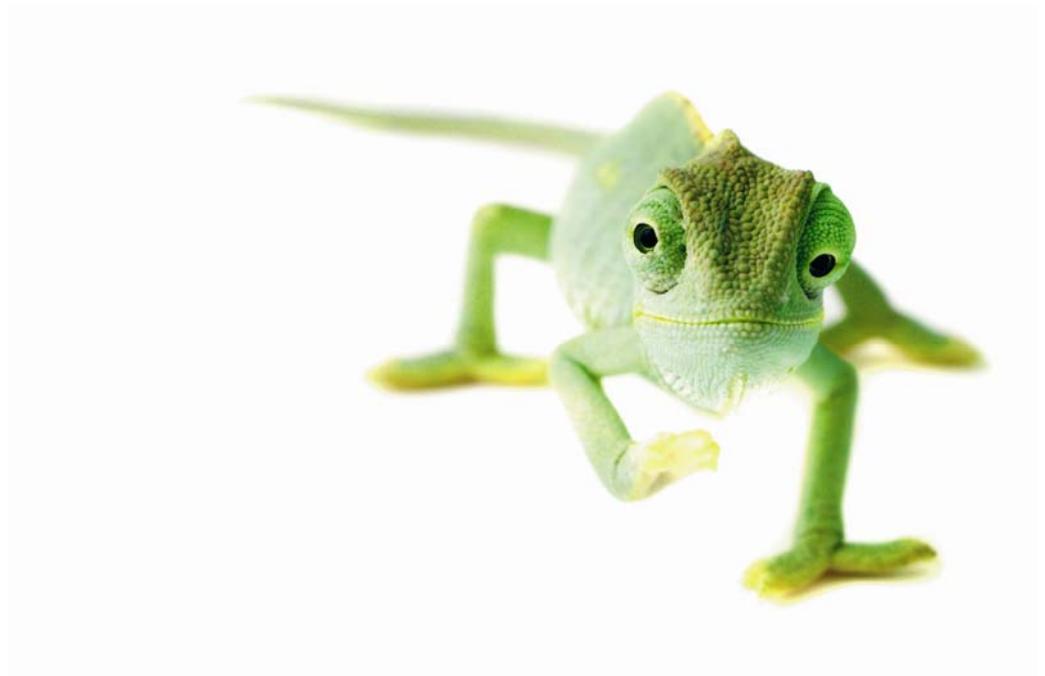


Michael Steinfeldt

Mit Nanotechnologie zur Nachhaltigkeit?

Prospektive Technologiebewertung einer zukünftigen Schlüsseltechnologie

Schriftenreihe des IÖW 166/03



i | ö | w

INSTITUT FÜR
ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Michael Steinfeldt (Hrsg.)

Mit Nanotechnologie zur Nachhaltigkeit?

Prospektive Technologiebewertung einer zukünftigen Schlüsseltechnologie

Mit Beiträgen von Ulrich Petschow, Prof. Dr. Arnim von Gleich
und Dr. Silvia Diabaté

Schriftenreihe des IÖW 166/03
Berlin, April 2003, ISBN 3-932092-67-8

IÖW gGmbH Geschäftsstelle
Potsdamer Straße 105
D-10785 Berlin

Tel.: +49.(0)30.884 59 40
Fax: +49.(0)30.882 54 39
mailbox@ioew.de

Zusammenfassung

Diese Schriftenreihe stellt den derzeitigen Wissensstand des vom BMBF geförderten Projekts „Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte“ dar. Außerdem werden die Anregungen von dem Expertenworkshop am 16. Januar 2003 in Berlin berücksichtigt. Diese aktuelle Veröffentlichung versteht sich eher als ein Diskussionsbeitrag im weiteren Prozess der Innovations- und Technikanalyse zur Nanotechnologie und weniger als ein abschließendes Projektdokument.

Die einzelnen Beiträge behandeln verschiedene Aspekte der prospektiven Technologiebewertung von Nanotechnologie, wie die Themen Leitbild als Orientierungshilfe und Gestaltungsmöglichkeit in der Technikgestaltung; die „Charakterisierung von Technologien“ als generalisierender Ansatz zur Technologiebewertung sowie Bewertungskonzept für konkrete Nanotechnologianwendungen. Darüber hinaus folgt ein Überblick über den derzeitigen Wissensstand zu den Sicherheits-, Umwelt- und Gesundheitswirkungen von Nanotechnologien sowie ein Beitrag zum Thema Toxikologie von Nanopartikeln.

Abstract

This paper refers to the recent standard of knowledge in our project dealing with the effects of the production and use of nanotechnologies on sustainability, funded by the German Federal Ministry for Education and Research. It also considers the suggestions resulting from a workshop with several experts that took place on January 16th 2003 in Berlin. This current publication is rather meant to be a contribution to the ongoing discussion on the innovation and technology assessment of nanotechnologies than a concluding project report.

The articles are dealing with different aspects of the prospective technology assessment in the field of nanotechnology. The topics are: Guiding principle as a possibility for orientation and design of technologies; the “characterisation of technologies” as an generalizing approach to technology assessment as well as assessment concepts for actual nanotechnology applications. Additionally, there is given an overview of the state of the art concerning the effects of nanotechnology on security, environment and health as well as a contribution to toxicology of nanoparticles.

Die Autoren

Dipl.-Ing. Michael Steinfeldt ist seit 1992 wissenschaftlicher Mitarbeiter im IÖW im Forschungsfeld „Ökologische Unternehmenspolitik“ und Leiter des Projekts.

Dipl.-Oec. Ulrich Petschow ist seit 1989 wissenschaftlicher Mitarbeiter im IÖW und seit 1992 Leiter des Forschungsfeldes „Umweltökonomie und –politik“.

Prof. Dr. Arnim von Gleich ist Professor an der Universität Bremen und Inhaber des Lehrstuhls für Technikgestaltung und Technikentwicklung.

Dr. Silvia Diabaté ist Gruppenleiterin am Institut für Toxikologie und Genetik am Forschungszentrum Karlsruhe.

Kontakt: Michael Steinfeldt, Tel. +49-(0)30-884594-18, E-mail: michael.steinfeldt@ioew.de

Inhaltsverzeichnis

Einführung	1
Wege zu einer nachhaltigen Nanotechnologie? Gestaltungsmöglichkeiten durch Leitbilder	3
1. Einflussmöglichkeiten auf die Technologieentwicklung	3
2. Orientierung in der Technikgestaltung durch Leitbilder	5
3.1 Leitbilder als Steuerungs'instrumente' in der Technikgestaltung	5
3.2 Risikominimierung durch leitbildorientierte Technikgestaltung?	7
4. Leitbilder einer ‚Nachhaltigen Nanotechnologie‘	9
Mögliche ökologische und gesundheitliche Wirkungen der Nanotechnologie Ansätze für eine prospektive Technologie-Bewertung und -Gestaltung	15
Einleitung	15
1. Verfahren, Methoden und Kriterien der Technikbewertung	16
2. Das Prognoseproblem	16
3. Der Umgang mit dem Nicht-Wissen	17
4. Die ‚Charakterisierung von Technologien‘ als Ansatz	17
5. Technologiespezifische Wirkungen: ‚Size matters!‘	18
6. Versuch und Irrtum als verbreitetste Form der Technikbewertung und die Grenzen von trial und error	21
7. Betrachtung der Anwendungskontexte	22
8. Fazit	23
Umweltwirkungen nanotechnologischer Verfahren und Produkte.....	24
1. Zur Frage Nanotechnologien.....	24
2. Zeitfristen	25
3. Verhalten von Nanopartikeln und potenzielle Umwelt- und Gesundheitswirkungen.....	26
4. Forschungsbedarf aus Sicht von Industrie, Behörden und Forschung bzgl. der chemischen Industrie	29
Konzept zur Bewertung konkreter Nanotechnologieranwendungen.....	32
1. Das Bewertungskonzept.....	32
2. Erprobung des Bewertungskonzept an konkreten Fallbeispielen	35
Toxikologie von Nanopartikeln	39
1. Mechanismus der Lungenschädigung durch inhalierte Partikel.....	41
2. Arbeiten am Institut für Toxikologie und Genetik.....	43

Einführung

Michael Steinfeldt, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin

In der Forschungs- und Technologiepolitik rangiert die Nanotechnologie an gehobener Position. Enorme Innovationspotenziale und die damit verbundenen ökonomischen Chancen der Nanotechnologie führen weltweit zu entsprechenden Forschungsprogrammen, deren finanzielle Ausstattung weiter zunimmt. Jedoch ist weder eine ‚Vorhersage‘ der konkreten Technologieentwicklungen noch der damit verbundenen ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Konsequenzen ist möglich.

Aus diesem Grund sind Diskurse zu Innovations- und Technikfolgen und zu Nachhaltigkeitswirkungen der Nanotechnologie notwendig und werden insbesondere durch im Frühjahr 2002 erfolgte Ausschreibung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) für eine „Innovations- und Technikanalyse zur Nanotechnologie“ intensiviert. In diesem Rahmen werden seit September 2002 drei Projekte mit den folgenden Schwerpunkten durchgeführt:

- Wirtschaftliches Potenzial der Nanotechnologie
Auftragnehmer: VDI Zukünftige Technologien Consulting Düsseldorf, Deutsche Bank Innovationsteam Mikrotechnologie Berlin
- Nanotechnologie und Gesundheit
Auftragnehmer: Aachener Kompetenzzentrum Medizintechnik (AKM), Institut für Gesundheits- und Sozialforschung Berlin (IGES) u.a.
- Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte
Auftragnehmer: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) in Kooperation mit der Universität Bremen, asmec i.G. und Nanosolutions GmbH.

In dieser Schriftenreihe wird inhaltlich zum letztgenannten Projekt Bezug genommen.

Das Projekt „Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte“ greift den aktuellen Stand der Stoff- und Technikbewertung auf und versucht, ihn in Richtung einer integrierten Nachhaltigkeitsbewertung weiter zu entwickeln. Dabei ist der Fokus auf die ökologischen Chancen und Risiken dieser sich entwickelnden Technologie gerichtet. Die Komplexität der Aufgabenstellung erfordert für das Projektdesign zumindest zwei Analyse- und Bewertungsschritte:

- a. Zum einen sind die Nanotechnologien im Sinne einer nachhaltigen Technologiebewertung generalisierend zu bewerten, ausgehend von der Charakterisierung der Technologie.
- b. Zum anderen sind konkrete Anwendungskontexte dieser dann spezifizierten Technologien zu bewerten.

Außerdem gilt es im Rahmen des Projektes Gestaltungsmöglichkeiten in Richtung einer nachhaltigen Nanotechnologie auszuloten.

Im Rahmen des Projektes fand am 16. Januar 2003 in Berlin der Workshop „Mit Nanotechnologie zur Nachhaltigkeit? - Prospektive Technologieentwicklung einer zukünftigen Schlüsseltechnologie“ statt, auf dem 25 Expert/innen aus Forschung und Unternehmen verschiedene Aspekte zur prospektiven Technologiebewertung von Nanotechnologie diskutierten. Von Seiten des Projektteams wurden die bisher im Projekt entwickelten Bewertungsansätze vorgestellt und mögliche Fallbeispiele für die Anwendung des Bewertungskonzeptes zur Diskussion gestellt. Vorträge von Experten zu den Themen „Freisetzung von Nanopartikeln durch Nanotechnologien, insbesondere zur Exposition am Arbeitsplatz“ von Prof. H. Fissan, Universität Duisburg-Essen, „Toxikologie von Nanopartikeln“ von Dr. S. Diabaté, Forschungszentrum Karlsruhe, und „Bereiche der Nanotechnologie mit hoher Marktrelevanz“ von Dr. W. Luther und Dr. N. Malanowski, VDI Zukünftige Technologien Consulting Düsseldorf rundeten das Themenfeld des Workshop ab.

Unter Berücksichtigung der Diskussionen auf dem Workshop wird in den folgenden Beiträgen der derzeitige Wissensstand im Projekt bezogen auf verschiedene Aspekte der prospektiven Technologiebewertung von Nanotechnologie dargestellt.

Im ersten Beitrag behandelt Arnim von Gleich das Thema Leitbild als Orientierungshilfe und Gestaltungsmöglichkeit in der Technikgestaltung für eine „Nachhaltige Nanotechnologie“ und stellt drei konkrete Leitbilder zur Diskussion.

Im nächsten Kapitel stellt Arnim von Gleich mit der „Charakterisierung von Technologien“ einen generalisierenden Ansatz zur Technologiebewertung vor und wendet diesen auf die Nanotechnologie an.

Einen Überblick über den derzeitigen Wissensstand zu den Sicherheits-, Umwelt- und Gesundheitswirkungen von Nanotechnologien vermittelt dann Ulrich Petschow in seinem Beitrag.

Mit der Ableitung eines Konzeptes für die Bewertung konkreter Nanotechnologieanwendungen und deren Umsetzung befasst sich dann der Text von Michael Steinfeldt.

Ergänzt wird die Veröffentlichung durch einen Aufsatz von Silvia Diabaté vom Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Toxikologie und Genetik, der das Thema Toxikologie von Nanopartikeln tiefer behandelt.

Vor dem Hintergrund der Präsentation von Projektzwischenergebnissen versteht sich die aktuelle Veröffentlichung eher als ein Diskussionsbeitrag im weiteren Prozess der Innovations- und Technikanalyse zur Nanotechnologie und weniger als ein abschließendes Projektdokument. Sie als Leser/innen sind somit herzlich eingeladen, die Beiträge zu kommentieren und mit uns Autor/innen in einen Diskurs zu treten.

Wege zu einer nachhaltigen Nanotechnologie? Gestaltungsmöglichkeiten durch Leitbilder

Prof. Dr. Arnim von Gleich, Universität Bremen - FB Produktionstechnik, Fachgebiet Technikgestaltung und Technologieentwicklung

1. Einflussmöglichkeiten auf die Technologieentwicklung

Ein angemessenes und hinreichend differenziertes Verständnis der Prozesse der Technikentwicklung und Innovation gehört zu den Grundvoraussetzungen für eine erfolversprechende Einflussnahme auf die Entwicklung und Gestaltung von Technologien. Diese Prozesse der Entstehung (Genese) bzw. Entwicklung von Technologien und Innovationen besser zu verstehen, versuchen seit geraumer Zeit durchaus erfolgreich die Technikgeneseforschung (vgl. z. B. Dierkes 1997) sowie die Innovationsforschung (vgl. z. B. Sauer; Lang 1999 / Hübner 2002). Innovation wird dabei als gesellschaftlich bzw. ökonomisch erfolgreich umgesetzte Idee und Technik als ‚soziales Konstrukt‘ verstanden, als (Zwischen)Ergebnis von Innovationsprozessen.

Innovationen vollziehen sich in der Regel in sehr komplexen Akteursstrukturen, sogenannten ‚Innovationssystemen‘¹, wobei sowohl verschiedene Typen als auch verschiedene Handlungs- und Kommunikationsebenen unterschieden werden können, also z. B. betriebliche, regionale, nationale und internationale Innovationssysteme. Alle beteiligten Akteure nutzen in diesen Innovationssystemen ihre je spezifischen Einflussmöglichkeiten. Diese sind unterschiedlich weitreichend, aber in der Regel immer stark begrenzt. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Akteur (oder eine Akteursgruppe) im System den gesamten Technikgenese- bzw. Innovationsprozess in der Lage wäre zu steuern, ist vergleichsweise gering. Noch geringer dürfte die Wahrscheinlichkeit sein, solche Innovationssysteme quasi ‚von außen‘ zu steuern.

Wenn Gestaltungsversuche Aussicht auf Erfolg haben sollen, sollte auf jeden Fall neben dem Systemtyp und der räumlichen Handlungsebene auch die Zeitstruktur von Innovationsprozessen beachtet werden². Vor nicht allzu langer Zeit wurde Technikgeschichte meist als kontinuierliche Höherentwicklung, als mehr oder minder autonomer Entfaltungsprozess beschrieben. Tatsächlich gibt es Phasen, auf die solche Beschreibungen recht gut passen. Die Technologieentwicklung kann mitunter eine relativ große ‚Eigendynamik‘ entfalten. Sie verläuft dann – und das wäre nur einer von mehreren Erklärungsversuchen - in kleinschrittigen Verbesserungsinnovationen entlang sogenannter ‚Technologiepfade‘ (trajectories). Die ‚Richtung‘ der Entwicklung ist dann weitgehend pfadbestimmt. Richtungsänderungen und Alternativen haben es besonders schwer. Weiter reichende Einflussmöglichkeiten auf die Technologieentwicklung würden sich in diesem Modell auf die Phasen (Zeitfenster) vor dem Einstieg in den Pfad und auf die Umbruchszeiten kurz vor einem anstehenden Pfadwechsel beschränken. Vor dem Einstieg in den Pfad, also vor dem damit erfolgenden ‚technologischen lock-in‘, müssen immer wieder Richtungsentscheidungen an den verschiedensten möglichen Verzweigungspunkten getroffen werden. Hier bestehen viele Freiheitsgrade. Auf dem Pfad

¹ Vgl. Nelson 1993 / Freeman 1995, in der Technikgeneseforschung spricht man auch von Technikgenesenetzwerken.

² Mit Typisierungsversuchen vor dem Hintergrund von Fallbeispielen beschäftigt sich derzeit im Rahmen des vom BMBF geförderten Innovationsforschungsverbundes riw (2002) sowie Hemmelskamp (2001) das Projekt SUBCHEM: Gestaltungsoptionen für handlungsfähige Innovationssysteme zur erfolgreichen Substitution gefährlicher Stoffe. Mit der Bedeutung und Nutzbarkeit von Zeitfenstern beschäftigt sich das Projekt SUSTIME: Innovation, Zeit und Nachhaltigkeit - Zeitstrategien ökologischer Innovationspolitik.

sind sie dagegen stark eingeschränkt. Möglichkeiten für einen Pfadwechsel deuten sich erst dann wieder an, wenn sich einerseits Probleme anhäufen, für die auf dem Pfad selbst keine Lösungen in Sicht sind, und wenn sich andererseits schon ein konkurrierender Technologiepfad abzeichnet³.

Solche Gelegenheitszeitfenster (windows of opportunity) öffnen und schließen sich allerdings nicht nur im Rahmen der technologischen Eigendynamik. Insbesondere bei Investitionsgütern spielen z. B. auch Investitionszyklen von Unternehmen und dergleichen eine wichtige Rolle.

Es geht um Technikgestaltung, nicht um Techniksteuerung. Ein Versuch der ‚Techniksteuerung‘ (insbesondere durch ansonsten nicht unmittelbar beteiligte ‚politische Akteure‘) muss angesichts der Komplexität von Technikgenese- und Innovationsprozessen nicht nur als mehr oder minder aussichtslos, sondern geradezu als ‚disfunktional‘ bzw. kontraproduktiv erscheinen. Damit soll nicht das vielzitierte ‚Primat der Politik‘ in der Technologieentwicklung und damit in einem Feld bestritten werden, das die Lebensbedingungen der Menschen in den modernen Industriegesellschaften sehr weitgehend und immer weiter zunehmend prägt. Es geht nicht um die Rechtfertigung von Technokratie oder Expertokratie. Politik und demokratische (partizipatorische) Einflussnahmen sollten sich nur nicht auf ‚Steuerung‘ kaprizieren. Vielmehr sollten sie eher – und das ist ja auch gängige Praxis – einerseits auf die Definition und die Einhaltung von Rahmenrichtlinien und sogenannten ‚Leitplanken‘, innerhalb derer sich der Suchprozess mehr oder minder frei bewegen kann und soll und andererseits auf die zahlreichen kleinen Handlungsspielräume der Akteure in den Innovationssystemen (partizipatorische Mikropolitik) abzielen. Und schließlich besteht mit der staatlichen F&E-Förderung ja noch eine weitere Möglichkeit, Unerwünschtes eher abzulehnen und Wünschenswertes eher zu fördern.

Es geht also um ‚weichere‘ Formen der Einflussnahme, die der Komplexität von Innovationsprozessen und der Teilautonomie gesellschaftlicher Subsysteme angemessen sind. Zu den wichtigen Elementen solcher ‚weichen‘ Formen der Einflussnahme – und auch das ist Ergebnis der Technikgeneseforschung – gehören ohne Zweifel ‚Leitbilder‘. Wenn es gelänge, auf Leitbilder und durch Leitbilder Einfluss zu nehmen auf die Prozesse der Technikgenese und Innovation im Bereich der Nanotechnologie, dann würde dieses Technologiefeld ein Stück weit geöffnet gegenüber dem ‚öffentlichen und demokratischer Diskurs‘.

³ Das ‚Modell‘, mit dem hier die Entwicklung von Innovationen und Technologien zu verstehen versucht wird (vgl. insbesondere Dosi 1982 und 1988), erinnert stark an das Modell, mit dem Thomas Kuhn die von Paradigmen geleitete Wissenschaftsentwicklung zu erklären versuchte: a) Paradigmenherausbildung, dann b) ‚normal science‘ im Rahmen des Paradigmas, dann c) Anhäufung von im Rahmen des Paradigmas unlösbaren Problemen und schließlich d) Eintritt in die Phase des Paradigmenwechsels, der ‚revolutionary science‘ (vgl. Kuhn 1976).

2. Orientierung in der Technikgestaltung durch Leitbilder

Innovationen sind Zwischenergebnisse eines permanenten Such- und Ausleseprozesses mit dem Ziel der jeweils ‚besseren‘ Lösung. Als Modell scheint eine Analogie zum biologischen Evolutionsprozess dies recht gut abzubilden, mit seinen Hauptfaktoren Mutation/Variation (Hervorbringung von Neuem), Selektion (survival of the fittest⁴) und Isolation (geschützte Räume⁵). Insoweit diese Analogie trägt, lässt sich aus ihr ableiten, dass es z. B. auch darauf ankommt, eine Vielfalt von Alternativen zu erzeugen, aus denen dann ausgewählt werden kann, und dass Innovationen manchmal – zumindest vorübergehend – auf besondere - mitunter sogar auf ‚geschützte‘ - Räume angewiesen sind.

Man sollte derartige Analogien allerdings nicht zu weit treiben⁶. Dem Evolutionsmodell fehlt schließlich etwas für menschliches Handeln sehr Spezifisches, ein angestrebtes Ziel. Im Unterschied zu biologischen Arten kann das bloße Überleben, die bloße Weiterexistenz (oder gar die Selbstreproduktion) von technischen Artefakten nicht als ‚Sinn‘ oder ‚Logik‘ der ‚technischen Evolution‘ angesehen werden. Trotz aller Probleme bei der Unterscheidung zwischen Mittel und Zweck⁷: Erfolgreiche technische Innovationen basieren in der Regel auf einer Verknüpfung des Machbaren mit dem Wünschbaren, also auf einer Verknüpfung von (oft neuen) technischen Möglichkeiten mit bisher unbefriedigten gegenwärtigen oder zukünftigen gesellschaftlichen Bedarfen bzw. zu lösenden Problemen. Es gehört aber gerade zu den Spezifika und zu den wichtigsten Funktionen von Leitbildern, dass genau diese beiden Seiten, also das Wünschbare mit dem Machbaren in ihnen verknüpft wird⁸.

3.1 Leitbilder als Steuerungs‘instrumente‘ in der Technikgestaltung

Leitbilder beeinflussen die Technikentwicklung und mit Leitbildern lässt sich evtl. die Technikentwicklung beeinflussen. Leitbilder fungieren als Richtungsgeber für Innovationen, ihnen kommt eine Koordinations- und eine Synchronisationsfunktion in den komplexen Innovationssystemen (bzw. Technikgenesenetzwerken) zu. Leitbilder reduzieren Komplexität, leiten die Wahrnehmung, sie motivieren und sie dienen oft auch der Legitimation. Besonders wichtig dürften Leitbilder für sogenannte Basisinnovationen sein und zwar in den Phasen vor dem technologischen lock-in in einen Pfad und in Zeiten des Umbruchs bei bevorstehenden technologischen Pfadwechseln.

Die prinzipielle Wirksamkeit von Leitbildern scheint kaum bestritten zu werden, auch wenn der empirische Nachweis ihrer Wirksamkeit eher selten und wohl auch sehr schwierig ist. Ob und inwiefern Leitbilder ‚gezielt‘ und quasi ‚instrumentell‘ eingesetzt werden können zur Be-

⁴ Wobei die Doppelbedeutung der Vokabel ‚fit‘ in ihrem Akteurs- und Umweltbezug hier wichtig ist, im Sinne von ‚guter Leistung guter performance‘ einerseits und von ‚guter Anpasstheit bzw. Eingepasstheit‘ andererseits.

⁵ Ein mögliches Analogon aus der Innovationsforschung wären hier evtl. die sogenannten ‚lead markets‘ (vgl. dazu ein weiteres Projekt aus dem riw-Verbund (2002): LEAD-MARKET: Politikmuster der Entwicklung internationaler Märkte für Innovationen nachhaltigen Wirtschaftens - Vom Pilotmarkt zum Lead-Markt sowie Hemmelskamp 2001)

⁶ Sie beruhen ja historisch auf einer mehrfachen Ideenübertragung des Wettbewerbsmodells zwischen Markt und Artenentstehung zu Zeiten Darwins und Spencers.

⁷ Die ‚Unterscheidung‘ ist genau gesehen gar nicht das Problem, richtig problematisch ist nur der Versuch einer ‚Trennung‘, als deren Konsequenz man dann glaubt, auf der einen Seite ‚reine Mittel‘ und auf der anderen ‚reine Zwecke‘ sehen zu können.

⁸ Vgl. Dierkes et al. 1992. Dort wird im übrigen auch schon auf eine weitere interessante Parallele hingewiesen, angesichts der Unterscheidung zwischen dem ‚Machbaren‘ und dem ‚Wünschbaren‘ in der Leitbilddebatte. Es geht um die Unterscheidung bzw. Typisierung von Innovationen in eher ‚technologiegetriebene‘ (technology push) und eher ‚nachfragegetriebene‘ (demand pull). Bei beiden Innovationstypen, also sowohl bei der Weiterentwicklung der technischen Möglichkeiten, als auch bei der Entwicklung und Formulierung gesellschaftlicher Bedarfe und zu lösender Probleme spielen im übrigen Leitbilder eine wichtige Rolle.

einflussung bzw. Gestaltung von Technologien ist noch unklarer (vgl. dazu z. B. Mambrey et al. 1995 / Hellige 1996 / Meyer-Krahmer 1997 / Kowol 1998). Im strategischen Unternehmensmanagement wird oft von einem vergleichsweise erfolgreichen Einsatz verschiedener ‚management by‘ Ansätze berichtet, zu denen auch das ‚management by guiding principles‘ zu zählen ist, also das Management mit Hilfe von Unternehmensleitbildern (vgl. Bea; Haas 1995 / Matje 1996 / Blättel-Mink 1997 / KPMG 1999).

Wer mit Hilfe von Leitbildern Einfluss nehmen und gestalten möchte, muss versuchen, die Wirkungsvoraussetzungen und Wirkungsweisen erfolgreicher Leitbilder zu verstehen. Leitbilder entfalten ihre Wirkung, indem sie motivieren, eine Gruppenidentität konstituieren, die Aktivitäten individualisierter Akteure koordinieren und synchronisieren, Komplexität reduzieren und die Wahrnehmung strukturieren. Zu den wichtigsten Voraussetzungen für ihre Wirksamkeit gehören somit ihre Bildhaftigkeit und Emotionalität, der Bezug zu Wünschen und Machbarkeiten gleichermaßen, kurz gesagt ihre Resonanzfähigkeit im Bewusstsein der Akteure⁹.

Zentral scheinen drei Elemente zu sein a) die Bildhaftigkeit, b) Leitfunktion und c) ein Bezug zur Machbarkeit. Die Bildhaftigkeit hat einen großen Stellenwert für die Anschaulichkeit und die damit verbundene Komplexitätsreduktion. Die Leitfunktion wirkt über ihren emotionalen und Wertegehalt, sie wirkt motivierend und orientierend. Der Bezug zur Machbarkeit ist wichtig in Abgrenzung z. B. zu ‚unrealistischen‘ Utopien oder Visionen. Bei wirksamen Leitbildern darf also der Abstraktionsgrad nicht zu hoch sein. Ansatzpunkte für eine Konkretisierung und Operationalisierung sollten unmittelbar einleuchten. ‚Nachhaltiges Wirtschaften‘ erscheint dementsprechend für ein Leitbild als zu komplex, zu abstrakt und zu defensiv. Zumindest im Hauptdiskurs, wie er in Rio begonnen wurde, mit den Themen Umwelt und Gerechtigkeit, Klimaschutz, Artenschutz und Ressourcenschutz ist das Nachhaltigkeitsziel noch zu sehr auf das bloße Überleben (Ressourcenverfügbarkeit, Tragekapazitäten) und noch zu wenig auf das ‚Gute Leben‘ bezogen. Wirksamer dürften bedürfnisfeldbezogene Leitbilder sein wie z.B. das von der Enquete-Kommission Schutz des Menschen und der Umwelt des 13. Deutschen Bundestags skizzierte und ansatzweise auch operationalisierte Leitbild ‚Nachhaltiges Bauen und ‚Wohnen‘ (vgl. Enquetekommission 1997). Zu abstrakt sind sicher auch die auf der strategischen Ebene vieldiskutierten Leitorientierungen wie Ressourcen-Effizienz, Suffizienz (Genügsamkeit) und Konsistenz (Einbettung des gesellschaftlichen Stoffwechsels in den natürlichen). Als mögliche Beispiele für wirksame technikorientierende Leitbilder auf mittlerer Konkretisierungs- und Operationalisierungsebene dürften dagegen die Kreislaufwirtschaft, die Bionik (Vorbild Natur) und evtl. noch in jüngster Zeit v. a. im englischsprachigen Raum die ‚green chemistry, in Frage kommen.

⁹ Hier fallen insbesondere in den Punkten ‚Bildhaftigkeit‘, ‚Komplexitätsreduktion‘, ‚Strukturierung der Wahrnehmung‘, ‚Motivation‘, ‚Herstellung einer Gruppenidentität‘, ‚Koordination und Synchronisation‘, ‚Bezug zur Realisierbarkeit‘ und zu ‚bevorzugten Instrumenten und idealtypischen Lösungswegen‘ zahlreiche interessante Überschneidungen zwischen dem Leitbildbegriff und dem Paradigmabegriff bei Thomas Kuhn auf (vgl. Kuhn 1975).

3.2 Risikominimierung durch leitbildorientierte Technikgestaltung?

Risikominimierung hat insbesondere angesichts ‚neuer Technologien‘ und damit auch zumindest zum Teil noch unbekannter Risiken mit einem immensen Wissens- und Prognoseproblem zu kämpfen. Wie sollen wir Risiken abschätzen und minimieren, die wir noch gar nicht kennen? Ein Ansatz zur Risikominimierung – bzw. zur Umsetzung des so oft geforderten Vorsorgeprinzips – könnte in der vorsorgeorientierten Technikgestaltung liegen. Das ist an sich nichts Neues. Die Konstruktion von technischen Systemen nach den Prinzipien (dem Leitbild?) der Eigensicherheit hat in den Bereichen Kerntechnik und Chemische Verfahrenstechnik eine schon recht lange Tradition. Grundlage sind hier allerdings meist vergleichsweise konkrete ‚Störfallszenarien‘ auf deren ‚Beherrschung‘ dann die Systeme ausgelegt werden. Als Beispiel kann die Aufhängung von Brennstäben in Kernreaktoren genannt werden, die durch Elektromagnete gehalten werden, und bei einem Stromausfall dann ‚von selbst‘ nach unten ‚herausfallen‘. Andere Beispiele sind die sogenannten ‚Sicherheitsstämme‘ in der Gentechnik, die normalerweise in der freien Natur nicht überleben können oder noch weitergehend Organismen, denen ein sogenanntes ‚Killer-Gen‘ einpflanzt wird, durch dessen Aktivität sie sich nach einer gewissen Zeit selbst zerstören.

Was spricht also dagegen, die durchaus interessante und vielversprechende Perspektive einer ‚eigensicheren Nanotechnik‘ oder gar einer ‚nachhaltigen Nanotechnologie‘ zu verfolgen und dabei auch praktisch die Möglichkeiten einer leitbildorientierten Technikentwicklung und -gestaltung auszuloten? Man muss das ja nicht überbewerten. Selbstverständlich werden berechnete Einwände gegen die oben angeführten Beispiele für eine ‚eigensichere‘ Technik vorgebracht. Eine völlig ‚eigensichere‘ also quasi ‚risikofreie‘ Technik wird und kann es schon aus prinzipiellen Überlegungen heraus nicht geben. Aber konkret erzielte Fortschritte auf einem graduellen Weg in Richtung eigensichere Technik bzw. in Richtung auf die Menschen einschließende ‚eigensicherere Anwendungssysteme‘ sollten als Motiv und Erfolgsmaßstab völlig ausreichen.

Natürlich erhebt sich auch hier sofort die Frage, ob bzw. inwieweit eine leitbildorientierte Technologieentwicklung und -gestaltung auch tatsächlich eine dem Leitbild ‚gemäßere‘ Technologie bzw. Technik hervorzubringen imstande ist. Vorsicht ist angebracht mit Erwartungen an den Erfolg intentionalen Handelns in komplexen Innovationssystemen. Mit nichtintentionalen Ergebnissen, also mit den berühmten sogenannten Neben- und Langfristwirkungen, mit denen sich die Technikfolgenabschätzung vornehmlich beschäftigt, muss natürlich auch hier gerechnet werden.

Trotzdem macht es sicher einen Unterschied, ob man mögliche problematische Nachhaltigkeitswirkungen bei der Technologieentwicklung sowie bei der Technik- und Produktgestaltung von Anfang an mit berücksichtigt oder nicht. Und dies dürfte in gleichem Maße auch für die möglichen positiven Wirkungen gelten. Es dürfte sehr wohl im Ergebnis einen Unterschied ausmachen, ob man die Nanotechnologie bzw. Techniken und Produkte auf Basis der Nanotechnologie gezielt danach entwickelt und auswählt, ob und inwiefern sie einen Beitrag leisten können in Richtung auf das Ziel Risikominimierung bzw. viel weiter gehender für das Ziel ‚Nachhaltiges Wirtschaften‘.

Wenn alle diese Annahmen auch nur einigermaßen zutreffen sollten, dann wird zwar auch unter dem Leitbild einer ‚eigensicheren‘ oder gar einer ‚nachhaltigen Nanotechnologie‘ nicht immer und nicht ausschließlich etwas entwickelt werden, was diesen Namen wirklich verdient und evtl. sogar völlig frei ist von problematischen Risiken, Neben- und Folgewirkungen.

Aber die Wahrscheinlichkeit, dass das konkrete Ergebnis der Entwicklungs-Bemühungen dem Leitbild näher kommt, dürfte insgesamt doch etwas höher sein. Und dies ist ja nicht wenig angesichts der unendlichen Schwierigkeiten und Aporien in die wir uns begeben, wenn wir unter völliger Vernachlässigung der davor liegenden Gestaltungsprozesse immer nur die (potentiellen) technologischen Ergebnisse (Technologien, Prozesse und Produkte) einer ‚nachträglichen‘ oder gar ‚prospektiven‘ Technikbewertung bzw. Nachhaltigkeitsbewertung zu unterziehen versuchen. Leitbildorientiertes Handeln und Entwickeln wird hier also auch empfohlen als (zumindest partieller) Ausweg aus dem prinzipiell nicht lösbaren Technikfolgenabschätzungs- und -bewertungsdilemma. Wir werden immer zu wenig wissen über die möglichen Folgen von Technologien bzw. Eingriffen in gesellschaftliche und natürliche Systeme. Erst recht, wenn wir die Folgen einer Technologie abzuschätzen versuchen, die noch gar nicht entwickelt und eingeführt ist. Ein Lösungsansatz dieser Problematik eines angemessenen ‚Umgangs mit dem Nichtwissen‘ besteht somit darin, dem Versuch einer prospektiven Technikfolgenabschätzung gleichberechtigt den Versuch einer leitbildorientierten Technikentwicklung an die Seite zu stellen. Das bedeutet, dass man das prinzipiell unlösbare Prognoseproblem der Technikfolgenabschätzung nicht nur dadurch angeht, dass die Ansätze und die Instrumentarien einer prospektiven Technikfolgenabschätzung weiter entwickelt werden¹⁰, sondern auch dadurch, dass man das ‚Prognostizierte‘ bzw. genauer ‚das Wünschenswerte‘ von vornherein aktiv zu realisieren versucht. Die ‚aktive Realisierung‘ dürfte schließlich nach wie vor die erfolversprechendste Methode sein, um Prognose und ‚Realentwicklung‘ zur Deckung zu bringen.

Eine leitbildorientierte Technologieentwicklung könnte also einen Ausweg bieten aus dem auf *Wirkungen und Folgen* fixierten Bewertungsdilemma. Das Wissen über die möglichen Wirkungen von Techniken (Technikfolgenabschätzung) oder Stoffen (Toxikologie, Ökotoxikologie, Arbeitsschutz) wird immer prinzipiell unzureichend und unvollständig bleiben. Sowohl ‚worst case Szenarien‘ als auch ‚Leitbilder‘ könnten in dieser Situation Orientierung geben für den Suchraum von Innovationen, also für die ‚Nicht-Realisierung‘ dessen, was man auf jeden Fall vermeiden will und auf die Annäherung an das Ziel einer eigensicheren oder gar nachhaltigen Nanotechnologie.

Elemente einer ‚eigensicheren Nanotechnologie‘ wären somit der Einsatz ‚eigensicherer Stoffe‘ im Rahmen einer ‚eigensicheren Technik‘ im Rahmen ‚eigensicherer Anwendungssysteme‘. Einer unkontrollierten Ausbreitung von Nanopartikeln könnte dann zum Beispiel durch folgende Gestaltungs- bzw. Auswahlprinzipien vorgebeugt werden: i) Schneller Verlust womöglich problematischer ‚Nanoeigenschaften‘ (z. B. durch Agglomeration) ii) schnelle Metabolisierung der verwendeten Stoffe (biologische bzw. photochemische Abbaubarkeit), iii) geringe Bioverfügbarkeit und Bioakkumulation von Stoffen und Partikeln, iv) Beschränkung auf ‚geschlossene Anwendungen‘ (Vermeidung umweltoffener Anwendungen, sehr gutes Containment).

¹⁰ In dieser Richtung wird noch ein zweiter ‚Ansatz‘ vorgestellt, der auch das Prognoseproblem zu umgehen versucht, die ‚Charakterisierung‘ einer Technologie.

4. Leitbilder einer ‚Nachhaltigen Nanotechnologie‘

Mit dem Leitbild einer ‚nachhaltigen Nanotechnologie‘ wurde eine technologieorientierte Herangehensweise gewählt. Man geht von der Technologie aus und fragt nach ihrem möglichen Beitrag für ein nachhaltiges Wirtschaften, man fragt nach den mit ihr verbundenen Chancen und Risiken mit Blick auf das Nachhaltigkeitsziel. Alternative bzw. konkurrierende Herangehensweisen wären die problemorientierte und die bedürfnisfeldorientierte. Bei der problemorientierten Herangehensweisen würde der Klimaschutz, die Ressourcenschonung oder die Risikominimierung im Zentrum stehen und die Nanotechnologie käme nur dort ins Spiel, wo gerade von ihr ein Beitrag zur Lösung des Problems erwartet würde. Dasselbe gilt auch für den Bedürfnisfeldansatz, bei dem z. B. das Ziel eines ‚nachhaltigen Bauens und Wohnens‘ im Zentrum stünde. ‚Nachhaltige Nanotechnologie‘ ist also ein technikorientiertes Leitbild. In der derzeitigen im vielen Bereichen noch vor allem technologiegetriebenen Entwicklungsdynamik der Nanotechnologie dürfte die Orientierung auf solche technologieorientierte Leitbilder durchaus erfolgversprechend sein. Erweiterungen in Richtung Bedürfnisfelder sind von hier aus ohne weiteres möglich durch Fokussierung auf bestimmte Einzelsbereiche, also auf nachhaltige ‚Anwendung‘ bzw. einen nachhaltiger ‚Einsatz‘ von Nanotechnologie, z.B. im ‚Leichtbau von (recyclingfähigen) Fahrzeugen auf der Basis von durch Nanotubes verstärkten Werkstoffen.

Erfolgreiche Leitbilder einer nachhaltigen Nanotechnik sollen bildhaft und anschaulich sein, sie sollen motivieren, indem sie die Werte bzw. Zielebene ‚transportieren‘, und sie sollten an den realen Möglichkeiten der Nanotechnik ansetzen, also einen Bezug zur Machbarkeit haben (siehe oben). Hilfreich wären sicher unterschiedliche ‚zeitliche Reichweiten‘ mit Bezug sowohl auf die Zielperspektive als auch auf die konkreten technischen Potentiale und Machbarkeiten. Das könnte beginnen mit defensiven und möglicherweise kurzfristig realisierbaren Potentialen der Risikominimierung bzw. Schadensvermeidung, über mittelfristige Entwicklungs- und Planungshorizonte wie sie z. B. in den technological road maps vorausschauender Unternehmen und Branchen formuliert werden, bis hin zum utopischen (idealen) langfristigen Entwurf.

Im kurzfristigen Zeithorizont könnte zunächst einmal als Arbeitsbegriff das Leitbild ‚**Ressourceneffiziente Nanotechnik**‘ formuliert werden. Im mittelfristigen das Leitbild ‚**Konsistente und eigensichere Nanotechnik**‘ und im langfristigen das Leitbild ‚**Nanobionik**‘. Diese Leitbilder sollten insofern auch aufeinander aufbauen, als die längerfristigen Leitbilder immer auch die Ziele der kurzfristigen mit beinhalten. Die Nanobionik soll also auch die Anforderungen der Ressourceneffizienz, der Konsistenz¹¹ und der Eigensicherheit erfüllen.

Diese Leitbilder können hier (noch?) nicht ausformuliert und präsentiert werden. Es ist ohnehin eher unwahrscheinlich, dass solche Ausformulierungen erfolgreich am vielzitierten ‚grünen Tisch‘ stattfinden können. Wenn die Resonanzfähigkeit des Leitbildes getestet und gesichert werden soll, wird dies nicht ohne öffentlichen Diskurs möglich sein. Wobei dieser öffentliche Diskurs keinesfalls im wesentlichen in einem Abfragen vorfindlicher Positionen,

¹¹ Konsistenz soll hier verstanden werden als die qualitative und quantitative Einbettung des gesellschaftlich-technischen Stoffwechsels in den natürlichen. Dies kann sowohl durch Öffnung der Stoff- und Energieströme der Technosphäre gegenüber der Ökosphäre geschehen (z. B. durch Übergang zu regenerativen Stoff- und Energiequellen und durch das Achten auf die biologische oder photochemische Abbaubarkeit von Stoffen) als auch durch einen besonders effektiven Abschluss der Technosphäre gegenüber der Ökosphäre (nur ‚geschlossene Anwendungen‘ und bestes Containment).

Meinungen und Emotionen bestehen kann. Leitbilder können nicht einfach im kleinsten gemeinsamen Nenner bestehen, sie können nicht schlicht am vorfindbaren Bewusstsein andocken wollen. Zum Leitbild gehört auch eine gehörige Portion Irritation und Provokation. Gerade Irritationen und Provokationen haben bekanntlich oft die besten Resonanzen.

Zur Konkretisierung und als Einstieg in die öffentliche Debatte sollen hier deshalb nur noch einige zentrale Elemente dieser Leitbilder einer Nachhaltigen Nanotechnik aufgelistet werden:

1. ‚Ressourceneffiziente Nanotechnik‘ (kurzfristig)

Thema/Motto:

‚Möglichst wenig verbrauchend und schadend‘

Im Fokus:

Die Quantität der Energie- und Stoffströme (lebenszyklusbezogen) im Verhältnis zum gesellschaftlichen Nutzen

Beispiele:

Verschleiß- und reibungsarme Oberflächen (Maschinenbau)
Hochspezifische Membranen (Biotechnologie, Brennstoffzellen)

2. Konsistente und eigensichere Nanotechnik (mittelfristig)

Thema/Motto:

‚Eingepasst in die Stoffwechselprinzipien und -kapazitäten der äußeren Natur und der inneren Natur der Menschen‘ (geringe Eingriffstiefe und Fehlerfreundlichkeit)

Im Fokus:

Die Qualität und Quantität der Stoff- und Energieströme sowie technische Risiken

Beispiele:

Nanotubes
Spinnenseide

3. Nanobionik (langfristig)

Thema/Motto:

‚Nach dem Vorbild der Natur‘, Leben unterstützend, mit den ‚Selbstorganisationsprinzipien‘ der inneren und äußeren Natur kooperierend

Ein möglicherweise dahinter stehendes Leitbild: Mitproduktivität der Natur in einer ‚Allianztechnik‘ (vgl. Bloch 1973)

Im Fokus:

Die Qualität der Technik (die Form des Umgangs mit Natur)

Beispiele:

Katalysatoren/Enzymtechnik

Biomimetische Materialsynthese (vgl. Niesen; Aldinger 2001)

Um diese Leitbilder nicht gar so ‚trocken‘ dastehen zu lassen, sollen zum Abschluss dieser Überlegungen die beiden Beispiele Spinnenseide und Biomimetische Materialsynthese zumindest von der Seite ihrer nanotechnischen Potentiale her, also mit Bezug auf die vielzitierten Machbarkeiten skizziert werden.

Spinnenseide

Die Fäden, die von Spinnen produziert werden, stellen in ihrer Vielfalt und in ihren Eigenschaftskombinationen einen geradezu phantastischen Werkstoff dar. Mit bis zu sieben verschiedenen Spinnrüsen sind manche Spinnen in der Lage, Fäden mit den verschiedensten Eigenschaften zu produzieren: zum Fangen (Dehnbarkeit, Klebrigkeit), zum Konservieren der Beute, zum eigenen Schutz (Haltbarkeit), als Fortbewegungshilfe usw. (vgl. Abbildung 1). Ein Blick auf die Molekülstruktur zeigt sehr schön, wie die Spinnen, die Aufnahme der immensen Kräfte ‚nanotechnisch‘ realisiert haben (vgl. Abbildung 2).

Abb. 1

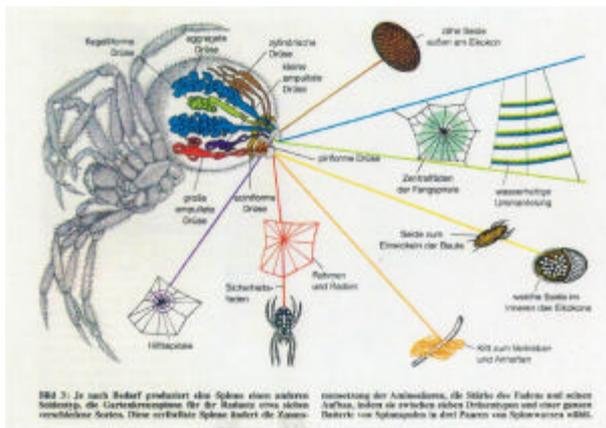
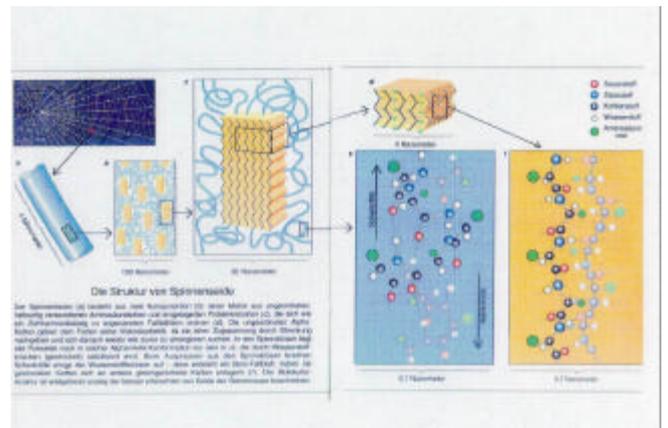


Abb. 2



Quelle: BMBF (1993)

Interessant dort auch das begrenzte Reservoir an eingesetzten Stoffen. Zur ‘Entsorgung’ nicht mehr gebrauchter Fäden werden sie als proteinhaltige Nahrung wieder verspeist. Die Seide einiger Seidenspinnen ist doppelt so reißfest wie Stahl und bis zu 50mal so dehnbar wie Perlon. Längst wird an mehreren Stellen auf der Welt intensiv an Spinnenseide geforscht, unter anderem auch im Auftrag der US-Armee, die sich auf diesem Wege bessere schussichere Westen und bessere Fallschirme erhofft. Zur Gewinnung von Spinnenseide werden parallel drei Strategien verfolgt. Zum einen werden derzeit Versuchsspinnen ‘gemolken’, d. h. es werden ihnen pro Tag bis zu 100 m Spinnenseide abgezogen. Die Tiere werden dazu mit CO2 betäubt und fixiert. Dies mag eine ethisch (gegenüber den Spinnen) nicht völlig unproblematische Lösung sein, mit Blick auf die möglichen ökologischen Wirkungen ist sie aber vergleichsweise überschaubar, am ehesten wohl noch vergleichbar mit der traditionellen Gewinnung von Wolle oder Seide (der Seidenraupe). Die anderen beiden Strategien

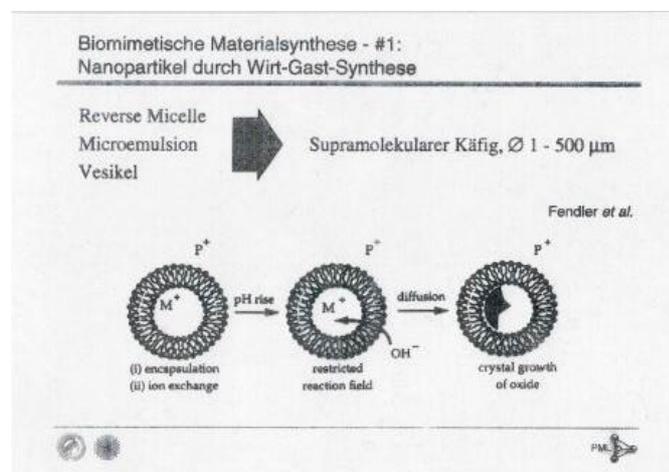
bestehen darin, dass die Spinnenseide auf chemischem Wege synthetisiert, oder dass ein für Spinnenseide codierendes Gen in ein kultivierbares Bakterium eincloniert wird. Auf beiden Wegen konnten schon geringe Mengen an Spinnenseide hergestellt werden.

Dies Beispiel zeigt auch sehr schön, dass auf der Basis 'bionischer' Anregungen aus der Natur sehr unterschiedliche (wohl auch sehr unterschiedlich zu bewertende) technische Strategien verfolgt werden. Das Lernen von der Natur, der bionische Ausgangspunkt, ist noch lange kein Garant für eine 'eigensicherere ökologische Technik'.

Biomimetische Materialsynthese

Die Erlangung der Fähigkeit zur Selbstorganisation war ein wesentlicher Schritt beim evolutionären Übergang von der unbelebten in die Evolution der belebten Natur (vgl. z. B. Eigens Arbeiten zum 'Hypercycle' Eigen; Winkler 1978 sowie die Arbeiten von Maturana und Varela zur Autopoiese, Maturana; Varela 1987). Doch Vorformen der Selbstorganisation finden sich auch schon in der unbelebten Natur. Dazu gehört z. B. auch die 'Orientierung von Molekülen' aufgrund ihrer Ladung. Bekannt sind z. B. als zentrale Elemente von Zellmembranen 'polare Moleküle' mit einem hydrophilen und einem hydrophoben (meist lipophilen) Pol. Bringt man solche Moleküle möglichst einschichtig auf eine Wasseroberfläche auf, so orientieren sie sich selbständig und bilden einen orientierten sogenannten 'self assembled monolayer'. In Abbildung 3 ist das Ergebnis eines dreidimensionalen Selbstorganisationsprozesses dargestellt.

Abb. 3: Prinzip der Abscheidung einer keramischen Schicht aus der Lösung auf funktionalisierte Self-Assembled Monolayers (SAMs)



Quelle: Aldinger (o.J.)

Literatur

Aldinger, Fritz (o.J.): Vortrag.

Bea, Franz / Haas Jürgen (1992): Jahreszahl im Text falsch oder Angaben fehlen im Literaturverzeichnis?

Bea, Franz / Haas, Jürgen (2001): Strategisches Management. Grundwissen der Ökonomik. Lucius und Lucius: Stuttgart.

- Blättel-Mink, Birgit (2001): Wirtschaft und Umweltschutz - Grenzen der Integration von Ökonomie und Ökologie. Habilitationsschrift. Campus: Frankfurt a.M.
- Blättel-Mink, Birgit / Renn, Ortwin (Hrsg.) (1997): Zwischen Akteur und System. Die Organisation von Innovation. Opladen.
- Bloch, Ernst (1973): Das Prinzip Hoffnung (3 Bde.), Frankfurt a.M.
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (Hrsg.) (1993): Technologien des 21. Jahrhunderts. Einige anschauliche Beispiele. Bonn.
- Dierkes, Meinolf (1992): Jahreszahl im Text falsch oder Angaben fehlen im Literaturverzeichnis?
- Dierkes, Meinolf (Hrsg.) (1997): Technikgenese. Befunde aus einem Forschungsprogramm. Sigma: Berlin.
- Dierkes, Meinolf / Canzler, Weert (2000): Informationelle Techniksteuerung: öffentliche Diskurse und Leitbildentwicklungen. In: Politische Vierteljahresschrift, 41 (31).
- Dosi, Giovanni (1982): Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of determinants and directions of technical change. In: Research Policy 2 (11)..
- Dosi, Giovanni (1988): The Nature of the Innovative Process. In: Ders. et al. (Eds): Technical Change and Economic Theory. London. .
- Eigen, Manfred; Winkler, Ruthild (1978): Das Spiel. München.
- Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages (Hrsg.) (1997): Zwischenbericht - Konzept Nachhaltigkeit. Bonn.
- Freeman, Christopher (1995): The „National System of Innovation“ in historical perspective. In: Cambridge Journal of Economics 19/95. pp. 5-24.
- Fricke, Werner (Hrsg.) (1998): Innovationen in Technik, Wissenschaft und Gesellschaft: Beiträge zum 5. Internationalen Ingenieurkongreß der Friedrich-Ebert-Stiftung am 26. und 27. Mai 1998 in Köln. Bonn.
- Glock, Friedrich (1998): Konstruieren als sozialer Prozeß. Eine Untersuchung technischen Gestaltens. Wiesbaden.
- Hellige, Hans (1996): Technikleitbilder als Analyse-, Bewertungs- und Steuerungsinstrumente: Eine Bestandsaufnahme aus informatik- und computerhistorischer Sicht. In: Hellige, Hans (Hrsg.): Technikleitbilder auf dem Prüfstand. Leitbild-Assessment aus Sicht der Informatik- und Computergeschichte. Sigma: Berlin.
- Hemmelskamp, Jens (Hrsg.) (2001): Forschungsinitiative zu Nachhaltigkeit und Innovation. Ökom Verlag: München.
- Hübner, Heinz (2001): Integratives Innovationsmanagement - Nachhaltigkeit als Herausforderung für ganzheitliche Erneuerungsprozesse. Erich Schmidt Verlag: Berlin.
- Kowol, Uli (1998): Innovationsnetzwerke. Technikentwicklung zwischen Nutzungsvisionen und Verwendungspraxis. Wiesbaden.

- KPMG (1999): Unternehmensleitbilder in deutschen Unternehmen. Eine Untersuchung von KPMG in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Unternehmensführung an der Universität Erlangen-Nürnberg. Frankfurt a.M.
- Kuhn, Thomas (1975): Neue Überlegungen zum Begriff des Paradigma. In: Ders: Die Entstehung des Neuen. Studien zur Struktur der Wissenschaftsgeschichte. Frankfurt a.M.
- Kuhn, Thomas (1976): Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. Frankfurt a.M.
- Mambrey, Peter; Paetau, Michael; Tepper, August (1995): Technikentwicklung durch Leitbilder. Neue Steuerungs- und Bewertungsinstrumente. Frankfurt a.M.
- Marz, L., / Dierkes, Meinolf (1994): Leitbildprägung und Leitbildgestaltung. Zum Beitrag der Technikgenese-Forschung für eine prospektive Technikfolgen-Regulierung. In Bechmann, Gotthard; Petermann, T. (Hrsg.): Interdisziplinäre Technikforschung. Genese, Folgen, Diskurs. Campus: Frankfurt a.M.. S. 35-71.
- Matje, Andreas (1996): Unternehmensleitbilder als Führungsinstrument. Komponenten einer erfolgreichen Unternehmensidentität. Gabler Verlag: Wiesbaden.
- Maturana, Humberto; Varela, Francisco (1987): Der Baum der Erkenntnis. Bern.
- Meyer-Krahmer, F. (1997): Umweltverträgliches Wirtschaften. Neue industrielle Leitbilder, Grenzen und Konflikte. In: Blättel-Mink, Birgit; Renn, Ortwin (Hrsg.): Zwischen Akteur und System. Die Organisation von Innovation. Opladen..
- Nelson, Richard (ed.) (1993): National Systems of Innovation. A comparative analysis. Oxford University Press: Oxford.
- Niesen, Thomas; Aldinger, Fritz (2001): Biomineralisation & Biomimetische Materialherstellung. In: Gleich, Arnim von (Hrsg.): Bionik - ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur? 2. Aufl. Stuttgart.
- riw (Rahmenbedingungen für Innovationen zum Nachhaltigen Wirtschaften) (2002): <http://www.riw-netzwerk.de>.
- Rammert, Werner (1998): Die Rolle der Wissenschaft im technologischen und gesellschaftlichen Wandel - oder: Wie lässt sich die technische Innovation nachhaltig und demokratisch gestalten? In: Fricke, Werner (Hrsg.): Innovationen in Technik, Wissenschaft und Gesellschaft: Beiträge zum 5. Internationalen Ingenieurkongreß der Friedrich-Ebert-Stiftung am 26. und 27. Mai in Köln. Bonn.
- Sauer, Dieter / Lang, Christa (Hrsg.) (1999): Paradoxien der Innovation. Perspektiven sozialwissenschaftlicher Innovationsforschung. Frankfurt a.M.
- Soskice, David (1999): Divergent Production Regimes: Coordinated and Uncoordinated Market Economies in the 1980s and 1990s. In: Kitschelt, Herbert; Lange, Peter; Marks, Gary; Stephens, John (Hrsg.): Continuity and Change in Contemporary Capitalism. Cambridge University Press: Cambridge. pp. 101-134.

Mögliche ökologische und gesundheitliche Wirkungen der Nanotechnologie

Ansätze für eine prospektive Technologie-Bewertung und -Gestaltung

Prof. Dr. Arnim von Gleich, Universität Bremen - FB Produktionstechnik, Fachgebiet Technikgestaltung und Technologieentwicklung

Überblick:

1. Verfahren, Methoden und Kriterien der Technikbewertung
2. Das Prognoseproblem
3. Der Umgang mit dem Nicht-Wissen
4. Die ‚Charakterisierung von Technologien‘ als Ansatz
5. Technologiespezifische Wirkungen: ‚Size matters!‘
6. Trial and error als verbreitetste Form der Technikbewertung
Grenzen von trial and error
7. Betrachtung der Anwendungskontexte
8. Fazit

Einleitung

Frühzeitige Technologiebewertung und ein differenziertes Verständnis von Innovationsprozessen sind die Voraussetzungen für vorsorgende und auf das Nachhaltigkeitsziel orientierte Gestaltungsmöglichkeiten.

Ziel dieser Skizze ist ein Beitrag zur Beantwortung folgender Fragen, die für die Bewertung, Förderung und Gestaltung der Nanotechnologie wichtig sind:

Was können wir wissen? Und was können wir tun?

- a) Wie kann methodisch vorgegangen werden? Wie kann die prospektive Bewertung einer erst im Entstehen begriffenen Technologie mehr sein, als das vielzitierte ‚Stochern im Nebel‘?
- b) Gibt es einen technologie-spezifischen Grund für die explizite Thematisierung der Nanotechnologie? Warum wird besonderes Augenmerk auf die möglichen positiven und/oder negativen Wirkungen der Nanotechnologie gelegt? Inwiefern handelt es sich um eine besonders wirkmächtige und/oder besonders vielseitige ‚Power-‘ und/oder ‚Schlüsseltechnologie‘?
- c) Worauf muss bei der Entwicklung und Gestaltung dieser Technologielinie besonders geachtet werden? Welche Rolle können insbesondere Leitbilder bei einer vorsorgeorientierten Gestaltung der Nanotechnologie spielen?

1. Verfahren, Methoden und Kriterien der Technikbewertung

Im Projekt wird keine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung angestrebt. Der Fokus liegt auf den ökologischen und gesundheitlichen Wirkungen und zwar sowohl auf den intendierten Chancen als auch auf den nicht intendierten Risiken und Nebenwirkungen; ebenso auf den leichter erkennbaren kurzfristigen wie auf den schwieriger erkennbaren langfristigen Folgen.

Wissenschaftlich unterstützte Technikbewertung basiert auf mehr oder weniger etablierten und formalisierten Bewertungsverfahren, Bewertungsmethoden und Bewertungskriterien.

Zu den Verfahren gehören insbesondere Bürgerdialoge, Konsensuskonferenzen, Anhörungen, Enquete-Kommissionen, aber auch Umweltverträglichkeitsprüfungen, Genehmigungsverfahren und Gerichtsprozesse. Zu den Methoden gehören insbesondere die Risikoanalyse, die ökotoxikologische und toxikologische Prüfung, die Kosten-Nutzen-Analysen sowie die Ökobilanz. Beispiele für Bewertungskriterien sind Ressourcenverbrauch, Treibhauspotential, Wirkung auf Lebensräume und Artenvielfalt, Wassergefährdungsklasse, akute und chronische Toxizität usw. Letztendlich sollen die Bewertungsmethoden mit Hilfe von Bewertungskriterien ‚qualifizierte‘ (d. h. im wesentlichen wissenschaftlich begründete) Argumente liefern für die gesellschaftlichen Bewertungsverfahren.

2. Das Prognoseproblem

Jede Form der Technikbewertung hat beim Versuch der Abschätzung von Wirkungen mit dem Prognoseproblem zu kämpfen. Unser Wissen über mögliche Wirkungen von Stoffen, Techniken und Anwendungssystemen ist begrenzt durch

i) Noch-Nicht-Wissen.

Es ist prinzipiell erlangbar, aber noch nicht vorhanden, z. B. weil bestimmte Tests noch nicht durchgeführt wurden oder bestimmte Erfahrungen noch nicht gemacht wurden. Das kann viele Gründe haben, z. B. dass das mögliche Problem noch gar nicht gesehen wurde (Bsp. Ozon zerstörende Wirkung von FCKWs) oder aus Mangel an Ressourcen (Zeit, Geld, manpower). Typisches Beispiel sind bestimmte Wirkungen, auf die hin die sog. ‚Altstoffe‘ nach Chemikalienrecht noch nicht getestet wurden (z. B. akut toxisch, CMR, biologische Abbaubarkeit, Bioakkumulation usw.).

ii) Nicht-Wissbarkeit

Die Reaktionen instabiler, komplexer und dynamischer Systeme auf Eingriffe sind prinzipiell nicht prognostizierbar. Die Gründe für die Nicht-Wissbarkeit liegen dabei einerseits in der ‚Architektur‘ bzw. im instabilen Zustand der Systeme, in die eingegriffen wird. Aber auch die ‚Stärke‘ des Eingriffs nach Qualität und Quantität spielt eine wesentliche Rolle.

Beispiele sind nicht vorhersehbare Reaktionen auf ‚Lücken‘ in Nahrungsnetzen in Ökosystemen oder die Nichtvorhersehbarkeit vereinzelter stark räumlich und zeitlich eingegrenzter Wirkungen von Klimaveränderungen (wie und wann reagiert der Golfstrom?).

3. Der Umgang mit dem Nicht-Wissen

Gewissheit ist die Ausnahme! Ungewissheit (uncertainty) ist die Regel! Ins Extreme verstärkt wird das immer vorhandene Prognoseproblem bei der Abschätzung von Wirkungen einer erst im Entstehen begriffenen Technologie. Das Hin- und Herschieben von ‚Beweislasten‘ ist angesichts dieser Situation ein zwar sehr beliebtes aber völlig unfruchtbares Spiel. Weder die Gefährlichkeit noch die Ungefährlichkeit können ‚bewiesen‘ werden. Weder die ‚Neuartigkeit‘ einer Technologie noch mangelndes Wissen über mögliche problematische Folgen können als gute und hinreichende Gründe für eine ‚große Besorgnis‘ oder gar für weitreichende ‚Moratorien‘. Neuartigkeit und mangelnde Erfahrung sind Gründe für ein ‚umsichtiges Vorgehen‘, wie es allenthalben jenseits von Routine in unserer Alltagspraxis angebracht ist.

Für eine berechtigte ‚große Besorgnis‘ (und damit auch für weitreichende Maßnahmen nach dem Vorsorgeprinzip) bedarf es zusätzlicher Gründe. Solche zusätzlichen Gründe finden sich in der Regel entweder in der zu betrachtenden Technologie (extrem hohes Wirkpotential, große Eingriffstiefe) oder im jeweils spezifischen Anwendungskontext (besonders sensibles, instabiles und wichtiges System, in das eingegriffen wird).

Prinzipiell gilt: Keine Innovation ist ohne Risiko! Es kommt auf die Höhe des potentiellen Risikos an, und das wird in der Regel bestimmt durch

- i) die Qualität des Eingriffs (Identifizierung von Risikotechnologien)
- ii) die Quantität des Eingriffs (Identifizierung kumulativer Effekte) und
- iii) durch die Qualität der Systeme, in die eingegriffen wird.

Zu den zentralen Aufgaben einer ‚reflexiven Modernisierung‘ gehört somit die Entwicklung von vernünftigen (rationalen und wertgeleiteten) Formen des Umgangs mit Risiken und insbesondere mit dem Nicht-Wissen. Wichtige Voraussetzungen dafür sind

- i) die Analyse und Charakterisierung der Technik (der Eingriffe) und
- ii) die Analyse und Charakterisierung der Systeme, in die eingegriffen wird (das sind direkt die technischen Anwendungssysteme und indirekt die menschliche Gesundheit und/oder Ökosysteme).

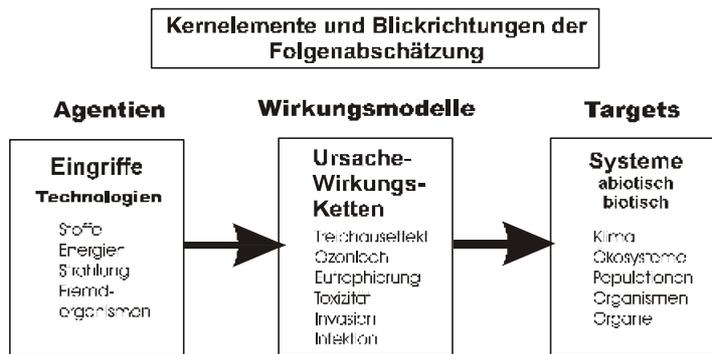
4. Die ‚Charakterisierung von Technologien‘ als Ansatz

Im Unterschied zu einer immer noch weit verbreiteten Meinung ‚die Technik‘ sei neutral, es käme allein darauf an, was man damit macht, kann gesagt werden: Technik ist immer eine ‚Form des Umgangs‘ mit etwas. Sie kann damit nicht ‚wertneutral‘ sein. Trotzdem ist für ihre Bewertung wichtig ‚was man damit macht‘.

Wirkungswissen (als zentrale Voraussetzung von Technikfolgenabschätzung) ist angewiesen auf Wissen über drei Grundelemente:

- i) Ein Agens (die Technik, der Stoff usw., um deren mögliche Wirkungen es geht)
- ii) Ein Wirkungsmodell (d. h. wissenschaftlich begründbare Vorstellungen, wie das Agens auf ein mögliches Target wirkt, Beispiele für solche ‚Wirkungsmodelle‘ sind Treibhauseffekt, Hautkrebs als Folge stratosphärischer Ozonzerstörung, kanzerogene, mutagen und reproduktionstoxische Wirkungen (CMR) usw.)
- iii) Ein Target (Endpunkt bzw. Zielsystem auf welches das Agens einwirkt, z. B. Klima, Ökosystem, Organismus, Organ).

Abb. 4



Operationalisierung des Vorsorgeprinzips bei fehlendem Wirkungsmodell:
 Charakterisierung der Agentien

Eingriffstiefe

Insb. erwerbbar: Länge der durch den Eingriff ausgelösten Ursache-Wirkungsketten
 z. B. Persistenz, Mobilität, Halbwertszeit, Reproduktionsfähigkeit

AVG 5/2011

Quelle: eigene Darstellung

Alle drei Elemente können unbekannt sein. In unserem technologieorientierten Fall sind folgende Formen des Nicht-Wissens besonders relevant: das Wirkungsmodell und/oder das Target sind unbekannt. Ein zentraler Lösungsansatz für die Technikfolgenabschätzung besteht nun darin, dass man den Blick vom möglichen Zielsystem löst, dass man den Blick wendet und das Agens genauer betrachtet, das auf die Zielsysteme zukommt bzw. auf sie einwirken wird (Blickwende). Es geht dann also um die Charakterisierung des ‚Agens‘, in unserem Fall um die Charakterisierung der Nanotechnologie, um die Frage, welche (potenziellen) Wirkungen allein schon aus ihrem ‚Nano-Charakter‘ erwartbar (ableitbar) sind?

5. Technologiespezifische Wirkungen: ‚Size matters!‘

Betrachten wir also dasjenige, was die Nanotechnologie so interessant macht:

- i) Ihre **Wirkmächtigkeit und Eingriffstiefe** (die Möglichkeit zur Kontrolle über die kleinsten Bausteine der Materie und ggf. der Lebewesen). Inwieweit ist die Nanotechnologie eine ‚Power-technologie‘ und/oder ‚Risikotechnologie‘?
- ii) Die mit ihrer Hilfe erzielbaren ‚**neuen Effekte**‘. Wo verbessert (verstärkt) die Nanotechnologie ‚nur‘ schon bekannte Möglichkeiten und Effekte, und wo wird wirklich Neues, noch nicht Dagewesenes bewirkt?
- iii) Ihre **Vielseitigkeit** sowohl in den möglichen Wirkungen als auch in den möglichen Anwendungsbereichen. Inwieweit handelt es sich bei der Nanotechnologie um eine Schlüsseltechnologie und/oder Basisinnovation?

Folgende nanospezifische Aspekte und Effekte können im ersten Zugriff aufgelistet werden zusammen mit einigen auf diesen Eigenschaften basierenden möglichen bzw. erwartbaren Wirkungen.

Nanospezifische Aspekte/Effekte

1. Kleinheit

- => Mobilität
- => Wahrnehmbarkeit/Nachweisbarkeit

2. Spezifisches Verhältnis Oberfläche/Volumen

- => Adhäsion, Kohäsion, Agglomeration
- => Veränderte chemische Reaktivität und Selektivität
- => Katalytische Effekte
- => Quanteneffekte

3. Selbstorganisation

- => unkontrollierbare, sich verselbständigende Entwicklungen

Zu erwähnen ist noch

4. Definiertheit und Stoffqualität

- => chemische Reinheit
- => definierte Korngrößen
- => ‚seltene‘ ggf. problematische Elemente bzw. Stoffgruppen

Dies ist zwar keine allein (und auch nicht überall) ‚nanospezifische Eigenschaft‘. Aber wenn für die Herstellung von Nanowerkstoffen, Nanoprozessstoffen oder -hilfsstoffen ein spezifisch hoher Aufwand getrieben werden muss, so ist das durchaus ‚wirkungsrelevant‘ zumindest in einer ökobilanziellen Betrachtung.

Mögliche problematische ‚nanospezifische‘ Wirkungen

Auch hier soll sozusagen vorneweg auf die Fragen des ‚Aufwands‘ und der ‚Qualität der eingesetzten Stoffe‘ eingegangen werden, auch wenn die dabei zu beachtenden Fragen nicht immer und allein nanospezifische sind.

0.1 Definiertheit der Materialien, Herstellungsaufwand

Qualität und Quantität von Stoff- und Energieströmen zur Herstellung von Nanomaterialien bzw. -partikeln.

Ggf. sehr hohe Anforderungen an die ‚Definiertheit‘ der Ausgangsmaterialien (insb. Reinheitsgrade, Korngrößen).

Ein solcher Aufwand sollte sich im Produktlebenszyklus ‚amortisieren‘.

Frage nach Recyclingmöglichkeiten und –aufwand? (Entropiebilanz)

0.2 Stoffqualität

Werden seltene bzw. bekannt problematischer Elemente oder Stoffgruppen eingesetzt?
z. B. Gallium-Arsenid im Halbleiterbereich

Schwermetalle als Katalysatoren

Verhältnis zwischen ‚natürlichen‘ und ‚anthropogenen‘ Stoffumsätzen in Ökosystemen als Indikator?

Ad 1) Kleinheit => Mobilität der Partikel

Sind die Partikel staubend, d. h. ‚mobil‘ über den Luftpfad, nicht absinkend, in der Luft schwebend verbleibend?

lungen- bzw. alveolengängig (problematische Wirkungen stark größenabhängig, ggf. sogar völlig unabhängig von der Stoffqualität)

Durchgang durch Zellmembranen (auch Blut-Hirn-Schranke, Kontakt mit DNA?)

Ggf. mobilisierende und oder einschleusende Wirkung auf problematische Stoffe oder Stoffgruppen (huckepack): Toxine, Schwermetalle?

Ad 2) Adhäsion, Kohäsion, Agglomeration

AKH-Effekte erschweren das technische ‚handling‘, sind aber über eine ggf. damit verbundene ‚Aufhebung‘ der Nano-Eigenschaften evtl. auch ein Beitrag zur ‚Eigensicherheit‘.

Verhalten ‚freigesetzter‘ Partikel oder Fasern in der ‚Umwelt‘?

Ad 3) Veränderte chemische Reaktivität und Selektivität sowie katalytische Effekte

Hier ist durchaus mit toxikologischen und ökotoxikologischen Überraschungen zu rechnen, auch mit sensibilisierenden Wirkungen

photokatalytische Wirkungen?

Ad 4) Quanteneffekte

Insofern viele in der Nanotechnik relevante ‚Quanteneffekte‘ auf hochreine und hochdefinierte ‚technische Umgebungen‘ angewiesen sind, dürften ‚Nebenwirkungen‘ dieser Effekte in Organismen und Ökosystemen wenig wahrscheinlich sein.

Allerdings dürften umgekehrt ‚Verunreinigungen‘ und ‚Störungen‘ in den hochdefinierten Systemen eine relevante Quelle für ‚Fehler‘ und ‚technisches Versagen‘ sein, mit womöglich sehr weitreichenden Folgen (Frage nach ‚Eigensicherheit und Fehlerfreundlichkeit im Anwendungssystem‘).

Selbstorganisation, unkontrollierbare Entwicklungen

Techniken, die auf die Fähigkeit von Molekülen zu ‚gerichteter Reaktion‘, Bewegung, Kombination bzw. allgemein ‚Selbstorganisation‘ aufbauen, gehören zu den vielversprechendsten, auch unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten (Stoff- und

auch unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten (Stoff- und Energieaufwand). Selbstorganisationseffekte bilden zusammen mit der Exergiequelle Sonne die Grundprinzipien der Evolution und Ontogenese. Eine Technologie die gezielt mit Selbstorganisationseffekten in der Natur ‚zusammenarbeitet‘ kann als Nanobionik bezeichnet werden (mögliches Leitbild).

Technische Kontrollmöglichkeiten auf molekularer Ebene gehören andererseits zu den sehr wirkmächtigen ‚Powertechnologien‘. Sie sind allerdings auch oft auf bestimmte ‚Umgebungsbedingungen‘ angewiesen.

Selbstorganisation ist zu unterscheiden von Selbstreproduktion, also der Fähigkeit zur Selbstvervielfältigung, wie sie z. B. gentechnisch veränderten Organismen zueigen ist.

Für Nanotechnologie alleine ist der Schritt zur Selbstreproduktion und Vervielfältigung eher unwahrscheinlich. Ob dies auf der Grundlage einer Verschmelzung mit der Gentechnik möglich wird, ist noch offen.

Es ist also genauer zu untersuchen, ab welcher Form der Nanotechnik die Fähigkeit zur Selbstreproduktion und Vervielfältigung zu erwarten wäre, ab welcher Form es sich um eine potentiell sich verselbständigende (nicht mehr beherrschbare) Risikotechnologie handelt? Die derzeit absehbaren Nutzungen von Selbstorganisationsprinzipien der Nanotechnologie (Nanobionik) basieren nicht auf tiefen Eingriffen in zentralen Steuerungsmechanismen (wie z. B. zerebrale, hormonelle und genetische Steuerungen). Sie basieren eher auf dezentraler Kontextsteuerung (Stoffgradienten) bzw. auf der Nutzung weit verbreiteter chemisch-physikalischer Eigenschaften von Molekülen in präparierten Umgebungen. Solange dies gilt, dürften unbeherrschbare Verselbstständigungen (Selbstreproduktion und Selbstvervielfältigungen) eher unwahrscheinlich sein.

6. Versuch und Irrtum als verbreitetste Form der Technikbewertung und die Grenzen von trial and error

Versuch und Irrtum ist und bleibt das Grundprinzip der Technikbewertung. Das ist aus pragmatischen Gründen (Ressourcen, Zeit, Geld, manpower), aus prinzipiellen Gründen (Nicht-Wissbarkeit) und auch aus gesellschaftlichen Gründen (internationaler Innovationswettbewerb) gar nicht anders möglich. Das ist in vielen ja vermutlich zahlenmäßig den meisten Innovationsschritten auch gar kein allzu großes Problem. ‚Trial and error‘ ist im Prinzip völlig adäquat bei kleinen (im Prinzip) revidierbaren Schritten in nicht besonders sensiblen Anwendungskontexten.

Allerdings kann und sollte auch das Prinzip von Versuch und Irrtum in der Technikfolgenabschätzung nicht ‚blind und zufällig‘ sondern ‚bewusst und methodisch‘ zum Einsatz kommen. Zu den wichtigsten Voraussetzung für letzteres gehören ein gutes und so weit wie möglich gezieltes Monitoring der ‚Versuche‘ basierend auf relativ weitreichendem Wissen, worauf in diesem methodischen ‚Versuchsstadium‘ insbesondere zu achten ist. Dafür ist wiederum im Fall der Entwicklung und Einführung der Nanotechnik der Fokus zu legen auf

- i) nanospezifische Wirkungen und
- ii) bestimmte bewusst ausgewählte Anwendungskontexte.

Dem Prinzip von Versuch und Irrtum sind allerdings bei sehr großer Schrittweiten der Innovation, d. h. z. B. beim Einsatz von sehr wirkmächtigen und eingriffstiefen Techniken mit sehr weitreichenden erwartbaren Folgen (Wirkungsketten in Raum und Zeit) deutliche Grenzen gesetzt.

Die Anwendbarkeit des Prinzips von Versuch und Irrtum findet dort ihre Grenzen, wo (begründbar durch Informationen über den Charakter bzw. die Qualität der eingesetzten Technik bzw. des Eingriffs oder des Systems, in das eingegriffen wird) mit einem nicht revidierbaren Versuch ganze Landstriche oder Ökosysteme oder die Lebensgrundlagen zukünftiger Generationen ‚aufs Spiel gesetzt‘ werden. Also spätestens dort, wo es sich tendenziell um globale und irreversible Wirkungen handelt, ggf. sogar noch verstärkt durch hohen quantitativen Einsatz mit kumulativen Effekten.

Zu den Beispiele für die Nichtbeachtung dieser ‚Grenzen von Trial and Error‘ gehören die Freisetzung von FCKWs mit ihren globalen und irreversiblen Folgen auf Basis folgender schon damals bekannter Eigenschaftskombinationen dieser Stoffgruppe:

- i) ‚hohe Mobilität‘,
- ii) wenig bekannte (seltene, naturfremde) Stoffqualität und
- iii) Persistenz.

Allein aufgrund dieser Eigenschaftskombinationen konnten die FCKWs quasi ‚überall auf der Welt‘ auftauchen, eben auch in Umgebungsbedingungen, die bzw. deren Bedeutung womöglich noch nicht bekannt waren.

Zu den Grenzen von trial und error dürfte auch eine extreme Eingriffstiefe gehören (z. B. Eingriffe in Steuerungsprinzipien und/oder Basisprozesse von Systemen) sowie die Freisetzung von gentechnisch veränderten Organismen, welche die Fähigkeit zur Selbstreproduktion besitzen.

7. Betrachtung der Anwendungskontexte

Die vorgestellten Ansätze zur ‚Charakterisierung einer Technologie‘ sind sicher kritisch zu diskutieren hinsichtlich ihrer Begründung bzw. Begründbarkeit und insbesondere in Hinblick auf ihre Operationalisierbarkeit und Reichweite. Die ‚Charakterisierung einer Technologie‘ erscheint dabei als eine noch vergleichsweise leistbare Aufgabe. Sehr viel schwieriger ist die Betrachtung der Anwendungskontexte und die Analyse und Charakterisierung der Systeme (Architektur und Stabilitätszustand), in die eingegriffen wird. Technikwirkungen entfalten sich eben nicht nur aus dem ‚Charakter einer Technologie‘, sondern ebenso sehr aus dem jeweiligen Anwendungskontext (in Qualität und Quantität).

Um nur einige bekannte Beispiele zu nennen: Technologien können gesellschaftliche Trends verstärken oder schwächen. Technologien können missbraucht werden. Selbst auf der Basis von in der Regel harmlosen (eigensicheren) Technologien können bei Eingriffen in besonders sensible Systeme oder verstärkt durch quantitative Kumulationseffekte auch in vergleichsweise ‚stabilen‘ Systemen globale und irreversible Wirkungen hervorgerufen werden (Bsp. für ersteres: Conterganwirkung in der Embryonalentwicklung, Beispiel für letzteres: anthropogener Treibhauseffekt).

Eine prospektive Bewertung möglicher ökologischer und gesundheitlicher Wirkungen der Nanotechnologie kann sich also nicht allein auf die Charakterisierung der Technologie bzw. auf nanospezifische Wirkungen konzentrieren. Sie muss auch gesellschaftliche Trends und die je spezifische Anwendungskontexte betrachten.

8. Fazit

Nach derzeitigem Wissen lässt sich mit Blick auf die absehbaren nanospezifischen Effekte (einschließlich der Selbstorganisationseffekte) keine ‚besonders große Besorgnis‘ begründen, vergleichbar etwa mit derjenigen bei der Atom- oder der Gentechnologie.

Die auf dem gegenwärtigen Wissensstand erwartbaren Risiken scheinen am ehesten vergleichbar zu sein mit den Risiken der (synthetischen) Chemie. Letztere haben sich allerdings historisch als durchaus ‚beträchtlich‘ erwiesen.

Frühzeitige Technikbewertung und -gestaltung und Vorsorgemaßnahmen zur Vermeidung vieler der in ‚der Chemie‘ gemachten Fehler sind also angebracht. Das im aktuellen ‚Weißbuch zur Chemikalienpolitik‘ der EU vorgesehene REACH-System dürfte auch für einen Großteil der Einsatzbereiche der Nanotechnologie die adäquaten Schritte der Risikoanalyse vorsehen. Auch beim Risikomanagement kann viel von der Chemischen Industrie bzw. vom Umgang mit Chemikalien gelernt werden. Aber auch das Risikomanagement mit Blick auf Chemikalien weist noch Lücken auf bei der Operationalisierung des Vorsorgeprinzips (Stichwort ‚eigensichere Stoffe, Techniken und Anwendungssysteme‘). Dazu gehört auch das noch weitgehende Ausblenden der vorbeugenden Gestaltungsmöglichkeiten bei der Entwicklung von Stoffen und Technologien, und damit auch das Arbeiten mit Leitbildern als Steuerungs‘instrumenten‘.

Für das Projekt ‚nachhaltige Nanotechnologie‘ dürfte somit das folgende zweigleisige Vorgehen am vielversprechendsten sein:

- a) Herausarbeitung der technologiespezifischen Wirkungsmechanismen der Nanotechnologie. Insbesondere geht es hier um die Begründung und Begründbarkeit aber auch um eine Vervollständigung und weitere Ausdifferenzierung der Ableitung von möglichen Wirkungen aus der ‚Charakterisierung der Technik‘.
- b) Begründete Auswahl einiger besonders ‚interessanter‘ Anwendungskontexte, wobei als ‚interessant‘ jene Anwendungskontexte gelten könnten,
 - i) denen eine besonders hohe Sensibilität innewohnt (Qualität und Architektur der Systeme, in die eingegriffen wird). Methode der Wahl ist hier die Risikoanalyse, und/oder
 - ii) die ohnehin schon eine hohe gesellschaftliche Dynamik aufweisen (wg. evtl. Verstärkungs-, Massen- und Kumulationseffekte, Quantität des Einsatzes). Methode der Wahl ist hier die Ökobilanz.

Umweltwirkungen nanotechnologischer Verfahren und Produkte

Ulrich Petschow, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin

Die Bewertung der Umweltwirkungen von Nanotechnologien wurde bislang vorrangig unter dem Aspekt der Chancen betrachtet („radical green vision“), Risiken werden vorrangig in möglichen langfristigen Entwicklungstendenzen von „selbstreplizierenden Nanorobotern“ gesehen. Der Umgang mit diesen Risiken soll durch Richtlinien der Technikgestaltung gemindert werden, indem vor allem die Möglichkeiten der Verselbständigung dieser Techniken vermieden werden sollten (Foresight Guidelines).

Erst in jüngerer Zeit, auch im Zusammenhang mit dem Übergang zur industriellen Produktion, insbesondere der Nanopartikel, werden Bedenken im Hinblick auf die Bereiche benannt, die sich aus der Charakterisierung der Technologie ergeben.

In der Folge soll wie folgt vorgegangen werden:

1. zur Frage der Nanotechnologien
2. zur Frage der Zeitfristen
3. auf einige aktuelle Ergebnisse verwiesen und in den Kontext der Charakterisierung der Technologien gestellt werden
4. schließlich einige Anforderungen an den FuE Bedarf im Hinblick auf die Nanotechnologien gegeben werden, die sich u.a. aus den road maps der chemischen Industrie ergeben.

1. Zur Frage Nanotechnologien

Der Begriff der Nanotechnologien erweist sich als wenig exakt eingegrenzt. In seiner weitesten Fassung werden all die Technologien / Verfahren darunter gefasst, die im Nanometerbereich agieren. Dies bedeutet zugleich, dass damit die unterschiedlichsten Technologiebereiche einbezogen werden, mithin in der Nanotechnologie ein Zusammenwachsen unterschiedlichster Technologien zu erwarten ist.

Nun ist der Umgang mit Nanomaterialien nicht grundsätzlich neu, bspw. werden Nanopartikel im Kontext der Reifenproduktion bereits seit langem eingesetzt. Neu ist allerdings der grundsätzliche Anspruch der Nanotechnologie, der auf die Kontrolle und Gestaltung der molekularen Architektur abzielt und damit quasi ein Übergang vom unbewussten Umgang mit nanoskaligen Materialien zum bewussten, gestaltenden Umgang mit diesen Materialien erreicht werden soll.

Mit der grundsätzlichen Idee der Beherrschbarkeit der molekularen Architektur ist zugleich die Vorstellung von veränderten Produktionskonzepten verbunden, nämlich der Veränderung der herkömmlichen „top-down“ Ansätze zu „bottom-up“ Ansätzen. Mit dieser Veränderung des Produktionsparadigmas ist zugleich verbunden, dass im Grundsatz, von den zweifelsohne vorhandenen immensen technischen Schwierigkeiten an dieser Stelle abgesehen, die

Ressourceneffizienz erheblich zunehmen kann, da bspw. insbesondere die Abfallstoffe deutlich abnehmen könnten.

Konkret ist allerdings darauf zu verweisen, dass beide Produktionsparadigma längerfristig nebeneinander bestehen werden. Um es am oben angeführten Beispiel der Reifenproduktion zu verdeutlichen, gelingt es durch die Gestaltung der Nanopartikel die Eigenschaften der Reifen zu verbessern, ohne dass der Produktionsprozess selbst umfassend verändert wird.

2. Zeitfristen

Die Vorstellungen über die Entwicklung der Nanotechnologien werden durchaus kontrovers diskutiert, wobei allerdings auch hier festzustellen ist, dass insbesondere die Möglichkeiten langfristiger Entwicklungen (selbstreplizierender Nanoroboter) umstritten sind.

Bspw. werden von Rocco (2002: 5) folgende Fristen bzw. Generationen für industrielle Prototypen und der Vermarktung im Bereich der Nanotechnologien benannt:

- Die „zufällige“ Nutzung von Nanotechnologie bspw. carbon black wird seit Jahrhunderten betrieben.
- Isolierte Anwendungen (Katalysatoren, Komposite etc.) seit den 50er Jahren und in Folge zunehmenden Wissens um Nanostrukturen seit Anfang der 90er Jahre
- Erste Generation: Passive Nanostrukturen (ca. 2001)
Anwendungsbereiche: Coatings, Nanopartikel, bulk materials (nanostrukturierte Metalle, Polymere, Keramiken und ink jet)
- Zweite Generation: Aktive Nanostrukturen (ca. 2005)
Transistoren, Verstärker, adaptive Strukturen etc.
- Dritte Generation: 3D Nanosysteme (ca. 2010)
Mit heterogenen Nanokomponenten und unterschiedlichen assembling Techniken
- Vierte Generation: molekulare Nanosysteme (ca. 2020)
Mit heterogenen Molekülen, basierend auf biomimetic und neuem Design

In Entsprechung der oben eingeführten Differenzierung nach der Technologie an sich und dem jeweiligen Anwendungskontext ergeben sich für die ökologische Nachhaltigkeitsbewertung unterschiedliche Fragestellungen mit unterschiedlichen Fristigkeiten.

Zum einen ist eine Bewertung erforderlich, die auf die „erste Generation“ abzielt und deren ökobilanzielle und (öko-) toxikologische Bewertung vornimmt, zum anderen ist zu überprüfen, welche potenziellen Konsequenzen sich aus den jeweils folgenden und insbesondere der „vierten Generation“ ergeben. Dabei ist vor allem auf die ökologische Nachhaltigkeit dieser Entwicklungsvorstellungen und die nicht intendierten Nebeneffekte zu fokussieren.

Weitere erwartete Fortentwicklungen der Nanotechnologie beinhalten allerdings Risikocharakteristika, wie sie bspw. in Bereich der Gentechnologie eine Rolle spielen. Typisierend kann dies auf den Bereich der sog. „wet nanotechnologies“ bezogen werden, die in starkem Maße auf Zellen (in der Sprache der Nanotechnologie: Nanomaschinen) bezogen werden.

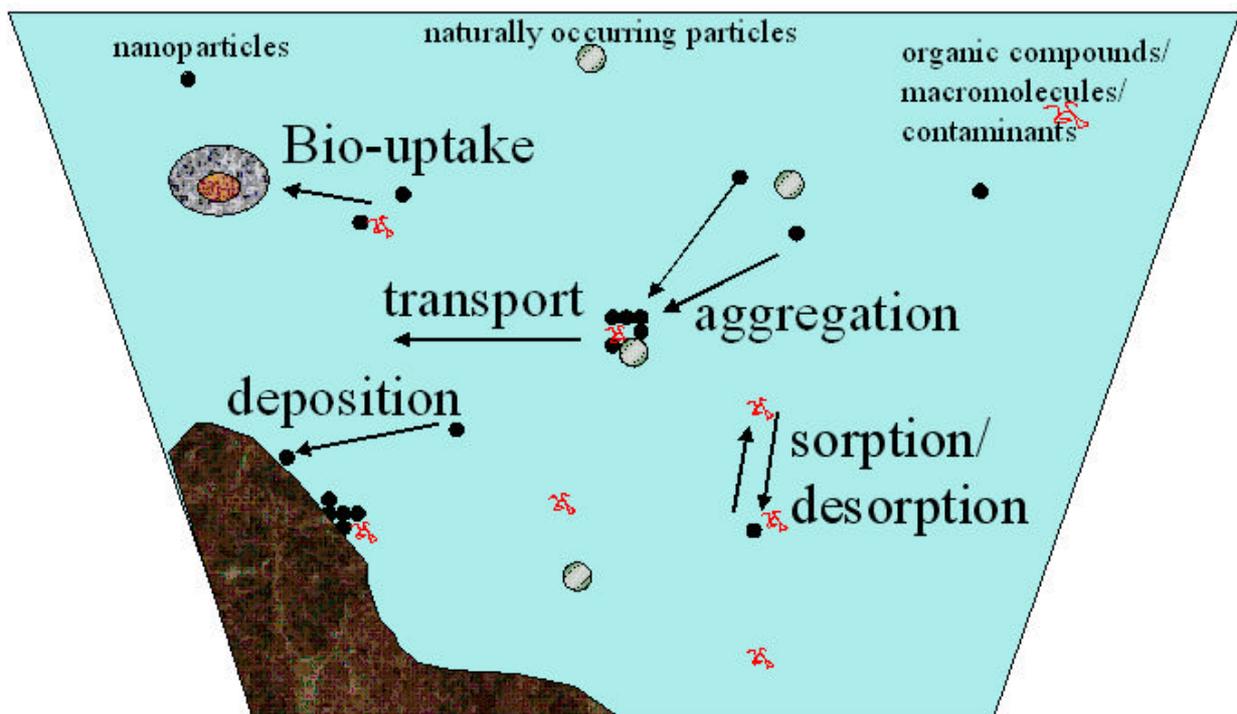
Dies gilt ebenfalls für sog. selbstreplizierende Nanoroboter – deren Machbarkeit in Frage steht – die gleichwohl auf anorganischer Ebene dem Gentechnikproblem entsprechen.

Aus diesen Phasenvorstellungen wird zugleich deutlich, dass die Bewertung von Chancen und Risiken sowie das Risikomanagement auf unterschiedlichen Ebenen anzusetzen haben. In der Folge werden allerdings vorrangig solche Umwelt- und Gesundheitsaspekte der Nanotechnologien angesprochen, die sich bereits heute stellen und nicht mit den langfristigen Entwicklungstendenzen der Nanotechnologien.

3. Verhalten von Nanopartikeln und potenzielle Umwelt- und Gesundheitswirkungen

In Anlehnung an die Typisierung der Technologie (Nanospezifische Aspekte/Effekte vgl. oben) ergeben sich unterschiedliche potenzielle Effekte. Das folgende Schaubild verdeutlicht das mögliche Verhalten von Nanopartikeln mit möglicherweise nicht intendierten Folgewirkungen.

Abb. 5



Quelle: Colvin 2002

Das Schaubild gibt Anhaltspunkte für das Verhalten von Nanopartikeln in der Umwelt und fokussiert vor allem auf die Bioverfügbarkeit (bio uptake), die Möglichkeiten der Aggregation und des Transports, der Sorption und Desorption und schließlich der Ablagerung. Wesentlich ist es dabei, dass es sich um eine generelle Betrachtung handelt, die je nach vorliegenden Stoffen oder Stoffkombinationen differenziert betrachtet bzw. untersucht werden muss.

Gemäß der oben eingeführten Differenzierung der nanospezifischen Aspekte und Effekte werden damit die Kleinheit und insbesondere das spezifische Verhältnis Oberfläche / Volu-

men erfasst: Also die Probleme der Adhäsion, Kohäsion und Agglomeration sowie die veränderte chemische Reaktivität und Selektivität.

Damit können allerdings noch keine Aussagen im Hinblick auf die möglichen Umwelt- und Gesundheitswirkungen getroffen werden. Hinsichtlich der möglichen nanospezifischen Wirkungen auf Sicherheit, Gesundheit und Umwelt existiert gegenwärtig nur wenig verifiziertes Wissen, vielmehr gibt es vielfach Vermutungen und Warnungen. In der Folge sollen einige dieser Hinweise angeführt werden.

Nanopartikel, die bereits im großtechnischen Maßstab produziert und eingesetzt werden, stellen allerdings nicht grundsätzlich ein neues Problem dar. Vielmehr sind Partikel im Nanobereich, nicht zuletzt aufgrund der sich entwickelnden messtechnischen Möglichkeiten, in die Diskussion geraten, dies insbesondere anhand der Emissionen von Dieselfahrzeugen.

Nanospezifische Aspekte

In der Folge werden einige wenige Zitate im Hinblick auf das Verhalten von Nanopartikeln und Nanomaterialien aufgelistet. Es ist zu betonen, dass damit keine Aussagen zu den tatsächlichen Risiken gemacht werden können. Gleichwohl geben diese Zitate Hinweise auf potenzielle Risiken.

Luftreinhaltung

Hinsichtlich der technischen Maßnahmen zur Luftreinhaltung – und damit einer generellen Problemlage - kommt eine Studie zu folgendem Ergebnis: „Es zeigte sich jedoch, dass durch die technischen Verbesserungen lediglich die gröberen Staubfraktionen (> PM 10) effizient reduziert wurden. Während solche Partikel, die nur in die oberen Bronchien gelangen, deutlich abnahmen, konnte bei lungengängigen Partikeln (PM 2,5 und PM 0,1) ein viel geringerer Rückgang verzeichnet werden. Ultrafeine Partikel (PM 0,1) haben in ihrer Konzentration in der Atemluft sogar eher zugenommen“ (Eikmann; Seitz 2002:63).

Diese Aussagen gelten allein für Nanopartikel, die aus den Emissionen des Verkehrs stammen und nicht für die Emissionen aus der Produktion von Nanopartikeln bzw. der Freisetzung durch den Gebrauch entsprechender Produkte. Gleichwohl werden diese Partikelemissionen im Hinblick auf die möglichen Gesundheitsgefährdungen zunehmend kritisch diskutiert.

Wasser

Mark Wiesner vom CBEN (Center for Biological and Environmental Nanotechnology) forscht an dem Verhalten von Nanomaterialien in Wasser und kommt zu folgenden Aussagen: „nanomaterials can move with great speeds through aquifers and soil [...] nanomaterials provide a large and active surface for sorbing smaller contaminants, such as cadmium and organics. Thus, like naturally occurring colloids they could provide an avenue for rapid and long-range transport of waste in underground water.“

Ein internationales Forschungsprojekt kommt zu dem Ergebnis, dass Abwässer aus Bergwerken sehr hohe Konzentrationen von gelösten Schwermetallen und Aluminium enthalten.

Nanopartikel können diese Schwermetalle in Fließgewässern verschleppen (vgl. Vista Verde 2002).

Verhalten im Organismus

“Based on studies of naturally occurring nanoscale particles such as ultrafine particle aerosols and surgical wear debris from implants, we can speculate that nanoscale inorganic matter is not generally biologically inert. However, without hard data that specifically addresses the issues of synthetic nanomaterials, it is impossible to know what physiological effects will occur, and more critically, what exposure levels to recommend” (Krane 2002).

Neue Stoffe

In einigen Veröffentlichungen wird ein Vergleich von Nanotubes und Asbest vorgenommen, allerdings liegen Untersuchungsergebnisse in diesem Kontext nicht vor (vgl. Small Times 2002).

Obwohl absehbar ist, dass die industrielle Produktion der Nanotubes bevorsteht, sind toxikologische Experimente eine Seltenheit. Forscher haben bislang nicht untersucht, was passiert, wenn Menschen diese Nanotubes einatmen oder sie bei medizinischen Behandlungen erhalten.¹²

Unklar ist zudem die Frage, inwieweit diese Stoffe biologisch abbaubar sind. So wird für Fullerene vermutet, dass sie dies sind, für Nanotubes wird dies hingegen nicht angenommen.

Bewertung der Risiken im Rahmen eines Prozesses vor dem Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg

Im Rahmen einer ersten gerichtlichen Überprüfung der Genehmigung einer Anlage zur Produktion von Nanopartikeln wurden eine Reihe von kritischen Punkten durch Gutachteraussagen bewertet. Dabei wurde übereinstimmend festgestellt, dass die gesundheitlichen Auswirkungen von Nanopartikeln derzeit noch wenig erforscht sind. In der Summe allerdings wurde von den Gutachtern in diesem Verfahren festgestellt, dass der Diskussionsprozess im Hinblick auf einen Beurteilungsmaßstab noch nicht abgeschlossen ist. Durch Analogiebildung zu den Beurteilungswerten von Dieselruß und der von der Anlage ausgehenden Immissionszusatzbelastung kamen die Gutachter zu der Einschätzung, dass die Genehmigungsaufgaben hinreichend waren.

In der Folge sollen allein zwei Aspekte des Verfahrens kurz dargestellt werden.

- Zellwandgängigkeit von Nanopartikeln
Es existieren einzelne Untersuchungen, die zu dem Ergebnis kommen, dass „nach der tierexperimentellen Gabe von Partikeln in die Atemwege hinein diese in nicht zu kleiner Zahl auch in der Leber nachweisbar seien, also auf dem Blutwege dorthin gelangt sein müssten. Diese Ergebnisse seien nach seiner (Prof. Dr. Dr. Wichmann –

¹² Es wird allerdings auf wenige Studien verwiesen, die auf eine geringe Relevanz des Problems abstellen (vgl. Freitas 2002; Huczko et al. 2001).

beigeladener Sachverständiger) Einschätzung jedoch zurückhaltend zu bewerten“ (Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg 2002:28).

- Völlig neuartiges Gefährdungspotenzial
„Zwar macht der Kläger geltend, dass es sich bei den von der Anlage der Beigeladenen ausgehenden gezielt zur wirtschaftlichen Verwendung hergestellten Nanopartikeln um ein völlig neuartiges Gefährdungspotenzial handele, das mit ubiquitär vorhandenen Nanopartikeln nicht vergleichbar sei; der Sachverständige konnte jedoch ein solch neuartiges Gefährdungspotenzial – wenn auch unter gewissen Vorbehalten – nicht bestätigen“ (Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg 2002:35).

Ökobilanzielle Aspekte

Ökobilanzen für nanotechnologische Verfahren und Produkte liegen gegenwärtig nicht vor. Erste Ansätze der Entwicklung von Ökopprofilen wurden vom IÖW vorgenommen, dabei wurde zum einen deutlich, dass die Umweltentlastungspotenziale durchaus groß sein können. Am Beispiel des Automobilkatalysators konnten deutliche Entlastungseffekte identifiziert werden. Allerdings existieren einige Datenlücken, die das Ergebnis wieder relativieren können. Dies betrifft zum einen die Frage des Produktionsaufwandes der Nanopartikel (energetisch aber auch bzgl. der eingesetzten Chemikalien) und zum anderen die Frage der Wirkungen der möglichen Freisetzung von Nanopartikeln in der Umwelt.

4. Forschungsbedarf aus Sicht von Industrie, Behörden und Forschung bzgl. der chemischen Industrie

Im Rahmen eines Workshops „Nanomaterials and the Chemical Industry – R&D Roadmap Workshop“¹³, in welchem vorrangig die technischen Ziele und Hindernisse identifiziert wurden für die Anwendung und Marktfähigkeit von Nanomaterialien in der Chemischen Industrie und daraus abgeleitet prioritäre FuE Notwendigkeiten, wurden zugleich auch Aspekte der Sicherheit, Umwelt und Gesundheit identifiziert. Es ist darauf zu verweisen, dass für den Bereich Sicherheit, Umwelt und Gesundheit ausschließlich Sicherheits-, Umwelt- und Gesundheitsprobleme benannt werden, die sich durch Nanopartikel und Nanomaterialien ergeben können. Längerfristige Problembereiche werden insofern kaum berücksichtigt.

Diese sollen in der Folge referiert werden, da diese grundsätzlichen Fragestellungen für die weiteren Forschungsbemühungen von Bedeutung sind und im Grundsatz eine Forschungsagenda für die Nanotechnologien darstellen.

¹³ Vision 2020 (2002): Nanomaterials and the Chemical Industry – R&D Roadmap Workshop. Preliminary Results. Workshop held on September 30; October 1 and 2, 2002. Chemical Industry: Vision 2020 - Technology Partnership.

Mögliche Hemmnisse der Marktentwicklung, die sich aus dem fehlenden Wissen über Sicherheits-, Umwelt- und Gesundheitsfolgen von Nanomaterialien / -partikeln ergeben sind:

- Fehlendes Wissen über das Ausbreitungsverhalten von Nanopartikeln in der Luft
- Fehlendes Wissen des Niveaus von Nanopartikeln in der Umwelt (Problem: Messung und Quantifizierung)
- Große Unbekannte bei dem upscalen der Produktion, da keine Umweltstandards existieren
- Unzureichendes Wissen bzgl. der Gesundheitsrisiken durch Nanomaterialien
- Fehlende Toxizitätsdaten
- Unzureichende Erfahrungen im sicheren Umgang mit Nanopartikeln
- Überwiegend fehlendes Wissen bzgl. Gesundheits-, Sicherheits-, und Umweltfolgen

Daraus werden folgende Forschungsprioritäten abgeleitet:

- Entwicklung von Modellen für das Verständnis für die Inhalierung und Aufnahme von Nanopartikeln und dem Transfer in den Blutkreislauf oder in das Gewebe
- Untersuchung der kurz- und langfristigen Effekte von Gesundheitsrisiken von Nanopartikeln
- Untersuchung über das Zerlegen (break down) von Nanokompositen / die Freisetzung von Nanopartikeln in die Umwelt

FuE Erfordernisse:

- Erforschung der toxikologischen Eigenschaften von Nanomaterialien, die von Mikropartikeln adsorbiert werden oder die Aggregationen von Nanomaterialien
- Zusammenstellung von Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltdaten für Nanopartikel in unterschiedlichen Zusammensetzungen
- Toxizitätstest und -studien
- Interaktion von Nanopartikeln mit der menschlichen Physiologie
- Life cycle Aspekte von Nanopartikeln
- Modellierungen um Nanomaterialien zu designen, die umweltfreundlich sind
- Entwicklung von schnellen screen Protokollen
- Methoden und Maßstäbe bzgl. der toxischen Effekte von Nanomaterialien unter Nutzungsbedingungen
- Recycling / Immobilisierung
- Beauftragung von Environmental impact studies und LCA's

Zentraler Output der FuE Prioritäten

- Umfassendes Verständnis der Humantoxizität der Basis Nanomaterialien
- Schnelle Ergebnisse für neue Materialien
- Adäquates Verständnis des Umwelteinflusses und der indirekten Gesundheitsimpacts.

In der Summe lässt sich festhalten, dass das Wissen um die Sicherheits-, Umwelt- und Gesundheitsfolgen von Nanotechnologien gering ist und dies, gerade auch aus Sicht der Industrie, ein mögliches Hemmnis für die Entwicklung und Vermarktung von Nanotechnologien darstellen kann. Dabei ist hervorzuheben, dass es sich bei den benannten Problemen nicht um grundsätzlich neue Probleme handelt, vielmehr um Bewertungsmethoden, wie sie bspw. im Bereich der chemischen Industrie zur Anwendung kommen und einsetzbar sind.

Literatur

Colvin, Vicki (2002): Responsible Nanotechnology: Looking Beyond the Good News. <http://www.eurekalert.org/context.php?context=nano&show=essays&essaydate=1102>.

Eikmann, Thomas; Heike Seitz (2002): Klein, aber oho! Von der zunehmenden Bedeutung der Feinstäube. In: Umweltmedizin in Forschung und Praxis 7 (2), S. 63.

Freitas, Robert (2002): Could Medical Nanorobots Be Carcinogenic? <http://www.imm.org/Reports/Rep033.html>.

Huczko, Andrej et al. (2001): Physiological testing of carbon nanotubes: Are they asbestos-like? In: Fullerene Science and Technology 9 (2), pp. 251 – 254.

Krane, Jim (2002): Some Worried of Nanotechnology Risk. http://www.softcom.net/webnews/wed/bm/Atiny-toxins.RvdU_CS8.html, 08.09.2002.

Roco, Mihail C. (2002): The Future of National Nanotechnology Initiative. Präsentation vom 5/11/02.

Small Times 12/9/02: <http://www.smalltimes.com>.

Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg (2002): Beschluss vom 19/3/02 –10 S 2184/99.

Vista Verde (2002): Schwermetalle: Aus dem Bergbau in die Flüsse. http://www.vistaverde.de/news/Wissenschaft/0209/27_bergbau.htm

Wiesner, Mark (2002). In: Small Times. <http://www.smalltimes.com>.

Konzept zur Bewertung konkreter Nanotechnologienanwendungen

Michael Steinfeldt, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin

Den betrachteten Aspekten der Charakterisierung der Nanotechnologie sind für die Bewertung konkreter Nanotechnologienanwendungen geeignete Methoden bzw. ein Methodenset zuzuordnen, mit deren Hilfe die aufgegriffenen Forschungsfragestellungen möglichst zufriedenstellend beantwortet werden können.

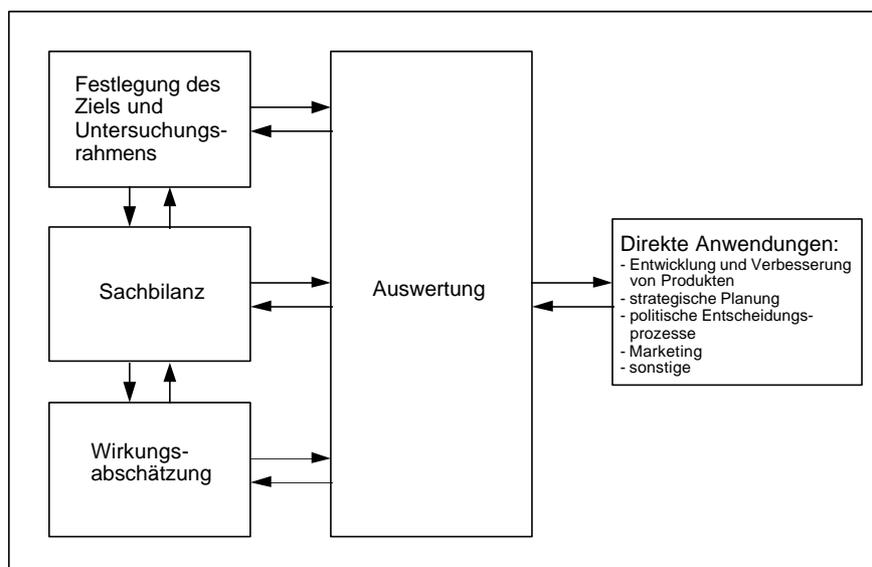
1. Das Bewertungskonzept

Da die Abschätzung von potentiellen Umweltwirkungen im Vordergrund steht, bietet sich als Ausgangspunkt die Methode der Ökobilanzierung an. Die Ökobilanz ist die am weitesten entwickelte und normierte Methode zur Abschätzung der mit einem Produkt verbundenen Umweltaspekte und produktspezifischen potentiellen Umweltwirkungen. Im Vergleich zu bestehenden Anwendungen ist durch die Ökobilanz die Analyse von Ökoeffizienzpotenziale möglich. Nach EN ISO 14040 besteht eine Ökobilanz aus folgenden Schritten:

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens,
- Sachbilanz,
- Wirkungsabschätzung,
- Auswertung.

Den Zusammenhang zwischen diesen Schritten verdeutlicht die nachfolgende Abbildung.

Abb. 6: Schritte zur Erstellung einer Ökobilanz



Quelle: EN ISO 14040 1997

Die Pfeile zwischen den einzelnen Ökobilanzschritten sollen den iterativen Charakter verdeutlichen, d.h. dass die Ergebnisse weiterführender Schritte stets rückgekoppelt werden und ggf. Änderungen und einen erneuten Durchgang zur Folge haben.

Im ersten Schritt erfolgt die **Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens**. Im Rahmen der **Sachbilanz** erfolgt die Erhebung, Zusammenstellung und Berechnung der Daten. Eine Ökobilanz erstreckt sich in der Regel über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes oder einer Dienstleistung. Die Stoff- und Energiedaten müssen nun für jede dieser Lebenszyklusstufen in physikalischen Einheiten zusammengetragen werden. Dabei sind auf der Inputseite Daten über den Verbrauch an Roh- und Hilfsstoffen sowie Energie und auf der Outputseite Daten über die Produkte, die Luft- und Wasseremissionen sowie die Abfälle erforderlich.

In der **Wirkungsabschätzung** werden die Sachbilanzdaten im Hinblick auf ihre ökologische Relevanz strukturiert (Klassifizierung) und zusammen gefasst (Charakterisierung). Auf diese Weise werden die Ressourcenentnahmen und Emissionen, die im Laufe des Produktlebenszyklus auftreten, mit Umweltauswirkungen in Zusammenhang gebracht, die in Fachkreisen und der Öffentlichkeit diskutiert werden.

In der folgenden Tabelle sind Wirkungskategorien und die dazu beitragenden Substanzen aufgelistet.

Tab. 1: Wirkungskategorien und dazu beitragende Substanzen

Wirkungskategorie	Beitragende Substanzen und Faktoren
Ressourcenbeanspruchung	Verbrauch erneuerbarer und nicht erneuerbarer Ressourcen (Erdöl, Erdgas, Kohle, Mineralien, Holz u.a.)
Treibhauseffekt	Kohlendioxid (CO ₂), Methan (CH ₄), Lachgas (N ₂ O) u.a.
Stratosphärischer Ozonabbau	Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), bromierte und halogenierte Kohlenwasserstoffe u.a.
Humantoxizität	Flüchtige organische Kohlenwasserstoffe (VOC), organische Lösemittel, Schwebstaub, Benzol, Schwermetallverbindungen (Arsen, Cadmium, Quecksilber, Blei, Nickel, etc.) Schwefeldioxid (SO ₂), Stickoxide (NO _x), Fluoride, Fluorwasserstoff, Chlorwasserstoff, Kohlenmonoxid (CO), Ruß u.a.
Ökotoxizität	Schwefeldioxid (SO ₂), Stickoxide (NO _x), Fluoride, Fluorwasserstoff, Chlorwasserstoff, Blei (Pb), Cadmium (Cd), Kupfer (Cu), Quecksilber (Hg), Zink (Zn), Chrom (Cr), Nickel (Ni), adsorbierbare organische Halogene (AOX) u.a.
Sommersmog	Stickoxide (NO _x), Methan (CH ₄), flüchtige organische Kohlenwasserstoffe (VOC) u.a.
Versauerung	Schwefeldioxid (SO ₂), Stickoxide (NO _x), Ammoniak (NH ₃), Salzsäure (HCl), Fluorwasserstoff (HF) u.a.
Aquatische Eutrophierung	Nitrat (NO ₃ ⁻), Ammonium (NH ₄ ⁺), chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), Gesamt-Phosphor, Gesamt-Stickstoff u.a.
Terrestrische Eutrophierung	Stickoxide (NO _x), Ammoniak (NH ₃) u.a.
Naturraumbeanspruchung	Rohstoffgewinnung (z.B. Kohle- und Erzabbau), Inanspruchnahme von Flächen einer bestimmten ökologischen Qualität (z.B. Landw.)

Quelle: Ankele; Steinfeldt 2002

Der letzte Schritt einer Ökobilanz ist die **Auswertung**. Darin gilt es, die Schlussfolgerungen für die geplante(n) Anwendungen der Ökobilanz zu ziehen und konkrete Handlungen abzuleiten.

In Bezug auf ein umfassendes Bewertungskonzept muss auf einige Defizite der Ökobilanz hingewiesen werden.

1. Nicht für alle Wirkungskategorien existieren bisher allgemein akzeptierte Wirkungsmodelle. Dies muss insbesondere für die relevanten Kategorien Humantoxizität und Ökotoxizität festgestellt werden. So geht die Berücksichtigung der Belastung durch Feinstäube (PM₁₀-Risiko thematisiert ein mögliches Toxizitätspotenzial durch Partikel < 10 µm) in Ökobilanzen bei Nanotechnologieranwendungen allein schon größenordnungsmäßig am Ziel vorbei.
2. In Ökobilanzen werden Risiken sowie die Wirkmächtigkeit von Anwendungen nicht betrachtet.

Aus unserer Sicht sollte sich deshalb ein umfassendes Konzept zur ökologischen Bewertung von Nanotechnologieranwendungen neben der Ökobilanz folgende weitere Bewertungsmethoden berücksichtigt werden:

- Risikoanalyse
- toxikologische Analyse
- Analyse der Eingriffstiefe.

Eine **Risikoanalyse** ist der Prozess, der Informationen einer Situation (Situationsbeschreibung, Identifizierung von Gefahren) mit Schätzungen von Risiken verbindet, welche auf möglichen Folgen bzw. Gefahren von Handlungsalternativen gründen.

Die **toxikologische Analyse** umfasst unter anderem eine Prüfung auf akute Toxizität, chronische Toxizität, ätzende Wirkung, Hautreizung, Augenreizung, kanzerogene Wirkung, Sensibilisierung (potentielle allergieauslösende Wirkung) etc.

Der Begriff der **Eingriffstiefe** einer Technologie beurteilt den Grad des „technischen Ansetzens an Steuerungsstrukturen“ in der natürlichen Umwelt mit dem Effekt einer möglichen extremen Wirkmächtigkeit und einer extremen Ausdehnung raum-zeitlicher Wirkungsketten. Mit dem Begriff der Eingriffstiefe soll der „Charakter“ einer Technologie bestimmt werden, der qualitative Unterschied zwischen dem Bearbeiten von Steinen und dem Spalten von Atomen (vgl. Gleich; Rubik 1996).

Ein derartig zusammengesetztes Methodenset, dessen jeweilige Schwerpunktsetzung an den spezifischen Anwendungskontext angepasst werden muss, würde einerseits die Abschätzung der mit einer Anwendung verbundenen Umweltaspekte und damit im Vergleich zu bestehenden Anwendungen die Analyse möglicher Ökoeffizienzpotenziale und andererseits die Risikobewertung unter Einbeziehung des Vorsorgeprinzips gewährleisten.

Die folgende Abbildung stellt einen ersten Versuch dar, den Zusammenhang zwischen den verschiedenen nanospezifischen Aspekten / Effekten, den daraus resultierenden Problemen, der geeigneten Bewertungsmethode sowie möglicher Maßnahmen bzw. Anforderungen darzustellen.

Tab. 2: Zusammenhang zwischen nanospezifischen Aspekten, geeigneten Bewertungsmethoden und möglichen Maßnahmen

Aspekt / Effekt	Problem	Methode	Maßnahme
Kleinheit	Durchgängigkeit	Toxische Analyse	geschlossene Anwendung, Fixierung der Partikel, Messtechnik
Definiertheit: Reinheit, Korngröße	Produktlebenswegaufwand, Entropie	Ökobilanz	ökoeffiziente Herstellung
Definiertheit: seltene Materialien	"Neue Stoffe" in Umwelt (Mengenmäßig)	Ökobilanz, Toxische Analyse	ökoeffiziente Herstellung, geschlossene Anwendung
Spezifisches Verhältnis Oberfläche/ Volumen	Mobilisierung, chemische Reaktivität	Toxische Analyse, ökotoxische Analyse	geschlossene Anwendung, Fixierung der Partikel,
Selbstorganisation	unkontrollierbare Verselbständigung	Risikoanalyse, Analyse der Eingriffstiefe	inhärente Sicherheit

Quelle: eigene Darstellung

2. Erprobung des Bewertungskonzept an konkreten Fallbeispielen

Die praktische Anwendbarkeit dieses Methodenkonzeptes soll in der nächsten Projektphase im Rahmen von vertiefenden Untersuchungen an auszuwählenden Fallbeispielen mit dem Ziel der Erstellung von ökologischen Profilen erprobt werden. Hierbei ist uns bewusst, dass wir uns an die dargestellten Bewertungsmethoden wie z.B. an die Ökobilanzmethode nach DIN ISO 14040 nur anlehnen können und nicht in allen Anforderungen entsprechen werden. Nach unserem gegenwärtigen Kenntnisstand ist davon auszugehen, dass die hohen Ansprüche einer Ökobilanz an die vorliegende Datenqualität nicht im Rahmen der vertiefenden Fallstudien erfüllt werden können, da davon auszugehen ist, dass die Datenlage über die Produkte / Verfahren und über die Vergleichsprodukte / -verfahren lückenhaft sein werden und zum einen vor dem Hintergrund des zur Verfügung stehenden Zeitrahmens und zum anderen des finanziellen Rahmens nicht zu füllen sein werden¹⁴.

¹⁴ Ein Ansatz zum Umgang mit diesem Problem ist z.B. die Methode der Simplified bzw. Streamlined LCA (vgl. Christiansen et al. 1997 / Todd; Curran 1999).

Die Erstellung der ökologischen Profile umfasst folgende Teilschritte:

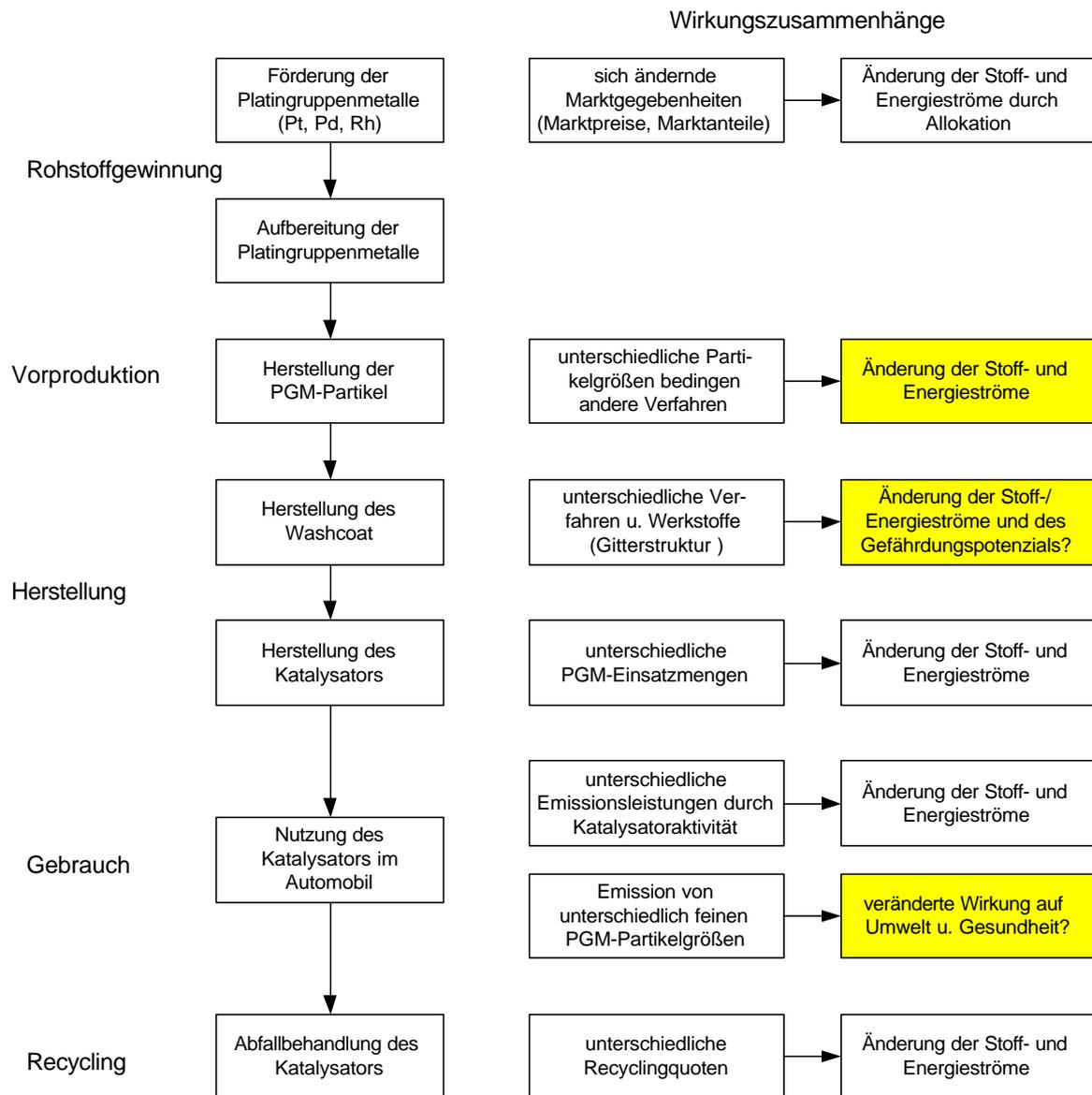
- Formulierung der Rahmenbedingungen und der Zieldefinition des jeweiligen Fallbeispiels
- Formulierung der Vergleichsoptionen (Verfahren bzw. Produkte)
- Datenerhebung und Bilanzierung der Fallbeispiele (Sachbilanzierung in Anlehnung an DIN ISO 14040)
- Wirkungsabschätzungen in Anlehnung der DIN ISO 14040
- Toxische / Risikoanalysen bzw. –diskussionen
- Analyse der Eingriffstiefe
- Zusammenfassende Bewertungen der Fallbeispiele

Zum Konkretisierung der Anwendbarkeit soll das Konzept am **Beispiel Autoabgaskatalysator** näher erläutert werden. Im Rahmen einer Studie für das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag wurden durch das IÖW erste Ansätze zur Entwicklung von Ökoprofilen für nanotechnologische Anwendungen vorgenommen (vgl. Steinfeldt et al. 2002) Fokus der Fallstudie Autoabgaskatalysator sind Technologieentwicklungen, die durch den Einsatz immer kleiner werdender nanoskaliger Stoffe gekennzeichnet sind.

Die Fallstudie schränkte hierbei ihren Fokus auf das Anwendungsfeld des Drei-Wege-Katalysators ein und untersuchte in vergleichenden Betrachtungen abgeleitet von wesentlichen Einflussparametern fünf Varianten, die einerseits die Entwicklung der Katalysatorentechnologie nachzeichneten (vgl. Hagelüken et al. 2001 / Heck et al. 2002) und andererseits zwei aktuelle Neuentwicklungen (vgl. CSI 2002; Daihatsu News 2002) berücksichtigten. In Bezug zu diesen Entwicklungen wurden die damit in Verbindung stehenden ökologischen Effekte untersucht.

Die folgende Abbildung stellt den betrachteten Bilanzraum dar. Außerdem werden den einzelnen Lebenszyklusstufen Wirkungszusammenhänge mit Bezug zum Edelmetalleinsatz zugeordnet.

Abb. 7: Bilanzraum des Autokatalysators und dessen Wirkungszusammenhänge unter dem Fokus des Platingruppen-Metalleinsatz



Quelle: Steinfeldt et al. 2002

Auch unter Berücksichtigung einiger Datenlücken, die das Ergebnis wieder relativieren könnten (in der Abbildung unterlegt), konnten an diesem Anwendungsbeispiel quantifizierte ökologische Entlastungseffekte festgestellt werden. Ökologische Entlastungseffekte werden dadurch erzielt, dass die Schadstoffemissionen der Autoabgase verringert und dass durch die „ersparte“ Rohstoffgewinnung von Platingruppenmetalle (PGM), die mit sehr hohen Aufwendungen verbunden ist, Umweltauswirkungen vermieden werden. Auf der anderen Seite blieb im Bereich der Beurteilung von Gefährdungspotenzialen durch PGM-Emissionen die Frage einer zusätzlichen kombinierten Wirkung aufgrund der immer geringer werdenden nanoskaligen Partikelgröße aufgrund von „Nichtwissen“ offen. Aussagekräftige Untersuchungen hierzu konnten nicht gefunden werden.

Im Rahmen des BMBF-Projektes wird die Auswahl von Fallbeispielen zum Ziel haben, das Spektrum an nanotechnologischen Anwendungen (Vielfalt der Herstellungsverfahren und der nanoskaligen Basisstrukturen) möglichst umfassend abzudecken und unterschiedliche Schwerpunkte zu setzen. Die Auswahl der Fallbeispiele wird entsprechend folgender Auswahlkriterien und den damit verbundenen Kriterien erfolgen:

Nach Art und Umfang der Umweltauswirkungen

- erwartetes Ökoeffizienzpotenzial (hoch --- gering)
- mögliches Risiko- bzw. Toxizitätspotenzial (hoch --- gering)

Nach Ausmaß an Marktnähe

- Marktreife (vorhanden --- langfristig)
- Marktrelevanz (hoch --- gering)
- mögliches Anwendungsspektrum (breit --- eng)

Nach Art der Innovation

- Innovationsgrad (gering --- hoch).

Konkrete Ergebnisse der Fallstudienuntersuchungen werden Ende 2003 zur Verfügung stehen.

Literatur

- Ankele, Kathrin; Steinfeldt, Michael (2002): Ökobilanzen. In: Der Umweltschutzberater. Lo-seblattsammlung. Deutscher Wirtschaftsdienst.
- Christiansen, Kim et al. (1997): Simplifying LCA: just a cut? SETAC, Brüssel.
- CSI (Catalytic Solutions, Inc.) (2002): Technology. <http://www.catsolns.com/technology.htm>, 02.12.2002.
- Daihatsu News (2002): Industrialization of the World's First Self-Regenerating "Intelligent Catalyst". <http://www.daihatsu.com/news/n2002/02091901/>, 19.09.2002.
- DIN EN ISO 14040 (1997): Umweltmanagement – Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen. Berlin.
- Gleich, Arnim von; Rubik, Frieder (1996): Umwelteinflüsse Neuer Werkstoffe. Düsseldorf.
- Hagelüken, Christian et al. (2001): Autoabgaskatalysatoren: Grundlagen – Herstellung – Entwicklung – Recycling – Ökologie. Renningen.
- Heck, Ronald; Farrauto, Robert; Gulati, Suresh (2002): Catalytic Air Pollution Control. Commercial Technology. New York.
- Steinfeldt, Michael; Petschow, Ulrich; Hirschl, Bernd (2002): Anwendungspotenziale nanotechnologiebasierter Materialien. Teilgebiet 2: Analyse ökologischer, sozialer und rechtlicher Aspekte, Bericht des IÖW (unveröffentlicht). Berlin.
- Todd, Joel; Curran, Mary (1999): Streamlined Life-Cycle Assessment: A Final Report from the SETAC North America Streamlined LCA Workgroup.

Toxikologie von Nanopartikeln

Dr. Silvia Diabaté, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Toxikologie und Genetik

Es ist schon lange bekannt und gut untersucht, dass Stäube an Arbeitsplätzen zu berufsbedingten Erkrankungen wie z.B. Pneumokoniose bei Bergleuten führen können. Aber auch durch hohe Staubkonzentrationen in der Umwelt in Verbindung mit anderen Luftschadstoffen wie Schwefeloxiden, Stickoxiden und Kohlenmonoxid kam es in der Vergangenheit mehrfach zu dramatischen Anstiegen der Mortalität in der Bevölkerung, z.B. während der Smogperiode in London Anfang Dezember 1952 (Abb. 8, Schwartz, 1994). Dem rapiden Anstieg der Luftschadstoffe folgte mit einem Tag Verzögerung ein drastischer Anstieg der Todesfälle, die hauptsächlich durch Erkrankungen der Atemwege und des Herz-Kreislauf-Systems ausgelöst wurden.

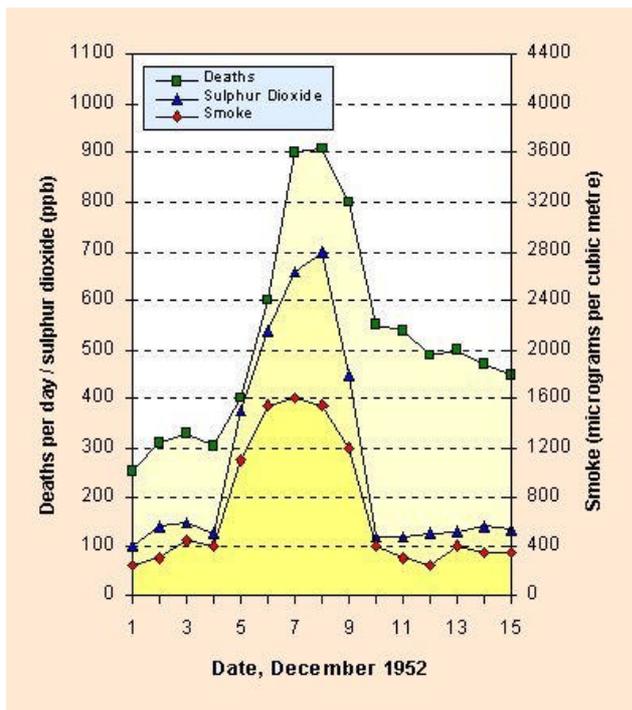


Abb. 8: Zeitlicher Verlauf der Staub- und SO₂-Konzentrationen sowie der Todesfälle pro Tag vom 1. - 15. Dezember 1952 in London.

Quelle:

http://www.doc.mmu.ac.uk/aric/ea/Air_Quality/Older/Great_London_Smog.html

Durch effektive Minderungsmaßnahmen in der Industrie ist heute die Staubkonzentration in der Umwelt auf typischerweise 20-30 µg/m³ zurückgegangen. In Smogsituationen wie z.B. Anfang Januar 2002 kann die Staubkonzentration, die heute routinemäßig als PM₁₀ (**P**articulate **M**atter <10 µm) gemessen wird, auch auf über 150 µg/m³ ansteigen. Neuere epidemiologische Studien, die weltweit durchgeführt wurden, zeigen jedoch, dass selbst bei diesen niedrigen Konzentrationen eine Korrelation mit der Häufigkeit von Erkrankungen und Todesfällen zu beobachten ist (Tab. 3). Diese akuten Effekte treten jedoch kaum bei gesunden, sondern insbesondere bei Personen mit schweren Herz- sowie

sondern insbesondere bei Personen mit schweren Herz- sowie Atemwegserkrankungen (Asthma, chronische Bronchitis), bei Kleinkindern und älteren Menschen auf. Eine Meta-Analyse zeigte, dass ein Anstieg der PM₁₀-Konzentration um 10µg/m³ mit einem Anstieg der Mortalität um ca. 1% assoziiert ist (Thurston, 1996).

Es ist bis jetzt absolut unklar, wie solch niedrige Staubkonzentrationen zur Beeinträchtigung der Gesundheit führen können. Als Ursachen werden verschiedene chemische Aerosolkomponenten (Metalle, organische Verbindungen, Endotoxine) sowie physikalische Eigenschaften, wie die Partikelgröße, diskutiert. Anthropogene Komponenten von Umweltstäuben stammen vor allem aus Verbrennungsprozessen und enthalten aufgrund der Abluftreinigung feine (<1µm) und ultrafeine Partikel (UFP, <0,1µm) mit nur geringer Masse, jedoch hoher Partikelanzahl und dementsprechend großer Oberfläche. Diese kleinen Partikel gelangen bis in periphere Bereiche der Lunge. Sie können entweder selbst biologische Reaktionen auslösen oder als Vehikel für andere toxische Komponenten fungieren. In epidemiologischen Studien im Raum Erfurt (Wichmann et al., 2000) konnte erstmals eine statistische Korrelation zwischen Mortalität und UFP-Konzentration beobachtet werden.

Tab. 3: Vergleich einiger epidemiologischer Studien zum relativen Risiko (RR) der Gesamtmortalität bei einem Anstieg der PM₁₀-Konzentration um 100 µg/m³. (Quelle: Thurston, 1996)

Untersuchtes Gebiet (Referenz)	Mittelwert PM ₁₀ (µg/m ³)	Maximum PM ₁₀ (µg/m ³)	100 µg/m ³ RR	100 µg/m ³ (95%CI)
Utah Valley, UT (Pope et al., 1992)	47	297	1.16*	(1.10-1.22)
St. Louis, MO (Dockery et al., 1992)	28	97	1.16*	(1.01-1.33)
Kingston, TN (Dockery et al., 1992)	30	67	1.17*	(0.88-1.57)
Birmingham, AL (Schwartz, 1993)	48	163	1.11*	(1.02-1.20)
Athens, Greece (Touloumi et al., 1994)	78	306	1.07*	(1.05-1.09)
Toronto, Canada (Özkaynak et al., 1994)	40	96	1.07*	(1.00-1.06)
Los Angeles, CA (Kinney et al., 1995)	58	177	1.05**	(1.03-1.07)
Chicago, IL (Ito, et al., 1995)	38	128	1.05**	(1.00-1.11)
Santiago, Chile (Ostro et al., 1995)	115	367	1.04**	(0.98-1.09)
			1.05**	(1.01-1.10)
			1.08*	(1.06-1.12)
			1.15*	(1.08-1.22)

* Einzel-Schadstoff-Modell (z.B. PM₁₀).

** Multiples Schadstoff-Modell (z.B. PM₁₀ und andere Schadstoffe gleichzeitig).

Anwendung des Tagesmittelwerts der PM₁₀ Konzentration.

Anwendung der über mehrere Tage gemittelten PM₁₀ Konzentration.

Von der Partikelgröße hängt ab, welche Teilchen eingeatmet werden und wo die Ablagerung im Atemtrakt erfolgt. Aus den hierfür vorliegenden experimentellen Daten (Abb. 9) wurden für die wirkungsbezogene Messung von Staub Konventionen in der DIN ISO 7708 festgelegt. Die gesamte einatembare Fraktion wird durch PM₁₀ und die bis in die Alveolen vordringende

Fraktion durch $PM_{2,5}$ ($<2,5 \mu\text{m}$) annäherungsweise erfasst. In der Europäischen Union gilt gegenwärtig eine Richtlinie für die Luftqualität für PM_{10} von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Jahresmittelwert). Die amerikanische Umweltbehörde Environmental Protection Agency (EPA) hat kürzlich auch einen neuen Richtwert für $PM_{2,5}$ mit $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eingeführt.

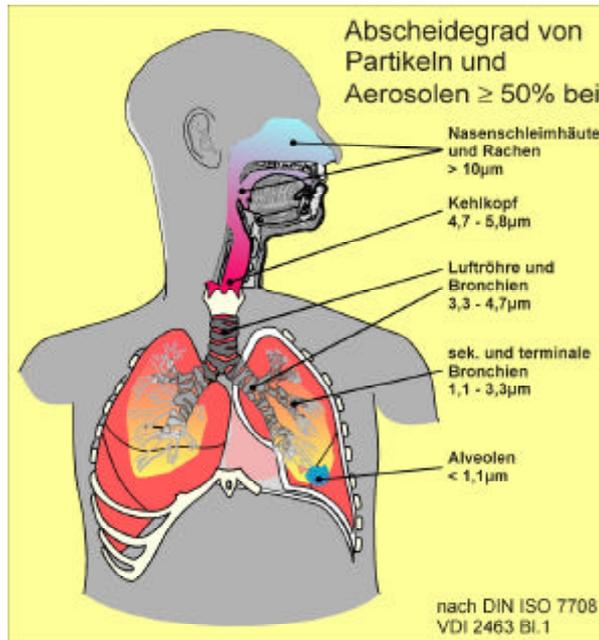


Abb. 9: Mittlere Wahrscheinlichkeit für Schwebstaub, in bestimmte Bereiche des Atemtraktes vordringen zu können (Abscheidegrad) (nach DIN ISO 7708).

1. Mechanismus der Lungenschädigung durch inhalierte Partikel

In unserem Atmungssystem sorgen verschiedene Schutzmechanismen dafür, dass eingeatmete Krankheitserreger und Fremdstoffe keinen Schaden anrichten. Neben der mechanischen Ausschleusung (Husten, Niesen) spielen unspezifische und spezifische Immunabwehrprozesse sowie Entgiftungsmechanismen eine wichtige Rolle. Zur Bekämpfung von Bakterien und Viren oder zur Beseitigung nicht-infektiöser Partikel wird lokal eine Entzündungsreaktion durch die vor Ort anwesenden Immunzellen, in Lungenbläschen sind das Alveolarmakrophagen, ausgelöst (Abb. 10). Dabei werden neben reaktiven Sauerstoffspezies (ROS, reactive oxygen species) auch Proteine und Lipide freigesetzt, die als chemische Botenstoffe (Mediatoren) auf andere Zelltypen wirken, z.B. die Epithelzellen, welche die Lungenbläschen auskleiden, oder die Endothelzellen, welche die in unmittelbarer Nachbarschaft liegenden Blutgefäße auskleiden. Der einsetzende Vernichtungsprozess von Fremdmaterial zerstört auch gesundes Gewebe, das durch anti-inflammatorische Prozesse wieder repariert werden muss. Die Feinregulation (Homöostase) dieses Netzwerks von Mediatoren sorgt dafür, dass der Schaden für die Lunge oder den Organismus begrenzt wird. Eine Unter- oder

Überregulierung bestimmter Mediatoren würde zu größeren Schäden und damit zur Verschlimmerung von Erkrankungen führen.

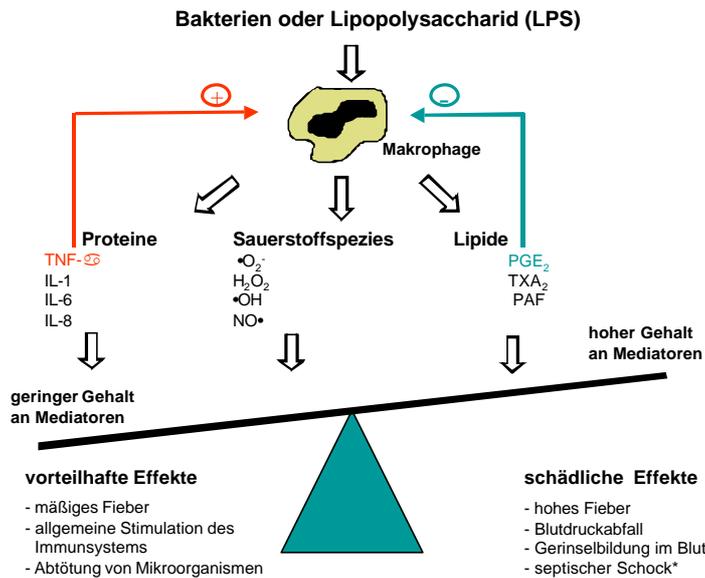


Abb. 10: LPS (Lipopolysaccharid) oder bestimmte Bakterien regen Makrophagen zur Produktion und Freisetzung von Vermittlermolekülen in Form von Proteinen (Tumor-Nekrose-Faktor- α , Interleukin-1, -6, -8), reaktiven Sauerstoffspezies (Sauerstoffanionradikal, Wasserstoffperoxid, Hydroxyradikal, Stickstoffmonoxid) und Lipiden (Prostaglandin E_2 , Thromboxan A_2 , Plättchen-aktivierender Faktor) an. Diese sogenannten Mediatoren sind sehr empfindlich aufeinander abgestimmt und können verschiedene vorteilhafte oder schädliche Effekte auslösen. Die freigesetzten Stoffe wirken teilweise auf die Makrophagen zurück. TNF erhöht die Produktion von Mediatoren (roter Pfeil) und PGE_2 hemmt sie (grüner Pfeil).

Die inflammatorische Antwort nach Inhalation von feinen und ultrafeinen Partikeln wurde an Menschen (Salvi et al., 1999, 2000) und Tieren (Review: Oberdörster, 2001) eingehend untersucht. Die mit der Einwanderung von Entzündungszellen verbundene Freisetzung von ROS und von lysosomalen Enzymen schädigte das Lungenepithel, so dass die Fähigkeit zur Abwehr von Krankheitserregern beeinträchtigt wurde. Der Metallanteil im Umweltaerosol scheint bei der Auslösung von PM-induzierten Effekten eine wichtige Rolle zu spielen, wie in einer Studie, die experimentelle und epidemiologische Versuchsansätze kombinierte, gezeigt wurde (Ghio et al., 2000). Partikel, die im Utah-Valley, USA, zu verschiedenen Zeiten gesammelt wurden, wurden resuspendiert und in den Atemtrakt von gesunden Menschen instilliert. Partikel, die während der Betriebsphase eines lokalen Stahlwerks gesammelt wurden und einen hohen Metallgehalt (v.a. Fe, Cu, Zn, Pb, Ni) aufwiesen, induzierten eine stärkere inflammatorische Antwort als Partikel, die während der Stilllegungsphase des Stahlwerks gesammelt wurden und weniger Metalle enthielten.

Als Ursache für die zytotoxische Wirkung von Partikeln werden auch Oberflächeneigenschaften und das elektrokinetische Potential von Partikeln diskutiert (Devlin et al., 2000). So findet man auf der Oberfläche von Quarzpartikeln reaktive Siloxanbrücken (Si-O-Si) und Silanole (SiOH). Im wässrigen Milieu adsorbieren die Partikel über negative Ladungen ihrer Oberfläche an Oberflächenproteine von Zellen. Dadurch kommt es zur Zerstörung von Wasserstoffbrückenbindungen, die Proteinkonformation wird irreversibel verändert und es kommt zur Lyse der Membran. Durch Coating von Partikeln mit positiv geladenen organischen Molekülen wie Dipalmitoyllecithin, Proteinen, Immunglobulinen oder Surfactant konnte die negative Oberflächenladung *in vitro* und damit auch die zytotoxische Wirkung reduziert werden. Quarzpartikel, die mit Aluminiumlaktat behandelt und in Rattenlungen instilliert wurden, waren im Vergleich zu unbehandelten Quarzpartikeln deutlich weniger zytotoxisch (Duffin et al., 2001).

2. Arbeiten am Institut für Toxikologie und Genetik

Im Institut für Toxikologie und Genetik soll am Beispiel eines umweltrelevanten Aerosols mit lungenspezifischen *in vitro* Tests herausgefunden werden, welche chemischen Bestandteile und welche Partikelgrößenfraktionen zur toxischen Wirkung beitragen. Als Beispiel für Umweltpartikel wurde Flugstaub aus einer industriellen Hausmüllverbrennungsanlage ausgewählt, weil der Verbrennungsprozess, ähnlich wie bei der Kohleverbrennung, gut untersucht ist und weil dieses Thema eines der Arbeitsschwerpunkte des Forschungszentrums darstellt (Paur et al., 2000).

Im Allgemeinen werden für Toxizitätsstudien Zellkulturen aus der Lunge submers in flüssigen Kulturmedien mit den zu untersuchenden Partikeln behandelt. Die Dosis bezieht sich dabei auf ihre Konzentration im Medium. Zur Untersuchung von Partikeln ist dieser Versuchsansatz jedoch nur bedingt geeignet, da die physiko-chemischen Eigenschaften der Partikel und die Zelloberflächen in der flüssigen Phase andere Eigenschaften als in der Gasphase aufweisen. Ein realitätsnahes Modell für die *in vivo* Situation in der Lunge ist die Exposition von Zellen an der Luft/Flüssigkeits-Grenzschicht, die allerdings technisch sehr aufwendig ist und daher nur selten eingesetzt wird. Es muss einerseits ein definiertes Aerosol erzeugt werden, das in einer geeigneten Weise über Testzellen geleitet wird und andererseits müssen die Zellkulturen durch geeignete Trägersysteme über den Testzeitraum funktionell lebensfähig erhalten werden. Hier wurden die Zellen auf einer porösen Membran ausgesät (Abb. 11), die es den Zellen erlaubt, sich während der Luftexposition durch die Poren mit Flüssigkeit und Nährstoffen zu versorgen. Bei dieser Methode ist die Erarbeitung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen meist schwierig, da die quantitative Bestimmung der Ablagerung von Partikeln aus der Gasphase auf die Zellen nur berechnet oder geschätzt werden kann.

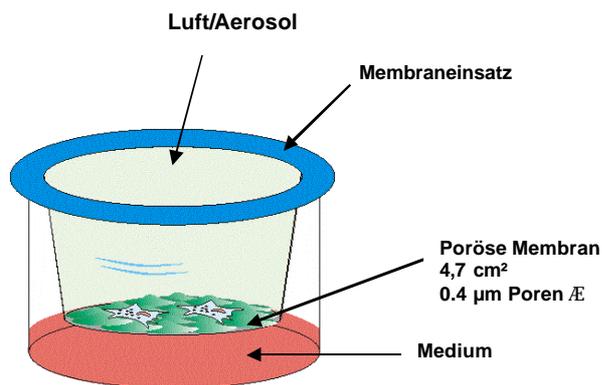


Abb. 11: Transwell®-Membransystem zur Exposition von Zellen an der Luft/Flüssigkeits-Grenze. Der Einsatz trennt das System durch die Membran in ein unteres und oberes Kompartiment auf, die nur durch die Poren in der Membran ($\varnothing = 400$ nm) verbunden sind. Die Poren sind groß genug, um Partikel, nicht aber Zellen einen Übergang zwischen den Kompartimenten zu ermöglichen.

Nach der Exposition werden die Zellen auf ihre Vitalität und das Kulturmedium auf den Gehalt an freigesetzten Substanzen untersucht, die charakteristisch für entzündliche Veränderungen sind. Bisher konnten wir zeigen, dass das Verfahren zur Resuspension von Flugasche in Luft und die Exposition von Lungenzellen über die Atmosphäre prinzipiell funktionieren. Nach Behandlung von Lungenzellen menschlichen Ursprungs als auch Zellen aus der Ratte mit Partikelsuspensionen in der Submerskultur konnten wir zeigen, dass ultrafeine synthetische Modellpartikel (Abb. 12 + 13) und Flugaschepartikel (Abb. 14) bereits bei nicht zytotoxischen Konzentrationen verschiedene Parameter einer entzündlichen Reaktion, z.B. Zytokinbildung, in Lungenzellen induzieren oder verstärken (Diabaté et al., 2002). Diese Effekte werden möglicherweise durch die ebenfalls nachgewiesene Bildung von reaktiven Sauerstoffspezies ausgelöst, da bekannt ist, dass ROS mit verschiedenen Signaltransduktionswegen interagieren, die zur Expression von Zytokinen führen.

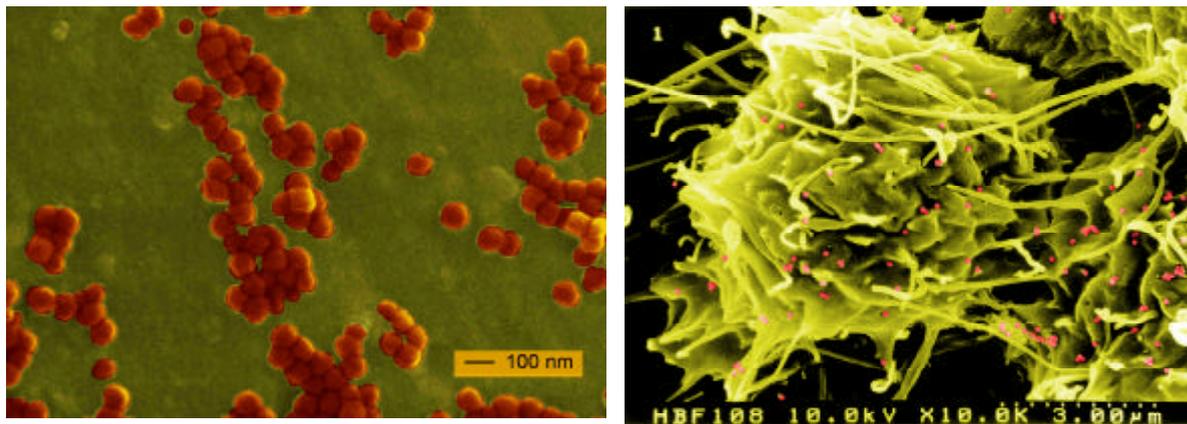


Abb. 12: Rasterelektronenmikroskopische Darstellung von ultrafeinen Partikeln. Links: Darstellung von ultrafeinen Hämatitpartikeln (Fe_2O_3 , mittlerer Durchmesser 70 nm), die von W. Ferstl (ITC-WGT) synthetisiert wurden (Aufnahme von B. Neufang, HVT-HZ). Rechts: REM-Aufnahme (H. Zöltzer, Uni Kassel, Humanbiologie) eines Makrophagen der Maus-Zelllinie RAW 264.7 (gelb), der Hämatitpartikel phagozytiert (rot).

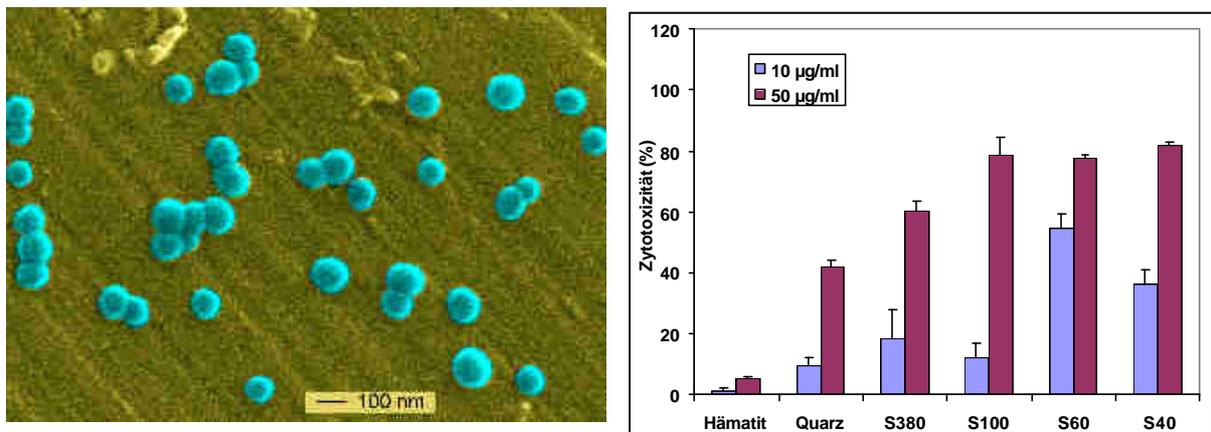


Abb. 13: Ultrafeine Partikel und ihre zytotoxische Wirkung. Links: Darstellung ultrafeiner Silicasol-Partikel mit einem mittleren Durchmesser von 60 nm im Rasterelektronenmikroskop (B. Neufang, HVT-HZ). Rechts: Messung der Zytotoxizität von Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, ~ 70 nm) und Silicasol (amorphes SiO_2 : 380, 100, 60 und 40 nm im Durchmesser) (beide synthetisch hergestellt von W. Ferstl, ITC-WGT) sowie Quarzstaub (< 5 µm) in Maus-Makrophagen (RAW 234.7). Die kleineren Silicasolpartikel sind toxischer als die großen. Hämatit im gleichen Größenbereich ist dagegen praktisch untoxisch.

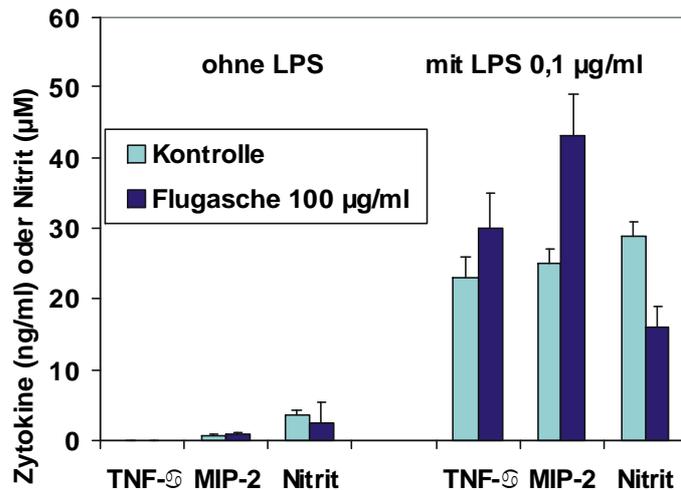


Abb. 14: LPS-stimulierte Alveolar-makrophagen der Ratte (NR8383) reagieren auf die subtoxische Flugaschekonzentration von 100 µg/ml mit verstärkter Freisetzung von TNF und MIP-2 sowie mit verringerter Bildung von NO, gemessen als Nitrit. In unstimulierten Zellen werden diese immunologischen Parameter nicht durch Flugasche beeinflusst (Diabaté et al., 2002).

Aus den Ergebnissen der beschriebenen Untersuchungen sollen Informationen zur Verfügung gestellt werden, mit denen die Gesundheitseffekte durch partikuläre Luftverschmutzungen aus einzelnen Quellen beurteilt werden können, um dann gezielte technische Maßnahmen zur Emissionsminderung vorzunehmen. Genauso wichtig ist die Einschätzung der Partikelemissionen, die bei der Anwendung von neuen Technologien oder beim Einsatz von neuen Brennstoffen entstehen können, damit die Entwicklungen so frühzeitig wie möglich in die richtige Richtung gelenkt oder Entscheidungen über eine ausgedehntere Anwendung getroffen werden können.

Literatur

Devlin, R.B., Ghio, A.J. & Costa, D.L. Responses of inflammatory cells. In: Particle-lung interaction. (eds. Gehr, P. & Heyder, J.), Vol. 143, 473-489, New York: Marcel Dekker (2000).

Diabaté, S., Mülhopt, S., Paur, H.-R., W. & Krug, H.F., Pro-inflammatory effects in lung cells after exposure to fly ash aerosol via the atmosphere or the liquid phase. *Ann. Occup. Hyg.* 46, 382-385 (2002).

DIN ISO 7708: Luftbeschaffenheit – Festlegung von Partikelgrößenverteilungen für die gesundheitsbezogene Schwebstaubprobenahme (Januar 1996)

Duffin, R., Gilmour, P.S., Schins, R.P.F., Clouter, A., Guy, K., Brown, D.M., MacNee, W., Borm, P.J., Donaldson, K., & Stone, V. Aluminium lactate treatment of DQ12 quartz inhibits its ability to cause inflammation, chemokine expression, and nuclear factor- κ B activation. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 176, 10-17 (2001).

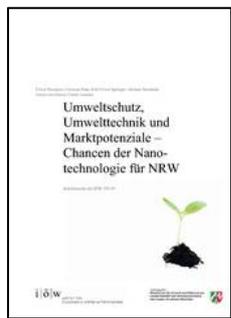
http://www.doc.mmu.ac.uk/aric/eae/Air_Quality/Older/Great_London_Smog.html

- Ghio, A.J., Kim, C. & Devlin, R.B. Concentrated ambient air particles induce mild pulmonary inflammation in healthy human volunteers. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 162, 981-988 (2000).
- Oberdörster, G. Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 47, 1-8 (2001).
- Paur, H.R., Baumann, W., Becker, B., Mätzing, H. & Seifert, H. Technische Maßnahmen zur Minderung von Verbrennungsaerosolen. *Nachrichten* 32, Heft 3 (2000).
- Salvi, S., Blomberg, A., Rudell, B., Kelly, F., Sandström, T., Holgate, S.T. & Frew, A. Acute inflammatory responses in the airways and peripheral blood after short-term exposure to diesel exhaust in healthy human volunteers. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 159, 702-709 (1999).
- Salvi, S., Nordenhall, C., Blomberg, A., Rudell, B., Pourazar, J., Kelly, F.J., Wilson, S., Sandström, T., Holgate, S.T. & Frew, A.J. Acute exposure to diesel exhaust increases IL-8 and GRO- α production in healthy human airways. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 161, 550-557 (2000).
- Schwartz, J. Air pollution and daily mortality: a review and meta-analysis. *Environ. Res.* 64, 36-52 (1994)
- Thurston, G.D., A Critical Review of PM10-Mortality Time-Series Studies. *J. Expos. Analysis Environ. Epidemiol.* 6, 3-21 (1996).
- Wichmann, H.E., Spix, C., Tuch, T., Wölke, G., Peters, A., Heinrich, J., Kreyling, W.G. & Heyder, J. Daily mortality and fine and ultrafine particles in Erfurt, Germany. Part I: Role of particle number and particle mass. Health Effects Institute, Cambridge, USA, Report 98, 2000.

Publikationen des Instituts für ökologische Wirtschaftsforschung

Das IÖW veröffentlicht die Ergebnisse seiner Forschungstätigkeit in einer Schriftenreihe, in Diskussionspapieren sowie in Broschüren und Büchern. Des Weiteren ist das IÖW Mitherausgeber der Fachzeitschrift „Ökologisches Wirtschaften“, die allvierteljährlich im oekom-Verlag erscheint, und veröffentlicht den IÖW-Newsletter, der regelmäßig per Email über Neuigkeiten aus dem Institut informiert.

Schriftenreihe/Diskussionspapiere



Seit 1985, als das IÖW mit seiner ersten Schriftenreihe „Auswege aus dem industriellen Wachstumsdilemma“ suchte, veröffentlicht das Institut im Eigenverlag seine Forschungstätigkeit in Schriftenreihen. Sie sind direkt beim IÖW zu bestellen und auch online als PDF-Dateien verfügbar. Neben den Schriftenreihen veröffentlicht das IÖW seine Forschungsergebnisse in Diskussionspapieren – 1990 wurde im ersten Papier „Die volkswirtschaftliche Theorie der Firma“ diskutiert. Auch die Diskussionspapiere können direkt über das IÖW bezogen werden. Informationen unter www.ioew.de/schriftenreihe_diskussionspapiere.

Fachzeitschrift „Ökologisches Wirtschaften“



Ausgabe 2/2010

Das IÖW gibt gemeinsam mit der Vereinigung für ökologische Wirtschaftsforschung (VÖW) das Journal „Ökologisches Wirtschaften“ heraus, das in vier Ausgaben pro Jahr im oekom-Verlag erscheint. Das interdisziplinäre Magazin stellt neue Forschungsansätze in Beziehung zu praktischen Erfahrungen aus Politik und Wirtschaft. Im Spannungsfeld von Ökonomie, Ökologie und Gesellschaft stellt die Zeitschrift neue Ideen für ein zukunftsfähiges, nachhaltiges Wirtschaften vor. Zusätzlich bietet „Ökologisches Wirtschaften online“ als Open Access Portal Zugang zu allen Fachartikeln seit der Gründung der Zeitschrift 1986. In diesem reichen Wissensfundus können Sie über 1.000 Artikeln durchsuchen und herunterladen. Die Ausgaben der letzten zwei Jahre stehen exklusiv für Abonnent/innen zur Verfügung. Abonnement unter: www.oekom.de.

IÖW-Newsletter

Der IÖW-Newsletter informiert rund vier Mal im Jahr über Neuigkeiten aus dem Institut. Stets über Projektergebnisse und Veröffentlichungen informiert sowie die aktuellen Termine im Blick – Abonnement des Newsletters unter www.ioew.de/service/newsletter.

Weitere Informationen erhalten Sie unter www.ioew.de oder Sie kontaktieren die

IÖW-Geschäftsstelle Berlin
Potsdamer Straße 105
10785 Berlin
Telefon: +49 30-884 594-0
Fax: +49 30-882 54 39
Email: [vertrieb\(at\)ioew.de](mailto:vertrieb(at)ioew.de)



| i | ö | w

INSTITUT FÜR
ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

GESCHÄFTSTELLE BERLIN

MAIN OFFICE

Potsdamer Straße 105

10785 Berlin

Telefon: + 49 – 30 – 884 594-0

Fax: + 49 – 30 – 882 54 39

BÜRO HEIDELBERG

HEIDELBERG OFFICE

Bergstraße 7

69120 Heidelberg

Telefon: + 49 – 6221 – 649 16-0

Fax: + 49 – 6221 – 270 60

mailbox@ioew.de

www.ioew.de