

Aspekte einer nachhaltigen Gestaltung von Nanotechnologien

13 Designprinzipien

Arbeitsgruppe ‚Green Nano‘ (30. 8. 2010)

1 Vorbemerkung

Der vorliegende Entwurf gibt den Stand nach der Sitzung der Nanokommission vom 18. 6. 2010 wieder. Dort wurde angeregt, den Text nach folgenden Gesichtspunkten noch einmal kritisch durchzusehen und ggf. zu überarbeiten:

- Vermeidung zu weitgehender Generalisierungen mit der Gefahr von Fehlschlüssen, Aspekt des Lernens von der Natur nicht überziehen
- Mögliche Widersprüche zwischen den Anforderungen aus unterschiedlichen Designprinzipien beachten, Betonung des nötigen Abwägungsprozesses.

2 Nachhaltige Gestaltung von Nanotechnologien (green nano)

Das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung ist nicht allein mit technischen Innovationen zu erreichen, braucht aber einen Beitrag aus Innovationen. Die Nanotechnologien eröffnen in Richtung auf ein nachhaltigeres Wirtschaften interessante Möglichkeiten, auch wenn derzeit viele Entwicklungen noch am Anfang stehen und deshalb vielfach noch offen ist, wohin sich Technologielinien konkret entwickeln werden. Bisher vollzieht sich die Nanotechnologieentwicklung stark wissenschafts- und technologiegetrieben. Es sind vor allem die neuen technischen Möglichkeiten, die – wenn sie mit Problemlösungen verbunden werden können - die Innovationschancen eröffnen. Mit Blick auf Nachhaltigkeitsziele geht es derzeit also vor allem um die Beeinflussung der Wissenschafts- und Technologieentwicklung, des technology push. Die Einflussnahme zielt dabei sowohl auf eine Orientierung an nachhaltigen Anwendungszwecke der Nanotechnologien (z. B. Umweltentlastung und Ressourcenschutz), als auch auf eine nachhaltige Gestaltung der technologischen Lösung selbst (green nano).

Noch sind nicht viele Beispiele für eine erfolgsversprechende gesellschaftliche Mitgestaltung in einer so frühen Phase im Innovationsprozess bekannt. Bisher eher vernachlässigt sind die Möglichkeiten einer Mitgestaltung über Leitbilder, ihre Diskussion, Ausgestaltung und Operationalisierung. Im Folgenden sollen diese Möglichkeiten am Beispiel des Leitbilds ‚Nachhaltige Nanotechnologien‘ bzw. ‚green nano‘ diskutiert werden. Es geht also um die Fragen, was dieses Leitbild konkret bedeutet und mit Hilfe welcher ‚Designprinzipien‘ eine leitbildorientierte Technik- und Produktentwicklung umgesetzt werden kann¹.

Wesentliche Adressaten für eine nachhaltige Gestaltung der Nanotechnologien, mit denen die hier vorgeschlagenen Designprinzipien permanent rückgekoppelt werden müssen, arbeiten somit in der Grundlagenforschung, in der Forschungsförderung (High-Tech-Strategie der Bundesregierung), in der strategischen Unternehmensentwicklung, in den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen von Unternehmen und in Stakeholderorganisationen insbesondere des Umwelt- und Verbraucherschutzes, der Gewerkschaften und der Kirchen/ Akademien (Multiplikatoren). Mit Blick auf ökonomische Akteure sind zunächst die forschenden Unternehmen und Technologieentwickler, bzw. die Nanomaterialien herstellenden Unternehmen im Blick. Aber auch von den Anwenderbranchen ist bekannt, dass sie – wenn es sich z.B. um Systemführer (bzw. fokale Unternehmen) wie die Automobilindustrie handelt - starken Einfluss auf die vorgelagerten Entwicklungen nehmen können.

3 Voraussetzungen

Die folgenden Überlegungen beziehen sich im Wesentlichen auf den aktuellen Stand der nanotechnologischen Entwicklungen, haben somit einen Schwerpunkt im Bereich der Nanomaterialien. Sie lassen sich aber nicht auf diese beschränken. Auch die nächsten ‚Generationen‘ der Nanotechnologien wie Nanosysteme (z.B. intelligente Drug Delivery Systeme) werden in den Blick genommen. Außerdem werden nicht nur die unmittelbar nanotechnologischen Elemente bzw. Systeme betrachtet, sondern auch die Prozesse und Produkte, in denen diese eingesetzt werden. Betrachtet werden soll der gesamte Produktlebenszyklus von der Rohstoffgewinnung bis zum Recycling.

Zwei wichtige Voraussetzungen für das Arbeiten mit Designprinzipien einer nachhaltigen Nanotechnologie müssen hier allerdings noch vorausgeschickt werden: Es müssen überhaupt Handlungsspielräume existieren für ein entsprechendes Design. Es müssen zum einen *gesellschaftliche Handlungsspielräume* existieren im

¹ Orientierung für das Arbeiten mit Leitbildern und den Entwurf von ‚Designprinzipien‘ bietet das in den USA sehr erfolgreiche Beispiel ‚green chemistry‘.

Forschungs- und Entwicklungsprozess. Akteure in den Innovationssystemen müssen die Möglichkeit haben, diese Prinzipien aufzugreifen und in die F&E-Prozesse einfließen zu lassen. Dabei sollen diese Designprinzipien nicht als ‚Vorschriften‘ missverstanden werden. Es handelt sich um Zielvorstellungen bzw. Orientierungen. Dabei ist es unvermeidbar, dass Anforderungen aus unterschiedlichen Designprinzipien in einem Spannungsprozess zueinander stehen oder sich gar widersprechen können. Die Umsetzung der Vorgaben durch die Designprinzipien vollzieht sich somit im Rahmen eines komplexen Optimierungsprozesses. Schließlich sind auch diese Designprinzipien nur ein bestimmendes Element unter mehreren, wichtig sind natürlich auch die technische Funktion und die Wirtschaftlichkeit.

Zum anderen müssen *technische Handlungsspielräume* existieren. Das große gesellschaftliche und technische Interesse an nanotechnologischen Innovationen beruht im Wesentlichen auf Nanofunktionalitäten. Als Nanofunktionalitäten werden dabei Eigenschaften bzw. Effekte bezeichnet, die auf Nanoebene neu oder verstärkt auftreten, also z. B. neue oder verstärkte optische, magnetische, elektrische Eigenschaften, Quanteneffekte sowie die Reaktivität und Mobilität von Nanopartikeln. Handlungsspielräume für ein nachhaltiges Design existieren dann, wenn diejenigen Nanofunktionalitäten, die den Einsatz von Nano im jeweiligen Innovationsprozess besonders interessant machen (die in diesem Fall genutzten technischen Funktionalitäten, z. B. Superparamagnetismus oder Quanteneffekte), nicht identisch und somit funktional trennbar sind, von anderen unter Gesundheits- Sicherheit- und Umweltaspekten besonders problematischen Nanofunktionalitäten (z.B. Reaktivität oder Mobilität). Dies wird in vielen aber nicht in allen Fällen möglich sein. Wenn z. B. bei Drug Delivery Systems gezielt auf die Überwindung biologischer Barrieren gesetzt wird, ist das Bestreben genau diese Funktionalität durch ein nachhaltiges Design zu vermeiden oder zu minimieren möglicherweise kontraproduktiv. Trotzdem können auch in diesem Fall durch ein gezieltes Design oder durch bestimmte Einsatzbedingungen bestimmte Expositionen und bestimmte unerwünschte Nebenwirkungen vermieden bzw. minimiert werden.

4 Leitbildorientierte Gestaltung als Ansatz des nicht-regulativen vorsorgeorientierten Risikomanagements

Leitbilder geben Orientierung im Innovationsprozess. Sie reduzieren und ordnen Komplexität. Sie strukturieren und synchronisieren die Wahrnehmung und gemeinsame Aktivitäten (Gruppenidentität) von Akteuren im Innovationssystem. Erfolgreiche Leitbilder wie z. B. ‚solares Wirtschaften‘ oder ‚Kreislaufwirtschaft‘ motivieren verschiedenste Akteursgruppen. Sie verbinden das Wünschbare (und damit Normativität und Emotionalität) mit dem Machbaren und unterscheiden sich insofern von Visionen oder abstrakten Utopien. Leitbilder tragen dazu bei, die Unsicherheiten über Chancen und Risiken, über Erfolg und Misserfolg von Innovationen zu überbrücken, wobei diese Unsicherheiten zu den wichtigsten Innovationshemmnissen überhaupt gehören.

Die leitbildorientierte Gestaltung von nanobasierten Prozessen, Produkten und Nanomaterialien soll als eigenverantwortlicher (d.h. nicht regulativer) Ansatz für eine nachhaltige Technologieentwicklung stärker als bisher beachtet werden. Sie darf aber nicht als Alternative zu notwendigen regulativen Maßnahmen des Risikomanagements missverstanden werden. Sie ist vielmehr als Beitrag zu verstehen, alle Handlungsmöglichkeiten im Sinne einer nachhaltigen Technologieentwicklung und eines vorsorgeorientierten Risikomanagements so weit wie möglich auszuschöpfen.

Der Gestaltungsdiskurs setzt damit ebenso wie eine vorläufige Risikoabschätzung mit Hilfe von Entlastungs- und Besorgniskriterien sehr früh und vorsorgeorientiert im Innovationsprozess an. Indem er sich sowohl auf die Minimierung von Risiken als auch auf die Realisierung von Chancen konzentriert, überwindet er schon in dieser frühen Phase der Innovation die Trennung zwischen Risiko- und Chancendiskurs. Die leitbildorientierte Gestaltung ist zudem als Ansatz geradezu prädestiniert für einen Stakeholderdialog, weil ‚Leitbilder‘ gesellschaftliche Konstrukte darstellen, die nur im gesellschaftlichen (öffentlichen) Diskurs entstehen, präzisiert und operationalisiert werden können. Der partizipative Gestaltungsdiskurs ist derzeit allerdings noch stark unterentwickelt im Vergleich zum partizipativen Gefährdungs- bzw. Risikodiskurs.

5 Welches Leitbild? Was bedeutet hier ‚Nachhaltig‘ oder ‚green‘?

Die im Folgenden vorgestellten Designprinzipien beziehen sich auf das Ziel der Entwicklung ‚Nachhaltiger Nanotechnologien‘ (bzw. im internationalen Raum ‚green nano‘) im Sinne einer expliziten Berücksichtigung von Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsaspekten.

Sie zielen somit im Wesentlichen auf die folgenden Anforderungen an Materialien, Prozesse und Produkte:

- Kreislaufwirtschaft (kreislauffähige Materialien und Produkte)
- Ressourceneffizienz (hohe Energie- und Materialeffizienz, atomare Effizienz, molekulare Spezifität, geringe Entropieproduktion)
- Risikoarmut und Vorsorgeorientierung (geringe (Öko)Toxizität, geringe technische Risiken inkl. Explosivität, Strahlung usw.)
- Solares Wirtschaften (Wirtschaften auf Basis regenerativer Energiequellen und nachwachsender Rohstoffe).

Das Leitbild ‚Nachhaltige Nanotechnologien‘ bezieht sich somit auf ein recht breites Spektrum von Umsetzungsmöglichkeiten, angefangen von Emissionsminderungs- und Umweltsanierungsmaßnahmen bis hin zur Biomimetik. Ziel der letzteren ist nicht nur die Minimierung und Vermeidung negativer, sondern die Realisierung positiver

Wirkungen auf Mensch und Natur. Im englischsprachigen Raum ist hierfür eine interessante Formulierung gebräuchlich: ‚benign by design‘². Der Stoffwechsel von Organismen, ihr Umgang mit Stoffen, Energien und Selbstorganisationsprinzipien ist faszinierend. Abfallarme, hocheffiziente Stoffumsetzungen bei Außentemperatur, solares Wirtschaften, Kreislaufwirtschaft, viele Leitbilder eines Nachhaltigen Wirtschaftens sind in der Biosphäre verwirklicht. Die Orientierung am Vorbild Natur darf aber auch nicht überzogen oder gar zum Dogma erhoben werden. Eine Innovation muss nicht schon allein deshalb ‚gut‘ werden, weil sie unter einem bestimmten Leitbild erfolgte. Das Leitbild erhöht möglicherweise nur die Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung. Letztendlich müssen alle – auch die leitbildorientierten Innovationen – einem komplexen Bewertungsprozess mit Hilfe der üblichen Technik-, Stoff- und Produktbewertungsmethoden unterzogen werden.

6 Struktur der Designprinzipien

Die im Folgenden vorgestellten Designprinzipien sind gegliedert nach vier Hauptfeldern (vgl. Abbildung 1):

- I. Biomimetik
- II. Risikoarmut
- III. Ressourceneffizienz
- IV. Energie- und Umwelttechnik

Wobei in der Abbildung 1 die Innovationsschrittweite (Innovationshöhe) von links unten nach rechts oben in der Regel zunehmen dürfte.

² Vgl. Anastas 1994

Nachhaltige Nanotechnologien 13 Designprinzipien



Abbildung 1: Struktur der Designprinzipien

7 Die Designprinzipien im Einzelnen

I. Biomimetik

1. Nutzung lokaler Stoff- und Energiequellen (energetischer und stofflicher Opportunismus)

Bevorzuge regenerative und ‚nahe liegende‘ Energiequellen und Nachwachsende Rohstoffe sowie Stoffe, die ohnehin schon in großen Mengen in bio-geo-chemischen Kreisläufen zirkulieren.

Beispiele: Sonnenenergie, Abwärme, biogene Naturstoffe (z. B. Zellulose, Pflanzenöle usw.), Kalk usw.

2. Selbstorganisation (bottom-up) als Herstellungsparadigma

Bevorzuge die Nutzung molekularer Selbstorganisation und der Kontextsteuerung bei der Herstellung komplexer Strukturen und Systeme.

Beispiele: Self assembly (SAMs), Templat gesteuerte Kristallisation (Biominalisation) zur Herstellung hierarchisch strukturierter, anisotroper, selbstheilender Werkstoffe.

3. Physiologische Herstellungsbedingungen

Bevorzuge ‚physiologische Bedingungen‘ der Herstellung und Verarbeitung.

Physiologische Herstellungsbedingungen: Eine ‚wässrige Synthese‘ käme dem z. B. nahe, pH um 7, Umgebungsdruck und –temperatur, Reduzierung / möglichst Vermeidung von Gefahrstoffen.

II. Risikoarmut – Benign by design

4. Vermeidung sicherheits-, umwelt- oder gesundheitsgefährdender Nanostrukturen und Nanomorphologien sowie toxische Stoffe

Bevorzuge ein risikoarmes Design (benign by design). Vermeide problematische Nanostrukturen, Nanomorphologien sowie Gefahrstoffe.

Beispiele für problematische Morphologie und Stoffeigenschaft: Asbestähnlichkeit.

Beispiele für Gefahrenmerkmale: Bioakkumulativ, persistent, (öko)toxisch, Aufnahme und Reaktivität in Zellen, staubend/explosiv.

Möglicher Ansatzpunkt für ein ‚benignes design‘: Quantitative Structure Activity Relations (QSAR).

5. Verantwortungsvoller Einsatz von Nanofunktionalitäten

Nutze die technisch intendierten Nanofunktionalitäten so, dass mit ihnen möglichst geringe *sicherheits-, umwelt- oder gesundheitsgefährdende* Nanofunktionalitäten verbunden sind und / oder so, dass existierende technische oder stoffliche Risiken vermieden bzw. minimiert werden (Gefahrstoffsubstitution).

Beispiele für problematische Nanofunktionalitäten und Oberflächeneigenschaften von Nanomaterialien: Überwindung biologischer Barrieren, Mobilität in Umweltmedien, Reaktivität.

Ansätze zur Trennung / Verminderung / Vermeidung problematischer Nanofunktionalitäten: Wahl von Stoff und Gestalt, Coating, Oberflächenfunktionalisierung durch Liganden usw.

Interessante Ansätze zur Gefahrstoffsubstitution bieten nanotechnologische Lösungen in den Bereichen Lösemittel, Brandschutzmittel, Metalle usw.

6. Minimierung und möglichst Vermeidung von Expositionsmöglichkeiten

Gestalte die Nanoobjekte und -systeme sowie die Prozesse und Produkte und deren Lebenszyklus so, dass Freisetzungen und Expositionsmöglichkeiten minimiert oder möglichst verhindert werden.

Ansätze zur Expositionsminderung / -verhinderung liegen zum einen im Objekt und Materialdesign zur Minimierung von Mobilität, Bioverfügbarkeit, Bindung in Matrix.

Andererseits bietet auch das Prozess- und Produktdesign z.B. durch Containment Ansatzpunkte auf verschiedenen Ebenen und nicht zuletzt die Reduzierung der Produktions- und Einsatzmengen auf das geringst mögliche Ausmaß. Neben der Berücksichtigung der anderen Prinzipien sind die Vermeidung einer Freisetzung ohne Wissen über den Verbleib sowie eines Inverkehrbringens ohne Methoden zum sicheren Nachweis im Körper / in der Umwelt und zur Expositionsbestimmung in situ wichtige weitere Voraussetzungen.

III. Ressourceneffizienz

7. Atomare Effizienz und molekulare Spezifität

Gestalte die Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse abfallarm und mit geringer Materialintensität.

Ansätze zur molekularen Spezifität und atomaren Effizienz, zur Vermeidung / Minimierung von Nebenreaktionen, Abfällen und Emissionen bieten Prozesse der molekularen Erkennung, der (Auto)Katalyse, enzymatische Reaktionen sowie Präzisionsherstellung und -gestaltung.

Ansätze zu geringer Materialintensität bieten Miniaturisierung / Dematerialisierung, Vermeidung aufwendiger Reinigungsprozesse bei der Herstellung, Vermeidung seltener Stoffe (mit großem ökologischem Rucksack), Einsparung von Reinigungsmitteln durch selbstreinigende Oberflächen sowie die Vermeidung von dissipativen Verlusten z. B. durch Korrosionsschutz.

8. Energieeffizienz

Gestalte Prozesse und Produkte mit einem hohen Wirkungsgrad und mit hoher Energieeffizienz über den gesamten Produktlebenszyklus.

Ansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz bieten z. B. höhere Wirkungsgrade (Stromerzeugung, Licht usw.), niedrige Prozesstemperaturen, Minimierung der Entropieproduktion (Umwandlung in Wärme und Wärmeverluste), Leichtbau usw.

9. Kreislauffähigkeit

Wähle die Stoffe und gestalte die Prozesse und Produkte so, dass die Stoffe ohne große Qualitätseinbußen in der Technosphäre im Kreis geführt werden können. Vermeide / minimiere unwiederbringliche (dissipative) Verluste.

Ansätze zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit bieten: Geringe Materialvielfalt, gute Trennbarkeit/Modularität, Minimierung von Zusatz- und Hilfsstoffen, Vermeidung dissipativer Nutzungsformen, diffuser Emissionen und von Materialverunreinigungen (Störstoffen).

Eine besonders interessante ‚Nanooption‘ besteht z. B. darin, unterschiedliche (auch anisotrope) Werkstoffqualitäten anstatt durch Legierungen und Zusatzstoffe durch gezielte Beeinflussung der Kristallisation (Kornbildung) bzw. der Polymerisation zu erzielen.

IV. Energie-und Umwelttechnik

10. Emissionsminderung

Nutze die sich durch Nanotechnologien eröffnenden Möglichkeiten zur Emissionsminderung.

Nanotechnologische Ansätze zur Emissionsminderung bieten insbesondere Filter, Membranen, Fällungsmittel und Katalysatoren (off site, on site) aber auch Nanoelektronik zum Prozessmonitoring und zur Prozesssteuerung im industriellen Bereich.

11. Umweltmonitoring

Nutze die sich durch Nanotechnologien eröffnenden Möglichkeiten zum Umweltmonitoring.

Ansätze zur Verbesserung des Umweltmonitoring bieten z. B. Nanosensoren und -assays.

12. Umweltsanierung

Nutze in verantwortlicher Weise die sich durch Nanotechnologien eröffnenden Möglichkeiten zur Umweltsanierung (Boden, Grundwasser) ex situ und in situ.

Ansätze bieten unter Berücksichtigung der anderen Prinzipien z. B. die ex situ Nutzung von Eisennanopartikeln zum katalytischen Abbau petrochemischer Altlasten oder zur Adsorption von Arsen im Rahmen der Trinkwassergewinnung.

13 Umstieg auf regenerierbare Stoff- und Energiequellen

Nutze regenerierbare Energiequellen und nachwachsende Rohstoffe.

Möglichkeiten bieten, auch hier selbstverständlich unter Berücksichtigung aller anderen Prinzipien, nanotechnologische Ansätze in der Windenergie, in der Solarthermie, in der Biomasseumwandlung usw.

8 Grenzen eines nachhaltigen Designs

Derzeit können die meisten nanotechnologischen Innovationen noch als vorwiegend technologiegetrieben bezeichnet werden. Es sind vor allem die neuen technologischen Möglichkeiten, welche die Innovationsprozesse maßgeblich bestimmen. Zudem befinden sich viele Innovationsprozesse noch in einer sehr frühen Phase. Auf diese frühe Phase und auf die in dieser Phase im Vordergrund stehenden technischen Funktionalitäten sind die oben stehenden Designprinzipien maßgeblich orientiert. Dieser Umstand begrenzt selbstverständlich ebenso ihre Reichweite, wie der aktuelle geringe Kenntnisstand über Chancen und Risiken der jeweiligen Innovationen.

Sowohl die Chancen als auch die Risiken nanotechnologiebasierter Innovationen werden aber letztendlich nur zum Teil durch die Technologie selbst bestimmt. Die Anwendungszwecke, die Einsatzbedingungen bzw. Anwendungskontexte spielen diesbezüglich eine mindestens genauso wichtige Rolle. Je stärker die Wirkungen der Materialien, Prozesse und Produkte durch die jeweiligen Anwendungszwecke und –kontexte bestimmt werden, desto stärker müssen zusätzliche, noch stärker auf die Anwendungszwecke und –kontexte bezogene Designprinzipien herangezogen werden.

Verwendete bzw. weiter führende Literatur:

Anastas, Paul T. (1994): *Benign by Design Chemistry*, ACS Symposium Series, Vol. 577

Anastas, P.T.; Zimmermann, J.B. (2003): Design through the 12 principles of green engineering, *Environmental Science & Technology* 37 (5) pp. 94A-101A

Anastas, P.; Eghbali, N. (2010): *Green Chemistry: Principles and Practice*, Chemical Society Reviews, 39 (1), pp. 301-12

Harper, S.L.; Dahl, J.A.; Maddux, B.L.S.; Tanguay, R.L.; Hutchison, J.E. (2008): "Proactively designing nanomaterials to enhance performance and minimise hazard," *Int. J. Nanotechnol.*, 5, 124-142.

Limbach, L.K.; Grass, R.N.; Stark, W.J. (2009): "Physio-chemical differences between particle- and molecule-derived toxicity: Can we make inherently safe nanoparticles?," *CHIMIA*, 63, 38-43.

McKenzie, L.; Hutchison, J. E. (2004): "Green Nanoscience: An integrated approach to greener products, processes, and applications", *Chemistry Today*.

Morose, G. (2010): The 5 principles of "Design for Safer Nanotechnology", *Journal of Cleaner Production*, 18 (3), pp 285-9

Nel, A; Mädler, L.; Velegol, D.; Xia, T.; Hoek, E. M. V.; Somasundaran, P.; Klaessig, F.; Castranova, V.; Thompson, M. et al. (2009): "Understanding biophysicochemical interactions at the nano–bio interface", *Nature Materials*, Vol. 8, July 2009.

Schmidt, Karen (2007): *Green Nanotechnology: It's Easier Than You Think*. Technical Report. Project on Emerging Nanotechnologies, Washington

Warner, John; Kazu Hiyoshi; Barbara Karn (2008): "The road to green nanotechnology." *Journal of Industrial Ecology* 12(3): 262-266.