

Unsichtbare Ursprünge: Herbert Gleiter und der Beitrag der Materialwissenschaft

Alfred NORDMANN

Institut für Philosophie, Technische Universität Darmstadt
nordmann@phil.tu-darmstadt.de

Abstract. Herbert Gleiter promoted the development of nanostructured materials on a variety of levels. In 1981 already, he formulated research visions and produced experimental as well as theoretical results. Still he is known only to a small community of materials scientists. That this is so is itself a telling feature of the imagined community of nanoscale research. After establishing the plausibility of the claim that Herbert Gleiter provided a major impetus, a second step will show just how deeply Gleiter shaped (and ceased to influence) the vision of the US Nanotechnology Initiative. Finally, then, the apparent invisibility of Gleiter's importance needs to be understood. This leads to the main question of this investigation. Though materials science research meets even the more stringent definition of nanotechnology, there remains a systematic tension between materials science and the device-centered visions of nanotechnology.

1. Einleitung¹

Auf einer Webseite aus dem Jahr 2002, auf der zu einem Symposium über nanostrukturierte Materialien eingeladen wird, findet sich eine durchaus typische, kurz gefasste Geschichte der Nanotechnologie. Wie viele dieser Kurzfassungen besteht sie aus drei Aussagen. Zunächst wird auf die prophetische Vision Richard Feynmans aus dem Jahr 1959 verwiesen (Feynman 2001, unter Historikern eine durchaus umstrittene Referenz). Dann wird der entscheidende Durchbruch genannt, der die Realisierung von Feynmans Vision einläutete. Am Schluss steht eine Beschreibung gegenwärtiger Produktivität und der vielversprechenden Zukunft nanotechnischer Forschung. Ungewöhnlich an dieser Darstellung ist nur, wie sie den entscheidenden Durchbruch identifiziert:

1959 sprach Richard Feynman an der Universität Caltech von „Jede Menge Platz da unten“, um das ungeheure wissenschaftliche und technische Potenzial von Materialien und Geräten in atomaren/molekularen Dimensionen hervor zu heben. Fast zwanzig Jahre später nahm Herbert Gleiter die Vorteile ultrafeiner Korngrößen in Festkörpern in den Blick und prägte den Begriff nanostrukturierte Körper. Heute sind Nanowissenschaft und Nanotechnik die am schnellsten wachsenden Forschungsfelder. Es wird einer sehr starken interdisziplinären Anstrengung bedürfen,

¹ Diese Studie ist Zwischenergebnis einer vornehmlich historischen Untersuchung, die zunächst bei der Cain Conference der Chemical Heritage Foundation „Nano before there was nano“ vorgestellt wurde (Philadelphia, 19. März 2005). Viele Gespräche sind in sie eingeflossen, insbesondere mit Horst Hahn (TU Darmstadt, Forschungszentrum Karlsruhe), Hanno zur Loyen (University of South Carolina, Columbia), James Murday (Naval Research Laboratory), Gary Peterson (Chemical Heritage Foundation, University of Pittsburgh), Eckart Exner (vormals an der TU Darmstadt) und Herbert Gleiter (vormals in Saarbrücken und am Forschungszentrum Karlsruhe).

um diese außerordentlichen Möglichkeiten der Nanomaterialien in praktische Geräte zu überführen.²

Der Name Herbert Gleiter ist allerdings hauptsächlich Materialforschern geläufig und dürfte den meisten im Nanobereich tätigen Wissenschaftlern unbekannt sein. Dass dies so ist, ist nun seinerseits ein bezeichnender Aspekt der zunächst nur imaginierten Nanoforschungsgemeinschaft. Dem entsprechend beginnt dieser Beitrag damit, überhaupt erst einmal die Plausibilität der Behauptung zu verdeutlichen, Gleiter habe einen wichtigen Impuls gesetzt und einen Ausgangspunkt für die Nanoforschung geboten. Darüber hinaus lässt sich in einem zweiten Schritt aufzeigen, wie stark seine Ideen auf die Visionen der US-amerikanischen Nanotechnologie Initiative eingewirkt haben – und wo dieser Einfluss auch aufgehört hat. Schließlich muss daher die weitgehende Unsichtbarkeit von Gleiters Bedeutung verstanden werden. Dies führt auf die Hauptfrage dieser Untersuchung: Obwohl die Materialforschung auch strengen Definitionen von Nanotechnologie genau entspricht, bleibt ein merkwürdiges Missverhältnis zwischen Materialwissenschaft und den gerätezentrierten Visionen der Nanotechnologie. Und obwohl Materialforschung Kontrolle auf der molekularen Ebene ausübt und sich neuartige größenabhängige Eigenschaften zu Nutze macht, will es scheinen, als ob an der Nanotechnik mehr dran sein müsse – aber worin kann dieses „mehr“ bestehen, und was geht auf der Suche danach verloren?

2. Grundideen

Um Herbert Gleiters „Grundidee“ ganz einschätzen zu können, hilft es, sie vor dem Hintergrund der bis dahin geltenden Orthodoxie zu betrachten. 1964 formulierte John Ziman auf der ersten Seite seiner *Principles of the Theory of Solids*, was bis in die 1980er Jahre das hierarchische Verhältnis von Physik und Materialwissenschaft bestimmte: Die ganze Festkörperphysik lässt sich aus perfekten Kristallen erklären. Werkstoffkunde oder Materialforschung kommt erst ins Spiel, wenn wirkliche Materialeigenschaften aus Störungen des Kristallgitters, aus Defekten oder Deformationen heraus erklärt werden müssen.

Eine Theorie der Eigenschaften von Festkörpern wäre praktisch unmöglich, wenn die stabilste Struktur in den meisten Festkörpern kein regelmäßiges Kristallgitter wäre. Auf Grund der *Übersetzungssymmetrie* reduziert sich das N -Körper Problem und wird beherrschbar. *Das heißt dass es Grundvektoren $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$ gibt derart, dass die Atomstruktur invariant bleibt bei Verschiebungen um jeglichen Vektor, der die Summe ganzzahliger Vielfacher dieser Vektoren ist.*

² Indian Institute of Technology, Dehli: National Symposium on Nanostructured Materials, December 5-6, 2002, http://www.iitd.ernet.in/utilities/archives/symp_nano.html – letzter Zugang am 15. März, 2005. Für die Geschichtsschreibung bedeutsamer, darum aber auch weniger knapp wird die gleiche Geschichte von Robert Cahn erzählt: „Auf einer Tagung der American Physical Society im Jahre 1959 spekulierte der mit dem Nobelpreis ausgezeichnete Physiker Richard Feynman über die vermutliche Wirkung der Manipulation kleiner Teile verdichteter Materie. [...] Auf nanostrukturierte Materialien aufmerksam machte Herbert Gleiter in einem 1981 in Dänemark gehaltenen Vortrag; in seinem Überblick über das Arbeitsgebiet bezeichnet Siegel diesen Vortrag als einen Wendepunkt“ (2001, S. 398). Cahn fügt hinzu, dass Gleiter das Arbeitsgebiet der nanostrukturierten Materialien eigentlich begründet hat (2001, S. 400). – Gewöhnlich wird der Durchbruch oder Wendepunkt mit Binnig und Rohrsers Erfindung des STM (Raster-Tunnel Mikroskop) identifiziert, auch mit Eigler und Schweizers willkürlicher Verschiebung einzelner Atome, mit den Visionen Drexlers, mit dem Beginn der US-amerikanischen Nanotechnologie Initiative.

In der Praxis ist dies nur ein Ideal. Jeder Festkörper ist ein begrenztes Einzelstück, so dass wir unsere Struktur nicht über seine Grenzfläche hinausführen dürfen. Aber die einzigen Regionen, in denen dies eine Rolle spielt, sind die den Grenzflächen nahen Atomlagen, und in einem Block aus N Atomen sind das nur ungefähr $N^{2/3}$ – in einem makroskopischen Einzelstück also etwa 1 Atom aus 10^8 . Die meisten kristallinen Festkörper sind strukturell unvollkommen, weisen Defekte, Verunreinigungen und Versetzungen auf, die die regelmäßige Anordnung der Atome stören. Solche Defekte sind für viele interessante physische Phänomene verantwortlich, aber wir werden sie in dieser Darstellung weitgehend ignorieren. Wir interessieren uns hier für den perfekten idealen Festkörper [...] (Ziman 1964)³

Ziman nennt zwei Grenzen einer physikalischen Theorie perfekt idealisierter Festkörper. Die Phänomene an diesen Grenzen weist er implizit einer anderen Art von Forschung zu, nämlich den Materialwissenschaften. Was an den Oberflächen geschieht, so Ziman, kann von der Festkörperphysik vernachlässigt werden, und weitenteils auch die Unregelmäßigkeiten und Defekte in der Struktur des Körpers. Was 1964 noch mit einiger Sicherheit gelten konnte, wurde von der Nanoforschung auf den Kopf gestellt: Die Grenzen der Festkörperphysik sind konstitutiv für nanoskalige Körper. In einem Nanopartikel liegt ein großer Anteil der Atome nahe der Oberfläche, und die interessanten Eigenschaften nicht nur nanostrukturierter Materialien hängen entscheidend von ihren Abweichungen vom regelmäßigen Kristallzustand ab und somit von Unvollkommenheiten, Defekten, Verunreinigungen und Versetzungen. Eben dies hat Herbert Gleiter 1981 erstmals postuliert: Materialeigenschaften ändern sich dramatisch, wenn sich der Anteil von Atomen in der Nähe einer Grenzfläche von 1 aus 10^8 auf 1 aus 2 erhöht.⁴

Gleiter promovierte mit einer Arbeit über *Die Wechselwirkung von Versetzungen mit kohärenten, verspannten, ungeordneten und geordneten Teilchen*. Diese theoretische Untersuchung hatte unmittelbare praktische Bedeutung für die sogenannte Teilchenhärtung von Metall in spezifischen Anwendungen wie Turbinen oder Düsenmaschinen (Gleiter 1964).⁵ Einige Jahre später erschien sein gemeinsam mit B. Chalmers verfasstes Buch über *High-Angle Grain Boundaries*. Auf seinen ersten Seiten stellt es eine etwas spekulative „was wäre, wenn“ Frage, in der sich Gleiters zukünftige Fragen und Forschungen ankündigen. Die Autoren betrachten einen Typ Abweichung vom perfekt kristallinen Zustand, in der sich die unmittelbare Umgebung oder Nachbarschaftsbeziehung von Atomen so stark verändert, dass sich der Kristall zu weit von einer atomaren Gleichgewichtsverteilung entfernt, um eigentlich noch ein Kristall zu sein:

³ Im Zusammenhang der Nanotechnikforschung ist interessant und durchaus pikant, dass sich der nämliche John Ziman seit einiger Zeit mit Analysen der Wissenschaft und „technoscience“ befasst hat und dabei den Begriff der „post-academic science“ prägte, der auch dazu dient, dem verlorenen Status einer akademischen Idealwissenschaft nach zu trauern und den Aufstieg der Nanoforschung entsprechend skeptisch zu bewerten, siehe Ziman 1968, 2000.

⁴ Dies lässt sich auch so ausdrücken: Als Richard Feynman 1959 vorschlug, ein vielbändiges Lexikon auf den Kopf einer Stecknadel zu schreiben, hat er nicht bedacht, wie sich dadurch die physischen Eigenschaften der Stecknadel ändern. (Diese Bemerkung verdanke ich Axel Blau.)

⁵ Diese Forschungen stießen auf das Interesse Bernie Kears (seinerzeit bei Pratt & Whitney, später an der Rutgers Universität). 1990 organisierte Kear in Atlantic City eine Vorläufertagung zu den seither in zweijährigem Zyklus stattfindenden Tagungen zu Nanomaterialien (von Nano 1992 in Cancun bis etwa zur Nano 2004 in Wiesbaden). Bernie Kear wird im folgenden noch öfter auftauchen, aber die Bedeutung der Verbindung von Gleiter und Kear für die Formierung materialwissenschaftlicher Nanoforschung muss noch untersucht werden.

Wir müssen daher fragen, wie die Atome in der Oberflächenregion ihre Lage so anpassen können, dass sich die Maße für Stärke und Energie der Oberfläche gegenüber der Vorstellung eines rigiden Kontakts erhöhen, bzw. vermindern. [...] Wir müssen zwei Weisen unterscheiden, wie sich die Abweichung vom perfekten Kristall vorstellen lässt. Eine davon geht von einer annähernd linearen elastischen Verzerrung aus, bei der sich der Abstand zwischen Atomen um nicht mehr als ein paar Prozent verändert. In diesem Regime gilt eine Hooke'sche Beziehung zwischen Kraft und Versetzung und die Umgebung jedes Atoms bleibt wesentlich unverändert in dem Sinn, dass die Nachbarschaftsordnung erhalten bleibt (nächster Nachbar, zweitnächster, usw.). Die zweite Weise ist drastischer, wenn sich das Atom nämlich in eine Position bewegt, in der sich die Nachbarschaftskonfiguration ändert und die Abweichung vom interatomaren Abstandsgleichgewicht außerhalb des Hooke'schen Bereichs liegt. Natürlich gibt es keine absolut scharfe Trennung zwischen diesen beiden Regimen, aber die Unterscheidung ist trotzdem hilfreich. (Gleiter und Chalmers 1972, S. 2)

Ohne eine scharfe Trennung zwischen den Regimen zu behaupten, stellt Gleiter der Form nach die Frage, ob der graduelle Übergang von einem Regime zum anderen irgendwann zu einer grundsätzlichen qualitativen Veränderung führt. Wenn ein Material aus Körnern besteht und somit gewissermaßen aus Partikeln zusammengesetzt ist, führt Gleiters Frage auf diese Vermutung: Wird die Korngröße so weit verkleinert, dass das Material aus nanoskaligen Partikeln zusammengesetzt scheint, dann ist das Material derart von Grenzflächen strukturiert und von Atomen, die sich ausschließlich in Grenzflächenbereichen befinden, dass die Nachbarschaftsbeziehungen der Atome sehr weit von dem Abstandsgleichgewicht abweichen, das für Kristallgitter gilt.⁶ Diese Vermutung entspricht in etwa Gleiters Grundidee, die er 1981 in einem Beitrag über „Materials with ultra-fine grain sizes“ explizit zu formulieren und experimentell zu erproben begann.⁷ Er kündigt eine „neue Klasse von Materialien an“, die Gleiter hier noch „grenzflächig (*interfacial*)“ oder „mikrokristallin“ nennt. Zu ihren besonders attraktiven Eigenschaften zählt allerdings die Tatsache, „dass sie im Nanometer Bereich ‚legiert‘ werden können“ (Gleiter 1981, S. 15).

Obwohl er 1981 noch nicht den Begriff „nanokristalline Materialien“ verwandte, entspricht Gleiters Charakterisierung seiner neuen Materialien auch strikten Definitionen der Nanotechnologie⁸, indem sie sich nämlich auf spezifisch von der Nanoskala größenabhängige Eigenschaften bezieht. In praktischer Hinsicht besteht dies darin, dass diese Materialien „im Nanobereich ‚legiert‘ werden können, und zwar unabhängig von ihrer Mischbarkeit, Art der Bindung, Struktur, Molekulargewicht usw.“ Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass es besonders leicht ist, Nanopartikel in Materialien zusammenzufügen, weil die Atome in der Oberflächenregion eines Nanopartikels (das aus

⁶ Diese Rekonstruktion von Gleiters Ansatz wird in der Wissenschaftsforschung als stark internalistisch bezeichnet. Die Grundidee Gleiters erscheint als eine theoretische Extrapolation mit praktischer Bedeutung (ähnlich wie das aus der Praxis extrapolierte Moore'sche Gesetz in der Halbleitertechnik, das seinerseits einer Miniaturisierungslogik folgt). Dieses extrapolierende Denken weitete Gleiter sehr viel später noch einmal aus: Nachdem er fragte, was aus kristallinen Strukturen bei zunehmend verkleinerter Korngröße wird, fragt er nun, was passiert, wenn an Stelle von Grenzflächen zwischen Kristallen Grenzflächen zwischen Nanometer großen Glasbereichen eingebaut werden.

⁷ Eine noch frühere Formulierung deutet sich (noch ohne weitreichende Programmatik) in einem kurzen Abstract von Marquardt und Gleiter aus dem Jahr 1980 an.

⁸ Bezüglich der späteren Bezeichnung „nanokristalline Materialien“ siehe Gleiter und Marquardt 1984; Birringer, Gleiter u.a. 1984. In Gleiter 1989, 226 und Gleiter 1993, 10 bezieht er sich auf seinen Beitrag aus dem Jahr 1981 als erste Formulierung der „Grundidee“.

nichts als Oberflächenregion besteht) ihre Lage so anpassen können, dass sich ohne die gewöhnlich vom Gitter eines Kristalls ausgehenden Beschränkungen die Festigkeit der Grenzfläche vergrößert und ihre Energie vermindert.

Weitreichender als dies ist Gleiters theoretische Bestimmung dieser neuen Klasse von Materialien. Ihre zweite besonders attraktive Eigenschaft besteht nämlich in der Tatsache, dass „ihre atomare und elektronische Struktur von der atomaren und elektronischen Struktur ihres glasförmigen oder kristallinen Zustands unterschieden ist“. Diese Feststellung bereitet den Boden für die deutlichere, vielleicht kühnere Aussage, dass die neuen Materialien einen ganz neuen Materiezustand darstellen. Im Weiteren spricht Gleiter dies offen aus:

Auf Grund der Tatsache, dass die eine Grenzfläche bildenden Atome dem (periodischen) Potenzialfeld der Kristalle auf beiden Seiten der Grenzfläche ausgesetzt sind, stellen Korngrenzen und innere Grenzflächen einen speziellen Zustand fester Materie dar.⁹ Daraus folgt, dass sich die Anordnung der Atome in inneren Grenzflächen grundsätzlich von glasförmigen und kristallinen Zuständen unterscheidet. (...) Von der Struktur und den Eigenschaften eines Materials im kristallinen oder amorphen Zustand können sich daher Struktur und Eigenschaften eines Festkörpers aus gleichem Material unterscheiden, in dem das Volumen der Grenzflächen (mikrokristallines oder grenzflächiges Material) gegenüber dem Volumen des Kristalls vergleichbar ist oder sogar größer wird. (...) Im Fall von Gold, zum Beispiel, wird das Material zu 50% des Volumens aus Grenzflächen bestehen, wenn der Durchmesser des Kristalls 3 bis 6 Nanometer beträgt. Da das Material aus gleichen oder verschiedenartigen Kristallen bestehen kann, sind dies die attraktiven Aspekte solcher mikrokristallinen Materialien: (i) Sie bieten eine Gelegenheit, einen neuen Materiezustand zu generieren, der sich vom glasförmigen und kristallinen Zustand unterscheidet. (Gleiter 1981, S. 15-16)

Aus Gleiters Anregung ergaben sich einerseits praktische Entwicklungen und insbesondere Techniken für die Herstellung nanokristalliner Materialien. Dies drückt sich in den folgenden, verschiedenen Zusammenhängen etwas willkürlich entnommenen Feststellungen aus: (i) „Der Begriff „Nanopartikel“ erschien um 1982 in der Literatur in Zusammenhang von Pulverpartikeln mit physischen Dimensionen von einem bis zehn Nanometern. Diese Partikel wurden von H. Gleiter und Mitarbeitern mittels Gaskondensation von Metaldämpfen in einer inerten Niederdruckatmosphäre präpariert. Sie wurden dann gepresst und in kleine Festkörper konsolidiert und die Produkte wurden „nanostrukturierte“ Materialien genannt“ (Schwarz 1998, S. 93); (ii) „Pioniere bei der Synthese von nanokristallinen Proben waren Gleiter *et al.* in den frühen 1980er Jahren“ (Lu 1999, S. 1127); (iii) „Die ursprüngliche Entwicklung von neuen kristallinen Materialien basierte auf Nanopartikeln, die durch Verdampfung und Kondensation (Keimbildung und Wachstum) in einem subatmosphärischen inerten Gas generiert wurden (Gleiter 1989)“ (Hu & Shaw 1999, S. 20), und (iv) „Das Gebiet der nanokri-

⁹ Im englischen Original lautet dieser Satz: „Grain boundaries and interphase boundaries represent a special state of solid matter due to the fact that the atoms forming an interface are subjected to the (periodic) potential field of the crystals on both sides of the interface“. Hier findet also ein schwer übersetzbare, das theoretische Denken anregende Wortspiel statt. Wo Gleiter von „interfaces“ und „interphase boundaries“ spricht, kündigt sich ein spezifischer Materiezustand (*phase of matter*) an, der an der Grenzfläche (*interface*) zweier nanoskaliger Kristalle mit verschiedenen Phasen entsteht, also am „*interphase*“ beispielsweise der Phasen eines Blei- oder Aluminiumkristalls. Wie im Weiteren noch deutlich wird, verschiebt Gleiter die Aufmerksamkeit von skalunenabhängigen Kristallphasen auf kristallgrößenabhängiges „nanophasiges“ Material.

stallinen (oder nanostrukturierten, nanophasigen) Materialien als ein wesentliches eigenständiges Feld der Materialforschung entstand in den 1980er Jahren weitenteils aus den Arbeiten Gleiters und seiner Mitarbeiter, die ultrafeinkörniges Material mittels einer Konsolidierung *in situ* aus nanoskaligen Atomclustern synthetisiert haben“ (Koch 1999, S. 94).¹⁰

Neben diesen praktischen Entwicklungen stehen theoretisch zugespitzte Charakterisierungen der neuen Materialien als Beispiele für einen grundsätzlich neuen Materiezustand:

Nach ihren charakteristischen Bandbreiten von Strukturordnung wird grundsätzlich zwischen zwei Arten von Festkörpern unterschieden: Kristalle mit weitreichender Ordnung und nicht-equilibriale Systeme (glasförmige oder andere ‚amorphe‘ Festkörper) mit nur kurzstreckiger Ordnung.

Diese Notiz berichtet Evidenz für die Existenz einer dritten Art von Festkörperstruktur, die sich ähnlich wie gasförmige Strukturen durch Abwesenheit sowohl weit- als auch kurzreichender Ordnung auszeichnet, und also konventionell als ‚gasförmige‘ Festkörper klassifiziert werden kann. Konventionelle makroskopische Festkörper werden allgemein aus flüssigen oder gasförmigen Bestandteilen gebildet, die sich während der Verfestigung zu kurzstreckigen (glasförmigen) oder weitreichenden (kristallinen) Ordnungsstrukturen lockern. Es wird vorgeschlagen, gasförmige Festkörper durch Zusammenfügung von vorgefertigten, zufällig angeordneten Kristallen mit Größen d kleiner als 10nm (‚Nanokristallen‘) zu synthetisieren. Unter den in den Experimenten angewandten Bedingungen scheint diese Methode einer angemessenen Kompaktierungstechnik für ‚nanokristalline Festkörper‘ zu einer neuen Klasse von Festkörpern zu führen. (Birringer *et al.* 1984, S. 365)

Hiermit verhelfen Gleiter und seine Mitarbeiter der Umkehrung des traditionellen Verhältnisses von Festkörperphysik und Materialforschung zu einem besonders sinnfälligen Ausdruck. John Ziman sprach von Defekten als interessanten Sonderfällen an den Grenzen der Physik. In Gleiters Augen zeichnen sich alle Materialien durch eine größere oder kleinere Anzahl von Defekten aus, wobei die idealisiert defektfreien Kristalle der Festkörperphysik einen theoretischen Grenzfall darstellen.¹¹ Indem sie die ganze Bandbreite von Materialien berücksichtigt, erweist sich die Materialforschung als Wissenschaft der Materialzustände und der Phasenübergänge zwischen ihnen. Für Gleiter ist sie daher ein vornehmlich theoretisches Unterfangen mit praktischer Bedeutung. Im Übergang zur Nanostrukturierung und der resultierenden Dominanz von Defekten kommt diese theoretische Materialwissenschaft lediglich zu ihrem angestammten Recht.

¹⁰ Während die potenzielle Bedeutung nanokristalliner Materialien bald erkannt wurde und im Saarbrücker Institut für Neue Materialien Ausdruck fand, muss noch ermittelt werden, wie eng Gleiters mit der Industrie zusammengearbeitet hat. Sein Einfluss bestand offenbar vornehmlich in der Entwicklung von Herstellungsmethoden und nicht etwa in der Optimierung bestimmter, anwendungsorientierter Materialeigenschaften, vergleiche hierzu Cahn 2001, 399 und 401. Ganz abgesehen wird hier von Gleiters Beitrag zu Modellierungs- und Simulationstechniken, siehe schon Weins, Gleiter und Chalmers 1971, Koblinski, Phillpot, Wolf und Gleiter 1999 oder Yamakow, Wolf, Phillpot, Mukherjee und Gleiter 2002.

¹¹ Die Allgegenwart von Grenzflächen kommt einer Dominanz von Defekten gleich; vergleiche die folgende Darstellung der Grundidee: „Die Grundidee von nanokristallinem Material besteht in der Erzeugung einer neuen Klasse ungeordneter Festkörper, indem eine solche Dichte von Defektkernen (*defect cores*) eingeführt wird, dass 50% und mehr der Atome (Moleküle) in den Kernen dieser Defekte situiert sind“ (Gleiter 1989, S. 226).

3. Vernachlässigte Wirkungen

Die Darstellung von Gleiters Grundideen und experimentellen Befunden mag bereits ausreichen, um ihn als einen der „Gründerväter“ der Nanotechnologie zu etablieren. Gerechtfertigt erscheint dies durch seine frühe Verwendung des Begriffs „nanokristalline Materialien“, das Erkennen diskontinuierlich größenabhängiger Eigenschaften im Nanobereich und seine explizite, manche würden sagen: visionäre Formulierung eines Forschungsprogramms, das der Herstellung, Untersuchung und Nutzung dieser neuartigen Eigenschaften gewidmet ist. 19 Jahre vor der US-amerikanischen National Nanotechnology Initiative, 9 Jahre bevor Eigler und Schweizer einzelne Atome manipuliert haben, 5 Jahre vor Eric Drexlers *Engines of Creation*, 4 Jahre vor Identifizierung des Buckminster Fullerenes oder buckyballs und im gleichen Jahr, in dem Binnig und Rohrer das Rastersondenmikroskop erfanden, erscheint Herbert Gleiter als der möglicherweise erste produktiv arbeitende Nanoforscher, der sich selbst als solcher verstand.

Nun ist es aber unmöglich, den Aufstieg der Nanotechnologie als eine nur wissenschaftsinterne Entwicklung zu verstehen, schon gar nicht als Entwicklung in einer einzigen Disziplin. Nanotechnologie ist ein mindestens ebenso sehr gesellschaftliches wie wissenschaftliches Phänomen. Auch wenn es sich in diversen wissenschaftlichen und technischen Entwicklungen anzukündigen scheint, auch wenn es hier und da schon einen frühen Gebrauch des Wortes „Nanotechnologie“ gab, entstand die Nanotechnologie als übergreifend bedeutsamer Schwerpunkt der Forschungsförderung erst Ende der 1990er Jahre mit der US-amerikanischen National Nanotechnology Initiative (NNI) – selbst wenn sich diese Initiative ihrerseits als vorgehend weitblickende Antwort auf internationale Entwicklungen rechtfertigte:

Die US Regierung, zum Beispiel, investierte 1997 etwa 116 Millionen Dollar U.S. in nanotechnologische Forschung und Entwicklung. Im Haushaltsjahr 1999 ist diese Zahl auf 260 Millionen Dollar angestiegen. Japan und Europa tätigen ähnliche Investitionen. Wer sich in diesen nanoskopischen Größenordnungen am besten auskennen und geübt sein wird, ist gut gerüstet für die immer stärker technikbasierte und globalisierte Wirtschaft des 21. Jahrhunderts. Das kann auch erklären, warum das National Science and Technology Council (NSTC) des Weißen Hauses 1998 die Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology (IWGN) gegründet hat. (Amato 1999, S. 2)

Erst nachdem das Weiße Haus mit der NNI auf die Wahrnehmung einer Wettbewerbs-herausforderung seitens Europas und Japans „reagiert“ hat, reagierten Deutschland und Europa ihrerseits, indem auch sie die „Nanotechnologie“ als eigenständigen Förderungsschwerpunkt etablierten.¹²

Wenn Herbert Gleiter also als ein Gründervater der Nanotechnologie in einem umfassenden Sinn gelten soll, dann muss auch seine Rolle im Entstehen einer öffentlichen Forschungspriorität verdeutlicht werden. War er wie Richard Feynman, Norio Taniguchi (der 1974 den Begriff „Nanotechnologie“ prägte) und Eric Drexler jemand, dessen Beitrag erst im Rückblick prophetisch erscheint, oder trug seine Forschung zur Definition und wissenschaftlichen Legitimierung der NNI bei? Die Antwort auf diese Frage liefert einen weiteren Beleg für Gleiters Bedeutung. Zugleich legt sie jedoch nahe, wo sich die Wege trennen und wie sich die weitgehende Abwesenheit Gleiters in den gro-

¹² Diese Reaktion bestand beispielsweise darin, 1998 am Forschungszentrum Karlsruhe ein erstes Institut für Nanotechnologie einzurichten, dessen Leitung Herbert Gleiter übernahm. Die japanische Entwicklung ist komplizierter und kann hier nicht rekonstruiert werden.

ßen Erzählungen und Entstehungsmythen der Nanotechnologie erklärt. Es wird sich zeigen, dass die Vernachlässigung Gleiters mit der Herabsetzung einerseits der Materialforschung, andererseits einer theoriegeleiteten Nanoforschung einher geht.

Wer im Jahr 1999 die 1992 gegründete Zeitschrift *Nanostructured Materials* zur Hand nahm, hätte unter den Herausgebern neben bedeutenden Namen wie Richard Smalley, Bernie Kear, C.C. Koch, L.E. Brus, T. Tsakalos und anderen eine für die NNI durchaus folgenreiche Personenkonstellation ausmachen können: Richard Siegel als einer der drei Hauptredakteure, Herbert Gleiter als Mitglied des Redaktionsbeirats, und Horst Hahn als assoziiertes Redaktionsmitglied. In einem Beitrag zu *Scientific American* hat Richard Siegel diese Konstellation so beschrieben:

Ein Wendepunkt ergab sich allerdings 1981. Auf einer Tagung am Nationalen Laboratorium in Risø, Dänemark, machte der deutsche Physiker Herbert Gleiter von der Universität des Saarlands seinem Publikum den Vorschlag, dass aus der Zusammenfügung ultrafeiner Partikel erstelltes Material seinerseits radikal andere Eigenschaften haben würde. Nach seinem Vortrag publizierte Gleiters Labor eine Reihe provokativer Untersuchungen nanokristalliner Metalle, die in der Materialforschungsgemeinschaft Europas und der USA viel Aufsehen erregten.

Meine eigene Beschäftigung mit Nanostrukturierung begann vier Jahre später eher zufällig auf einer Tagung in Indien. Dort traf ich Gleiters früheren Studenten Horst Hahn. Hahn, der jetzt an der Universität in Darmstadt ist, begann gerade einen Forschungsaufenthalt als postdoc in Argonne [National Laboratories, USA], und ich half ihm bei seinem Start, indem ich ihm Vakuumapparaturen zur Verfügung stellte, die er brauchte, um eine Kammer für die Synthese von Atomclustern zu bauen. Bald begannen wir darüber zu reden, ob ultrafeine Pulver auch benutzt werden können, um andere Materialien als Metalle daraus zu machen – was er sich zunächst als Aufgabe gestellt hatte. Innerhalb weniger Monate hatten wir erfolgreich ein keramisches Material, nanophasiges Titanium, produziert, das aus 10 Nanometer großen oxydierten Titanclustern erstellt wurde. (Siegel 1996, S. 75)¹³

Eines der ersten Ergebnisse der Zusammenarbeit von Siegel und Hahn war ein gemeinsam verfasster Überblick über das neue Forschungsgebiet der „Nanophase Materials“ (Siegel & Hahn 1987). Bald wurde Siegel (zusammen mit Bernie Kear) Mitglied eines insgesamt achtköpfigen Komitees zu Materialien mit Mikrostrukturen im Submikronbereich.¹⁴ 1989 legte es dem US-amerikanischen Wissenschaftsrat einen Bericht über „Forschungsmöglichkeiten bezüglich Materialien mit ultrafeinen Mikrostrukturen“ vor. Gleiter und seine Mitarbeiter werden in diesem Bericht häufig zitiert. Im angehängten Lebenslauf Siegels wird er als Leiter einer Forschungsgruppe an den Argonne National Laboratories im Bereich der Metallphysik und Metalldefekten vorgestellt, der sich „in jüngster Zeit auf die Synthese, Charakterisierung und Eigenschaften ultrafeinkörniger, nanophasier Materialien, insbesondere Keramik“ konzentriert (Kear *et al.* 1989, S. 110).

Auf Grund seiner Arbeiten und seiner Bedeutung in diesem Forschungsfeld, vielleicht auch als Gründer und Geschäftsführer der Nanophase Technologies Corporation (wofür er 1991 den Preis für Exzellenz im Wissenstransfer vom US-amerikanischen Federal Laboratory Consortium erhielt), wurde Siegel eingeladen, bei der Vorbereitung

¹³ Insbesondere wegen ihrer Anwendung in kosmetischen Produkten gelten Titanium Dioxid Nanopartikel auch heute noch als exemplarisches Nanomaterial.

¹⁴ Die Bezeichnung „submicron-sized microstructures“ drückt die allmähliche Annäherung an „nano“ treffend aus.

der NNI eine wesentliche Rolle zu spielen. Mihail Roco erinnert an die einzelnen Schritte dieser Vorbereitungsphase:

Wir begannen mit der Vorbereitung unterstützender Veröffentlichungen, einschließlich eines Berichts über Forschungsaufgaben in zehn relevanten Gebieten – trotz der seinerzeit geringen Aussicht auf zusätzliche Forschungsgelder. Die NNI wurde zwischen 1997 und 2000 mit der gleichen Strenge wie ein Forschungsprojekt vorbereitet: Wir entwickelten eine langfristige Vision für Forschung und Entwicklung, wir erstellten als Maßstab einen internationalen Vergleich von Nanotechnologie in der Universitätsforschung, Regierungs- und Industrieprojekten... (Roco 2004, S. 894)

Während des ersten Vorbereitungsschritts leitete Siegel 1997 einen Workshop und gab (zusammen mit Evelyn Hu und Mihail Roco) dessen Ergebnisse über „F&E Status und Trends in den USA bezüglich Nanopartikeln, nanostrukturierten Materialien und Nanogeräten“ heraus. Dieser Bericht hob insbesondere im Abschnitt über Synthese und Fertigung Gleiters Bedeutung hervor (vergleiche insbesondere Schwarz 1998). Siegel fungierte auch als Herausgeber und Haupt-Berichterstatter des internationalen Vergleichs *Nanostructure Science and Technology: A Worldwide Study*. Auch diese Studie bezieht sich oft auf Gleiter und seinen Beitrag zur Entwicklung der Nanotechnologie (darin insbesondere Hu & Shaw 1999, Cox 1999, Koch 1999).

Zugleich markiert diese Studie jedoch einen wichtigen Einschnitt oder Wendepunkt. Sie vervollständigte die öffentliche Begründung für die NNI, nämlich den Druck auf die USA, ihre nanotechnologische Führungsrolle im internationalen Wettbewerb zu bewahren oder zu behaupten. Spätere Veröffentlichungen der NNI beschränkten sich auf US-amerikanische Forschungen, auf die Errungenschaften und Herausforderungen daheim. Die Studie aus dem Jahr 1999 ist zugleich die letzte, in der die Materialforschung eine prominente Rolle spielt: Richard Siegel war mit späteren programmatischen Überblicksdarstellungen nicht mehr befasst, der Name Gleiters taucht in ihnen nicht auf, ebenso wenig wie Zielsetzungen bezüglich neuer Werkstoffe, Nanopartikel oder Beschichtungen.¹⁵ Ein Grund dafür wurde vermutlich von dem Bericht aus der internationalen Bestandsaufnahme selbst geliefert: Das Ergebnis des Vergleichs mit Europa und Japan war nämlich, dass die USA in den meisten nanotechnologischen Forschungsgebieten führend war, einschließlich „Synthese und Fertigung“, „Dispersionen und Beschichtungen“ und „Materialien mit großen Oberflächen“. Dreimal jedoch und in einer Grafik wird in dem Bericht festgestellt, dass „im Bereich der Nanogeräte Japan anscheinend recht deutlich vor Europa und den USA führt“¹⁶ (Siegel *et al.* 1999, ab-

¹⁵ Vergleiche den als Anhang zum präsidentialen Forschungsbudget für das Haushaltsjahr 2004 konzipierten Bericht des National Science and Technology Councils *National Nanotechnology Initiative: Research and Development Supporting the Next Industrial Revolution*. Dieser Bericht widmet zwar der Erfolgsgeschichte abnutzungsresistenter Beschichtungen einen eigenen Textkasten, der die schnelle Durchsetzung nanotechnischer Innovationen illustrieren soll (NSTC 2003, S. 6). Wo es jedoch um die Herausforderungen der Zukunft geht, wird im Abschnitt „Nanostrukturierte Materialien nach Maß“ vor allem von funktionalisierbaren Materialien gesprochen. Als exemplarisches Beispiel wird bezeichnenderweise „das Ideal des Fulleren“ mit seiner „molekularen Perfektion“ angeführt (NSTC 2003, S. 15-16). Dem entsprechend werden im prospektiven Teil des Berichts Beschichtungen nur beiläufig unter dem Stichwort der selektiven Oberflächen genannt, die die Funktionalität eines freitragenden Fühlerbalkens unterstützen sollen (NSTC 2003, S. 15, 21). Dies steht in deutlichem Kontrast zu europäischen Berichten, die schmutzabweisenden Oberflächen, kratzfreien Lacken, verbesserten Textilien sehr viel mehr Bedeutung zuweisen. (Europa und Japan werden in dem NNI Bericht aus dem Jahr 2003 gar nicht mehr erwähnt.)

¹⁶ Mit „nanodevices“ meint der Bericht zunächst nichts anderes als Nanoröhrchen für Bildschirmtechnologien, biomedizinische Sensoren oder Lese- und Schreibköpfe für elektronische Speicher, die auf dem Gi-

stract, S. xix, xxi, 10). Sofern es Ziel der NNI war, die Dominanz der USA dort zu gewährleisten, wo sie herausgefordert war, musste das Gebiet der Nanogeräte in den Mittelpunkt rücken. Eine Umkehrung des Blickwinkels liegt aber auch nahe. Wenn Geräte und Apparate das interessanteste, bedeutendste, weitreichendste Anwendungsgebiet der Nanotechnologie ausmachen, dann ist es dieses Gebiet vor allen anderen, in dem sich jedes Land und so auch die USA auszeichnen soll. So oder so hat der Materialforscher Richard Siegel ganz unabsichtlich eine Grundlage für die Vernachlässigung der Materialforschung in den nanotechnologischen Visionen der NNI geschaffen, und zwar indem er herausfand, dass die USA in Bezug auf Nanopartikel und nanostrukturierte Materialien in führender Position waren.¹⁷

4. Material und Gerät, Theorie und Fertigkeit

Obwohl es schwer bleibt, am Ursprung der Nanotechnologie einzelne Ideen oder Errungenschaften auszumachen, sollte jetzt zumindest einleuchten, warum in gewissen Kreisen Gleiters Errungenschaft heraus gehoben wird. Und wer Gleiters Bedeutung für die Entwicklung der Nanotechnologie würdigt, nimmt nicht nur eine nachträgliche Zuschreibung vor. Er war nicht nur der erste produktive Nanoforscher, der sich selbst so verstanden hat. Seine Forschungen waren exemplarisch, insofern sie den auch heute noch gültigen strengeren Definitionen der Nanotechnologie genügen, denen zu Folge sie in der Nutzung größenabhängig diskontinuierlicher Eigenschaften besteht.¹⁸ Darüber hinaus gibt es wenigstens eine Schiene, über die Gleiter auf die NNI gewirkt hat, die wiederum eine internationale Norm für die Institutionalisierung der Nanotechnologie als Forschungspriorität darstellt.¹⁹ Der Nachweis all dieser Aspekte verschiebt die Frage auf die nunmehr erklärungsbedürftige vergleichsweise Unbekanntheit Herbert Gleiters und somit auch auf die Unsichtbarkeit der von ihm repräsentierten werkstoffkundlichen Tradition in den historischen Darstellungen und programmatischen Visionen der Nanotechnologie.

Die Antwort auf diese neue Frage wird eine bekannte, gewöhnlich aber nur andeutungsweise zum Ausdruck gebrachte Einstellung verdeutlichen: Neue Keramiken, Lacke, Beschichtungen, Textilien oder Aerosole mögen zwar als gute Beispiele für die jetzige wirtschaftliche Bedeutung der Nanotechnik dienen, reichen aber an die wirklichen Ziele der Nanotechnologie keineswegs heran. Diese Zielvorstellungen beziehen sich auf nanotechnische Systeme und Geräte.²⁰ Im Licht dieser Einstellung nehmen

ant-Magnetoresistance-Effekt beruhen (Siegel *et al.* 1999, xx). Die imaginative Reichweite des Begriffs „Nanogerät“ schließt natürlich aber auch Roboter und Visionen molekularer Fabrikationsverfahren ein.

¹⁷ Dieser Vernachlässigung durch nanotechnologische Visionen entspricht allerdings kein Rückgang in der Förderung oder wirtschaftlichen Bedeutung. Hier bleibt die Materialforschung eine treibende Kraft. Wenn sie „Opfer“ der hier beschriebenen Vernachlässigung ist, dann ist sie Opfer ihres eigenen Erfolgs.

¹⁸ Gleiters Arbeiten sollen ausdrücklich auch der in diesem Band von Michael Decker diskutierten Definition genügen.

¹⁹ Andere Einflusspfade müssen noch erkundet werden, siehe zum Beispiel Fußnote 5 oben. – Selbst der NNI-Bericht des Jahres 2003 (Fußnote 15) enthält noch ein schwaches und vereinfachtes Echo auf Gleiters Grundidee: „nanostrukturierte Materialien manifestieren die einzigartigen Eigenschaften ihrer Bestandteile“ (NSTC 2003, S. 16). Vergleiche hierzu gewissermaßen als Zwischenstufe die oben zitierte Formulierung Siegels, „dass aus der Zusammenfügung ultrafeiner Partikel erstelltes Material seinerseits radikal andere Eigenschaften haben würde“ (Siegel 1996, S. 75).

²⁰ Anekdotische Evidenz hierfür kann beispielsweise aus dem Gebiet der Nanomedizintechnik angeführt werden. Oft präsentieren hier Forscher durchaus wichtige Ergebnisse bezüglich verbesserter Materialien für Knochenimplantate, Beschichtungen für künstliche Gelenke usw. Am Schluss des Vortrags wird dann

Gleiters Materialforschungen einen paradoxen Anschein an. Nachdem die Materialwissenschaft im Nanobereich die scheinbare theoretische Dominanz der Festkörperphysik relativiert hat, strandet sie nun an den Klippen eines Ingenieursideals, nämlich dem Prestige des Geräts gegenüber dem bloßen Material.

Anders ausgedrückt: Als die Nanoforschung eine neue Klasse von Materialien entdeckte und die Charakterisierung von Materialzuständen und Phasenübergängen anregte, begegnete sie dem nanotechnologischen Desinteresse an Theorieentwicklung und stattdessen der beharrlichen Aneignung neuer Kontrollfertigkeiten.²¹ Dieses doppelte Dilemma – das Prestige des Geräts gegenüber dem Material, der gewonnenen Fertigkeit gegenüber der Theorieentwicklung – kann am Schicksal des Begriffs „nanophasiges Material“ illustriert und erläutert werden.

Anders als die neutral und bloß beschreibend gemeinte Bezeichnung „nanostrukturierte Materialien“, bezieht sich Siegels Vorschlag, von „nanophasigen Materialien“ zu sprechen, auf eine theoretische Charakterisierung.²² Er knüpft an Gleiters Vorschlag an, dass nanokristalline Materialien eine neue Klasse gasähnlicher Festkörper darstellen, also einen neuen Materialzustand neben den vertrauten kristallinen und amorphen, bzw. glasähnlichen Zuständen. Für den Fall dass Gleiters Ausdruck „gasähnlich“ missverstanden wird (so als behauptete er, diese Körper seien durchgängig ungeordnet), vermeiden Siegel und Hahn dieses Missverständnis mit ihrer Definition von „nanophasigem Material“. Zwar „manifestieren lokale Atomstrukturen einzelner nanokristalliner Grenzflächen [...] vermutlich geordnete Strukturordnungen, doch wird die Nanophase dagegen durch die Tatsache charakterisiert, dass „die Summe aller Grenzen in nanophasigem Material [...] einen aggregierten Festkörperzustand ohne weit- oder kurzreichende Ordnung darstellen“. Da alle „interatomaren Abstände mit ähnlichen Wahrscheinlichkeiten auftreten“, ist es charakteristisch für nanophasiges Material, dass seine Eigenschaften stark von atomaren Anordnungen abhängen, somit von morphologischer Struktur in atomaren und molekularen Größenordnungen (Siegel & Hahn 1987, S. 409-410, 405). Die Bezeichnung „nanophasige Materialien“ knüpft also an Gleiters Charakterisierung an, indem es diese Materialien als spezifisch nanotechnische Produkte empfiehlt, die ihre Besonderheit der größenabhängigen Diskontinuität verdanken.²³ Es ist

trotzdem noch das langfristige und eigentliche Ziel genannt, nämlich selektive Beschichtungen zu entwickeln für eine gezielte Verabreichung von Wirkstoffen (Medikamentenfähren).

²¹ Nordmann 2004a und 2004b bieten Evidenz aus einer Fallstudie und eine sorgfältigere Erläuterung der Orientierung auf Fertigkeiten statt Theorien. Vergleiche aber Cahns Charakterisierung: „In der Materialwissenschaft versuchen wir mit reproduzierbaren Mitteln zu erreichen, was noch niemand zuvor tun konnte...“ (2001, S. 182).

²² In seinem biographischen Rückblick schreibt Siegel einfach: „Meine Kollegen und ich untersuchten diese Stoffe seit 1985 und als wir spät eines Abends den Titel für einen Forschungsantrag brauchten, taufte ich sie ‚nanophasige Materialien‘“ (Siegel 1996, S. 74).

²³ Dagegen beinhaltet die Bezeichnung „nanostrukturierte Materialien“ eine solche Diskontinuität nicht. Sie umfasst auch einen ganz äußerlich strukturierenden Zugriff, der wie bei lithographischen Verfahren die Materialeigenschaften selbst anscheinend unberührt lässt. Angesichts dieser Bezeichnung ist *überraschend* nicht nur, welche neue Eigenschaften nanostrukturierte Materialien aufweisen, sondern sogar, dass die Nanostrukturierung überhaupt neue Materialeigenschaften bedingt. Dies muss nicht von Übel sein, zumal im Rahmen der Nanotechnologie Überraschungen als Innovationsgaranten hoch geschätzt werden. Die Unvorhersagbarkeit nanoskaliger Phänomene aus den bekannten klassischen und Quantentheorien macht den Nanokosmos überhaupt erst interessant. Zugleich unterstützt gerade diese Wertschätzung des Staunens, der Überraschung, des ganz Neuen und geradezu Magischen die vorherrschende Skepsis bezüglich der Möglichkeit von allgemeinen Theorien über Struktur-Eigenschafts-Beziehungen im Nanobereich.

darum umso bedeutsamer, dass sich diese Bezeichnung nicht durchgesetzt hat.²⁴ In einem Aufsatz über „Nanostrukturierte Materialien“ aus dem Jahr 1993 kommentiert Gleiter diese terminologische Verschiebung in einer Fußnote:

Andere Namen, die in der Vergangenheit verwendet wurden, waren „nanokristalline“ oder „nanophasige Materialien“ sowie „Cluster-assembled Materials“. Da diese Namen der inhaltlichen Ausweitung der Gebietes, die in den letzten Jahren erfolgte, nicht mehr gerecht werden, ist kürzlich der umfassendere Begriff „nanostrukturierte Materialien“ vorgeschlagen worden. (Gleiter 1993, S. 10)²⁵

Die genannte Ausweitung des Gebietes ging mit der zunehmenden Bedeutung von stark geordneten Strukturen mit relativ starren interatomaren Abständen einher, insbesondere den nanostrukturierten Halbleitern, Buckminster Fullerenen und Kohlenstoff Nanoröhrchen. „Nanostrukturierte Materialien“ ist dennoch mehr als ein bloßer Überbegriff, der Gleiters neue Materialien und Smalleys Buckybälle gleichermaßen umfasst, der einerseits die Tradition der Metallhärtung durch mit dem Hammer eingeführte Defekte meint und andererseits die künstlerische Tradition der supramolekularen Chemie mit ihrem Ideal einer gezielten Kontrolle der atomaren Struktur.²⁶ Da „Strukturierung“ immer so etwas wie das Einführen von Ordnung bedeutet, bevorzugt die Bezeichnung „nanostrukturierte Materialien“ das Ideal der präzisen Kontrolle gegenüber den charakteristischen Eigenschaften von „nanophasigen Materialien“, die allesamt auf Unordnung verweisen: die konstitutive Rolle von Defekten, die Abweichung vom perfekten Kristall, die heterogene Konstruktion, die nicht-kohärenten Grenzflächen, die gas-ähnliche Unordnung mit ihren unwahrscheinlichen und instabilen Zuständen, mit denen bezeichnenderweise das Forschungsproblem einhergeht, wie die Aggregation dieser Materialien in gröbere und geordnetere Strukturen verhindert werden kann (vergleiche Gleiter, Birringer *et al.* 1984, aber auch spätere Schriften wie Gleiter 1993). Aus dieser Art Beschreibung und im Gegensatz zu „rationalen Körpern“ wie Nanoschalen, Buckybällen oder Kohlenstoffröhrchen entsteht kaum der Eindruck, dass nanophasige Materialien tauglich seien, in der Konstruktion nanotechnischer Systeme oder Geräte als funktional stabile Elemente zu dienen. Während die Bezeichnung „nanostrukturierte Materialien“ nahe legt, dass sie nach menschlichen Vorstellungen geprägt and gestaltet worden seien, suggeriert „nanophasige Materialien“ einen Materialzustand als ob es sich um einen eigensinnigen Naturzustand handele.

Die bisherige Analyse legt nahe, dass der Begriff „nanophasige Materialien“ nicht in eine bestimmte nanotechnologische Rhetorik passt, dass er einem offenbar bevorzugten Ingenieursideal nicht entspricht, dem zu Folge Nanotechnologie in der Ausübung detaillierter Kontrolle von atomaren, bzw. molekularen Strukturen besteht.²⁷

²⁴ Damit soll nicht gesagt sein, dass die Bezeichnungen „nanophasig“ oder „nanokristallin“ gar nicht mehr gebraucht werden (siehe zum Beispiel Heegn *et al.* 2003).

²⁵ Vergleiche Cahn 2001, S. 398: „die internationale Forschergemeinschaft hat sich auf ‚nanostrukturierte Materialien‘ als den bevorzugten Begriff geeignet, die Ausdrücke ‚nanophasige Materialien‘ und ‚nanokristalline Materialien‘ dienen als Nachrücker“. Cahn warnt an dieser Stelle, dass die Bezeichnung „Nanostrukturen“ jedenfalls zu allgemein sei.

²⁶ Joachim Schummer hat gezeigt, dass sich die Vorstellung funktionalisierbarer Moleküle, die selbst schon kleinen Geräten entsprechen, letzterer Tradition verdankt (Schummer 2006). Ich stimme ihm zu, dass dieses (ästhetische, letztlich auf Analogien zu Ketten, Körben usw. beruhende) Ideal der supramolekularen Chemie die Programme und Visionen der Nanotechnologie dominiert. In der vorliegenden Betrachtung einer materialwissenschaftlichen Tradition kommt gewissermaßen die Kehrseite von Schummers Rekonstruktion zur Sprache.

²⁷ Gleiter und seine Mitarbeiter betonen immer wieder, dass sie über eine Kontrolle dieser Art nicht verfügen: „Viele der bisher durchgeführten Untersuchungen leiden unter den Schwierigkeiten, die für neue

Dies gilt auch für die hiermit einhergehende experimentelle und visuelle Rhetorik. So sind etwa Sondenmikroskope geradezu paradigmatische Werkzeuge der Nanotechnologie, die jedoch in Bezug auf nanophasige Materialien nur sehr beschränkt eingesetzt werden können. Da die Schlussfolgerungen aus den rohen Messdaten in die Software beispielsweise eines Rastertunnelmikroskop (STM) bereits integriert sind, scheint dieses Instrument einen unmittelbaren visuellen Zugang und sogar Kontrolle über die atomare Struktur einer Oberfläche zu ermöglichen. Wer dagegen in ein Material hineinschauen muss, um die Anordnung von Atomen entlang seiner inneren Grenzflächen auszumachen, ist auf die Elektronenmikroskopie und die traditionellen Methoden expliziter Schlussfolgerung aus spektroskopischen, bzw. kristallographischen Daten angewiesen. Da die Sondenmikroskope selbst bereits als nanotechnische Instrumente *par excellence* gelten und das Ideal nanoskaliger Präzision und Kontrolle verkörpern, mag es darum so scheinen, als sei die Erforschung nanophasier Materialien noch nicht so ganz in der schönen neuen Welt der Nanotechnologie angekommen.

Das Prestige des nanotechnischen Geräts mit seiner präzisen Bestimmung und Kontrolle atomarer Strukturen manifestiert sich auch in den produzierten Bildern selbst, wie sie von Rastersonden- und Elektronenmikroskopen produziert werden. Typischerweise bietet das STM einen Blick aus der Perspektive Gottes oder eines Ingenieurs auf eine atomare Landschaft, die offen da liegt und sich allen Erkundungen und Eingriffen anbietet. Die vom STM generierten Bilder wirken sauber und empfehlen ihren Betrachtern eine bunte Welt klar definierter und fester, wenn auch nanoskaliger Körper. Ihre implizite Botschaft ist immer: Hier lässt es sich forschen und leben, denn dies ist eine Welt, die der makroskopischen Welt ähnlich genug ist, um so etwas wie Maschinenbau, die Konstruktion von Schaltkreisen, den gezielten Transport in Behältern usw. zu erlauben (vergleiche Nordmann 2004b). Dagegen sieht die elektronenmikroskopische Innenaufnahme eines Materials schmutzig aus. Sie zeigt eine schwarmähnliche, weder ganz ordentliche noch ganz unordentliche Anordnung winziger schwarzer Punkte, die es uns nicht erlaubt, klare Grenzen zu erkennen und uns darin zurecht zu finden. Diese Bilder drücken die praktisch unerreichbare Ferne der nanoskaligen Innenwelt aus, somit auch die Schwierigkeiten des Zugangs und der Kontrolle, ja sogar die völlige Sinnlosigkeit, ingenieurmäßig irgendetwas durch die Manipulation einzelner Atome erreichen zu wollen.²⁸

Forschungsgebiete typisch sind; zum Beispiel unter Schwierigkeiten der Probenzubereitung, durch den Mangel an Methoden zur Charakterisierung der Proben und den jetzt bestehenden Grenzen bei der theoretischen Modellierung solcher Systeme“ (Gleiter 1989, S. 227). Vergleiche Siegel & Hahn 1987, S. 410: „Die tatsächliche atomare Natur dieser Grenzen ist bisher nicht bestimmt, aber es wird erwartet, dass elektronenmikroskopische Untersuchungen des nanophasigen Materials bei atomarer Auflösung diese Struktur aufklären werden“. Die genannten Grenzen sind entscheidend für theoretisches Verstehen, nicht aber für die Herstellung und Charakterisierung nanophasigen Materials. Dass diese Grenzen inzwischen zwar verschoben sind, aber prinzipiell weiterhin bestehen, verdeutlicht Suryanarayana 2005.

²⁸ Baird und Shew 2004 haben gezeigt, dass die experimentelle und visuelle Rhetorik des STM von seiner tatsächlichen Nützlichkeit in der Laborforschung unterschieden werden muss. In vielen Fällen erweist sich die Elektronenmikroskopie als überlegen (und diese Überlegenheit mag sich schon daraus ergeben, dass die vom STM mitgelieferte Interpretation der Daten schwieriger einzuschätzen und weniger transparent ist als im Fall der Elektronenmikroskopie). Und doch ist es innerhalb einer neuartigen Forschungskultur, in der es einen Wettbewerb um immer bessere Darstellungstechniken gibt, für jede Disziplin schwierig, die aus systematischen Gründen auf „langweilige“ und „schmutzige“ Bilder beschränkt ist. (Umgekehrt ließe sich argumentieren, dass es wegen der praktischen Errungenschaften der Materialforschung weniger notwendig ist, spektakuläre Bilder als Ersatz für noch nicht eingelöste technische Versprechungen vorzuschreiben: Die neuen Materialien sprechen für sich selbst, während nanoskalige Geräte visuell überzeugender Möglichkeitsbeweise bedürfen, die für sie sprechen müssen.)

All dies deutet an, wie ein gewisses Ingenieursideal atomarer Präzision, geplanter Systeme und Geräte dazu dient, die Entwicklung „bloßer“ Materialien herabzustufen. Schliesslich lässt sich aufzeigen, dass dieses Schicksal auch die Verpflichtung auf theoretische Fragen ereilt, etwa das Interesse, das sich mit der Charakterisierung nanostrukturierter Materialien als „nanophasig“ verbindet. Hierbei wird sich zeigen, dass die Methoden für die Herstellung neuer Material einflussreicher waren als der Vorschlag, diese Materialien als Beispiele einen neuen Materialzustands zu betrachten. Dies würde bedeuten, dass für Richard Siegel und die meisten anderen Forscher Modellierung und Verstehen lokaler Prozesse an den Grenzflächen ein nebengeordnetes Unterfangen ist, das sich parallel zu den alles entscheidenden Innovationsprozessen vollzieht, relativ unabhängig also von der Erarbeitung neuer Fertigkeiten bei der Herstellung neuer Materialien und der Manipulation ihrer Eigenschaften.²⁹

Da es methodisch schwierig ist, die Abwesenheit eines Forschungsinteresses oder dessen geringe Bedeutung nachzuweisen, kann hier nur eine indirekte Beweisführung skizziert werden. Sie geht vom gegenwärtigen Gebrauch des Wortes „nanophasig“ aus. Während sein Ursprung auf eine theoretische Begrifflichkeit und die Charakterisierung eines besonderen Materialzustands zurückgeht, trägt der spätere Gebrauch dieses Worts keine Spuren hiervon. So beschreiben die Webseiten der von Richard Siegel gegründeten Firma *Nanophase Technologies* eine breite Palette von Produkten und Dienstleistungen, gehen aber nirgendwo darauf ein, was all diesen Produkten gemein ist. Das *Nanophase Research Training Network* bezieht sich überhaupt nicht auf eine Klasse von Materialien, sondern benützt das Wort als ein Akronym für „*nanoscale photon absorption and spectroscopy with electrons*“. Besonders bedeutsam ist vielleicht, dass das *Center for Nanophase Materials Sciences* am Oak Ridge National Laboratory ein Institut für *Nanomaterials Theory* beheimatet und womit sich dieses Institut beschäftigt. Ihm geht es um die Entwicklung von Computersimulationen für „den Entwurf funktionaler Nanomaterialien und ihrer virtuellen Synthese“. Mit „Theorie“ werden hier Modellierungs- und Simulationstechniken gleichgesetzt, wobei diese Techniken nicht vor allem dem Verständnis eines neuen Naturphänomens und Materialzustands dienen, sondern eine Vision der perfekten technischen Kontrolle vorgehend realisieren sollen. Dem entsprechend findet sich auf der Webseite und in der Broschüre des Centers ein Bild aus einer Computersimulation, in dem ein Fulleren die technische Funktion eines Schleppschiffs übernimmt, das ein Heliumatom durch ein Kohlenstoffröhrchen navigiert.³⁰ Wissenschaftstheoretiker würden somit „nanophasig“ als einen theoretischen Begriff bezeichnen, der aus seinem theoretischen Zusammenhang entwurzelt zum Diener vieler Herren wurde.

Nach einer vereinfachten, aber weit verbreiteten Vorstellung, spaltet sich die Welt der Nanoforscher in zwei Lager. In dem einen Lager befindet sich nur eine kleine Schar von Außenseitern, die in der Gefolgschaft Eric Drexlers naiv postulieren, dass sich die Prinzipien des makroskopischen Maschinenbaus einfach auf die Ebene der Atome und Moleküle herunterskalieren liessen. Alle anderen, einschließlich aller seriösen Nano-

²⁹ Nordmann 2004a entwickelt ein ähnliches Argument in Bezug auf eine Fallstudie aus dem nanotechnologischen Forschungsfeld der molekularen Elektronik.

³⁰ Die hier genannten Beispiele entsprechen einer Google-Suche am 17. Januar 2006, bei der der Ausdruck „nanostructured material“ 14.500, „nanophase material“ dagegen nur 386 Treffer erzielte (der Plural ist ergiebiger: 444.000 zu 57.400). Betreffs *Nanophase Technologies* siehe <http://www.nanophase.com>; betreffs *Nanophase Research Training Network* siehe <http://www-users.york.ac.uk/~rwg3/nanophase.html>, schließlich zum *Center for Nanophase Materials Sciences* at Oak Ridge National Laboratories siehe http://www.cnms.ornl.gov/workshops/inaugural/CNMS_Fact_Sheet_2005-Feb.pdf (Zugang zu allen drei Seiten am 2. Januar 2006).

forscher gehören in das andere Lager. Dieser Beitrag legt nahe, dass die Verwerfungslinien anders verlaufen und zwar durch diverse Nanoforschungsgemeinschaften hindurch. Innerhalb der Materialforschung verorten sich nun diejenigen, die aus rationalen Entwürfen nahezu perfekte Körper entwickeln, die als Bausteine für nanotechnische Systeme und Geräte dienen können.³¹ Dort finden sich aber auch diejenigen, die auf kontrollierte Weise absichtsvoll ungeordnete Strukturen erzeugen, deren überraschende Eigenschaften möglicherweise nützlich sind. Das Wort „nanophasig“ wird aus seinem ursprünglichen Zusammenhang genommen und ganz unterschiedlich gebraucht – ein Schicksal, das es mit den Begriffen „self-assembly“, „bottom-up engineering“, aber auch er „Kontrolle“ teilt. Unaufgelöst bleibt vor allem jedoch die grundsätzliche Spannung zwischen einer Betonung des neuartigen, überraschenden, unvorhersehbaren Charakters nanogrößenabhängiger Phänomene und dem Ehrgeiz, maschinenartige Systeme und Geräte zu konstruieren.³²

Ob Herbert Gleiter als ein Gründervater in die Geschichten der Nanotechnologie eingehen soll (weil er nämlich der wahrscheinlich erste Forscher war, der visionär und experimentell ein ausdrücklich nanotechnisches Forschungsprogramm erfolgreich verfolgt hat) oder ob er zu Recht in solchen Geschichten vernachlässigt wird (weil er nämlich eine neue Klasse von Materialien wegen ihrer „gasförmigen Unordnung“ dem theoretischen und praktischen Interesse anempfohlen hat), das hängt davon ab, wie sich die Verwerfungslinien künftig herauskristallisieren und immer wieder neu gezogen werden. Es hängt also nicht davon ab, was die Nanotechnologie denn nun ist oder nicht ist, sondern davon, wohin sich die nanotechnischen Forschungsschwerpunkte orientieren, wie die Ambivalenzen von Instabilität und Kontrolle ausgehandelt werden oder ob es schließlich doch eine Bemühung um disziplinäre Vereinheitlichung in Bezug auf nanoskalig komplexe Struktur-Eigenschafts-Beziehungen geben wird.³³

Literaturverzeichnis

- Amato, I. (1999): *Nanotechnology – Shaping the World Atom by Atom*, Washington: National Science and Technology Council, Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology.
- Baird, D. & Shew, A. (2004): „Probing the History of Scanning Tunneling Microscopy“, in: Baird, D.; Nordmann, A. & Schummer, J. (Hrsg.), *Discovering the Nanoscale*, Amsterdam: IOS Press, S. 145-156.
- Bensaude-Vincent, B. (2001): „The construction of a discipline: Materials science in the United States“, *Historical Studies in the Physical Sciences* 31, 223-248.
- Birringer, R.; Gleiter, H.; Klein, H.-P. & Marquardt, P. (1984): „Nanocrystalline Materials: An Approach to a Novel Solid Structure with Gas-Like Disorder“, *Physics Letters A*, 102:8, 365-369.
- Cahn, R.W. (2001): *The Coming of Materials Science*, Amsterdam: Pergamon.
- Cox, D.M. (1999): „High Surface Area Materials“, in: Siegel, R.W.; Hu, E. & Roco, M.C. (Hrsg.), *Nanostructure Science and Technology: A Worldwide Study*, Washington: National Science and Technology Council, 1999, S. 49-66.

³¹ Die Heterogenität materialwissenschaftlicher Forschung wird von Robert Cahn thematisiert. Statt von Subdisziplinen oder Spezialisierungen spricht er von „Parepistemen“ und bezeichnet das Arbeitsgebiet der nanostrukturierten Materialien als gutes Beispiel einer erfolgreichen Parepisteme (Cahn 2001, S. 159-185, 401). Vergleiche dies jedoch mit der Darstellung Bernadette Bensaude-Vincent (2001).

³² Richard Jones schlägt in seinem Buch *Soft Machines* vor, wie diese Spannung überwunden werden kann (Jones 2004). Es bleibt aber abzuwarten, ob seine Darstellung dazu dienen wird, tief verwurzelte Ingenieursparadigmen neu zu orientieren, oder ob sie sich in einer bloß semantischen Bemühung erschöpft, zwei unvereinbare Vorstellungswelten zusammen zu zwingen (also auch dort von „Maschinen“ zu sprechen, wo dem Begriff der Maschine kein Sinn mehr verliehen werden kann).

³³ Die Debatten, die der Nanoforschung hier womöglich noch bevorstehen, würden vielleicht von einer Rekonstruktion auch der Meinungsunterschiede oder Kontroversen profitieren, die von Gleiter angestoßen wurden. Dies bleibt Gegenstand einer weiterführenden Untersuchung.

- Feynman, R. P. (2001): „Da unten ist jede Menge Platz“, in: *Es ist so einfach: Vom Vergnügen, Dinge zu entdecken*, München: Piper, S. 153-179.
- Gleiter, H. (1981): „Materials with Ultra-Fine Grain Sizes“, in: Hansen, N.; Leffers, T. & Lilholt, H. (Hrsg.), *Proceedings of the Second Risø International Symposium on Metallurgy and Materials Science*, Roskilde: Risø National Laboratory, p. 15-22.
- Gleiter, H. (1989): „Nanocrystalline Materials“, *Progress in Materials Science*, 33:4, 223-315.
- Gleiter, H. (1993): *Nanostrukturierte Materialien* (387. Sitzung der Nordrhein-Westfälischen Akademie der Wissenschaften am 4.11.1992), Opladen: Westdeutscher Verlag, S. 7-35.
- Gleiter, H. & Chalmers, B. (1972): *High-Angle Grain Boundaries*, Oxford: Pergamon Press.
- Gleiter, H. & Marquardt, P. (1984): „Nanokristalline Strukturen – ein Weg zu neuen Materialien?“, *Zeitschrift für Materialkunde*, 75:4, 263-267.
- Heegn, H.; Birkeneder, F. & Kamptner, A. (2003): „Mechanical activation of precursors for nanocrystalline materials“, *Crystal Research and Technology*, 38:1, 7-20.
- Hu, E. & Shaw, D. (1999): „Synthesis and Assembly“ in: Siegel, R.W.; Hu, E. & Roco, M.C. (Hrsg.), *Nanostructure Science and Technology: A Worldwide Study*, Washington: National Science and Technology Council, 1999, S. 15-34.
- Jones, R. (2004): *Soft Machines*, Oxford: Oxford University Press.
- Kear, B.H.; Cross, L.E.; Keem, J.E.; Siegel, R.W.; Spaepen, F.; Taylor, K.C.; Thomas, E.L. & Tu, K.-N. (1989): *Research Opportunities for Materials with Ultrafine Microstructures*, National Materials Advisory Board, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council, Washington D.C.: National Academy, Vol. NMAB-454 [<http://www.nap.edu/execsumm/030904183X.html>] (Zugang am 30.12.2005).
- Kebllinski, P.; Phillpot, S. R.; Wolf, D. & Gleiter, H. (1999): „Self-diffusion in high-angle fcc-metal grain boundaries by molecular-dynamics simulation“, *Philosophical Magazine A*, 79, 2735–2761.
- Koch, C. (1999): „Bulk Behavior of Nanostructured Materials“, in: Siegel, R.W.; Hu, E. & Roco, M.C. (Hrsg.), *Nanostructure Science and Technology: A Worldwide Study*, Washington: National Science and Technology Council, 1999, S. 93-112.
- Lu, K. (1999): „Synthesis of Nanocrystalline Materials from Amorphous Solids“, *Advanced Materials*, 11:13, 1127-28.
- Marquardt, P. & Gleiter, H. (1980): „Herstellung und Eigenschaften mikrokristalliner Festkörper“, *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 15, 328.
- Nordmann, A. (2004a): „Molecular Disjunctions: Staking Claims at the Nanoscale“, in: Baird, D; Nordmann, A. & Schummer, J. (Hrsg.), *Discovering the Nanoscale*, Amsterdam: IOS Press, S. 51-62.
- Nordmann, A. (2004b): „Nanotechnology’s Worldview: New Space for Old Cosmologies“, *IEEE Technology and Society Magazine*, 23:4, S. 48-54.
- NSTC (2003): *National Nanotechnology Initiative: Research and Development Supporting the Next Industrial Revolution*, Supplement to the President’s FY 2004 Budget, Washington: National Science and Technology Council.
- Roco, M. (2004): „Nanoscale Science and Engineering: Unifying and Transforming Tools“, *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 50:5, 890-897.
- Schummer, J. (2006): „Gestalt Switch in Molecular Image Perception: The Aesthetic Origin of Molecular Nanotechnology in Supramolecular Chemistry“, erscheint in *Foundations of Chemistry*.
- Schwarz, R.B. (1998): „Storage of Hydrogen in Powders with Nanosized Crystalline Domains“, in: Siegel, R.W.; Hu, E. & Roco, M.C. (Hrsg.), *WTEC Workshop Report on R&D Status and Trends in Nanoparticles, Nanostructured Materials, and Nanodevices in the United States*, Baltimore: International Technology Research Institute, S. 93-95.
- Siegel, R.W. (1996): „Creating Nanophase Materials“, *Scientific American* (December), S. 74-79.
- Siegel, R.W. & Hahn, H. (1987): „Nanophase Materials“, in: Yussouff, M. (Hrsg.), *Current Trends in Physics of Materials*, Singapore: World Scientific Publications, S. 403-419.
- Suryanarayana, C. (2005): „Recent Developments in Nanostructured Materials“, *Advanced Engineering Materials*, 7:11, 983-992.
- Weins, M.J.; Gleiter, H. & Chalmers, B. (1971) „Computer Calculations of the Structure and Energy of High-Angle Grain Boundaries“, *Journal of Applied Physics*, 42:7, 2639-2645.
- Yamakov, V.; Wolf, D.; Phillpot, S.; Mukherjee, A. & Gleiter, H. (2002): „Dislocation Processes in the Deformation of Nanocrystalline Aluminium by Molecular-Dynamics Simulation“, *Nature Materials*, 1 (September 2002), 1-4.
- Ziman, J. (1964): *Principles of the Theory of Solids*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Ziman, J. (1968): *Reliable Knowledge*, London: Cambridge University Press.
- Ziman, J. (2000): *Post-Academic Science*, Cambridge: Cambridge University Press.