanotechnologisch bestimmte Hypothesen und Funktionserwartungen antworten. Das ist eine nur scheinbar tautologische Bestimmung, da sich jene Hypothesen untereinander und dann wiederum von anderen Hypothesen und Funktionserwartungen in bestimmter und bestimmbarer Weise unterscheiden. Die Intendierbarkeit von Grenzen überhaupt ist durch die technisch jeweils mögliche Auflösbarkeit bestimmt. Mit der erreichten Auflösungstiefe des Instruments und mit der Stabilität seiner z-Achse sind eine technologische Basis und eine vektorielle Bestimmtheit vorgegeben, die nun gleichsam rückwärts die Agierenden zu technologisch deutlich bestimmbar Manipulationen zwingen, damit ihre Intention sich realisieren und damit innerhalb jenes Rahmen des Machbaren die jeweils intendierten Objekte hervortreten oder durch entsprechende Effekte erzeugt werden. Die Nanotechnologie ist zunächst dadurch lokalisierbar, dass sie selbst jedenfalls immer auch „ganz unten“ tätig ist.

Dieses Bild, in dem wir unsere bisherigen Überlegungen zusammenfassen können, erinnert sicher nicht zufällig an Binnig und Rohrsers Blick durchs Rastertunnelmikroskop: jenem entscheidenden Schritt für die Realisierung nanotechnologischer Visionen. Nanotechnologie kann im Ganzen als Instrument verstanden werden, das als dreidimensionales Fadenkreuz interessante Erkenntnis- und Manipulationsziele in Grenzbereichen ansteuert. Ausgehend von Schwellenwerten in benachbarten Systemen mit topologisch unterscheidbaren Eigenschaften ist die systemische Orientierung „von unten“ her vorgegeben durch das verkettete Beieinander allo- und autopoietischer Prozesse in Grenzbereichen verschiedener Komplexität und Größenordnungen. Wellenlängen und Energiepotenziale unterwerfen allerdings die durchgängige Organisiertheit der Natur jeweils einem derart rigiden Grenzregime, dass selbst bei interdisziplinärer Arbeitsteilung eine technisch induzierte Selbstbegrenzung jeweils bestimmter Arten von Nanotechnologie als nächstes Ergebnis beachtet werden muss.

Es macht einen ablesbaren Unterschied, ob ein Schwellenwert sich verändert oder ob der Zoom anders eingestellt werden muss, um ihn zu erfassen. Aber wir bewegen uns niemals auf einer bloßen Nanoskala, sondern stets in einer topologisch und axiologisch geordneten Welt. Je nach Kennzahl-Konstellation erscheinen am Rande unseres Blickfeldes die Rahmenbezeichnungen in den Semantiken der jeweiligen Hypothesen; wir können sie protokollieren, bis wir einen nanotechnologisch intendierten Grenzzustand erreicht oder ihn definitiv verfehlt haben. Der Skalenwert auf der z-Achse signalisiert mit seinem Abstand aber auch die Möglichkeit, kontrolliert die Perspektive auszuweiten und Vektorstrahlen zu verlängern, bis die Überlagerung bzw. die Überdeterminierung aller Werte und Funktionen durch Systemeigenschaften höherer Ordnung sichtbar wird. Während nun der diskrete Zustand als Wertekonstellation konstant bleibt, werden die Namen auf beiden Seiten der Grenze zum Ergebnis. Sie markieren Geltungsbereiche, in denen Nano-Kennzahlen mehrfach interpretiert werden können oder gar müssen - oder in denen man dies eben nicht mehr darf, weil andere Kontrollpara-

¹ In seinem reifsten Werk, der *Kritik der Urteilskraft* (1790), bestimmt Kant - in fast Darwinschen Ausdrücken - diese immerhin als durchgehende Eigenschaft der Naturdinge.

meter gelten. Bei dieser Bifurkation geht es dann immerhin noch um die Bildung neuer Abhängigkeitshypothesen.

Dabei tritt allerdings zunächst einmal die technische Bestimmtheit je eines Instruments in den Blick. Die Intendierbarkeit ist sodann bestimmt durch die Infrastruktur dieses einen Labors, in dem dieses und nichts Anderes erforscht und geleistet wird, auch wenn dies bei anderen Zielsetzungen, Interessen und Kompetenzen, in anderen interdisziplinären Kooperationen machbar wäre. Nanotechnologie ist ein jeweils auf diese Weise bereits bestimmter technologischer Zusammenhang von Infrastruktur und Institutionen, von bestimmten Intentionen, Verfahren und Erfahrungen. Wir sollten dies nicht vergessen, wenn wir den Zoom derart weiten, dass mit den möglichen Konvergenzkonstellationen der Nanotechnologie die Abhängigkeit solcher Zusammenhänge vom Kontakt und von der strukturellen Kopplung mit anderen Funktionssystemen der Gesellschaft in den Blick kommt. Auch hier geht es um ein Beziehungssystem, in dem die einmal gemessenen Zahlen als Werte steuernd wirken können. Aber erst in der uns aus der Binnenperspektive vertrauten Doppelperspektive von Kontiguität und Überlagerung systemischer Zusammenhänge werden nanotechnologische Kennzahlen zu Dritten Größen, mit denen sich dies gewährleisten lässt.

2.3 Nano-Kennzahlen als Dritte Größen

Dritte Größen ermöglichen stabile Orientierung über Systemgrenzen hinweg (Giddens 1992). Sie erreichen dies, indem sie ähnlich wie die beiden Seiten einer Münze einen ganzheitlichen Wertaspekt mit der Zahlangabe eines konkreten Maßes unauflöslich verbinden. Nanotechnologische Kennzahlen thematisieren in eigentümlicher Weise die technologische Abhängigkeit dieser Stabilität, die im Regelfall unbeobachtet und unbewusst bleibt. Dies ist eine Orientierungschance, die nicht ungenutzt bleiben sollte. Technologien sind noch vor jeder Ausdifferenzierung von Zeichenprozessen der universale Speicher gesellschaftlicher Erfahrungen und Lernprozesse. Die großen Kulturepochen sind geprägt von der Möglichkeit, die Muster generationsübergreifenden Erfahrungswissens auch handwerklich (chirographisch), mechanisch (typographisch) oder elektronisch statt nur durch Körperrhythmen im Direktkontakt zu speichern und zu reproduzieren. In den bildgebenden Verfahren der Nanotechnologie konkretisiert sich das „Leitmedium“⁸ der Kulturepoche, deren Schwelle wir gerade übertreten haben, als technisches Zugriffsmedium, und zugleich wecken die erzeugten Bilder als Realitätsbeweis der Verheißungen einer neuen Schlüsseltechnologie die Aufmerksamkeit der Verbreitungsmedien in einer Zeit, in der die vernetzte Informations- und Kommunikationstechnologien nicht nur die kulturelle Reproduktion, sondern auch die Produktionsverfahren unserer Gesellschaft prägen.

Diese Konstellation erschwert eine sachgemäße gesellschaftliche Orientierung, und sie macht noch einmal verständlich, warum sich die Europäische Akademie bei ihrem Definitionsversuch um eine eingrenzende Definition jener Technologie durch Ausgrenzung im Einzelfall bemüht hat. Wenn wir den Zoom in den Bereich des Labors hinein weiten, erscheint unsere Gegenwart wie im Modell als geschichtlich und kulturell gewachsene Konstellation von Möglichkeitsbedingungen, die jetzt und hier als nanotechnologisches Wissen und Können Realität werden. Das Instrumentarium und die gesamte Infrastruktur sind ja auch ganz real ein Mein, ein evolutionär bewährter Mu-

⁸ Zum Epochen- als „Leitmedienwechsel“ vgl. schon Nethöfel 1992; in Anlehnung an die Torontoer Schule auch Luhmann 1997, S. 190-412 („Kommunikationsmedien“).

sterspeicher, dessen kundiger Gebrauch mindestens ebenso stark wie schriftlich dokumentiertes Wissen positive und negative Erfahrungen speichert und die Kontinuität des nanotechnologischen Betriebes aufrecht erhält. Vor dem Hintergrund von Messbarkeit als Intendierbarkeit geben die gemessenen Zahlen aber nicht einfach eine Rückmeldung über das, was mit Hilfe der Nanotechnologie tatsächlich gemessen und erreicht werden kann. Dritte Größen sind Kennzahlen, die ein gerade erlangtes Wissen speichern, weil „Natur“ als nicht beliebige Antwort auf konkrete Hypothesen und Funktionserwartungen jetzt über diese Zahlen auf Bilder und Erfahrungen verweist, die bestimmte Intentionen interpretieren.

Mit diesen Intentionen entscheiden die Menschen im Labor und in der Werkstatt darüber, was sie mit den ihnen zur Verfügung stehenden Mitteln ansteuern, welches Wissen sie erwerben und was sie lernen wollen und wem sie ihr Wissen und Können zur Verfügung stellen. Ihr Handeln interpretiert abschließend eine bestimmte Medienkonstellation. In der Frage, die sie der Natur stellen, erhält die kulturelle Konfiguration aller Funktionssysteme der Gesellschaft einen Sinn, der von nun an nicht mehr rückholbar ist. Top Down, als autopoietische Hypothese über die Organisationsgestalt des Wirklichen, wird nach möglichen Beziehungen im Grenzbereich von Systemen gefragt. Auch die im Nanobereich arbeitenden Wissenschaftler und Ingenieure werden dabei von mancherlei angeregt, gesellschaftlich wie kulturell scheint vieles möglich und konstruierbar zu sein. Jetzt und hier aber entscheiden sie, wozu das technologisch gespeicherte Potenzial der Gesellschaft genutzt wird: für eine bestimmte Möglichkeit, aus Wissen Bildung werden zu lassen; für bestimmte Drittmittel und Aufträge, die technische Möglichkeiten realisieren und denkbare Produkte: Waren und Geschenke, Medikamente und Waffen wirklich werden lassen. An der Naturfront nimmt die Kultur Gestalt an, und in der Interpretation der Naturwissenschaftler und Ingenieure wird sofort Ernst aus dem Glasperlenspiel der Künstler und dem Gezocke der Politiker mit möglichen Formen und Gestalten.

Bottom up vermitteln nanotechnologische Kennzahlen allopoietische Informationen über das, was zwischen Systemen der Fall ist und über das, was im Grenzbereich geht und was nicht. Als Dritte Größen transportieren jene Kennzahlen Wissen und Können, indem sie gesellschaftliche Konstruktionen in den anderen Funktionssystemen an notwendige Beziehungen binden - wenn die Kommunikation upstream funktioniert. Und wenn sie downstream funktioniert, werden Nanowissenschaftler und Ingenieure, die in diesem Bereich arbeiten, auch nur für solche Entdeckungen und Erfinden haftbar gemacht, bei denen die Verantwortungsspur ihrer Entscheidungen entlang allopoietischer Systemverkettung durch die Labor- oder Werkstatttür tatsächlich zurück zu ihnen führt. Zwischen den Systemen im Objektbereich der Nanotechnologie und den Funktionssystemen der Gesellschaft, zu denen neben der Wissenschaft nicht nur Bildung und Wirtschaft, sondern auch Politik, Recht und Moral gehören, produziert die Nanotechnologie Dritte Größen, in denen „nanotechnologisch intendiert“ in der Tat zunächst und vor allem zwischen dem vermittelt, was intendierbar ist, und dem, was intendiert werden soll und darf.

Spätestens die Cyborg-Horrorbilder einer nanotechnologisch determinierten Zukunftsgesellschaft zeigen der medial vermittelten Öffentlichkeit, dass hier Regelbedarf besteht. Aber die Nanotechnologie zeigt ja auch, wie solche Regelungen möglich sind. Eben nicht durch ausgrenzende Definitionen oder institutionell blind festgeschriebene Zuschreibung von Verantwortung, sondern durch eine wache Konzentration gesellschaftlicher Kommunikation auf das, was in der Nanotechnologie wirklich geschieht. Nanotechnologische Dritte Größen schweißen jedes Mal ein expliziertes Systemverste-

hen mit einer Erklärung durch Teilfunktionen zusammen, und zwar so, dass in der Grenzschicht zwischen zwei benachbarten Systemen eine autopoietische Hypothese an eine allopoietische Verifikationsmöglichkeit gekoppelt wird. Nach diesem Modell, das bereits als Urbild mit einer kommunizierbaren Kennzahl untrennbar verbunden ist, kann man auch in anderen Funktionssystemen nanotechnologisches Verfügungs- und Orientierungswissen zusammenhalten. So könnte man in den entsprechenden institutionellen Zusammenhängen nicht nur angemessene nanotechnologische Sachentscheidungen treffen, sondern diese selbst ließe sich als technologischer Gesamtzusammenhang von außen oder besser: von den Systemgrenzen her im Ganzen sachgemäß orientieren. Denn mit Hilfe jener Dritten Größen lassen sich eine intersystemische Kontrolltheorie und die entsprechenden Kontrollverfahren entwerfen und entwickeln.

Mindestens im Bereich der Nanotechnologie sind Dritte Größen systemtheoretische Bausteine besonderer Art. Sie informieren upstream durch Zahlen eindeutig über Naturkonstanten in singulären Konstellationen. Sie übermitteln „nach oben“ definierte Informations- und Entropieverhältnisse, gemessene Wellenlängen und begrenzte Energiepotenziale. Sie berichten, wo sich topologische Muster in Grenzbereichen unterscheiden und wie sie aussehen, wo sich Grenzen öffnen und schließen, wo Dichte und Widerstand zur Umkehr zwingen, wo etwas haftet oder abgestoßen wird, wo sich Wachstumsrichtungen oder Schleifen zeigen, wo schließlich Funktionen stabil konstruierbar sind, Operationen dauerhaft verkettet werden können und makroskopische Wirkungen erzielbar sind. Und sie tun dies jeweils so, dass dabei konkrete Fragen und Erwartungen, Hoffnungen und Ängste, Kontrollwünsche und Kontrollillusionen, die an die Eigenleistung eines bestimmten Systems gebunden sind, zurückgebunden werden an die konkrete Funktion einzelner Elemente. Dies stabilisiert Rückkoppelungen im Objektbereich. Nun lassen sich auch über die Grenzen von Funktionssystemen hinweg Missverständnisse und Irrtümer vermeiden, Vergleiche und Metaphern kontrollieren, Täuschung und Lüge aufdecken. Durch die prozessuale Selbstbindung der Funktionssysteme an Dritte Größen könnte der allopoietische Ausschluss beliebiger Kopplung zwischen Systemen auch über die Systemgrenzen hinweg eine stabile nanotechnologische Orientierung der Gesellschaft und durch die Gesellschaft ermöglichen.

Dadurch zeigen nanotechnologisch rückgebundene Dritte Größen beispielhaft, wie sich die Systemtheorie von einem Makel befreien lässt, der ihr spätestens seit Luhmanns Integrationsbemühungen der biologischen Autopoiesis-Konzeption und des dort implizierten Spencer-Brownschen Kalküls anhaftet.⁹ Sie wird als bloße Reflexions-, nicht als Kontrolltheorie entwickelt, und daher kann sie den Verdacht, aus ihren radikal-paradoxen Ausgangssätzen sei Beliebiges ableitbar, nicht durch stringente Methodik und kontinuierliche Praxiszusammenhänge entkräften. Dies ist hier anders. Mit den nanotechnologisch induzierten Wissens- und Kontrollmöglichkeiten aus dem Grenzbereich benachbarter Systeme produziert eine Querschnittstechnologie gesellschaftlich wahrnehmbare Effekte. Wer sich auf die zugrunde liegenden Größen konzentriert, dem erscheinen zwar zunächst nur in idealtypischer Rekonstruktion zwei parallele Erkenntnispfade, die „oben“ beim Gegensatz von Erklären und Verstehen, Natur- und Geisteswissenschaften ansetzen können und sich im unendlich Kleinen bei einer kritischen Nanogröße schneiden. Aber wenn man diese Pfade betritt, dann werden auf deutlich unterschiedenen Kontrollebenen jeweils Verfügungs- und Orientierungswissen verkoppelt, in benennbaren Institutionen werden Controllingkriterien entwickelt oder diese versagen dabei erkennbar. Diese Dritten Größen funktionieren auf keiner Ebene wie

⁹ So spitzt Walter L. Bühl seine differenzierte Kritik zu (Bühl 1987; vgl. Bühl 2000, Spencer-Brown 2004).

Leitersprossen, sondern sie sind „hinkende Größen“, die erkennen lassen, wo sich Systemebenen verzahnen oder gar operativ verkettet sind. Indem sie an jeweils genau einer Stelle einen Informationskanal zwischen zwei benachbarten Systemen verschiedener Ordnung als offen oder geschlossen melden, verankern sie „unten“ ein Reißverschlussverfahren, das upstream induktives Wissen bereitstellt und methodisches Können ermöglicht, die durch keine Reflexion zu ersetzen oder einzuholen sind.

Dieses Wissen, dass das Können vorantreibt, wir erinnern uns, entsteht durch eine Art Kernfusion im Zentrum, durch eine schlagartige Dimensionserweiterung und Entgrenzung begrenzter Erfahrung. Die Nichtbeliebigkeit dieser induktiven Erfahrung verweist darauf, dass menschliche Kreativität hier die kreative Grundsicht des Wirklichen berührt und sich an ihr entzündet.¹⁰ Als schlagartiger Übergang bzw. als Perspektivwechsel von der Kontrollebene zum kontrollierten Raum interpretiert, müssen die von Thomas Kuhn beobachteten Diskontinuitäten des Paradigmenwechsels (Kuhn 1976) den von Imre Lakatos und anderen nachgewiesenen Kontinuitäten zwischen Forschungsprogrammen nicht widersprechen (Lakatos 1982). Beide wären nach diesem Modell vielmehr Komponenten einer starken Kreativitätstheorie: mit der Möglichkeit einer stabilisierenden Rückwärtsableitung des Alten als Teil des Neuen.“ Dies ist der Rahmen, in dem Dritte Größen ihre volle Wirksamkeit entfalten könnten. Im Falle der Nanotechnologie sehen wir, wie nach diesem Muster im konkreten Einzelfall etwas Neues entsteht und wir erkennen zugleich, wie wir der Verpflichtung nachkommen können, dieses kreative Potenzial stabil und sachgemäß gesellschaftlich zu orientieren. Jenes Reißverschlussverfahren, mit dem Dritte Größen über Systemgrenzen und Ordnungsebenen hinweg stabile Orientierung ermöglichen, muss sich im Fall der Nanotechnologie als Innovationstheorie und in trans- und interdisziplinärer Zusammenarbeit bewähren. Denn wie die Nanowissenschaften intrasystemisch exemplarisch zeigen, setzen intersystemische Modelle zwar die Geltung des Auswahlaxioms voraus. Aber im Unterschied zu Definitionen sind Aussagen mit Dritten Größen wahrheitsfähig.

3. Das innovationstheoretische Potenzial Dritter Größen im Bereich der Nanotechnologie

Wenn wir uns abschließend umschaun, erscheint die Innovationstheorie wie ein zusammenhängendes Frageraster, auf das jedenfalls im Bereich der Nanotechnologie Dritte Größen Antworten geben könnten. Das bestätigt sich bei einem Rückblick auf den Definitionsversuch der Europäischen Akademie und schließlich durch einen Vorblick auf ein Forschungsprogramm, mit dem sich einige weiterführende Hypothesen überprüfen lassen. Es reagiert auf das voraussehbare Scheitern aller Versuche, nanotechnologische Orientierung dauerhaft an definierende Orientierungsmuster zu binden.

3.1 Der innovationstheoretische Hypothesenrahmen

Die Nanotechnologie ist sicher ein heißer Kandidat für die nächste Schlüsseltechnologie unserer globalisierten Gesellschaften. Manche sehen mit ihr sogar einen neuen langwelligen Kondratieff-Zyklus anbrechen oder wieder einmal die Möglichkeit des tapferen Ritters, mit den Waffen der Wissenschaft Tod und Teufel endgültig aus der

¹⁰ Vergleiche den Anfang von Abschnitt 2.2.

" Entsprechende Modelle schon bei Nethöfel 1992.

Welt zu vertreiben. Der Rahmen, in dem sich die realen Innovationspotenziale abschätzen, fördern oder gar gestalten lassen, kann hier nur skizziert werden. Auch stehen Innovationstheorien gegenwärtig vor erheblichen theoretischen wie methodischen Problemen, und sie sind praktisch herausgefordert. Uns sollte jedoch aufmerken lassen, dass auch in der Innovationstheorie das Neue intersystemisch zum Thema wird: von der Entdeckung in der Forschung über die Erfindung im Anwendungsbereich und die Durchsetzung eines Produkts auf dem Markt bis zur Bewältigung institutioneller und kultureller Integrationsherausforderungen, vor die das Neue das Gesellschaftssystem im Ganzen stellt. Und wenn wir den Anforderungskatalog betrachten, der sich aus dieser Aufgabenstellung ergibt, so stellen sich Assoziationen zu möglichen Orientierungsfunktionen Dritter Größen aus dem Bereich der Nanotechnologie ein.

Dies zeigt sich sogleich angesichts der durchgehenden Schwierigkeit, dass der Gegenstand jener Theorien in einem ständigen Perspektivwechsel mal als orientierendes Muster, mal als markantes Bild erscheint. Sicher geht es im Ganzen um einen Gestaltwerdungsprozess, so dass die singulären Größen, über denen jene Innovationstheorien operieren am Anfang eher jener einen und am Ende eher jener anderen Erscheinungsform zuzuordnen sind. Aber es sollte auch am Ende nicht vergessen werden, dass „unterwegs“ die charakteristischen Bausteine dieser Theorien am leichtesten negativ zu kennzeichnen sind. Es führt in der weiteren Anwendung zu Widersprüchen, wenn man versucht, sie entweder als Form oder als Inhalt, quantitativ oder qualitativ festzuschreiben: eben als ob es sich um die uns aus dem Bereich der Nanotechnologie bekannten Dritten Größen handele. Innerhalb des weiten innovationstheoretischen Rahmens bewirken sie zwar digitale Entscheidungen, nach denen sich von mehreren möglichen Formen nur eine realisiert, aber diese entfalten in Entscheidungsbäumen kaskadenförmig Konsequenzen, was wiederum zugleich Ausgangspunkt neuer Entscheidungen ist, gestaffelte Hintergründe aufbaut und zum Entstehungs- und Verstehensprinzip neuer komplexer Formbildungen wird. Typischerweise überbrücken jene Größen dabei nicht nur im Objektbereich System-, sondern im Metabereich auch Theorieschichten, also etwa den Unterschied zwischen Produktanforderung und Produktgestalt, zwischen Muster, Modell und Produkt, zwischen Innovationskompetenz, Motivation und Performanz innerhalb einer Organisation. Je nach Interpretation und Anwendungsbereich der Innovationstheorie entscheiden Schwellenwerte oder Formkriterien innerhalb eines Prozesses über Entwicklungspfade.

Angemessene Interpretationen des gesellschaftlich Neuen, das entsteht, charakterisieren über solche Werte singuläre Prozesskonstellationen. In Organisationen lassen sich Raster mit Katalysatorfunktionen identifizieren, die wie Schnittstellen als stabiles Arrangement digitaler Entscheidungen zur komplexen Voraussetzung anschließender Formbildungen werden. Leistungsfähige Innovationstheorien scheinen darüber hinaus gekennzeichnet zu sein durch eine singuläre Anfangskonstellation, einen rekursiven Kalkül und eine algorithmische Lösung. Daraus ergeben sich dann einerseits typische Dynamiken, andererseits immer neue Formen. Das qualifizierte Wahrnehmen der Ergebnisse (und auch eine konsistente Verwendung der jeweiligen Theorie) verbindet das Verstehen eines Produkts mit dem Hintergrund seiner zwar unverwechselbaren, aber auch als solcher durchschaubaren Entstehungsgeschichte. Voraussetzung der Möglichkeit, diese Geschichte von der Entstehung und vom In-Erscheinung-Treten des Neuen

¹² Der hier vorgelegte Versuch vertieft die Theorie Dritter Größen, die ich im Rahmen des Buchmanuskripts „Innovation. Die Formel“ breiter entfaltet habe (Nethöfel 2006b).

zu erzählen oder zu inszenieren, ist demnach eine Zwei-Komponenten-Theorie, die im Reißverschlussverfahren beide Aspekte miteinander verkoppelt.

Innovationstheorien müssen Größen postulieren, die in gesellschaftlichen Zusammenhängen immer zwischen Kultur und Markt vermitteln, wenn man diese beiden Funktionsbereiche der Gesellschaft in einem weiten, innovationstheoretisch plausiblen Sinn versteht. In den Anfangsphasen eines Innovationsprozesses entkoppeln sie als Orientierungsmuster existierende technische und Marktgestalten, transponieren sie als Ausgangsmaterial in den Bereich der Kultur als das kreative Große Spiel möglicher Gestaltungen und bilden dann in den Endphasen die Gestalt filternden und Gestalt bildenden Eingangstore zurück ins Reich der technischen und ökonomischen Notwendigkeiten. Sie lassen Inventionen und Innovationen in Erscheinung treten und erklären im Nachhinein, warum sie als Erfindungen funktionieren und als Produkte erfolgreich sind - oder eben nicht. Institutionalisiert machen sie deutlich, warum auch Verfahren Inventionen sein können und warum Innovationsprojekte Organisationen verändern, wenn sie tief greifen. Als mikropolitische Arrangements zeigen sie auch, was der technologische Aspekt von Innovationen ebenfalls eher verdeckt: Entscheidungen wirken auch durch verworfene Möglichkeiten kaskadenförmig weiter. Entwicklungen entkoppeln sich von Intentionen. Sie erzeugen nicht-intendierte Produkte, Verfahren und Institutionen, sie können in Sackgassen führen oder „hinter sich“ dauerhaft Innovation verhindern.

Nach dieser Beschreibung erwarten wir bereits die sich im Innovationsbereich tatsächlich durchgehend manifestierenden praktischen Kontrollprobleme. Es ist gesellschaftlich unzugänglich, aber im Einzelfall schwierig, Verantwortung für Innovationen zuzuschreiben und zu übernehmen. Und was mit den Schwierigkeiten effektiver Regelung endet, setzt bei den Schwierigkeiten effizienter Förderung ein. Bereits bei der Kreativitätsförderung des Einzelnen gehen wissenschaftliche Organisationspsychologie und die Praxis des Managementtrainings getrennte Wege. Nachlaufende institutionelle Anreize sind nur zufällig wirksam; sie werden regelmäßig dupiert durch ebenso effizient wie effektiv emergierende Netzwerke. Offenkundig ist schließlich das praktische Versagen der Theorie bei der Regulierung gesellschaftlicher Innovationskonflikte. Gesucht wird das Formprinzip einer Erzählung oder das Konstruktionsprinzip eines Drehbuchs, worin in realen Umwelten reale Akteure am Ende eines Innovationsprinzips erwünschte Ziele erreichen. Wir bräuchten dazu gelingende Dialoge zwischen Akteuren aus verschiedenen Funktionssystemen, und dies setzt wiederum die gemeinsame Orientierung an intersystemisch wirkenden Merkmalen voraus, an denen sich das entstehende Neue durchgängig ausrichten könnte.

Anfang, Ende, und Umfang von Innovationsprozessen markieren allerdings den nanotechnologischen Bereich Dritter Größen, der zuvor wie von selbst in den Blick kam, als operativ geschlossenen Teilbereich eines Feldes notwendiger Beziehungen, das im Ganzen gekennzeichnet ist durch absehbare strukturelle Koppelungen sowie durch die axiologische und topologische Bestimmbarkeit singulärer Konstellationen. Auf diesem Feld ist die Nanotechnologie nicht nur praktisch wichtig oder pragmatisch interessant, weil sich hier bereits das ganze Spektrum medialer Thematisierungen beobachten lässt, während der Frontverlauf der veröffentlichten Meinungen noch nicht durch ideologische Schützengräben markiert ist. Und die singuläre Bedeutung von Bildvorstellungen für die Konzeption und für die Realisierung der Nanotechnologie macht das jeweilige nanotechnologische Medium noch nicht selbst zur Botschaft der Nanotechnologie. Aber die Art und Weise, wie dieser Hintergrund bei jedem angemessenen Verständnis nanotechnologischer Innovationen in immer neuen Kontexten aktua-

liert werden muss, verweist auf eine Selbstthematization des technischen Mediums als Formelement gesellschaftlicher Kommunikation, die innovationstheoretisch genutzt werden sollte. Es geht in diesen medialen Konstellationen jedes Mal um Bilder, die sich einprägen, weil in ihnen eine Semantik, die für verschiedene Betrachter „Sinn macht“, kontingent aber unwiderruflich an eine nanotechnologisch identifizierte Topologie und Axiologie gebunden ist. Ob einer von ihnen dies versteht oder missversteht, ob er das, was er sieht begrüßt oder ablehnt: er erzählt mit seiner eigenen auch jene Geschichte der Nanotechnologie weiter.

Dass und wie die kreative Grundsicht der Welt zum Grenzphänomen unserer Gesellschaft wird, wenn wie in der Nanotechnologie Grenzphänomene zum Thema einer Wissenschaft und zum Gegenstand einer Technologie werden, könnte aufschlussreich sein für die Art und Weise, in der wir uns auch in anderen Innovationsprozessen über Systemgrenzen hinweg orientieren können. Und die Bestätigung der Vermutung, dass sich am Beispiel der Nanotechnologie und ausgerichtet an Dritten Größen aus diesem Bereich eine Innovationstheorie als intersystemische Kontrolltheorie entwickeln lässt, dürfte auch zum vertieften Verständnis ihrer spezifischen Eigenart beitragen. Mit Hilfe jener Größen lassen sich Kontrollverfahren entwerfen, die sich in inter- und transdisziplinären Dialogen bewähren müssten. Diese Hypothese lässt sich begründen und konkretisieren, wenn wir bilanzierend zurückblicken und dabei liegen gebliebene offene Enden unseres Diskurses abschließend wieder aufnehmen. Definitivische Abgrenzungsversuche der Nanotechnologie werden dann zum Hintergrund einer tiefer angelegten Alternative: der Orientierung an Definitionen oder an Dritten Größen im Kontext von Innovationsprozessen.

3.2 Noch einmal: die Definition-Studie der Europäischen Akademie

Die Studie der Europäischen Akademie dokumentiert die Problematik des definitiven Orientierungsansatzes schon dadurch, dass sie Brücken in den Anwendungsbereich schlägt, nachdem sie vorab die Brücken zum Bereich der Nanotechnologie als Wissenschaft gekappt hat. Nicht für diese selbst, nur für die Reflexion über sie seien Definitionen wichtig (Schmid *et al.* 2003, S. 11). Aber schon der Relevanznachweis für die Folgeabschätzung der Nanotechnologie (nanotechnology assessment, NTA) will nicht recht gelingen, obwohl oder vielleicht weil die Autoren ihre Ergebnis handlich zusammenfassen. Es gehe um „newly appearing effects on the nanoscale“, und deren intersystemische Anschlussfähigkeit und -bedürftigkeit sei offenkundig (ebd., S. 109). Um dies zu belegen, unterscheiden sie zwischen einer strukturalen und einer inhaltlichen Erschließung des NTA-Feldes.¹³

Als solche thematische Bereiche („dimensions“) nennen die Autoren den wissenschaftlichen und technischen Fortschritt, Wirtschaftswachstum, Nachhaltigkeit („sustainability“), ethische Fragestellungen und die darüber hinausführenden Fragen nach zukünftigen Selbstbildern von Mensch und Gesellschaft („future models of mankind and society“) (ebd., S. 112). Die nanospezifische Erläuterung dieser Bereiche reproduziert dann aber eine Typologie herkömmlicher technology assessment (TA) Studien¹⁴, und es ist nicht abzusehen, nach welchen Prinzipien sich von ihr aus das Feld möglicher NTA-Studien erschließen sollte. Mit zunehmender Komplexität der teilweise sich

¹³ Dies in Anlehnung an Fleischer 2002; 2003.

¹⁴ Diese Typologie umfasst „foresight (scenario-oriented) or forecasting (more predictive)“, „economic innovation“, „case studies“, „life cycle assessments“, „future ethics“ (Schmid *et al.* 2003, S. 112).

überlagernden Objektbereiche solcher Studien zwischen allen gesellschaftlichen Funktionssystemen dürften sich die Diskussionen erheblich erschweren. Dies gilt insbesondere, wenn sich gewissermaßen nachträglich herausstellt, was sich hinter der scheinbar griffigen Definitionsformel der Europäischen Akademie verbirgt: die Forderung, jede abgrenzende Formulierung durch ein Verfahren abzusichern, an dessen logischem Ende die Einzelfallprüfung steht.

Die relative Stärke dieses Vorgehens kommt auch bei der angeblich strukturalen, besser: der funktionalen Erschließung des NTA-Feldes nicht zum Tragen. Hier hatte schon Fleischer zunächst innovationslogisch zwischen nanotechnologischer Unterstützung von Weiterentwicklungen und der nanotechnologischen Voraussetzung („enabling“) neuer Produkte und Verfahren oder ganzer Systeme unterschieden und dann entsprechend zwischen aktuell-stoffbezogener, konkret entwicklungsbegleitender und systembeobachtender NTA (a.a.O., S. 111 f). Die Studie folgt Fleischers Ansatz mit der Unterscheidung zwischen TA bei nanotechnologisch unterstützter Substitution einzelner Komponenten und nanotechnologisch ermöglichter Neuentwicklung. Daran schließt sich die Unterscheidung von Technikfolgestudien an, die sich entweder auf die Strukturförderung nanotechnologischer Forschung oder auf öffentliche Nano-Diskurse beziehen („the relation between nanotechnology and the public“). Ist schon diese Unterscheidung nicht wirklich schlüssig, da auch bei Substituierungen und Neuentwicklungen jene thematischen Dimensionen ausdrücklich mit einbezogen werden, so überrascht hier nun um so mehr, dass weder der vorgebliche noch der eigentliche Ertrag der Studie explizit gemacht wird, die sich ja ausdrücklich in den Dienst der Technikfolgenabschätzung stellt.

Die Studie legt den Schluss nahe: Weil x qua Definition „Nanotechnologie“ genannt werden darf, darf man darauf Erkenntnisse, Regeln und Maßnahmen beziehen, die zuvor in Bezug auf die Nanotechnologie im Ganzen erarbeitet wurden. Sie besagt aber eigentlich nur: x hat ganz bestimmte Eigenschaften (und kann daher Nanotechnologie genannt werden). Man kann der Studie vorwerfen, dass sie damit systematisch ein gesellschaftliches Missverständnis über diese Technologie produziert oder genauer: dass sie damit die üblichen gesellschaftlichen Missverständnisse über die Nanotechnologie im Einzelnen zersplittet, im Ganzen aber verfestigt. Aber damit verstellt man sich zugleich den Blick auf ihre eigentliche Leistung. Ihre Kommunikation als Definitionslösung der NTA-Aufgabe überfordert die umfangreiche Zusammenstellung der Einzelergebnisse nicht nur: sie unterfordert sie zugleich. Denn diese werden ja überdeterminiert durch einen konsequenten Verfahrensweg. Wie wir gesehen haben, schreibt die Definition, richtig gelesen, einen Verfahrensalgorithmus fest. Ob er sich in dieser Form wirklich in den Dienst gesellschaftlicher Kommunikation stellen lässt, darf weiterhin bezweifelt werden. Aber es wäre konsequent gewesen, aus den Klassifikationsverfahren, aus den Stufen und Typologien der Näherungswege, spätestens angelehnt an die Kategorien der Definitionstableaus alternative NTA-Lösungsverfahren abzuleiten und diskussionsstrukturierende Problemknoten zu benennen.¹⁵

¹⁵ Dies geschieht auch nicht in der Abschätzung des ökonomischen Potenzials, mit der die Studie der Europäischen Akademie schließt („Commercial Potential of Nanotechnology - A First Look“, Schmid *et al.*, S. 114-120). Hier argumentiert sie sogar gegen eine Beschränkung der Nanotechnologie auf technologische Merkmale, während sie einleitend ihren Definitionsversuch damit begründete, gerade (forschungs-)politische und ökonomische Prognosen setzten technologisch-objektive Definitions- als Ausgrenzungskriterien voraus („Which Purposes Should a Nanotechnology Definition Serve?“ (S. 21-23; vgl. Decker *et al.* 2004, S. 11).

Dass dieses Selbstmissverständnis tief geht, beweist der Testfall Nanobiotechnologie. Es beginnt intrasystemisch. Die Studie hält vermutlich bei nachgewiesenen diskreten Größen eine Anschlussfähigkeit über hinreichend kleine Volumengrößen für möglich. Aber damit wäre zugleich ein Ausgrenzungskriterium festgeschrieben, das dem eigentlichen Ansatz der Studie widerspricht. Ihm zufolge gilt nämlich eine Unterscheidung genau so viel, wie der Weg, der zu diesem Ziel geführt hat und der als solcher die konkreten Eigenschaften einer bestimmten Nanotechnologie an einem bestimmten Ort im Verfahrensprotokoll festschreibt. Genau diese Orientierung brauchen wir als Hintergrund, wenn wir auf die Probleme schon interdisziplinärer Nanokommunikation achten und auf die Praktiker hören. Hier geht es nicht darum, ob eine Kunststoffolie von einem Kilometer Länge, einem Meter Breite und 50 Nanometer Stärke ein Nanoobjekt ist. Selbst bei den im selben Messbereich „konvergierenden“ Top-Down- bzw. Bottom-up-Verfahren stehen unterschiedliche, Forscher und Ingenieure tief prägende Fachtraditionen im Hintergrund, die jeweils das Hintergrundverständnis derselben Messgrößen bestimmen. Allerdings spielen Größenordnungen eben doch eine Rolle, weil Industriechemiker immer noch „große“ Mengen erwarten, während Nanowissenschaftler an bestimmte Materialeigenschaften und Bauelemente denken und Erfolg nicht in Tonnen messen, sondern ihre Intention auf Oberflächeneigenschaften und spezifische Funktionen richten. Weitere Verständigungsschwierigkeiten beziehen sich auf den Aufwand, mit dem sich Intentionen verwirklichen lassen. Wenn ein Chemiker einem Mediziner ein neues Nanomaterial verspricht, verknüpft er damit durchaus eine entsprechende Entwicklungszeit für die chemische Entwicklung des neuen Stoffes, die Jahre in Anspruch nehmen kann, während der Mediziner vielleicht gleich nach dem Gespräch die Versuchstiergenehmigung einholt. Umgekehrt stellt der Chemiker häufig Physikern oder Mediziner eine Fülle von Stoffen zu Screeningzwecken zur Verfügung, nicht wissend, dass die betreffenden Kollegen überhaupt erst ein geeignetes Instrumentarium aufbauen oder Testverfahren etablieren müssen, weil sie eher statistisch arbeiten.

Wenn wir die Studie der Europäischen Akademie also möglicherweise besser verstehen, als diese sich selbst jedenfalls darstellt, dann sollten wir ihrem Definitionsversuch im Ganzen als Hinweis auf die Kontinuität des nanotechnologischen Praxiszusammenhangs folgen, in dem solche Missverständnisse sich entweder klären oder aber zu definitiven Ausschlüssen führen.

3.3 Dritte Größen und „Integral Innovation“: ein Marburger Schritt auf einem langen Weg

Laut Francis Bacon sind „middle axioms“ „true and solid and living axioms, on which depend the affairs and fortunes of men“, und der Ökumenische Rat der Kirchen entwickelte von solchen Mittleren Axiomen her seine Leitbilder einer „responsible“ bzw. einer „just, sustainable and participatory society“. ¹⁶ Aber im Großen wie im Kleinen entsteht bald die Frage, wie sich so ein Rahmen anders füllen lässt als durch ein geduldiges, pragmatisches, fachkundig-abwägendes Vorgehen, das Fall für Fall zwischen dem harten Kern eines Innovationsgeschehens und den gesellschaftlichen Intentionen vermittelt, die sich darauf beziehen. Wir haben gesehen, dass im Falle der Nanotechnologie Dritte Größen diesen Rahmen intra- und intersystemisch füllen würden. Lässt

¹⁶ Einen Überblick und einen analytischen Ansatz bietet Schummer 2004.

¹⁷ Siehe Francis Bacons *First Book of Aphorisms, CIV*. Zur Entwicklung dieser Konzeption in der Ökumenischen Bewegung vgl. Forrester 1989.

sich dies in einen kontrolltheoretischen Rahmen einzeichnen und verallgemeinern, und lassen sich die so gewonnenen Erkenntnisse auf andere Zusammenhänge übertragen - im Dienste wechselseitiger Orientierung gesellschaftlicher Funktionssysteme, die nur zusammen Innovationen generieren und die gemeinsam auf sie reagieren müssen? Auf diese Fragen erhoffe ich mir Antwort von einem Modellprojekt unserer interdisziplinären Marburger NanoGroup.¹⁸

Im Bereich der Nanotechnologie treiben Projekte angewandter Grundlagenforschung Innovationsprozesse voran. Sie lassen sich in einem transsystemischen Modell abbilden, um dessen Kontrolle sich ein „idealer Investor“ bemühen muss. Sein Kontrollraum ist jener Natur-Kultur-Zusammenhang, in dem Dritte Größen Formbildungsprozesse erschließen. In ihrer institutionellen Fortsetzung tritt Evolution im ökonomistischen Gewand auf und gestaltet Formprozesse „durch *Knappheit* und durch *Liebe*“.¹⁹ Im Rahmen von Zweikomponententheorien, an denen sich dieser Investor selbst orientiert, und durch die Reißverschlussverfahren, mit denen er seine Intentionen umsetzt, thematisieren Dritte Größen auch die eigentlich heuristische Funktion von ökonomistischen Rational-choice-, Principal-agent- und Property-rights-Theorien, die sonst unbewusst bleibt und zur Ursache neoliberaler Kontrollverluste wird. Indem er diese ebenso vermeidet wie die gesellschaftlichen Risiken der Überregulierung setzt der „ideale Investor“ die Leitvorstellung der Marburger NanoGroup um. Er ist Modellagent von „Integral Innovation“. Da er an einem kontinuierlichen Zufluss öffentlicher wie privater Mittel interessiert sein muss, will er sein Geld nur in die Herstellung eines in jeder Hinsicht „guten“ Produktes investieren: Es muss aus einem Forschungsprozess hervorgehen, der neue Erkenntnisse verspricht und wissenschaftsinternen wie -externen Forschungsstandards genügt. Es muss sich als „neu“ auf dem Markt durchsetzen und den dort geltenden Produktstandards genügen. Es muss über die unmittelbare Marktbeziehung hinaus nachhaltig gesellschaftlichen Bedürfnissen und Standards gerecht werden.

Modellinstrument ist ein integrierter Forschungs- und Business-Plan. In dieser Form entspricht dem Frage- und Kontrollbedürfnis des Investors eine möglichst plausible Innovationsstory. Diese versucht den Innovationsprozess in einem Algorithmus von Argumenten abzubilden: als Quellcode Dritter Größen, die Umsetzungsvorschläge in eine rekursive Syntax einbinden. Sie lassen diese Vorschläge zunächst als sinnvoll innerhalb einer Gesamtvorstellung erscheinen, da sie diese mitthematisieren. Sie müssen aber gleichzeitig innerhalb des Projektplans und der Gesamtrechnung als Controllingvorgaben funktionieren. Der Investor wird also motiviert durch eine Vision, die einen Zusammenhang von Bildern erzeugt. Er verfügt aber gleichzeitig über Kennzahlen, die aus dem Forschungsprozess hervorgegangen sind und die nun im Rahmen benachbarter oder überterminierender Systeme als überprüfbare Funktionserwartungen formuliert werden. So wären auch nanotechnologische Grenzwerte nicht mehr bloß vertragstheo-

¹⁸ Ich formuliere so, weil ich als Koordinator das Projekt trotz eines weitgehenden Verfahrenskonsenses für theoretisch und methodisch modifizierte Zielvorstellungen offen halten möchte. Die konzeptionelle Bedeutung geht über sozialetische Anwendungsfragen hinaus (Nethöfel 2001). Die Rekonstruktion einer Nano-Organisation, die anwendungsbezogene Grundlagenforschung betreibt, lässt sich als Innovationsmodul zum Grundelement eines Innovationsmodells machen (Nethöfel 2006b).

¹⁹ So müssten wir den sarkastischen, aber einschlägigen Schiller-Vers variieren, weil die Natur im Bereich der Kultur eine eigene Sprache spricht: „Doch wie es wäre, fing der Plan/ Der Welt nur erst von vorn an./ Ist in Moralsystemen/ Ausführlich zu vernehmen/ ... Doch weil, was ein Professor spricht,/ Nicht gleich zu Allen dringet./ So übt *Natur* die Mutterpflicht/ Und sorgt, dass nie die Kette bricht./ Und dass der Reif nie springet./ Einstweilen, bis den Bau der Welt/ Philosophie zusammenhält./ Erhält sie das Getriebe/ Durch Hunger und durch Liebe“ (Die Weltweisen. Die Taten der Philosophen, 1795).

retisch als Ergebnis eines Konsensverfahrens zu bestimmen, sondern als Regelgröße in den Netzplan eines Projektschemas eingebunden.

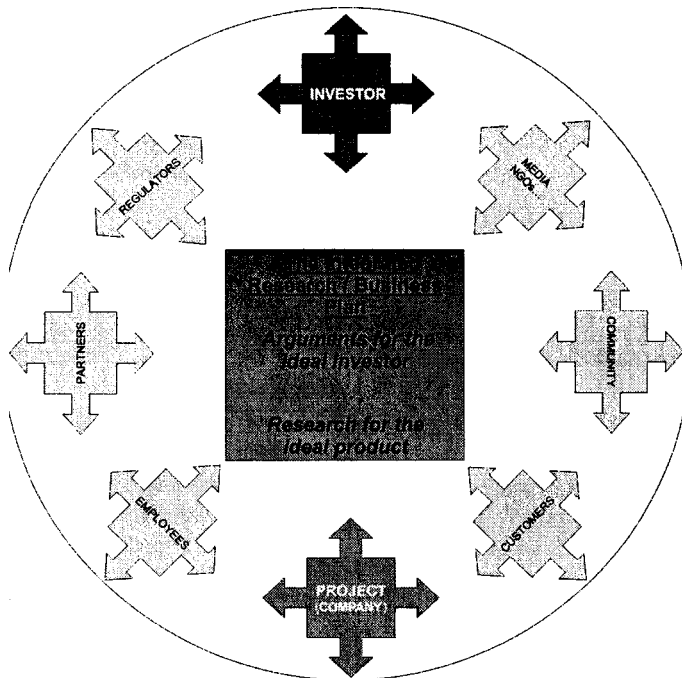


Abbildung 2: Integrated Research/Business Plan-Tool, NanoGroup Marburg.

In Marburg wird dieser Quellcode Dritter Größen als Open Source in einem Projekt-Netzwerk funktionieren, das nanotechnologische Innovationsmodule koordiniert. Das Schema des integrierten Forschungs- und Businessplans inspiriert, reguliert und dokumentiert deren Funktionen; es macht sie vergleichbar mit realen nanotechnologischen Innovationsmodulen aus verschiedenen nationalen Innovationssystemen. Die interdisziplinäre Marburger NanoGroup hat die Zusage von Nano-Arbeitsgruppen aus aller Welt, die Arbeit junger Wissenschaftler im Bereich angewandter Grundlagenforschung in das Projekt einzubeziehen. Dabei kann sie sich bereits jetzt auf ein interdisziplinäres Young Scientists' Network stützen. Es hat sich vor allem um die Ausarbeitung von Summer-School-Konzeptionen verdient gemacht, in ihm soll aber auch zwischen gemeinsamen Projektveranstaltungen die Arbeit koordiniert und erforscht werden. Während hier durch schemagenerierte Fragebögen vorrangig Material für die Zulassungsarbeiten der Marburger Bearbeiter der Teilprojekte generiert wird, dient jener Plan während der Summer Schools vor allem der Arbeitsstrukturierung und der Sensibilisierung der Bearbeiter der Nanoprojekte. Während das Schema selbst einen holographischen Lernalgorithmus vorgibt, in dem alle Inputs in den auszuarbeitenden Investor-Vorschlag eingehen, stellt die Veranstaltungsform methodische wie Funktionssystemgrenzen systematisch in Frage. An den internationalen und interkulturell gemischten Teams, die am möglicherweise nur teilsimulierten Wettbewerb um Drittmittel teilnehmen, arbeiten als teilnehmende Beobachter auch die Young Scientists aus den Sozial-, Wirtschafts- und Kulturwissenschaften mit. Bei der Informationsvermittlung soll der Brückenschlag erprobt werden. Die Mitglieder der Nanogroup und die eingeladenen Refe-

renten bieten fachübergreifende Expertise an, vor allem aber werden Stakeholder aus einem systemisch neu formulierten Stakeholdermodell ansprechbar sein: reale Investoren, weiter verarbeitende Industrie, Patientengruppen, Anwohner, Anwälte einer besorgten Öffentlichkeit: Open Space. Das Modellinstrument hat dann das (ergänz- und spezifizierbares) Funktionsschema von Abbildung 2.

Das Prinzip rückmeldender Orientierung an Dritten Größen soll innerhalb des Modellrahmens auf allen Ebenen die Orientierung durch ausgrenzende Definitionen ersetzen. Dies gilt zunächst für die Integration transdisziplinärer Kontakte und Dialoge in die meist von Anfang an interdisziplinäre nanotechnologische Zusammenarbeit.²⁰ Es setzt sich fort im Bereich der Moral, in dem sich das Spektrum von der Sensibilisierung für eigene und fremde Wertvorstellungen über deren Dokumentation bis hin zur Vermittlung nanoethischen und metaethischen State-of-the-art-Wissens erstreckt (Ach & Jömann 2005, Baumgartner 2004, Grunwald 2004). Die Vermittlung von prägenden Bildungserlebnissen bei den Young Scientists sowie die Aufbereitung der Projektergebnisse für zukünftige Schulungen sind in die Gesamtkonzeption des Projekts eingegangen. Bestandteil des Integral-Innovation-Konzepts ist die Weiterentwicklung der üblicherweise nachklappenden, allenfalls entwicklungsbegleitenden TA-Praxis. Es hat Gründe, dass diese nach dem Eingeständnis der TA-Mitbegründer Joseph und Vary Coates in den USA „widely known“, aber „virtually unpracticed“, in Europa zwar „innovative and creative, but at the same time often more piecemeal and expert-driven“ ist.²¹ Erst wenn verkettete Dritte Größen Konstellationen des Innovationsprozesses durch Soll-Ist-Vorgaben markieren und so diesen im Ganzen controllingfähig machen, wird dieser weder durch qualitative Festschreibungen blockiert noch lässt seine Dynamik inhaltliche Zielsetzungen und Normvorgaben ins Leere laufen, weil sie schon bei der nächsten Stufe der Produktentwicklung nicht mehr greifen. Im Rahmen des vorgeschlagenen Projekts würde ein forschungsintegriertes NTA upstream Größen generieren, die downstream kaskadenförmig regulieren - und zwar über die Grenzen von Funktionssystemen hinweg. Alles andere wäre dem „idealen Investor“ zu riskant; der Investor im Rollenspiel wird die vorgelegten Übungs-Geschäftspläne kritisieren und gegebenenfalls durch Nachfragen Korrekturen veranlassen. So zeichnen sich vielleicht Steuerungsmöglichkeiten ab, die auch bei der gegenwärtigen europäischen Bemühung um die angemessene Förderung der Nanotechnologie als einer konvergierenden Technologie hilfreich sein könnten.²² Und Innovationstheorien würden ungleich leistungsstärker durch eine kontrolltheoretische Komponente, in der interne (nano-)technologische Kennzahlen als Dritte Größen in anderen Funktionssystemen und in der Gesellschaft im Ganzen orientierend wirken können.

²⁰ Vgl. dazu Schmidt 2005, Schmidt & Grunwald 2005 und Mittelstraß 2005 im Schwerpunktthemen-Heft *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis* 14, H. 2: „Method(olog)ische Fragen der Inter- und Transdisziplinarität - Wege zu einer praxisstützenden Interdisziplinaritätsforschung“, sowie speziell zur Nanotechnologie Schummer 2004.

²¹ Coates & Coates 2002, S. 99f.; vgl. Fleischer 2002.

²² Nethöfel 2006a leitet ausführlich her, dass etwa die folgenden aufeinander verweisenden Axiome eine Lösung der Förderungsproblematik von Nanotechnologie im Zusammenhang der konvergierenden Technologien (KT) darstellen können: *Axiom I: KT dürfen nur innerhalb einer übergreifenden „Enabling“-Konzeption gefördert werden:* Ein beantragtes Projekt sollte nur dann als „konvergierend“ verstanden und mit dieser Begründung EU-gefördert werden, wenn nachgewiesen werden kann, dass sein Ergebnis für ein zweites Projekt aus einem anderen Bereich notwendige Voraussetzungen bereitstellt. *Axiom II: KT-Förderung muss anschlussfähig sein an die bisherige Entwicklung (und Förderung) der Nanotechnologie:* Ein Projekt sollte nur dann als „konvergierend“ verstanden und mit dieser Begründung EU-gefördert werden, wenn nachgewiesen werden kann, dass seine Förderung in einen plausiblen Zusammenhang mit der bisherigen Entwicklung (und Förderung) der Nanotechnologie steht.

Unabhängig von der Realisierung und vom Gelingen des Projekts sind einige nanotechnologische Sachargumente gegen die Orientierungsfunktion nanotechnologischer Definitionen. Da in ihrem Zentrum wissenschaftliche Erkenntnis im Grenzbe- reich einen intersystemisch wirkenden Innovationsprozess vorantreibt, ist sie nicht allein gefährdet, wenn dauerhaft ausgrenzende Merkmale unter dem Risiko mikropolit- ischer Erwägungen qua Verfahren festgesetzt werden. Es ist riskant, Streuverluste ver- meiden zu wollen, indem man alle „falschen“ Nanokandidaten ausscheidet und den Rest fördert. Solange keine verallgemeinerbaren Projekterfahrungen mit der intersy- stemischen Orientierung durch Dritte Größen vorliegen und solange diese noch nicht über Systemgrenzen hinweg ein Controlling von Rückkoppelungen ermöglichen, emp- fiehlt sich als praktische Alternative im Einzelfall die Anschlussfähigkeit zu prüfen, indem man versucht, mit den in Aussicht gestellten Möglichkeiten die Geschichte der Nanotechnologie plausibel weiter zu erzählen. Was spezifische Förderaxiome im Detail und „von unten“ bewirken würden, ließe sich so „von oben“ wahrscheinlicher machen: der nanotechnologische Evolution wenigstens nicht im Wege zu stehen, solange man nicht wissen kann, welchen Weg sie nimmt und man nicht absehen kann, wo sie schaden könnte. Die interne Kohärenz dieser Geschichte und die Stimmigkeit der Varianten, mit denen sie in anderen: zufällig kontrollierenden Funktionssystemen nacherzählt wird, kann die permanente Orientierung an Controlling-Kennziffern in gesellschaftlichen Kooperations-, Konsens- oder Konfliktregelungsprozessen durch konzentrierende, Sys- temgrenzen überbrückende und dennoch den Sachbezug wahrende Dritte Größen frei- lich nicht auf Dauer ersetzen.

Als Orientierungsmaxime kann unabhängig von Modellprojekten festgehalten werden: Was sich intern als gültig erwiesen hat, sollte so lange wie möglich auch ex- tern gelten. Im Kontext von Innovationsprozessen werden sich immer wieder experi- mentelle Konstellationen ergeben, aus denen sich ein Ensemble, im Fortgang eine gan- ze Folge controllingfähiger Kennzahlen ableiten lässt. Hier müssen nun Naturwissen- schaftler und Ingenieure ihren Blick für Leistungen, Wirkungen und Werte schulen, um dialogfähig zu bleiben. Wenn der geschärft Blick für diese Erscheinungsformen ein- hergeht mit der theoriegeleiteten methodischen Konzentration auf jene Konstellationen, dann werden auch aus der Praxis Dritte Größen hervorgehen. Und dieses Instrument schärft sich bei sachgemäßem Gebrauch. Auf diese Weise mögen sich viele jener Kon- flikte lösen lassen, von denen wir ausgegangen sind. Dort hatten sich intersystemische Dysfunktionalitäten verfestigt, weil man von einem ausgegrenzten Einzelfall her die definitorische Regel in Frage stellen muss, um die Ursache zu beseitigen. Können Drit- te Größen mit der Zuverlässigkeit des naturwissenschaftlichen Erkenntnisfortschritts auch gesellschaftliche Konflikte kontrollierbar machen? - Sie werden selbst bei Inno- vationsprozessen lediglich Effektivität und Effizienz von Unterstützungsmaßnahmen erhöhen, nicht aber Risiken ausschließen können. Eine Kontrolltheorie, die mit Dritten Größen arbeitet, funktioniert nicht nur über Systemgrenzen, sondern auch über Frei- heitsgerade verschiedener Ordnungen hinweg. Es geht um die thematische Konzentra- tion von Dialogen in einer offenen Gesellschaft, die nicht mit einem Konsens enden müssen, und mit denen dennoch gemeinsame Ziele erreicht werden können. In solchen Dialogen wollte ich die leise Stimme der naturwissenschaftlichen und technischen Vernunft unter Inkaufnahme des Risikos disziplinärer Transgressionen in Wissen- schaftsbereichen hörbar machen, wo sie im Stimmengewirr oft überhört wird.

Unterwegs und zwischendurch kann man die eigenen Maßstäbe immer wieder an der bisweilen deutlich wahrnehmbaren Selbstbegrenzung nanotechnologischer Inno- vationsprozesse eichen. Es scheint einen inneren Zusammenhang zu geben zwischen der

Kreativität des Einzelnen und jener kreativen Grundschrift des Wirklichen, aus der das Neue hervorgeht. Sie erschließt sich nur dem ganz, der von sich selbst absehen kann, und nur wer auch auf die Intentionen anderer reagiert, der kann sie sich dauerhaft zu Nutze machen. Lernt man über die Nanotechnologie „die Natur“ oder „was die Welt/ im Innersten zusammenhält“ „tiefer“ zu verstehen? Ich möchte mit einem Bekenntnis schließen: Die Nanotechnologie hat mich neu zu verstehen gelehrt, was Martin Luther seinen theologischen Gegnern zurief, die Christi Gegenwart im Abendmahl nur symbolisch verstehen konnten, weil dieser ja „in Wirklichkeit“ zur Rechten Gottes sitze. „Nichts ist so klein“, antwortete Luther darauf, „Gott ist noch kleiner“.²³ Gott sei den Dingen näher als diese sich selbst und in ihnen als Schöpfer unablässig tätig. Luthers Folgerung daraus: Gott könne wohl alles selbst tun, er wolle es aber durch uns tun. Ob man sich nun auf jene Pascalsche Wette auf die Existenz Gottes einlässt oder nicht²⁴ – wir können unsere gesellschaftliche Verantwortung für die Indienststellung der Natur im Rahmen von Innovationsprozessen gefahrlos an einem Leitbild ausrichten, dessen story bekannt ist: „servant leadership“²⁵.

Literaturverzeichnis

- Ach, J. S. & Jömann, N. (2005): „Size Matters. Ethische und soziale Herausforderungen der Nanobiotechnologie. Eine Übersicht“, *Jahrbuch für Wissenschaft und Ethik*, 10, 183-213.
- Baumgartner, C. (2004): Ethische Aspekte nanotechnologischer Forschung und Entwicklung, *Das Parlament*, 23/24, 39-46.
- Bühl, W. L. (1987): „Grenzen der Autopoiesis“, *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie*, 39, 225-254.
- Bühl, W. L. (2000): „Luhmanns Flucht in die Paradoxie“, in: Merz-Benz, P.-U.; Wagner, G. (Hg.), *Die Logik der Systeme. Zur Kritik der Systemtheorie Niklas Luhmanns*, Konstanz: Universitätsverlag, S. 225-256.
- Coates, J. C. & Coates, V. T. (2002): „Next Stages in Technology Assessment: Topics and Tools“, in: Banse, G.; Grunwald, A. & Rader, M. (Hg.), *Innovations for an e-Society. Challenges for Technology Assessment*, Berlin: edition sigma, S. 99-112.
- Decker, M. et al. (2004): „Ich sehe was, was du nicht siehst ... zur Definition von Nanotechnologie“, *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis* 13, H. 2, 10-16.
- Fleischer, T. (2002): „Technikfolgenabschätzungen zur Nanotechnologie - Inhaltliche und konzeptionelle Überlegungen“, *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis*, 11, H. 3/4, 111-122.
- Fleischer, T. (2003): „Technikgestaltung für mehr Nachhaltigkeit: Nanotechnologie“, in: Coenen, R.; Grunwald, A. (Hgg.): *Nachhaltigkeitsprobleme in Deutschland. Analyse und Wege ihrer Bewältigung*, Berlin: Edition Sigma, S. 415-432 [<http://www.itas.fzk.de/tatup/023/flei02a.htm>].
- Giddens, A. (1992): *Die Konstitution der Gesellschaft. Grundzüge einer Theorie der Strukturierung* (1984), Frankfurt a. M.: Campus
- Greenleaf, R. K. (2005), *The Servant as a Leader* (1970), Westfield, IN: The Greenleaf Center.
- Grunwald, A. (2004): „Ethische Aspekte der Nanotechnologie. Eine Felderkundung“, *Technikfolgenabschätzung-Theorie und Praxis*, 13, H. 2, 71-77.
- Jech, T. (1973): *The Axiom of Choice*, Amsterdam: North-Holland.
- Jungmichel, N. & Nethöfel, W. (2005): „Nanotechnology in Science, Economy and Society‘. Tagungsbericht“, *Technikfolgeabschätzung- Theorie und Praxis* 14, H. 2, 123-127.
- Kuhn, T. S. (1976): *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen* (1962), Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Lakatos, I. (1982): *Die Methodologie der wissenschaftlichen Forschungsprogramme* (1977), Braunschweig: Vieweg,
- Lau, F. (2005): *Die Form der Paradoxie - Eine Einführung in die Mathematik und Philosophie der ‚Laws of Form‘ von G. Spencer Brown*, Heidelberg: Carl-Auer.

²³ Vom Abendmahl Christi, Bekenntnis (1528), Weimarer Ausgabe (WA) 26, 339; die anderen Aussagen finden sich WA 23, 137 (in ähnlichem Zusammenhang), WA 18, 711 (gegen Erasmus) und z.B. WA 361, 436 (als Auslegung von Psalm 147,2).

²⁴ Pascal begründete wahrscheinlichkeitstheoretisch, dass man dabei nicht verlieren könne (*Pensées*, 418).

²⁵ Der Ausdruck wurde geprägt von AT&T-Manager Robert K. Greenleaf (2005).

- Luhmann, N. (1997): *Die Gesellschaft der Gesellschaft*, 2 Bde., Frankfurt a.M.: Suhrkamp.
- van der Maas, H.L.J. & Molenaar, P.C.M. (1992): „Stagewise cognitive development: an application of catastrophe theory". *Psychological Review*, 99, H. 3, 395-417.
- Mittelstraß, J. (2005): „Methodische Transdisziplinarität", *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis* 14, H. 2, 18-23.
- Nethöfel, W. (1992): *Theologische Hermeneutik. Vom Mythos zu den Medien* (Neukirchener Beiträge zur Systematischen Theologie 9), Neukirchen-Vluyn: Neukirchener Verlag.
- Nethöfel, W. (2001): *Christliche Orientierung in einer vernetzten Welt*. Neukirchen-Vluyn: Neukirchener Verlag.
- Nethöfel, W. (2006a): *Was ist und warum beschäftigen wir uns mit Nanotechnologie?*, Manuskript.
- Nethöfel, W. (2006b): *Innovation. Die Formel* (Manuskript).
- Orthuber, W. (2000): *Das Rekombinationsprinzip: Mathematik der Entscheidung und Wahrnehmung*, Manuskript [<http://www.orthuber.com>] (besucht 14. 01. 2006).
- Orthuber, W. (2004): „A Discrete and Finite Approach to past physical Reality", *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*, 19, 1003-1023.
- Schmid, G.; Decker, M.; Ernst, H.; Fuchs, H.; Grünwald, W.; Grunwald, A.; Hofmann, H.; Mayor, M.; Rathgeber, W.; Simon, U. & Wyrwaet, D. (2003): *Small Dimensions and Material Properties. A Definition of Nanotechnology* (Graue Reihe 35), Neuenahr-Ahrweiler: Europäische Akademie.
- Schmidt, J. C. (2005): „Dimensionen der Interdisziplinarität. Wege zu einer Wissenschaftstheorie der Interdisziplinarität", *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis*, 14, H. 2, 12-17.
- Schmidt, J. C. & Grunwald, A. (2005): „Einführung in den Schwerpunkt", *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis*, 14, H. 2, 4-11.
- Schummer, J. (2004): „Multidisciplinarity, Interdisciplinarity, and Patterns of Research Collaboration in Nanoscience and Nanotechnology", *Scientometrics*, 59,425-465.
- Spencer-Brown, G. (2004): *Laws of Form. Gesetze der Form* (1969), Lübeck: Bohmeier Verlag.
- Thom, R.: (1976), *Structural Stability and Morphogenesis. An Outline of a General Theory of Models* (fr. 1972), Reading MS: Benjamin/ Cummings Publishing Comp.
- Winkler, R. (2001): „Wie macht man 2 aus 1? Das Paradoxon von Banach-Tarski", *Didaktikhefte der Österreichischen Mathematischen Gesellschaft, Schriftenreihe zur Didaktik der Mathematik der Höheren Schulen*, 33, 166-196.