Michael Steinfeldt,
Arnim von Gleich, Ulrich Petschow,
Rüdiger Haum, Thomas Chudoba,
Stephan Haubold

Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte

Schriftenreihe des IÖW 177/04

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Institut für
ökologische
Wirtschaftsforschung
gGmbH

Michael Steinfeldt, Arnim von Gleich, Ulrich Petschow, Rüdiger Haum, Thomas Chudoba, Stephan Haubold

Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte

Schriftenreihe des IÖW 177/04

Berlin, November 2004, ISBN 3-932092-78-3

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die vorliegende Studie wurde im Rahmen der Innovations- und Technikanalyse zur Nanotechnologie vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert (Förderkennzeichen: 16I1504)

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) gGmbH

Potsdamer Straße 105
D-10785 Berlin
www.ioew.de

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

Zusammenfassung

Diese Schriftenreihe stellt die Ergebnisse des vom BMBF geförderten Projekts „Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte“ dar und formuliert dar über hinaus Handlungsbedarfe für die weitere Nanotechnologieentwicklung. Im Projekt wird hierzu ein dreistufiger Ansatz zur prospektiven Technologiebewertung und -gestaltung von Nanotechnologie verfolgt.

Der prospektiv orientierte Ansatz fokussiert auf die Bewertung der Nanotechnologie und ihrer Wirkungen durch eine ‚Charakterisierung der Technologie’. Im prozessbegleitenden Bewertungsansatz werden Nachhaltigkeitseffekte in Anlehnung an ökobilanziellen Methoden an konkreten Anwendungsbeispielen im Vergleich zu bestehenden Produkten und Verfahren vertiefend untersucht. Vier Fallstudien stellen mögliche Ökoeffizienzpotenziale durch Nanotechnologien dar; eine Fallstudie beschäftigt sich stellvertretend mit den Risikopotenzialen nanotechnologischer Anwendungen. Außerdem werden in einem dritten Schwerpunkt gestaltende Ansätze für eine nachhaltige Nanotechnologie bspw. durch Leitbilder formuliert.

Abstract

This paper illustrates the results of 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. Furthermore it formulates calls for action for the further development of nanotechnology. The result of our research will be presented on the basis of a three-tier approach for the prospective evaluation and designs of nanotechnology.

The prospect oriented approach has its focus on the evaluation of nanotechnology and its effects via a characterisation of the technology as a generalising approach to technology assessment. In additional to that, the process evaluation approach tries to identify sustainability effects with tangible examples. It compares new with existing products and has its focus on ecological risks and benefits. Four case studies show possible ecological efficiency potentials, one case study deals representatively with the risk potentials of nanotechnological applications. Moreover formative approaches for a sustainable nanotechnology are formulated in a third focal point through mission statements.

Die Autoren

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

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

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

M.Sc. Rüdiger Haum ist Medien- und Politwissenschaftler und seit 2003 wissenschaftlicher Mitarbeiter im IÖW im Forschungsfeld „Umweltökonomie und –politik“.

Dr. Thomas Chudoba ist Geschäftsführer der Firma ASMEC GmbH in Radeberg.

Dr. Stephan Haubold ist Geschäftsführer der Firma Nanosolutions GmbH in Hamburg.

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

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung 1

2 Einleitung 13

3 Methodische Ansätze zur prospektiven Technologiebewertung und – gestaltung 15

3.1 Charakterisierung von Technologien 15

3.1.1 Der Umgang mit Nichtwissen 15

3.1.2 Die ‚Charakterisierung von Technologien' als Ansatz der prospektiven Technikbewertung 20

3.2 Ökologische Profilbetrachtungen als prozessbegleitender Bewertungsansatz von konkreten Anwendungsbeispielen 23

3.3 Ansätze zur Technologiegestaltung 27

4 Technologiespezifische Wirkungen der Nanotechnologie 33

4.1 Charakterisierung der Nanotechnologie 33

4.2 Beschreibung und Bewertung von nanotechnologischen Herstellungsverfahren 38

4.2.1 Gasphasenabscheidung (CVD, PVD) 38

4.2.2 Flammenverfahren (Flame-Assisted Deposition) 40

4.2.3 Sol-Gel-Verfahren 41

4.2.4 Fällung 42

4.2.5 Molekulares Prägen 42

4.2.6 Lithographie 43

4.2.7 Selbstorganisation 44

4.2.8 Qualitative Bewertung von nanotechnologischen Herstellungsverfahren 46

4.3 Exkurs: Nanovisionen und deren Risikobewertung 51

5 Bewertung von Nachhaltigkeitseffekten an konkreten Anwendungskontexten 55

5.1 Auswahl der vertiefenden Fallstudien 55

5.2 Fallstudie 1: Ökoeffiziente Nanolacke 57

5.2.1 Inhalt, Ziel und Methode der Fallstudie 57

5.2.2 Eingrenzung des Untersuchungsbereichs 57

5.2.3 Sachbilanz 72

5.2.4 Wirkungsabschätzung 76
5.2.5 Zusammenfassung 80
5.3 Fallstudie 2: Nanotechnologische Prozessinnovation der Styrolsynthese 81
5.3.1 Inhalt, Ziel und Methode der Fallstudie 81
5.3.2 Eingrenzung des Untersuchungsbereiches 81
5.3.3 Untersuchungsrahmen und Datenverfügbarkeit 86
5.3.4 Sachbilanz 93
5.3.5 Wirkungsabschätzung 97
5.3.6 Zusammenfassung 98
5.4 Fallstudie 3: Nanoinnovationen im Displaybereich 99
5.4.1 Inhalt, Ziel und Methode der Fallstudie 99
5.4.2 Eingrenzung des Untersuchungsbereiches 99
5.4.3 Sachbilanz 120
5.4.4 Wirkungsabschätzung 124
5.4.5 Zusammenfassung 124
5.5 Fallstudie 4: Nanoanwendungen im Lichtbereich 125
5.5.1 Inhalt, Ziel und Methode der Fallstudie 125
5.5.2 Eingrenzung des Untersuchungsbereiches 125
5.5.3 Sachbilanz 138
5.5.4 Wirkungsabschätzung 144
5.5.5 Lichtquellen mit Quantenpunkttechnologien 144
5.5.6 Zusammenfassung 147
5.6 Fallstudie 5: Risikopotenziale nanotechnologischer Anwendungen 149
5.6.1 Mögliche Gefahren durch Nanotechnologie 149
5.6.2 Nanoskaliges Titandioxid in Sonnencreme 158
5.6.3 Lebenszyklusanalyse von Nanomaterialien 161
5.6.4 Diskussion 162
6 Gestaltende Ansätze für eine nachhaltige Nanotechnologie 165
6.1 Akteursübergreifende Gestaltungsansätze 168
6.1.1 Leitbilder einer nachhaltigen Nanotechnologie mit unterschiedlichen Reichweiten 169
6.1.2 Road maps als Informations- und Kommunikationskonzept für den Gestaltungsprozess 176

6.1.3 Constructive Technology Assessment bzw. real-time Technology Assessment... als Informations- und Kommunikationskonzepte für Gestaltungsprozesse 176

6.2 Akteursspezifische Gestaltungsansätze 179

6.2.1 Akteur Unternehmen: Integration von Sicherheits-, Gesundheits- und ..... Umweltschutzaspekten in das Wertschöpfungsketten übergreifende..... Qualitätsmanagement 179

6.2.2 Akteur Unternehmen: Nachhaltiges Nanodesign in Forschung und ..... Entwicklung 180

6.2.3 Akteur Staat: Staatliche Regulierungsansätze 181

7 Fazit, Ausblick und Handlungsbedarfe 185

8 Abbildungsverzeichnis 191

9 Tabellenverzeichnis 194

10 Anhang 197

11 Literatur 236

1 Zusammenfassung

Das im Rahmen der vom BMBF geförderten „Innovations- und Technikanalyse zur Nanotechnologie“ durchgeführte Projekt „Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte“ griff den aktuellen Stand der Stoff- und Technikbewertung auf und versuchte, ihn in Richtung einer integrierten Nachhaltigkeitsbewertung weiter zu entwickeln. Der Fokus war auf die ökologischen Chancen und Risiken der sich entwickelnden Nanotechnologie gerichtet. Dem Projekt stellten sich zwei zentrale Fragen

1. Wie kann es gelingen, die erwartbaren Wirkungen einer erst im Entstehen begriffenen Technologie abzuschätzen und

2. Wie kann erfolgreich auf die nachhaltigkeitsorientierte Gestaltung der Nanotechnologie Einfluss genommen werden?

Um der Komplexität der Aufgabenstellung des Projektes gerecht zu werden, wurde im Projekt folgender dreistufiger Ansatz zur prospektiven Technologiebewertung und -gestaltung von Nanotechnologie verfolgt.

1. Ansatz – prospektiv
Bewertung der Nanotechnologie und ihrer Wirkungen durch eine Charakterisierung der Technologie

2. Ansatz – prozessbegleitend
Bewertung von Nachhaltigkeitseffekten in Anlehnung an ökobilanziellen Methoden an konkreten Anwendungsbeispielen im Vergleich zu bestehenden Produkten und Verfahren

3. Ansatz – gestaltend
Leitbilder als Steuerungs‘instrumente‘ in der Technikgestaltung, Begleitprozesse, akteurs-spezifische Konzepte

Charakterisierung der Nanotechnologie

Jede Form der Technikfolgenabschätzung hat mit dem Prognoseproblem, mit dem Umgang mit Nichtwissen (Noch-Nicht-Wissen bzw. Nicht-Wissbarkeit) und Unsicherheit zu kämpfen. Der prospektiv orientierte Ansatz fokussiert auf die Bewertung der Nanotechnologie und ihrer Wirkungen durch eine ‚Charakterisierung der Technologie‘ (ausführlich hierzu Gleich 2004). Die Nichtwissensproblematik bei neuen Technologieentwicklungen bewusst und konsequent reflektierend, ermöglicht die Technologiecharakterisierung, mögliche Gefährdungspotenziale und positive Effekte „abzuleiten“ und aufzuzeigen.

Die Nanotechnologie ist in erster Linie durch die Dimension charakterisiert, in der sie sich bewegt: In der Nanowelt bewegen wir uns auf der Ebene einzelner Moleküle und Atome in der Größe eines Millionstel Millimeters. Das besondere an dieser Dimension ist nun, dass Nanopartikel sich meist völlig anders verhalten als ihre grobkörnigeren Pendants. So führt bspw. die große spezifische Oberfläche von Nanopartikeln in der Regel zu einer Steigerung der chemischen Reaktivität bzw. der katalytischen Aktivität. Die relativ geringe Anzahl von Atomen in Nanopartikeln führt andererseits zu abweichenden optischen, elektrischen und magnetischen

Eigenschaften. Ausgehend von diesen Grundcharakteristika der Nanotechnologie können mögliche positive Effekte und Potenziale bzw. mögliche und erwartbare problematische Wirkungen ‚abgeleitet' werden (vgl. Tabelle).

Tabelle 1: Nanoqualitäten und dadurch erwartbare positive ökologische Effekte und Potenziale bzw. problematische Wirkungen

Nanoqualität		+ Positive ökologische Effekte und Potenziale / - Probleme und Gefährdungspotenziale	Bewertungsansätze
Kleinheit und Mobilität der Partikel	+	Gezielte Nutzung für ressourcen- / ökoeffiziente Technik	Ökobilanz, Ausbreitungs- und Expositionsmodelle, (öko-)toxikologische Prüfung, Tierversuche, Epidemiologie
	-	Lungen- bzw. alveolengängig Durchgang durch Zellmembranen, Blut-Hirn-Schranke Mobilität, Persistenz und Löslichkeit als Indizien für Bioakkumulation und Umweltgefährdung	
Definiertheit, Korn-/ Schichtgrößen, Reinheit	+	Gezielte Nutzung für ressourcen- / ökoeffiziente Technik	Ökobilanz, Entropiebilanz, Frage nach ‚ökologischer Amortisierung'
	-	Erhöhter Herstellungsaufwand, höhere Stoff- und Energieströme, erhöhter Ressourcenverbrauch	
Stoffqualität	+	Möglicher Ersatz gesundheits- und umweltgefährdender Stoffe	Toxikologie, Ökotoxikologie, Verhältnis zwischen ‚natürlichen' und ‚anthropogenen' Stoffumsätzen
	-	Gesundheits- und Umweltgefährdung durch problematische (seltene) Elemente oder Stoffgruppen im umweltoffenen Einsatz	
Adhäsion, Kohäsion, Agglomeration	+	‚Eigensicherheit' durch Tendenz zur Adhäsion, Kohäsion und Agglomeration von Nanopartikeln	Ausbreitungs- und Expositionsmodelle, (öko-)toxikologische Prüfung, Tierversuche, Epidemiologie, Atmosphärenchemie, Risikoanalyse
	-	Verhalten ‚freigesetzter' Nanopartikel oder Nano-Fasern in der Umwelt, Mobilisierende und einschleusende Wirkung von Nanopartikeln auf Toxine oder Schwermetalle (Huckepack)	
Neue chemische Effekte, verändertes Verhalten	+	Nutzung des veränderten Verhaltens für ressourcen- / ökoeffiziente Technik, z.B. Nutzung der katalytischen Wirkungen für effizientere chemische Prozesse oder im Umweltbereich	Ökobilanz, Ausbreitungs- und Expositionsmodelle, (öko-)toxikologische Prüfung, z.B. auch auf Allergie / Sensibilisierung, Tierversuche, Epidemiologie, Atmosphärenchemie, Risikoanalyse
	-	Veränderungen bei: Löslichkeit, Reaktivität, Selektivität, katalytische Wirkung, photokatalytische Wirkung, Temperaturabhängigkeit von Phasenübergängen lassen überraschende technische, chemische toxische und ökotoxische Effekte erwarten	

Neue physikalische Effekte, verändertes optisches, elektrisches, magnetisches Verhalten	+	Gezielte Nutzung der Effekte bzw. der veränderten Eigenschaften für ressourcen- / ökoeffiziente Technik, z.B. GMR-Effekt, Tyndell-Effekt, Quanten-Effekte, Tunneleffekt	Ökobilanz, Für technische Systeme: FMEA, Fehlerbaumanalyse
	-	Meist auf hochreine und hochdefinierte ‚technische Umgebungen' angewiesen. Dort sind (bei Nichteinhaltung) Überraschungen erwartbar (technisches Versagen)	
Selbstorganisation	+	Gezielte Nutzung für ressourcen- / ökoeffiziente und konsistente Technik	Risikoanalyse, Eingriffstiefe, Ökobilanz, Umweltverträglichkeits-prüfung, Szenariotechnik
	-	Gefahr unkontrollierter Entwicklungen, selbstreplizierende Nanobots	

Quelle: verändert nach (Gleich 2004) und (Steinfeldt 2003)

Aus dieser Charakterisierungsübersicht wird deutlich, dass sich derzeit viele Gefährdungspotenziale auf Grund der neuen Qualitäten von Nanopartikeln ergeben können, die besonders beim offenen Umgang mit ihnen zum Tragen kommen würden. Dieses Thema, welches auch im aktuellen Diskurs zu Risiken die höchste Priorität besitzt, wurde daher in einer vertiefenden Fallstudie gesondert bearbeitet.

Bei der Bewertung von Risikogesichtspunkten weitergehender tlw. weit in der Zukunft liegender Anwendungsfelder von Selbstorganisation (z.B. Kombination von Nanotechnologie und Biotechnologie, Nanotechnologie und Robotik) erlangt der Aspekt einer möglichen Selbstreproduktion eine viel stärkere Bedeutung. Wobei die Verschmelzung von Nanotechnologie und Bio- bzw. Gentechnologie und eine sich daraus ergebende Möglichkeit zur Selbstreplikation wesentlich wahrscheinlicher sein dürfte, als die entsprechenden Möglichkeiten auf Basis einer Verschmelzung von Nanotechnologie und Robotik. Mit der Fähigkeit zur Selbstreproduktion, wie sie z. B. gentechnisch veränderte Organismen besitzen, dürften auf jeden Fall neuartige Risikodimensionen bezüglich Gesundheits- und Umweltgefährdungen eröffnet werden, während das für reine Selbstorganisationsprinzipien weniger gilt. Solange sich die Nanotechnologie auf den Umgang mit Molekülen beschränkt, dürfte ein solcher Schritt von der Selbstorganisation von Molekülen zur Selbstreproduktion und Vervielfältigung von Organismen (oder Robotern) – wenn er denn nicht bewusst angestrebt wird – eher unwahrscheinlich sein. Auf der Grundlage einer Verschmelzung der Nanotechnologie mit der gentechnologischen Manipulation von zur Selbstreproduktion fähigen Organismen könnte ein solcher Schritt allerdings durchaus realisierbar werden.

Neben dieser Charakterisierung der Nanotechnologie auf Technologieebene wurden in einem nächsten Schritt die bisher relevanten Herstellungsverfahren für Nanopartikel bzw. nanostrukturierte Materialien (Gasphasenabscheidung, Flammenverfahren, Sol-Gel-Verfahren, Fällung, Molekulares Prägen, Lithographie, Selbstorganisation) hinsichtlich ihres technologischen und damit in Verbindung stehenden energetischen Aufwandes sowie hinsichtlich ihrer Risikopotenziale für die Freisetzung von Nanopartikeln qualitativ bewertet.

Gegenüber anderen Verfahren besitzen diejenigen Verfahren ein höheres Potenzial für die Freisetzung von Nanopartikelemissionen, die im gasförmigen Medium ablaufen, bei denen am Arbeitsplatz direkt Emissionen auftreten können und außerdem lose Nanopartikel hergestellt

werden, wie z.B. bei Flammenverfahren. Bei den anderen Verfahren sind die Risikopotenziale unter der Voraussetzung, dass die anfallenden Emissionen durch die entsprechenden Abluft- bzw. Abwasserbehandlungsanlagen behandelt werden können, eher gering zu beurteilen. Außerdem zeichnen sich einige der dargestellten Prozesstechnologien, die z.B. schon als Basistechnologien in der Mikroelektronik und Optoelektronik eingesetzt werden, durch einen immensen technischen und energetischen Aufwand bei eher geringem absolutem Output aus.

Bewertung konkreter Anwendungskontexte - Ökobilanzierung

Aufbauend auf dieser Charakterisierung der Nanotechnologie und ihrer bisherigen Herstellungsverfahren verfolgte der prozessbegleitende Bewertungsansatz die Ermittlung von Nachhaltigkeitseffekten an konkreten Anwendungsbeispielen im Vergleich zu bestehenden Produkten und Verfahren, wobei der Fokus auf die ökologischen Chancen und Risiken gerichtet war.

Als Bewertungsansatz orientierten sich die erstellten ökologischen Profilbetrachtungen an der Methodik der Ökobilanzierung. Die Ökobilanz ist die am weitesten entwickelte und normierte Methode zur Abschätzung der mit dem gesamten Lebenszyklus eines Produkts verbundenen Umweltaspekte bzw. produktspezifischen potenziellen Umweltwirkungen. Ein Vorteil besteht darin, dass durch die Ökobilanz die Analyse von Ökoeffizienzpotenzialen im Vergleich zu bestehenden Anwendungen möglich ist. Auf der anderen Seite besitzt die Ökobilanzmethode Defizite; so existieren nicht für alle Wirkungskategorien bisher allgemein akzeptierte Wirkungsmodelle. Dies muss insbesondere für die relevanten Kategorien Humantoxizität und Ökotoxizität festgestellt werden. So geht die Berücksichtigung der Belastung durch Feinstäube (das PM10-Risiko thematisiert bspw. ein mögliches Toxizitätspotenzial durch Partikel < 10 µm) in Ökobilanzen bei Nanotechnologieanwendungen allein schon durch ihren Bezug auf das Gewicht größenordnungsmäßig am Ziel vorbei. Außerdem werden in Ökobilanzen Risiken sowie die Wirkmächtigkeit von Anwendungen nicht betrachtet. Ein umfassendes Methodenset müsste derartige Analysen mit beinhalten.

Im Projekt wurden diese methodischen Defizite insofern berücksichtigt, als bei der Auswahl der konkreten Anwendungskontexte bewusst Schwerpunkte gesetzt wurden. Aus dem Spektrum an nanotechnologischen Anwendungen wurden einerseits vier Fallbeispiele mit potenziell erwartbaren Ökoeffizienzpotenzialen gezielt auf Grundlage einer Vorabsichtung und qualitativen Bewertung ausgewählt. Dabei mussten die begrenzten Ressourcen der vorliegenden Untersuchung insofern berücksichtigt werden, als nur Beispiele in Frage kamen, bei denen zumindest für die zum Vergleich herangezogenen ‚herkömmlichen' Technologien bzw. Produkte schon ökobilanzielle Daten vorlagen. Die durch die Ökobilanzmethode nicht erfassbaren möglichen Risiko- und Gefährdungspotenziale nanotechnologischer Anwendungen wurden fokussiert am Thema Nanopartikel analysiert und diskutiert.

Tabelle 2: Übersicht der untersuchten Fallstudien

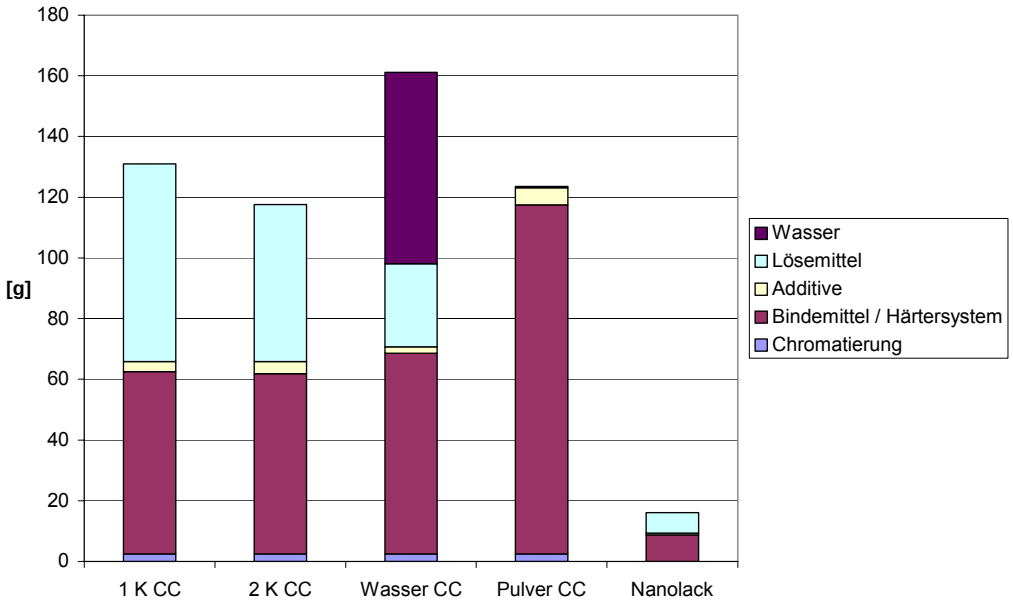
Anwendungskontexte	Zielstellung
Ökoeffiziente Nanolacke	Darstellung des Ökoeffizienzpotenzials von Nanobeschichtungen in Form eines vergleichenden Ökoprofils (Nanolack auf Basis der Sol-Gel-Technologie im Vergleich zu Wasserlack, Lösemittellacken und Pulverlack)
Nanotechnologische Prozessinnovation der Styrolsynthese	Darstellung des Ökoeffizienzpotenzials von Nanotechnologie in einer katalytischen Anwendung in Form eines vergleichenden Ökoprofils (Nanotube-Katalysator im Vergleich zu Katalysator auf Eisenoxidbasis)
Nanoinnovationen im Displaybereich	Abschätzung möglicher Ökoeffizienzpotenziale der Display-innovationen durch einen qualitativen Vergleich (Organic Light Emitter Display und Nanoröhren-Feldemitterdisplays im Vergleich zu Kathodenstrahlröhre, Flüssigkristallbildschirm und Plasmabildschirm)
Nanoanwendungen im Lichtbereich	Darstellung des Ökoeffizienzpotenzials von Nanoanwendungen im Lichtbereich in Form eines vergleichenden Ökoprofils (Weiße LED und Quanten Dots im Vergleich zu Glühlampe und Kompaktleuchtstofflampe)
Risikopotenziale nanotechnologischer Anwendungen	Exemplarische Diskussion möglicher Risiko- und Gefährdungspotenziale unter anderem am Beispiel Titandioxid, weniger Betrachtung der Umweltauswirkungen

Im Ergebnis der ökobilanziellen Vergleiche ist festzuhalten, dass nanotechnologische Anwendungen nicht per se mit hohen ökologischen Entlastungspotenzialen verbunden sind. Gleichwohl konnten für die Mehrzahl der gezielt ausgewählten Anwendungskontexte hohe Ökoeffizienzpotenziale mit der gewählten Methode der vergleichenden Betrachtung von Funktionalitäten ermittelt werden.

Die Belastbarkeit der ermittelten Zahlen ist natürlich abhängig von der vorliegenden Qualität und Verfügbarkeit der Stoff- und Energiedaten für die einzelnen Anwendungen. Für noch in Entwicklung befindliche Nanoinnovationen sind nur schwer quantitative Aussagen für den Herstellungsaufwand zu treffen, wohingegen Aussagen für die Gebrauchsphase (meist zum Energieeinsparpotenzial) eher abschätzbar sind. Zudem gilt es bei Vergleichen von etablierten und ‚reifen' Technologien mit erst in der Entwicklung befindlichen immer auch zu berücksichtigen, dass die neuen Technologien erst am Beginn ihrer ‚Lernkurve' stehen, d. h. meist noch wesentlich größere bisher unausgeschöpfte Effizienzsteigerungspotentiale in sich bergen.

Die Fallstudie „**Ökoeffiziente Nanolacke**“ verdeutlicht eindrucksvoll, dass im Bereich Beschichtungen bei allen betrachteten Emissionen und Umweltwirkungen sehr hohe Ökoeffizienzpotenziale durch den Einsatz von nanotechnologiebasierten Beschichtungen bestehen. Darüber hinaus konnte der weitere Vorteil einer einfachen Vorbehandlung nur qualitativ aufgezeigt werden. Durch die geringe notwendige Beschichtungsdicke bei gleicher Funktionalität wird eine um den Faktor fünf höhere Ressourceneffizienz erreicht; Vorteile aus der Gebrauchsphase sind insbesondere im Transportsektor im Zuge des Leichtbautrends zu erwarten. Neben der Automobilindustrie und Bahnindustrie würden sich diese Potenziale noch stärker in der Flugzeugindustrie auswirken. Weiteres Optimierungspotenzial besteht beim Nanolack noch darin, den Lösemittelanteil in der Lackapplikation zu senken.

Abbildung 1: Lack- und Chromatierungsmengen (g/m² lackierter Aluminium-Automobilfläche)



Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Harsch und Schuckert 1996)

Im Rahmen der Fallstudie „**Nanotechnologische Prozessinnovation der Styrolsynthese**“ wurde exemplarisch das ökologische Potenzial von auf Nanotechnologie basierenden Katalyseanwendungen untersucht. Als konkretes Beispiel wurde der Einsatz eines nanostrukturierten Katalysators auf Basis von Nanotubes für den chemischen Prozess der Styrolsynthese betrachtet. Da noch keine detaillierten Ökobilanzdaten für die alternative Styrolsynthese zur Verfügung standen, wurden Ableitungen zum Energieverbrauch für diesen Prozess auf Basis der Technologiebeschreibungen vorgenommen.

Mit dem alternativen Verfahren zur Styrolsynthese auf Basis eines Nanotubes-Katalysators ergibt sich somit auf der Prozessstufe der Styrolsynthese ein Energieeinsparpotenzial von knapp 50%. Zwei besondere Effekte führen zu dieser Effizienzsteigerung, einerseits ist es gelungen, die bisher endotherme Reaktion in eine exotherme Reaktion zu überführen, andererseits konnte die Reaktionstemperatur bedeutend gesenkt, das Reaktionsmedium verändert und der Anlagenaufwand minimiert werden. Bezogen auf den gesamten Produktlebensweg bis zum Styrol bedeutet dies eine Effizienzsteigerung beim Energiebedarf von ca. 8-9%. Des Weiteren ermöglicht der neue Katalysator durch den Wegfall von

Schwermetallen eine hohe Reduktion der Schwermetallemissionen im Produktlebensweg. Mögliche Risikopotenziale durch den Einsatz von Nanotubes können dem entgegenstehen. Sie sind noch weiter zu untersuchen und in einem möglichen Anlagenkonzept entsprechend zu berücksichtigen.

Die Fallstudie „**Nanoinnovationen im Displaybereich“** hatte zum Ziel, mögliche Ökoeffizienzpotenziale durch den Einsatz von neuen sich in der Entwicklung befindlichen nanotechnologiebasierten Produkten im Displaybereich zu untersuchen. Hierzu wurden OLEDs sowie CNT-FED mit den konventionellen Displays CRT, LCD und Plasmadisplays verglichen.

Auf Basis der vorliegenden Daten ist es schwer, konkrete Abschätzungen zu möglichen Ökoeffizienzpotenzialen zu formulieren, wobei auch hier sehr viel für Steigerungen der Material- und Energieeffizienz spricht. Nach Überwindung der Probleme mit der Langzeitstabilität der organischen Leuchtstoffe würden sich OLEDs gegenüber den vorherrschenden LCDs bspw. durch geringeren Herstellungsaufwand auszeichnen. Außerdem zeichnen sich OLEDs durch eine hohe Energieeffizienz in der Gebrauchsphase aus (um den Faktor 2 besser als LCD). Wenn es gelingt, bei OLEDs diese sich abzeichnenden Möglichkeiten zur Steigerung der Material- und Energieeffizienz in einer Massenproduktion umzusetzen, sind beträchtliche Ökoeffizienzpotenziale erreichbar. Eine 20%ige Energieeinsparung gegenüber LCD über den gesamten Lebensweg erscheint möglich.

Auch für CNT-FED wird das Erschließen von hohen Ökoeffizienzpotenzialen möglich sein, wenn es gelingt, die Herstellungsphase, insbesondere die hochkomplexe Nanotubeherstellung für Feldemitter, gegenüber bisherigen Herstellungsverfahren vergleichbar energieeffizient zu gestalten. Risikopotenziale durch diese neuen Technologien sind eher nicht zu erwarten.

Die Fallstudie „**Nanoanwendungen im Lichtbereich“** hatte zum Ziel, mögliche Ökoeffizienzpotenziale durch den Einsatz von neuen nanotechnologischen Produkten im Lichtbereich zu untersuchen. Hierzu wurden Weiße LEDs mit den konventionellen Lichtquellen Glühlampe und Energiesparlampe verglichen und Zukunftspotenziale von Quanten Dots eruiert.

Zentraler Maßstab für die ökologische Beurteilung von Lichtquellen für Beleuchtungszwecke ist der Energieverbrauch in der Gebrauchsphase und die damit verbundenen Emissionen. Hierbei zeigt sich, dass die heutige Weiße LED zwar gegenüber der klassischen Glühlampe besser abschneidet, aber gegenüber der Energiesparlampe um den Faktor 3 im Nachteil ist. Erst weiterentwickelte nanotechnologiebasierte Produkte mit bedeutend höheren Lichtausbeuten, d.h. Weiße LED mit Lichtausbeuten oberhalb von ca. 65 lm/W, können mit der Energiesparlampe hinsichtlich der Umweltwirkungen in Konkurrenz treten und für Beleuchtungsaufgaben mit wenig spezialisierten Anforderungen bzw. für die alltägliche Beleuchtung interessant werden.

Durch die Nutzung von Quantenpunkten wird in Zukunft eine weitere Erhöhung der Energieeffizienz von Lichtquellen möglich werden. Es ist zu erwarten, dass Quantenpunkttechnologien langfristig einen festen Platz im Displaybereich finden werden, insbesondere in Kombination mit OLEDs. Der kommerzielle Produkteinsatz von Quantenpunkten wird aber noch einige Jahre auf sich warten lassen.

In der Fallstudie „**Risikopotenziale nanotechnologischer Anwendungen**“ lag der Fokus auf der Analyse und Diskussion potenzieller Risiken insbesondere durch Nanopartikel. Einerseits

wurden die Risiken thematisiert, die sich aus den Eigenschaften der im Bereich der Nanotechnologie verwendeten Stoffe und Materialien ergeben könnten. Außerdem wurden in der wissenschaftlichen Literatur diskutierte problematische Effekte ausgewählter Stoffe auf den Menschen und die Umwelt dargestellt.

Das Verhalten von Nanopartikeln unterscheidet sich von Materie auf der Makro-Ebene, das gilt auch bei Gleichheit der Stoffe. Einige der analysierten Studien dokumentieren überraschendes Verhalten. Es gibt eine Reihe von ernst zu nehmenden Verdachtsmomenten über toxische Wirkungen von Nanomaterialien und besonders Nanopartikeln auf die Umwelt und menschliche Gesundheit. Besondere Bedeutung kommt dabei auch neben Nanopartikeln nanostrukturierten Materialien wie Nanotubes und Buckyballs zu.

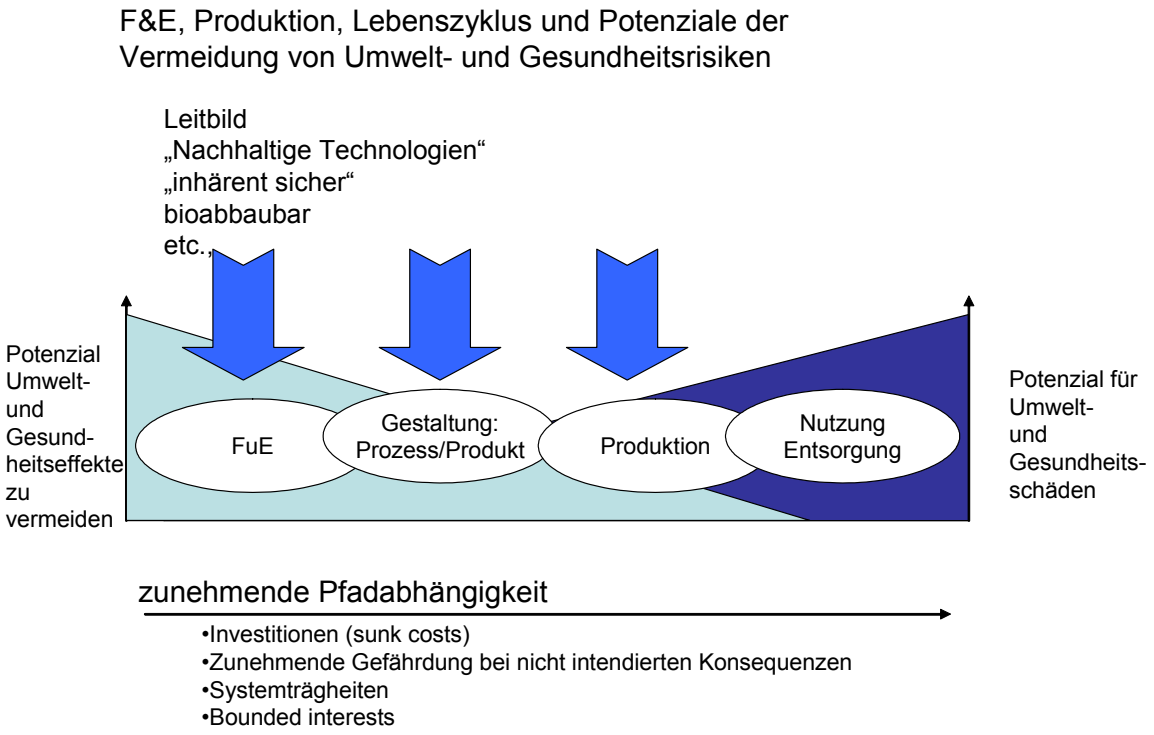
Alle bisher produzierten wissenschaftlichen Erkenntnisse sind allerdings nur vorläufig, teilweise widersprüchlich und beziehen sich nur auf einen Bruchteil von möglichen Effekten. Gleichzeitig erscheint die Übertragbarkeit bzw. Verallgemeinerbarkeit des bisher gewonnenen Wissens als äußerst fraglich. Das Wissen ist gegenwärtig zu lückenhaft, um eine vollständige Risikobewertung durchführen zu können. Verallgemeinerbare Aussagen und Klassifikationen zur Toxizität von Nanopartikeln können derzeit also noch nicht vorgenommen werden.

Es besteht im Hinblick auf Toxizität und Verhalten von Nanopartikeln in der Umwelt ein erheblicher Forschungsbedarf. Unter Berücksichtigung der Produktionsverfahren und der meisten Anwendungen erscheint aus heutiger Sicht das Problem der Nanopartikel einerseits als akut, andererseits womöglich aber auch von begrenzter Reichweite, da viele Produktionsverfahren entweder in wässrigen Lösungen oder in geschlossenen Systemen stattfinden und bei vielen Produkten die Partikel und Nanostrukturen fest in einer Matrix eingebunden sind. Über den gesamten Lebenszyklus bestehen gleichwohl noch große Wissenslücken im Hinblick auf etwaige Risikopotentiale.

Gestaltende Ansätze für eine nachhaltige Nanotechnologie

Technologieentwicklung ist nicht oder nur sehr begrenzt durch politische Interventionen steuerbar. Vielmehr ergibt sich aus dem Zusammenwirken unterschiedlichster Akteure eine Pfadentwicklung der Technologie, die gestaltend begleitet werden kann. Die Bedeutung der Pfadabhängigkeit im Zeitverlauf und damit der frühzeitigen Identifikation adverser Effekte auf Umwelt und Gesundheit wird durch die folgende Graphik dargestellt.

Abbildung 2: Zeitfenster der Gestaltung im Lebenszyklus



Quelle: Haum et al. 2004

Die Abbildung verdeutlicht, dass entlang des gesamten Prozesses von der Grundlagenforschung über die angewandte Forschung, die Gestaltungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase phasentypische Vorsorgeoptionen entwickelt und generiert werden können und müssen, die jeweils auch als Folgenforschung angelegt werden können. In den unterschiedlichen Phasen sind jeweils unterschiedliche Akteure (mit-)verantwortlich. Dies kann bereits in der Phase der Grundlagenforschung beginnen, deren Ergebnisse in der Folge zu Forschungs- und Entwicklungsbemühungen im Bereich der angewandten Forschung führen. Nach unserer Auffassung bestehen in diesen Phasen die weit reichendsten Möglichkeiten, potenzielle Umwelt- und Gesundheitsrisiken zu vermeiden.

Die Phase der Gestaltung von Produktionsprozessen und Produkten ist bereits in dem Sinne präformiert, als sie die FuE als Grundlage hat. Die Prozess- und Produktgestaltung hat gleichwohl noch relativ viele Freiheitsgrade, die entscheidend sein können für den Aspekt der „Eigensicherheit“ und mögliche Belastungen in den Folgephasen. Die Gestaltungsoptionen sind begrenzter, gleichwohl in erheblichen Umfang noch vorhanden.

Die Gestaltungsoptionen im Produktionsprozess und bei der Nutzung bis schließlich in der Entsorgung nehmen deutlich ab. In der Regel können zu diesem Zeitpunkt nur noch additive Maßnahmen greifen, indem die Prozesse und Produkte bspw. entsprechend der Gefahrstoffklassen in den Sicherheitsdatenblättern gehandhabt oder Vorschriften bzgl. der Entsorgung eingehalten werden.

Neben der wissenschaftlichen und technischen Pfadgestaltung ist zudem die Eigendynamik von Bedeutung, die von den getätigten Investitionen und von dem gebundenen Know-how und Wissen ausgeht, auch hier sind Pfadverfestigungen im Zeitablauf festzustellen.

Die Wissenschafts-, Technikgenese und Innovationsforschung hat die Bedeutung von Leitbildern sowohl bei der Herausbildung von Paradigmen und technologischen Trajektorien (Pfaden), als auch für wissenschaftliche Revolutionen und technologische Pfadwechsel heraus gearbeitet. 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, ihre Leitfunktion sowie der Bezug zu Wünschen und Machbarkeiten gleichermaßen, kurz gesagt ihre Resonanzfähigkeit im Bewusstsein der Akteure. Die Bildhaftigkeit hat einen hohen Stellenwert für die Anschaulichkeit und die damit verbundene Komplexitätsreduktion. Die Leitfunktion wirkt über ihren emotionalen und Wertegehalt, sie wirkt motivierend und orientierend. Leitbilder können also eine Steuerungswirkung entfalten und zur Orientierung bzw. Ausrichtung von Innovationen beitragen. Insofern liegt es nahe, die Möglichkeiten einer Beeinflussung von Innovationen in Richtung Nachhaltiges Wirtschaften mit Hilfe von Leitbildern auszuloten. Drei konkrete Vorschläge zu Leitbildern einer nachhaltigen Nanotechnologie mit unterschiedlichen Reichweiten wurden im Projekt entwickelt: „Ressourceneffiziente Nanotechnologie“, „Konsistente und eigensichere Nanotechnologie“ sowie das langfristig orientierte Leitbild „Nanobionik“.

In den unterschiedlichen Phasen im Produktlebenszyklus gemäß Abbildung 2 kommen unterschiedliche Akteure zum Zuge, die an der Gestaltung beteiligt sind und deren Handlungen entscheidend zu den potenziellen Wirkungen des Produkts oder Prozesses beitragen. Die für eine produktlebenszyklusbezogene Optimierung nötigen Kommunikationsströme zwischen den unterschiedlichen Akteuren entlang der Wertschöpfungskette sind derzeit in vielen Bereichen noch lückenhaft, es sei denn es handelt sich um Großunternehmen mit übergreifenden Managementsystemen oder Unternehmen zwischen zwei hintereinander liegenden Produktionsstufen, die in der Lage sind die ‚Systemführerschaft’ für die ganze Kette zu übernehmen. Die Kommunikation zwischen möglichen Betroffenen am Ende des Produktzyklus und denjenigen am Anfang ist vielfach nicht oder nur begrenzt entwickelt.

Entlang der Wertschöpfungskette kommen die unterschiedlichsten Institutionen und Akteurskreise in den Fokus, die jeweils für sich nur begrenzte Handlungsmöglichkeiten haben, die aber durch Kooperationen diese erheblich ausweiten könnten. Im Grundsatz handelt es sich hier um ein typisches Governanceproblem, in welchem die Einflüsse und Einflussmöglichkeiten der unterschiedlicher Akteure im Gestaltungsprozess nicht eindeutig zuzuordnen ist. Damit haben wir es neben dem Prognoseproblem mit Blick auf etwaige Folgen auch mit einem Komplexitätsproblem mit Blick auf etwaige Einflussmöglichkeiten zu tun. Die Folgen von Innovationen in den Nanotechnologien sind, wie beschrieben nur begrenzt vorhersehbar. Die Steuerungs- bzw. Einflussmöglichkeiten der jeweiligen Akteure werden entscheidend durch die Eigendynamiken gesellschaftlicher Subsysteme beeinflusst (Pfadabhängigkeiten). Es kommt also einerseits darauf an die Subsysteme reflexiver zu gestalten, dass sie weniger mit Abschottung reagieren, und andererseits gilt es das gesamte Arsenal an Einflussmöglichkeiten auszuschöpfen für einen Umbau unseres Wirtschaftens in Richtung Nachhaltigkeit.

Neben Leitbildern als Gestaltungsinstrument in der Technikentwicklung wurden deshalb noch weitere Gestaltungsansätze und –instrumente skizziert:

- Integration von Sicherheits-, Gesundheits- und Umweltschutzaspekten in das Wertschöpfungsketten übergreifende Qualitätsmanagement
- Nachhaltiges Nanodesign in Forschung und Entwicklung in den Unternehmen
- Staatliche Regulierungsansätze

Darüber hinaus muss die Bedeutung einer weiteren prozessbegleitenden Technologiegestaltung der Nanotechnologie bzw. eines entsprechenden Prozess- und Produktdesigns betont werden. Hierfür kommen Verfahrensvorschläge in Anlehnung an Konzepte wie Constructive Technology Assessment (CTA) und real-time TA in Frage.

Fazit und Handlungsbedarf

Im Rahmen der dreistufigen Vorgehensweise des Projektes konnten durch den Ansatz der Charakterisierung der Technologie wesentliche potenzielle Gefahren von Nanotechnologien identifiziert werden (hazard characterization), durch die Ökobilanzierung konnten mögliche Effizienzpotenziale der Anwendung der Nanotechnologien aufgezeigt werden und schließlich konnten Ansätze zur nachhaltigkeitsorientierten Gestaltung aufgezeigt werden. Wesentliche Schlussfolgerungen, die aus der Studie gezogen werden konnten, sind, dass schon heute von Nanopartikeln in offenen Anwendungen ein nicht zu vernachlässigendes Risikopotenzial ausgeht. Die Ergebnisse der Ökobilanzierung zeigen, dass deutliche Umweltentlastungspotenziale erschlossen werden können, dies gilt aber nicht durchgehend in allen Anwendungsbereichen und erfordert ggf. gezieltere Anstrengungen. Die prospektive (extrapolierende) bzw. begleitende Ökobilanzierung hat sich insofern als ein wichtiges Bewertungsinstrument auch für erst in der Entwicklung befindliche Technologien, Produkte und Prozesse bewährt. Schließlich ist darauf zu verweisen, dass den leitbildorientierten Gestaltungsansätzen, nicht zuletzt aufgrund der Erkenntnisse der ersten beiden Ansätze eine wichtige Rolle für die weitere Technologieentwicklung in Richtung Nachhaltigkeit zukommt.

Bezogen auf die Bewertung von Risiken von Nanotechnologie besteht Forschungsbedarf bzgl.

- toxikologischer und ökotoxikologischer Untersuchungen im Rahmen integrierter Untersuchungsprogramme
- des Verhaltens der Nanopartikel in der Umwelt und deren Systematisierung

Über die im Projekt untersuchten Fälle hinaus, die sich sehr stark auf anorganische Anwendungskontexte fokussierten, besteht insbesondere weiterer Forschungsbedarf

- im Bereich der Anwendungsfelder von Selbstorganisation sowohl im anorganischen als auch im organischen Bereich im Hinblick auf noch zu erschließende ggf. sehr viel weiter reichende Ökoeffizienzpotenziale
- im Bereich der weitergehenden und erst langfristig zu erwartenden Anwendungsfelder von Selbstorganisation, insbesondere bei einem möglichen Zusammenwachsen von

Nanotechnologie und Bio- bzw. Gentechnologie mit Blick auf die Frage eines schleichenden Übergangs von Selbstorganisation zur Selbstreproduktion.

Insgesamt muss angemerkt werden, dass Ökoprofilbetrachtungen von nanotechnologischen Anwendungen wesentlich erleichtert würden, wenn Stoff- und Energieflüsse (also wichtige Ökobilanzdaten) für die relevanten Herstellungsverfahren besser (bzw. überhaupt) zugänglich und ggf. auch zentral gesammelt würden.

Wenn sich die Erwartungen an die Nanotechnologie (bzw. an Innovationen auf ihrer Basis) hinsichtlich eines wesentlichen Beitrags zum Ziel eines Nachhaltigen Wirtschaftens erfüllen sollen, wenn also die Intention zu einer entsprechenden Gestaltung dieser Prozesse wirklich ernst genommen wird, dann ist eine weitere Begleitung der Technologie-, Prozess- und Produktentwicklung unerlässlich, zum einen mit Blick auf ein vorsorgeorientiertes Risikomanagement, zum anderen mit Blick auf die gezielte Ausschöpfung der Nachhaltigkeitspotenziale, die mit dieser Technologielinie ohne Zweifel verbunden sind.

Auf der instrumentellen Ebene erscheinen neben der Arbeit an und mit Leitbildern die bekannten Bewertungs-, Informations- und Kommunikationsinstrumente im Grundsatz geeignet zu sein, um Handlungsorientierungen gerade auch für kleine und mittlere Unternehmen zu generieren (Leitfäden, Gestaltungsorientierungen etc.).

- Die frühe Phase der Technologieentwicklung bietet im Grundsatz große Gestaltungspotenziale in Richtung Nachhaltigkeit – diese müssen erschlossen werden. Leitbildentwicklung in gestaltender Absicht bietet sich an.

- Begleitende und gestaltungsorientierte Prozesse müssen vorangebracht werden (bspw. via CTA oder real-time TA). Offene Kommunikationsprozesse sind empfehlenswert, in die Wissenschaft, Unternehmen und zivilgesellschaftliche Organisationen einbezogen werden. Nanotechnologische road maps können ein geeignetes Integrations- und Orientierungsinstrument sein. Begleitende Ökobilanzierungen müssen als Orientierungshilfe hinzukommen und ihre Ergebnisse in die Prozesse zurück gespiegelt werden.

- Unternehmen haben als Akteure in diesen Prozessen eine wesentliche Verantwortung, die insbesondere auch in jüngeren Ansätzen der Umweltpolitik wie REACh oder der Integrierten Produktpolitik (IPP) immer wieder betont werden. Die genannten Ansätze gehen zumindest von einer geteilten Verantwortung aus und nehmen insofern die Unternehmen stärker in die Pflicht. Konkret sollten Wertschöpfungsketten übergreifende integrierte Management- und Kommunikationskonzepte entwickelt werden, in denen die Aspekte Gesundheit, Sicherheit und Umwelt (HSE) als Element der Qualitätssicherung begriffen werden. Zur Unterstützung gerade auch der kleinen und mittleren Unternehmen wären Leitfäden für ein nachhaltigkeitsorientiertes Design von Produkten und Prozessen auf Basis der Nanotechnologie hilfreich.

2 Einleitung

Die Nanotechnologie wird vielfach als Basisinnovation[1] bezeichnet, d. h. es wird erwartet, dass von ihr zahlreiche innovative Entwicklungen in den verschiedensten technologischen Bereichen und in den verschiedensten gesellschaftlichen Anwendungsfeldern und ökonomischen Branchen ausgehen. Die technologische Dimension fokussiert somit auf die weit reichenden Veränderungen, die letztlich fast alle gesellschaftlichen Bereiche erfassen können und dementsprechend auch starke Rückwirkungen auf die Gesellschaft haben werden.

Beispielsweise werden von M.C. Roco (2002: 5)[2] folgende Fristen bzw. Generationen für industrielle Prototypen und deren Vermarktung benannt:

> **Vergangenheit und Gegenwart:** Die „zufällige" Nutzung von Nanotechnologie bspw. carbon black wird seit Jahrhunderten betrieben, isolierte Anwendungen (Katalysatoren, Komposite etc.) seit Anfang der 90er Jahre.
>
> **Erste Generation:** Passive Nanostrukturen (ca. 2001); Anwendungsbereiche: Coatings, Nanopartikel, bulk materials (nanostrukturierte Metalle, Polymere und Keramiken)
>
> **Zweite Generation:** Aktive Nanostrukturen (ca. 2005); Anwendungsbereiche: 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 biomimetischen Verfahren und neuem Design

Die weit reichenden und als potentiell machbar angesehenen Möglichkeiten der Nanotechnologien finden ihren Widerhall in z.T. extremen Bewertungen: auf der einen Seite einer radical green vision (Überwindung jeglicher Umweltbelastungen) und auf der anderen Seite die Gefahren der Unbeherrschbarkeit „der" Nanotechnologie, insbesondere mit Blick auf langfristige Entwicklungspotenziale[3].

Mit diesen typisierten Diskussionssträngen sind letztlich auch gesellschaftliche Kontroversen über die Entwicklungsrichtungen verbunden. Die Kontroverse betrifft dabei sowohl die ökologischen und ökonomischen als auch die sozialen Konsequenzen nanotechnologischer Entwicklungen und Visionen.

Aus diesem Grund sind Diskurse und möglichst frühzeitige und weit reichende Informationen zu Innovations- und Technikfolgen und zu Nachhaltigkeitswirkungen der Nanotechnologie notwendig. Diesem Bedarf wurde in Deutschland insbesondere durch die im Frühjahr 2002 erfolgte Ausschreibung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) für eine

---

[1] In der neueren Literatur wird vorrangig der Begriff Systeminnovation genutzt. Literatur zur Nanotechnologie generell vgl. bspw. (Bachmann 1998) sowie (National Science and Technology Council 1999) und (NNI 2000)

[2] Anstelle von Roco (2002) hätten auch andere Autoren und Studien benannt werden können, die jeweils andere Zeitskalen zur Grundlage nehmen. Es ist für die Zwecke hier allerdings nicht entscheidend, da es vorrangig darum geht, die Zeit- und Entwicklungsdynamiken in den Blick zu nehmen.

[3] Vgl. (Joy 2000; etc group 2002)

Innovations- und Technikanalyse zur Nanotechnologie entsprochen. In diesem Rahmen wurden 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 und Nanosolutions GmbH.

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. Dem Projekt stellen sich zwei zentrale Fragen

1. Wie kann es gelingen, die erwartbaren Wirkungen einer erst im Entstehen begriffenen Technologie abzuschätzen?
2. Wie kann erfolgreich auf die nachhaltigkeitsorientierte Gestaltung der Nanotechnologie Einfluss genommen werden?

Wenn das Anwendungsfeld einer Technologie noch unbekannt ist und zudem mit noch unbekannten neuen Wirkungen gerechnet werden muss, bleibt als wesentliche zu untersuchende Variable die Technologie selbst. Es empfiehlt sich also eine Blickwende von den ‚Wirkungen’ zum ‚Bewirkenden’, zur Analyse und Charakterisierung der Nanotechnologie. Andererseits lassen sich in einem weiteren Schritt an konkreten Anwendungsbeispielen Nachhaltigkeitseffekte erfassen und bewerten. Außerdem entstehen Technologien nicht naturwüchsig, sie werden von handelnden Menschen mit den ihnen zur Verfügung stehenden Mitteln in verstehbaren Konstellationen (Innovationssystemen) hervorgebracht. Technologien werden also ‚gestaltet’ und bei dieser Gestaltung spielen ‚Leitbilder’ oft eine wichtige Rolle. Es stellt sich somit die Frage, inwieweit mit Hilfe von Leitbildern und anderen Instrumenten auf die Gestaltung der Nanotechnologie Einfluss genommen werden kann.

In der Folge dieses Berichtes werden im Kapitel 3 die methodischen Grundlagen des verfolgten dreistufigen Ansatzes zur prospektiven Technologiebewertung und -gestaltung von Nanotechnologie erläutert. In den Kapiteln 4-6 werden die Ergebnisse der einzelnen Ansätze dargestellt. Dem schließt sich dann in Kapitel 7 die Zusammenführung der Ergebnisse der Projektarbeit zu einem Fazit sowie das Ableiten von Handlungsbedarf an.

3 Methodische Ansätze zur prospektiven Technologiebewertung und –gestaltung

Um der Komplexität der Aufgabenstellung des Projektes gerecht zu werden, wird im Projekt ein dreistufiger Ansatz zur prospektiven Technologiebewertung und -gestaltung von Nanotechnologie verfolgt.

1. Ansatz – prospektiv
Bewertung der Nanotechnologie und ihrer Wirkungen durch eine Charakterisierung der Technologie

2. Ansatz – prozessbegleitend
Bewertung von Nachhaltigkeitseffekten in Anlehnung an ökobilanziellen Methoden an konkreten Anwendungsbeispielen im Vergleich zu bestehenden Produkten und Verfahren

3. Ansatz – gestaltend
Leitbilder als Steuerungs‘instrumente‘ in der Technikgestaltung, Begleitprozesse, akteursspezifische Konzepte

3.1 Charakterisierung von Technologien

3.1.1 Der Umgang mit Nichtwissen

Jede Form der Technikfolgenabschätzung hat mit dem Prognoseproblem zu kämpfen. Wie können problematische Entwicklungen einer Technologie abgeschätzt, wie können Risiken, Neben- und Folgewirkungen erfasst werden, die wir womöglich noch gar nicht kennen? Das Prognoseproblem der Technikbewertung wurde durch die Thematisierung des Umgangs mit Nichtwissen und Unsicherheit in jüngerer Zeit noch zusätzlich akzentuiert (vgl. Wehling 2001; Böschen 2002; Wehling 2002). Ganz generell lassen sich zwei Formen des Nicht-Wissens unterscheiden:

i) *Noch-Nicht-Wissen*. Dabei handelt es sich um prinzipiell erlangbares Wissen, das aber noch nicht vorhanden ist, z.B. weil bestimmte Tests noch nicht durchgeführt oder bestimmte Erfahrungen noch nicht gemacht wurden. Das kann viele Gründe haben, z.B. dass das mögliche Problem noch gar nicht gesehen werden konnte, weil es bisher noch nicht aufgetreten ist und das ‚Wirkungsmodell’ noch nicht ausgearbeitet war (z.B. die Ozon zerstörende Wirkung von FCKWs). Insgesamt dürfte aber der Mangel an Ressourcen (Zeit, Geld, qualifizierte Menschen) beim Noch-Nicht-Wissen die zentrale Rolle spielen. Typisches Beispiel sind die knapp 100.000 so genannten ‚Altstoffe’, die nach Chemikalienrecht noch nicht auf bestimmte Wirkungen hin getestet wurden.[4]

ii) *Nicht-Wissbarkeit*. Hier liegen die Grenzen des Wissens weniger im Erkenntnissubjekt, sondern eher im Erkenntnisobjekt, im Gegenstandsbereich. Die Reaktionen instabiler,

[4] Ca. 3000 dieser Altstoffe werden in Europa derzeit mit einem Volumen von mehr als 1000 Tonnen pro Jahr produziert. Seit Inkrafttreten des Chemikaliengesetzes 1981 konnten bisher allerdings gerade mal 200 Stoffe dem vom Gesetz geforderten Prüfverfahren unterzogen werden. Dieses offenkundige Scheitern ist ein wesentlicher Grund für die derzeit laufende Neuorientierung der europäischen Chemikalienpolitik, eingeleitet durch das EU-Weißbuch zur Chemikalienpolitik. (vgl. Europäische Kommission 2001)).

sehr komplexer und dynamischer Systeme auf Eingriffe sind prinzipiell nicht prognostizierbar.[5] Die Gründe für die Nicht-Wissbarkeit liegen damit im Wesentlichen in der ‚Architektur' bzw. im instabilen Zustand der Systeme, in die eingegriffen wird. Selbstverständlich kann die Stärke von Eingriffen (nach Qualität und Quantität) diese Problematik noch weiter zuspitzen. Beispiele für derartige Grenzen der Wissbarkeit sind der viel zitierte Schmetterlingsflügelschlag, der den Tornado auslöst, nicht vorhersehbare Reaktionen auf Lücken in Nahrungsnetzen in Ökosystemen oder die Nichtvorhersehbarkeit vereinzelter, räumlich und zeitlich eingegrenzter Wirkungen von Klimaveränderungen (z.B. wie und wann reagiert der Golfstrom?).

Vor diesem Hintergrund stellt sich das Prognoseproblem der Technikbewertung in zugespitzter Weise, denn wie soll man diese Formen von Nichtwissen unterscheiden und bearbeiten können? Eine Möglichkeit ist die gezielte Anwendung einer reflektierten und systematischen Versuchs- und Irrtums-Strategie, für die im Folgenden Ansatzpunkte entwickelt werden.

Auch wenn es uns (Natur-)Wissenschaftlern immer wieder schwer fällt: Gewissheit ist die Ausnahme! Ungewissheit und unvollständiges Wissen sind die Regel. Die Schwierigkeiten, mit dieser Situation angemessen umzugehen, sind aber keineswegs auf Wissenschaftler beschränkt. Das Hin- und Herschieben von Beweislasten ist z.B. angesichts der prinzipiellen und weitreichenden Grenzen der Erkenntnis ein zwar immer wieder beliebtes aber doch völlig unfruchtbares Spiel. Wir können zwar einige Gefährdungspotenziale mit schon bekannten Wirkungsmodellen wissenschaftlich recht gut belegen. Aber alles, was nicht experimentell bzw. epidemiologisch (oder auch modelltheoretisch) erfasst werden kann, bleibt schlicht unbekannt. Die Ungefährlichkeit von Stoffen oder Techniken kann somit auf gar keinen Fall ‚bewiesen' werden.

Im Kern sind wir angesichts des weit verbreiteten Noch-Nicht-Wissens und der Nicht-Wissbarkeit wieder auf ein Vorgehen nach dem Prinzip von Versuch und Irrtum zurück geworfen – aber im Sinne einer reflektierten und systematischen Strategie. Zunächst einmal scheint es aus pragmatischen Gründen (Ressourcen), aus prinzipiellen Gründen (Nicht-Wissbarkeit) und ebenso aus sozio-ökonomischen Gründen (internationaler Innovationswettbewerb) kaum eine Alternative zum Vorgehen nach Versuch und Irrtum zu geben. Allerdings ist unter Nichtwissensbedingungen die Anwendbarkeit dieser Strategie zu reflektieren. Sie ist nämlich nur dann einsetzbar, wenn es sich um kleine (im Prinzip) revidierbare Schritte in nicht besonders sensiblen Anwendungskontexten handelt. Damit sind aber zwei wesentliche Einschränkungen markiert:

i) **Begrenzung der Schrittweite**

Im Zuge der wissenschaftlich-technischen Revolution wurden auf der Basis der mathematisch-experimentellen Naturwissenschaften Techniken mit einer Wirkmächtigkeit und Reichweite entwickelt, die ein Vorgehen nach dem Prinzip ‚Versuch und Irrtum' nicht mehr zulassen. Aufgrund der extremen Wirkmächtigkeit und Reichweite dieser Technologien könnte jeder einzelne Irrtum extreme, nicht wieder gut zu machende Folgen nach sich ziehen.

[5] Der Ökosystemforscher Holling spricht hier von ‚inherent unknowability', vgl. (Holling 1994)

ii) **Systematisches Vorgehen und möglichst weitgehendes Containment**
Außerdem darf das Prinzip von Versuch und Irrtum auch innerhalb dieser Grenzen nicht ‚blind und zufällig' sondern ‚bewusst und methodisch' zum Einsatz kommen. Zu den wichtigsten Voraussetzungen für ein methodisches Vorgehen gehören - unter möglichst weitgehender Beachtung all des bisher angesammelten Wissens - z.B. ein bewusstes und begründetes ‚setting'. Wenn möglich sollten Versuche z.B. zunächst nur in abgegrenzten ‚Versuchsbereichen' stattfinden. Es gehört aber auch ein gutes und so weit wie möglich gezieltes versuchsbegleitendes Monitoring dazu und nicht zuletzt eine transparente Dokumentation der Versuche.

Als historische Beispiele für die Nichtbeachtung dieser ‚Grenzen von Trial and Error' können einige Bereiche genannt werden, bei denen potenziell adverse Effekte frühzeitig einerseits aufgrund der Stoffeigenschaften und andererseits aufgrund der Wirkungen festgestellt wurden, diese allerdings hinsichtlich des Umgangs mit diesen Stoffen keine Konsequenzen bzw. erst spät nach sich zogen.[6] Dazu gehören bspw. a) die Freisetzung von FCKWs mit ihren globalen und irreversiblen Folgen auf Basis der schon damals bekannten Eigenschaftskombinationen dieser Stoffgruppe: i) hohe Mobilität, ii) wenig bekannte (seltene, naturfremde) Stoffqualität und iii) hohe Persistenz in der Umwelt[7], b) der offene Einsatz von Asbest (vgl. Kasten) c) die nicht ‚rückholbare' Freisetzung von gentechnisch veränderten Organismen, welche die Fähigkeit zur Selbstreproduktion besitzen und in diesem Zusammenhang ein von den Wissenschaftlern sich selbst auferlegtes Moratorium in den Frühphasen der Gentechnik.

Tabelle 3: Historischer Verlauf der Debatte zu Asbest

1889	Eine britische Gewerbeaufseherin Lucy Deane warnt vor schädlichen und ‚schlimmen' Wirkungen von Asbest
1906	Ein Bericht aus einer französischen Fabrik verweist auf 50 Todesfälle von Asbesttextilarbeiterinnen und empfiehlt Kontrollen
1911	Tierversuche liefern ‚hinreichende' Gründe für den Verdacht, dass Asbest schädlich ist
1911 und 1917	Die britische Gewerbeaufsicht findet nicht genügend Belege, die weitere Maßnahmen rechtfertigen würden
1918	US-Versicherungen verweigern Asbestarbeitern Versicherungsschutz aufgrund von Vermutungen über krankheitsauslösende Arbeitsbedingungen in der Industrie
1930	Der Merewether report in Großbritannien stellt bei 66% der Langzeitarbeiter in einer Fabrik in Rochdale eine Asbestose fest.
1931	Britische Asbestvorschriften sehen Staubkontrolle nur bei der Herstellung und der Entschädigung bei Asbestose vor, bei gleichzeitiger unzulänglicher Umsetzung der Vorschriften

[6] Eine Aufarbeitung von zwölf Fallbeispielen, die teilweise den hier genannten Aspekten entsprechen (Asbest, PCB's, Tributilyn (TBT)) werden in dem von der EEA herausgegebenen Band „Late Lessons from early warnings: the precautionary principle 1896-2000" dargestellt.

[7] 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 (vgl. dazu die sehr aufschlussreiche Aufarbeitung der damaligen Formen des Umgangs mit Nichtwissen (und Wissen) durch (Böschen 2000; Böschen 2002)).

1935-49	Berichte über Lungenkrebsfälle bei Arbeitern in der Asbestproduktion
1955	Doll stellt hohes Lungenkrebsrisiko bei Asbestarbeitern in Rochdale fest
1959-60	Mesotheliom-Krebsfälle bei Arbeitern und in der Bevölkerung in Südafrika festgestellt
1962/64	Mesotheliom-Krebsfälle bei Asbestarbeitern, Menschen in der Umgebung von Fabriken und bei Verwandten von Fabrikarbeitern u.a. in den USA und Großbritannien und den Vereinigten Staaten festgestellt
1969	Britische Asbestvorschriften verbessern die Kontrollen, lassen aber Anwender und Krebsfälle außer Acht
1982-1989	Verschärfung der Asbestkontrollen bei Anwendern und Herstellern und verstärkte Suche nach Ersatzstoffen
1998-1999	EU und Frankreich verbieten alle Formen von Asbest
2000-01	WTO stützt das Asbestverbot durch die EU / Frankreich gegen den Einspruch Kanadas

Quelle : Gee & Greenberg (2001)

Tabelle 4: Historischer Verlauf der Debatte zu FCKW

1907	Weigert führt Laborexperimente durch, die nachweisen, dass Chlor Ozon zersetzt
1934	Ähnliche Experimente von Norrish und Neville
1973	Globaler Überblick von CFC's durch Lovelock et al., die ihre Verteilung in der Atmosphäre weltweit aufzeigen
1974	Molina und Rowland veröffentlichen ihre theoretischen Argumente, dass CFC's den Ozongürtel zerstören können
1977	Die USA verbieten CFC's in Aerosolen aufgrund von „reasonable expectations" von Schäden. Gefolgt von Kanada, Norwegen und Schweden
1977	Dem forschungsorientierten „world plan of action on the ozon layer" wird zugestimmt. Er wird durch die UNEP koordiniert
1980	Europäische Entscheidung, die die Nutzung von CFC's in Aerosolen beschränkt; allerdings relativiert die verstärkte Nutzung von CFC's in Kühlschränken diese Einschränkung
1985	UNEP Vienna Convention wird verabschiedet. Sie fokussiert auf Forschung, Monitoring, Informationsaustausch und Restriktionen, wenn gerechtfertigt
1985	Farman, Gardiner und Shaklin veröffentlichen Ergebnisse, die ein ‚Loch' (starke Verdünnung) im Ozongürtel über der Antarktis aufzeigen
1987	Das Montreal Protokoll wird unterzeichnet, welches das Outphasing von Ozon zerstörenden Substanzen sowohl für entwickelte als auch Entwicklungsländer mit unterschiedlichen Zeitskalen vorsieht
1990	Verstärkte Bereitstellung von Finanzmitteln für Entwicklungsländer, um deren Abhängigkeit von Ozon zerstörenden Substanzen zu mindern

1997	Erweiterungen des Montreal-Protokolls, deren Ziel es ist, „to restore levels of chlorine“ bis 2050-2060
1999	Peking Deklaration, die zu Anstrengungen aufruft, den illegalen Handel mit Ozon zerstörenden Substanzen zu stoppen

Quelle: Farman (2001)

Die Beispiele verweisen darauf, dass die Nicht-Wahrnehmung von Hinweisen (bzw. die Nicht-Reaktion auf Hinweise) auf potenzielle Gefährdungen, die in der Regel bereits frühzeitig zur Verfügung standen, zur ungehinderten Ausbreitung erheblichen Umwelt- und Gesundheitsgefährdungen beigetragen haben. Des Weiteren lässt sich am Beispiel des Asbests aufzeigen, dass für die Unternehmen erhebliche Folgekosten entstanden sind u.a. durch Produktionsumstellungen (Eternit AG) und Schadenersatzforderungen (ABB), die im letzteren Fall die Existenz des Unternehmens hätte gefährden können.

Dem Prinzip von Versuch und Irrtum sind also deutliche Grenzen zu setzen, insbesondere bei sehr großen Schrittweiten der Innovation und beim Einsatz von sehr wirkmächtigen und eingriffstiefen[8] Techniken mit besonders weit reichenden erwartbaren Folgen (besonders langen Wirkungsketten in Raum und Zeit), so dass letztlich mit einem einzigen nicht revidierbaren Versuch (oder massivem Einsatz weniger eingriffstiefer Techniken[9]) ganze Landstriche, Ökosysteme oder die Lebensgrundlagen zukünftiger Generationen ‚aufs Spiel gesetzt’ werden. Aus diesen Gründen sind dem Versuch-und-Irrtum-Ansatz bewusste Grenzen zu setzen, in deren Rahmen man ihn verantwortungsvoll handhaben kann und insofern auch (demokratisch legitimiert) zulassen sollte.

Prinzipiell gilt: Keine Innovation ist ohne Risiko. Es kommt allerdings sehr auf die Höhe des etwaigen Risikos an. Wenn wir nicht alle (technischen) Innovationen von vornherein unterlassen oder unterbinden wollen, kann mangelndes Wissen über mögliche Folgen als alleiniges Argument nicht ausreichen, bestimmte Innovationen zu unterlassen. Eine ‚große Besorgnis’ oder gar die Forderung nach weit reichenden Maßnahmen nach dem Vorsorgeprinzip, wie z. B. nach einem ‚Moratorium’, kann nicht allein mit dem Hinweis auf die ‚Neuartigkeit’ einer Technologie und auf noch unvollständiges Wissen über mögliche problematische Folgen begründet werden. Neuartigkeit und mangelnde Erfahrung sind sicher gute 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 weit reichende Maßnahmen nach dem Vorsorgeprinzip bedarf es allerdings zusätzlicher Gründe[10]. Diese sind

[8] Das Konzept Eingriffstiefe baut zum einen auf Überlegungen von Günther Anders und Hans Jonas auf (vgl. (Anders 1965); (Jonas 1985): S. 42 ff.), zum anderen auf Untersuchungen zu den wissenschaftshistorischen und wissenschaftstheoretischen Hintergründen der Entstehung der mathematisch-experimentellen Naturwissenschaften sowie insbesondere der besonders eingriffstiefen Technologien Atomtechnik, synthetische Chemie und Gentechnik (vgl. (Gleich 1989)). Das Technikbewertungskriterium ‚Eingriffstiefe’ wird ausführlicher dargestellt bei (Gleich 1998/1999)

[9] Letzteres fand in einer von der Enquete-Kommission ‚Schutz des Menschen und der Umwelt’ aufgestellten ‚Managementregel’ Berücksichtigung, in der es heißt: „Das Zeitmaß anthropogener Einträge bzw. Eingriffe in die Umwelt muss im ausgewogenen Verhältnis zum Zeitmaß der für das Reaktionsvermögen der Umwelt relevanten natürlichen Prozesse stehen.“ ((Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages Schutz des Menschen und der Umwelt 1998): S. 46)

[10] Vgl. dazu auch (Wiedemann et al. 2002). Dort werden Ansatzpunkte für die Erkennung entsprechender ‚Evidenzen’ entwickelt.

entweder in der zu betrachtenden Technologie zu finden (z.B. wenn die ‚Technologiecharakterisierung' deutliche Hinweise auf eine hohe Eingriffstiefe und ein extrem hohes Wirkpotenzial gibt) oder im jeweils spezifischen Anwendungskontext (z.B. wenn in ein besonders sensibles, instabiles und wichtiges System bzw. in Basisfunktionen von Systemen eingegriffen wird). Als eine der zentralen Herausforderungen stellt sich für eine methodisch abgesicherte Strategie von Versuch und Irrtum somit die Aufgabe, Wege und Methoden für die Abschätzung des Ausmaßes des Nichtwissens und für eine Verständigung über dessen eventuelle Folgen zu finden[11].

Es kommt also auf das Ausmaß des Nicht-Wissens und die Höhe der potenziellen Gefahr (bzw. des potenziellen Risikos) an. Diese werden in der Regel bestimmt durch:

i) *die Qualität des Eingriffs*. Aufgabe ist hier die Charakterisierung der Technik, z.B. die Identifizierung von extrem wirkmächtigen Risikotechnologien.

ii) *die Quantität des Eingriffs*. Aufgabe ist hier die Identifizierung von erwartbaren kumulativen Effekten.

iii) *die Qualität der Systeme, in die eingegriffen wird*. Aufgabe ist hier die Identifizierung von extremen Instabilitäten, bzw. der Grenzen der Stressverarbeitungskapazitäten und der Elastizität (resilience) von Systemen.

3.1.2 Die ‚Charakterisierung von Technologien' als Ansatz der prospektiven Technikbewertung

Mit Blick auf erst im Entstehen begriffene neue Technologien, bei denen sowohl die Anwendungsfelder als auch die Anwendungsintensitäten in den meisten Bereichen noch weitgehend unklar sind, fokussiert der **prospektiv orientierte Ansatz** auf die Bewertung der Technologie und ihre erwartbaren Wirkungen. Aus der Charakterisierung der Technologie, aus den ‚Qualitäten' der Prozesse und Objekte ergeben sich schon deutliche Hinweise auf erwartbare Wirkungen und in vielen Fällen auch schon Orientierungen für eine vorsorgeorientierte Technikgestaltung.

Die Technikbewertung, das Wissen über mögliche Wirkungen von Techniken, ist allgemein betrachtet immer auf das Wissen über drei Grundelemente angewiesen (vgl. Abbildung 3):

i) Ein Agens, also die Technik, der Eingriff, der Stoff usw., um deren / dessen mögliche Wirkungen es geht.

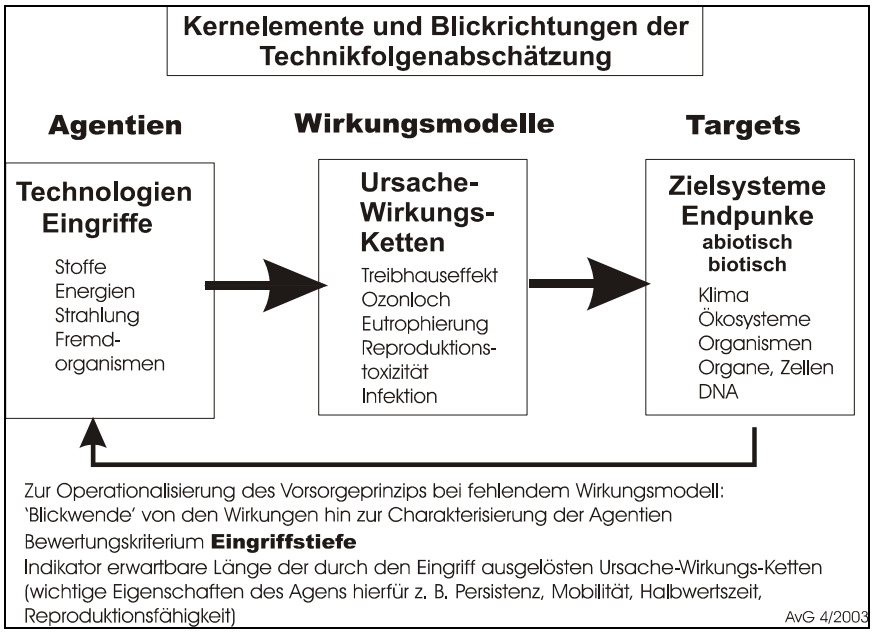
ii) Ein Wirkungsmodell, d.h. wissenschaftlich begründbare Vorstellungen, wie das Agens auf ein mögliches Zielsystem (Target) wirkt (Beispiele für solche Wirkungsmodelle sind der Treibhauseffekt, Hautkrebs als Folge stratosphärischer Ozonzerstörung sowie kanzerogene, mutagene und reproduktionstoxische Wirkungen (CMR) von Stoffen).

---

[11] Das ‚Rechnen mit dem Nichtwissen' ist nichts prinzipiell Neues. Bei der Gefahrstoffprüfung (Risikoabschätzung) gibt es längst eingeführte und international harmonisierte Formen des Umgangs mit dem verbleibenden Nichtwissen, einerseits über Konventionen zu bestimmten Extrapolationen (so genannte (Un-)Sicherheitsfaktoren für die Übertragung der Befunde aus dem Tierversuch auf den Menschen oder von Kurzzeittests auf etwaige Langfristwirkungen) oder zum Einsatz von ‚Default-Werten'. In diesem Bereich wird also schon lange mit dem Nichtwissen im wahrsten Sinne des Wortes ‚gerechnet'. In anderen Bereichen der Technikfolgenabschätzung ist ein solches methodisch abgestütztes ‚Rechnen mit dem Nichtwissen' allerdings noch wenig entwickelt.

iii) Ein Target, ein Endpunkt bzw. Zielsystem, auf welches das Agens einwirkt (z.B. Klima, Ökosystem, Organismus, Organ).

Abbildung 3: Blickwende in der Technikbewertung: Charakterisierung des Agens



Quelle: Gleich (2003)

Jedes der drei Elemente kann unbekannt sein. Bei neuen Technologien sind zumeist die potenziellen Anwendungsbereiche noch weitgehend unbekannt. Außerdem muss aufgrund ‚neuer Effekte' bei der Technologie auch mit neuen bisher noch unbekannten Wirkungsmodellen gerechnet werden. Über die Technologie selbst allerdings, zumindest über ihre Grundprinzipien, ist man schon ausreichend informiert, um von daher Einschätzungen über Gefährdungspotenziale vornehmen zu können. Mit einem besonders hohen Ausmaß von Nichtwissen haben wir also v.a. hinsichtlich der Wirkungsmodelle und hinsichtlich des Wirkungsorts der Ziel- bzw. Endpunkte (Targets) zu rechnen.

Entsprechend dem hier verfolgten Lösungsansatz für den Umgang mit Nichtwissen in der Technikfolgenabschätzung geht es nun darum, sich auf das in dieser Situation am besten Erforschbare zu konzentrieren, auf das Agens. Der Blick soll sich vom Nebel der noch unklaren Zielsysteme und der noch nicht bekannten Wirkungen lösen. Stattdessen wird das Agens genauer betrachtet, welches auf die Zielsysteme zukommt bzw. auf sie einwirken wird.

Aufgabe ist die ‚Charakterisierung der Technologie'[12]. Es geht um die Frage, welche möglichen positiven Effekte und Potenziale bzw. welche Gefährdungen allein schon aus ihrem ‚Charakter'

[12] Der hier verfolgte Ansatz der ‚Charakterisierung einer Technologie' ist genauso wenig wirklich neu wie das ‚Rechnen mit dem Nichtwissen', also der Umgang mit Sicherheitsfaktoren. Auch für die Technologiecharakterisierung gibt es bei der Gefahrstoffprüfung methodische Entsprechungen mit einer schon recht langen und etablierten Tradition. Die ‚Charakterisierung der (Gefahr-)Stoffeigenschaften' (die so genannte ‚hazard characterization' als wichtiger Schritt im risk assessment) konzentriert sich auf toxikologisch und ökotoxikologisch problematische Stoffqualitäten. Für das Risikomanagement, das die Ergebnisse der Risikoabschätzung auf staatlicher und/oder betrieblicher Ebene in Vorsorge- oder Schutzmaßnahmen umsetzen soll, sind dabei zwei Arten von Stoffeigenschaften besonders relevant geworden. Dies sind zum einen die CMR-Stoffe mit kanzerogenen, mutagenen und reproduktionstoxischen Eigenschaften (die hormonähnlichen Wirkungen werden als Unterkategorie „Reproduktionstoxizität" immer mehr dazu genommen), aus deren Vorhandensein

erwartbar bzw. ableitbar sind. Hierbei lohnt es sich diejenigen Qualitäten etwas näher zu betrachten, welche die neue Technologie einerseits so interessant machen und in denen andererseits die Quellen für ungewollte Nebenwirkungen und Folgeprobleme ihres Einsatzes vermutet werden können. Es sind dies insbesondere:

i) *Die Wirkmächtigkeit und Eingriffstiefe der Technologie*. Bei der Bewertung der Wirkmächtigkeit und Eingriffstiefe geht es auch um die Frage, inwieweit die Technologie an den Steuerungsstrukturen in der natürlichen Umwelt ansetzt, mit dem Effekt einer entsprechenden Wirkmächtigkeit und einer entsprechenden Ausdehnung raum-zeitlicher Wirkungsketten. Es geht um die Frage, in welchem Verhältnis die Technologie im Vergleich zu anderen besonders wirkmächtigen Technologien und damit ggf. auch ‚Risikotechnologien' steht und eingeordnet werden kann. Für besonders wirkmächtige Technologien müsste man als Vergleich bei der Risikoabschätzung und beim Risikomanagement am ehesten folgende Technologien heranziehen: Die Atomtechnik mit ihrem Katastrophenpotenzial und ihrer Atommüllproblematik, die Chemie der Gefahrstoffe inklusive der Freisetzung sehr mobiler und persistenter Stoffe (Fall FCKW) und schließlich die Freisetzung überlebensfähiger gentechnisch modifizierter Organismen.

ii) *Die mit Hilfe der Technologie erzielbaren ‚neuen Effekte'*. Bei der Bewertung dieser neuen Möglichkeiten geht es um die Frage, inwieweit die Technologie ‚nur' schon bekannte Möglichkeiten und Effekte verbessert bzw. verstärkt und ob bzw. wodurch sie wirklich Neues noch nicht Dagewesenes bewirken wird. Wenn diese ‚neuen Effekte' einerseits qualitativ nicht extrem eingriffstief sind, sich aber andererseits sehr viele neue Anwendungsfelder eröffnen und zudem durch eine sehr wahrscheinliche massenhafte Anwendung kumulative Effekte zu erwarten sind, empfiehlt es sich, für die Risikoabschätzung und das Risikomanagement zum Vergleich eher die Lasertechnik, die Computertechnik und/oder die so genannten ‚Neuen Werkstoffe' heranzuziehen.

iii) *Die Vielseitigkeit der Technologie* sowohl in den möglichen Wirkungen als auch in den möglichen Anwendungsbereichen. Bei der Bewertung wird hier z.B. auch die Frage berührt, inwieweit es sich bei der Technologie wirklich um eine ‚Schlüsseltechnologie' und/oder ‚Basisinnovation' handelt[13]. Je nach dem wie weitgehend dies zuträfe, wäre sie am ehesten vergleichbar mit der Informations- und Kommunikationstechnik oder mit der modernen Biotechnologie[14].

---

direkt – also noch vor einer Expositionsabschätzung - Managementkonsequenzen folgen; zum anderen sind es Eigenschaften, die für die Wahrscheinlichkeit einer Exposition besonders wichtig sind, wie Flüchtigkeit, Löslichkeit in Wasser, in Fett und insbesondere unter ökologischen Gesichtspunkten: Mobilität, Persistenz (in der Umwelt kaum abbaubar) und Bioakkumulation (Anreicherung in der Nahrungskette). Für *sehr persistente* und *sehr bioakkumulative* Stoffe (vPvB) wird nach den Plänen der Europäischen Kommission (Europäische Kommission 2001; Europäische Kommission 2003) in Zukunft allein aufgrund dieser Stoffqualitäten – also auch ohne begründete Wirkungsmodelle - ein Zulassungsverfahren vorgeschrieben werden.

[13] Mit all den Hoffnungen für konjunkturellen Aufschwung, Wirtschaftswachstum und Wohlstand, die mit einer derartigen Charakterisierung als Schlüsseltechnologie oder Basisinnovation in der Regel verbunden sind. Wobei selbstverständlich auch bei einem weit reichenden wirtschaftlichen Strukturwandel nicht nur mit Gewinnern, sondern auch mit Verlieren zu rechnen ist. Letztere werden insbesondere in denjenigen Branchen und Betrieben zu finden sein, die selbst nicht in der Lage sind, ihre ‚alten' Technologien und Lösungen durch nanotechnische Innovationen zu ersetzen.

[14] Mit dem Begriff der ‚Modernen Biotechnologie' wird der Bereich der wissenschaftsbasierten Biotechnologien umschrieben (z. B. Zellkulturen, Enzymtechnik usw.) in Abgrenzung zur ‚klassischen' erfahrungsbasierten

3.2 Ökologische Profilbetrachtungen als prozessbegleitender Bewertungsansatz von konkreten Anwendungsbeispielen

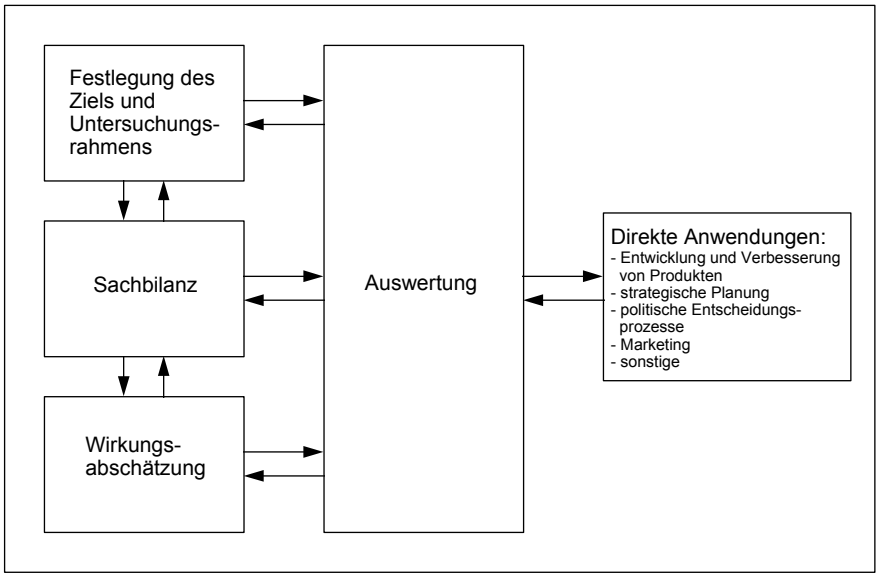
Aufbauend auf der Charakterisierung der Technologie verfolgt der prozessbegleitende Bewertungsansatz die Ermittlung von Nachhaltigkeitseffekten an konkreten Anwendungsbeispielen im Vergleich zu bestehenden Produkten und Verfahren, wobei der Fokus auf die Stoff- und Energieströme und die mit ihnen verbundenen ökologischen Chancen und Risiken gerichtet ist.

Da die Abschätzung von potenziellen Umweltwirkungen im Vordergrund steht, orientieren sich die ökologischen Profilbetrachtungen für die vertiefenden Fallstudien einerseits bei der Vorgehensweise an der Methodik der Ökobilanzierung, können andererseits aber nicht die hohen Anforderungen der Norm erfüllen, da die notwendige Güte der Datenlage über die Produkte / Verfahren und über die Vergleichsprodukte / -verfahren Lücken aufweisen wird. Die Ökobilanz ist die am weitesten entwickelte und normierte Methode zur Abschätzung der mit einem Produkt verbundenen Umweltaspekte und produktspezifischen potenziellen Umweltwirkungen. Im Vergleich zu bestehenden Anwendungen ist durch die Ökobilanz die Analyse von Ökoeffizienzpotenzialen 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.

Abbildung 4: Schritte zur Erstellung einer Ökobilanz



Quelle: DIN EN ISO 14040 (1997)

Biotechnologie (z. B. Brauen und Backen). Die ‚Neue Biotechnologie', die Gentechnik, bildet dann ein Element im Rahmen der ‚Modernen Biotechnologie'.

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 zusammengefasst (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.

Tabelle 5: Wirkungskategorien und dazu beitragende Substanzen

Wirkungskategorie	Beitragende Substanzen und Faktoren
Ressourcenbean-spruchung	Verbrauch erneuerbarer und nicht erneuerbarer Ressourcen (Erdöl, Erdgas, Kohle, Mineralien, Holz u.a.)
Treibhauseffekt	Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) 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 (NOx), Fluoride, Fluorwasserstoff, Chlorwasserstoff, Kohlenmonoxid (CO), Ruß u.a.
Ökotoxizität	Schwefeldioxid (SO_2), Stickoxide (NOx), 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 (NOx), Methan (CH_4), flüchtige organische Kohlenwasserstoffe (VOC) u.a.
Versauerung	Schwefeldioxid (SO_2), Stickoxide (NOx), 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 (NOx), Ammoniak (NH_3) u.a.
Naturraumbean-spruchung	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) Anwendung(en) 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 (PM_{10}-Risiko thematisiert ein mögliches Toxizitätspotenzial durch Partikel < 10 µm) in Ökobilanzen durch ihren Bezug auf das Gewicht und nicht auf die Partikelzahl bei Nanotechnologieanwendungen allein schon größenordnungsmäßig am Ziel vorbei.
2. In Ökobilanzen werden Risiken sowie die Wirkmächtigkeit von Anwendungen nicht betrachtet.

Aus unserer Sicht sollte deshalb ein umfassendes Konzept zur ökologischen Bewertung von Nanotechnologieanwendungen neben der Ökobilanz folgende weitere Bewertungsmethoden berücksichtigen:

- Risikoanalyse bzw. Gefahrenanalyse (hazard characterization)
- Toxikologische Analyse
- Analyse der Eingriffstiefe

Wenn vom versicherungsmathematischen Risikoverständnis ausgegangen wird (Risiko = Eintrittswahrscheinlichkeit x potentielle Schadenshöhe), ist die Risikoanalyse auf in statistischen Werten darstellbare Erfahrungen angewiesen (hilfsweise auf Modelle). Auch für die Risikoanalyse ergeben sich somit fast unlösbare Schwierigkeiten angesichts einer Technologie bzw. von Anwendungsbereichen, die sich erst in Entwicklung befinden, statistisch auswertbare Erfahrungen also in der Regel fehlen. In dieser Situation muss auf eine Gefährdungs- bzw. Gefahrenanalyse (hazard characterization) ausgewichen werden, wie sie in diesem Projekt im Zuge der ‚Charakterisierung der Nanotechnologie' vorgenommen wird.

Die toxikologische Analyse umfasst unter anderem eine Prüfung auf akute Toxizität, chronische Toxizität, ätzende Wirkung, Hautreizung, Augenreizung, kanzerogene Wirkung, Sensibilisierung (potenzielle Allergie auslösende 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, z. B. der grundlegende qualitative Unterschied zwischen dem Bearbeiten von Steinen und dem Spalten von Atomen (vgl. von Gleich & Rubik 1996).

Ein derartig zusammengesetztes Methodenset, dessen jeweilige Schwerpunktsetzung an den spezifischen Anwendungskontext angepasst werden muss, sollte einerseits die Abschätzung der mit bestimmten Anwendungen verbundenen Umweltbelastungen und -risiken im Vergleich zu bestehenden Anwendungen ermöglichen und andererseits die Analyse erschließbarer Ökoeffizienzpotenziale. Da die Informations- und Datenlage in den spezifischen Anwendungskontexten lückenhaft sowie die zur Verfügung stehenden Bearbeitungsressourcen

begrenzt sind, stößt die Anwendung dieses komplexen Methodensets allerdings an deutliche Grenzen.

Im Projekt wurde mit dieser Problematik dahingehend umgegangen, dass bei der Auswahl der konkreten Anwendungskontexte bewusst Schwerpunkte gesetzt wurden. Aus dem Spektrum an nanotechnologischen Anwendungen wurden einerseits vier Fallbeispiele mit potenziell erwartbaren Ökoeffizienzpotenzialen gezielt auf Grundlage einer Vorabsichtung und qualitativen Bewertung ausgewählt. Mögliche Risiko- und Gefährdungspotenziale nanotechnologischer Anwendungen wurden fokussiert am Thema Nanopartikel analysiert und diskutiert. Es wurden Hinweise aus der Wissenschaft im Hinblick auf potenzielle adverse Effekte von Nanotechnologien und insbesondere der Nanopartikel aufgenommen. Basis waren damit zum einen Untersuchungen zu den Wirkungen von Ultrafeinen Partikeln (UFP) auf die Gesundheit und zum anderen Untersuchungen zu Nanopartikeln aber auch zu Fullerenen und Nanotubes, die bislang vor allem in Tierversuchen durchgeführt worden sind. Untersuchungen zu den möglichen ökotoxikologischen Wirkungen liegen bislang kaum vor. Neben dem Hauptschritt der Analyse stellt diese Fallstudie im Wesentlichen einen Überblick über die wissenschaftliche Literatur und von Experteninterviews in diesem Feld dar. Beispielhaft wird die Diskussion zu TiO_2 –Nanopartikeln aufgegriffen.

3.3 Ansätze zur Technologiegestaltung

Die Thematisierung von Chancen / Nachhaltigkeitspotenzialen und Risiken ist Teil eines Prozesses, bei dem es meist um Innovationen, um deren Richtung, deren weitere Förderung oder Blockade geht. Ein hinreichend differenziertes Verständnis der Prozesse der Technikentwicklung und Innovation ist entscheidend für eine Erfolg versprechende Einflussnahme auf die Entwicklung und Gestaltung von Technologien.[15] Innovationen vollziehen sich in der Regel in sehr komplexen Akteursstrukturen, so genannten Innovationssystemen[16], wobei diese sowohl nach verschiedenen Typen als auch nach verschiedenen Handlungs- und Kommunikationsebenen unterschieden werden können, also z.B. sektorale oder betriebliche, regionale, nationale und internationale Innovationssysteme. Wenn Gestaltungsversuche Aussicht auf Erfolg haben sollen, ist auf jeden Fall neben dem Systemtyp und der räumlichen Handlungsebene auch die Zeitstruktur von Innovationsprozessen zu beachten.[17] 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 eines Technologiepfades (trajectory). Die Richtung der Entwicklung ist dann weitgehend pfadbestimmt. Richtungsänderungen und Alternativen haben es in solchen Phasen besonders schwer. Weiter reichende Einflussmöglichkeiten auf die Technologieentwicklung würden sich in diesem Modell auf die Phasen (Zeitfenster) vor dem Einstieg in den Pfad oder 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 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 abzeichnet.[18] 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.

---

[15] Diese Prozesse der Entstehung (Genese) bzw. Entwicklung von Technologien und Innovationen auszuleuchten, ist Gegenstand der Technikgeneseforschung (vgl. z.B. (Dierkes 1997)) sowie der Innovationsforschung (vgl. z.B. (Sauer & Lang 1999; Hübner 2002)).

[16] Vgl. (Nelson 1993; Freeman 1995); in der Technikgeneseforschung spricht man auch von Technikgenese-netzwerken.

[17] Mit Typisierungsversuchen vor dem Hintergrund von Fallbeispielen beschäftigt sich derzeit im Rahmen des vom BMBF geförderten Innovationsforschungsverbundes riw (Rahmenbedingungen für Innovationen zum Nachhaltigen Wirtschaften) (vgl. www.riw-netzwerk.de/ sowie (Hemmelskamp 2001)) das Projekt SUBCHEM: Gestaltungsoptionen für handlungsfähige Innovationssysteme zur erfolgreichen Substitution gefährlicher Stoffe. Die Bedeutung und Nutzbarkeit von Zeitfenstern untersucht das Projekt SUSTIME: Innovation, Zeit und Nachhaltigkeit - Zeitstrategien ökologischer Innovationspolitik.

[18] Das ‚Modell', das hier die Entwicklung von Innovationen und Technologien verständlich machen soll (vgl. insbesondere (Dosi 1982; Dosi 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'.(Kuhn 1975)

Alle beteiligten Akteure nutzen in diesen Innovationssystemen ihre spezifischen Einflussmöglichkeiten. Diese sind unterschiedlich weit reichend, aber in der Regel immer stark begrenzt. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Akteur (oder eine Akteursgruppe) im System den gesamten Technikgenese– bzw. Innovationsprozess zu steuern in der Lage wäre, ist vergleichsweise gering. Noch geringer dürfte die Wahrscheinlichkeit sein, solche Innovationssysteme quasi ‚von außen' zu steuern. Vielmehr noch: angesichts der Komplexität von Technikgenese- und Innovationsprozessen sind Eingriffe mit dem Anspruch auf ‚Steuerung' nicht nur als mehr oder minder aussichtslos, sondern geradezu als dysfunktional bzw. kontraproduktiv anzusehen. Damit soll nicht das viel zitierte ‚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 weder um die Apologie von technischer Eigendynamik noch von Technokratie oder Expertokratie. Politik und demokratische (partizipatorische) Einflussnahmen sollten sich allerdings nicht auf ‚Steuerung' kaprizieren, sondern eher – und das ist ja auch gängige Praxis – auf Beeinflussung und Gestaltung.

Im Rahmen der Studie wird von einem weiten Gestaltungsbegriff ausgegangen, der nicht nur die direkten Einflussmöglichkeiten beachtet, sondern auch die vermittelten und indirekten.

Die Studie fokussiert auf unterschiedliche Dimensionen der Gestaltungspotenziale und zwar einerseits auf informative und diskursive Verfahren und Ansätze, wie bspw. die Möglichkeiten der Gestaltung durch Leitbilder, die Möglichkeiten zur Erarbeitung von road maps und auf diskursive Verfahren wie das constructive technology assessment (CTA, vgl. Rip et al 1995). Des Weiteren wird insbesondere auf Instrumente abgehoben, welche die Informationsvermittlung in und zwischen den Unternehmen verbessern, bspw. durch Ökodesign, Leitfäden etc. Es werden staatliche Regulierungsansätze skizziert, die im Hinblick auf Nanotechnologien von Bedeutung sein können, beispielhaft wird dabei auf die neue Chemikalienregulierung (REACh – und deren Orientierung am Vorsorgeprinzip) verwiesen. Und schließlich geht es um die Definition und die Einhaltung von Rahmenrichtlinien und so genannten Leitplanken, innerhalb derer sich die Such- und Innovationsprozesse mehr oder minder frei bewegen können; die andererseits aber auch die optimale Ausnutzung der zahlreichen kleinen Handlungsspielräume der Akteure in den Innovationssystemen insbesondere auch der Unternehmen zulassen, die zunehmend mit potenziellen Handlungsfolgen konfrontiert werden[19]. Dabei wird insbesondere auch auf die neuen Ansätze der Umweltpolitik wie REACh oder die Ansätze der integrierten Produktpolitik fokussiert, die im Grundsatz wertschöpfungskettenübergreifend angelegt sind. Sie gehen zunehmend von geteilter Verantwortung aus und nehmen dabei die Unternehmen zumindest im Grundsatz stärker in die Pflicht.

[19] Beispielhaft seien die Probleme von ABB im Hinblick auf Schadensersatzforderungen auf Grund des Asbesteinsatzes benannt, aber auch die Aktivitäten der Versicherungen und Rückversicherungen, deren Sensibilität in dieser Hinsicht deutlich gewachsen ist. Als Beispiel sei die aktuelle Nanotechnologie-Studie der Swiss Re genannt (Hett 2004).

Neuere Ansätze zur Operationalisierung des Vorsorgeprinzips

Ein Leben ohne Risiken kann es nicht geben. Der Umbau zum nachhaltigen Wirtschaften ist auf Innovation angewiesen. Innovation und Risiko gehören untrennbar zusammen. Auch der Weg hin zum Nachhaltigen Wirtschaften ist voller Risiken. Die Tatsache, dass eine Technik, ein Verfahren, ein Stoff neu ist, begründet allein für sich noch keine weit reichenden Maßnahmen nach dem Vorsorgeprinzip. Dazu sind weitere Besorgnis erregende Gründe erforderlich. In vielen Fällen wird uns auch in Zukunft nichts anderes übrig bleiben, als bestimmte Dinge einfach ‚auszuprobieren'. Doch die Trial-and-Error-Methode, auf die wir so häufig zurückgeworfen sind, hat wie oben dargestellt ihre Grenzen. Sie ist nur für kleine - im großen Ganzen reversible –Schrittweiten angemessen.

Wenn bei bestimmten Projekten, Techniken und Eingriffen von vornherein und begründet damit gerechnet werden kann, dass sie globale und irreversible (nicht rückholbare) Auswirkungen haben werden, ist die Trial-and-Errror-Methode verantwortungslos. Die Einführung von FCKWs war ein solcher Fall. Das Vorsorgeprinzip muss ins Spiel kommen, wenn es um hohe Wirkmächtigkeiten geht, d. h. um extrem große qualitative Schrittweiten bei einzelnen Innovationen (hohe Eingriffstiefe) oder um sehr große Mengen bzw. quantitative Steigerungsraten vieler jeweils für sich kleiner Schritte (kumulative Effekte).

Als zentrale Leitlinie für die Umsetzung des Vorsorgeprinzips kann somit ‚Behutsamkeit' bei der Einführung von Innovationen bestimmt werden. Es geht dabei um Behutsamkeit hinsichtlich der Schrittweite bzw. Eingriffstiefe – hierfür liefert die Technikcharakterisierung die wesentlichen Informationen – sowie um Behutsamkeit bezüglich der eingesetzten Quantitäten und der Einführungsdynamik, hierfür liefern z. B. Produktionsmengen und deren Steigerungsraten die wesentlichen Informationen.

Im Entwurf für eine neue Chemikaliengesetzgebung der EU (REACh – Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals) finden sich beide Ansätze zur Operationalisierung des Vorsorgeprinzips. So bestimmen zum einen die Quantitäten bei der Einführung einer Innovation (Substanz und/oder Anwendung) weitgehend den jeweils erforderlichen risikoanalytischen Aufwand. Die Intensität der Chemikalienprüfung bzw. der Umfang der jeweils geforderten Datensätze bestimmt sich nach den jeweiligen Produktionsmengen. Für große Mengen bzw. Volumina werden die umfangreichsten Datensätze verlangt, für kleinere Mengen deutlich weniger und für die in der Forschung gebräuchlichen Volumina fast gar keine.

Auf der anderen Seite spielen aber auch die qualitativen Aspekte einer Innovation im Sinne der Eingriffstiefe eine weit reichende Rolle in diesem Neuansatz der Chemikalienregulation. Bestimmte Eigenschaften von Chemikalien wie z. B. Kanzerogenität, Mutagenität und Reproduktionstoxizität (CMR) determinieren schon sehr weitgehend die Erfordernisse des Risikomanagements und zwar noch vor einer genaueren Expositionsbetrachtung, als mindestens genauso wichtigem Element jeglicher Risikoanalyse. Ein besonders interessantes Beispiel für die Umsetzung des Vorsorgeprinzips ist darüber hinaus der geplante Umgang mit sehr persistenten und sehr bioakkumulativen Chemikalien (very persistent, very bio accumulative vpvb). Da allein durch diese Eigenschaften eine hohe irreversible Exposition sehr wahrscheinlich ist (und falls noch die Eigenschaft Mobilität dazu kommt zudem sehr rasch eine globale Exposition) müssen diese Stoffe einem staatlichen Zulassungsverfahren unterzogen werden und zwar ohne dass schon konkrete toxikologische oder ökotoxikologische

Verdachtsmomente vorliegen müssen. Hier folgen also Maßnahmen des Risikomanagements direkt aus der ‚Charakterisierung der Technologie', ohne dass schon ein wissenschaftliches Wirkungsmodell (ein (öko)toxikologischer Verdacht) oder gar eine abgeschlossene Risikoabschätzung vorliegen!

Leitbilder als Gestaltungsinstrumente in der Technikentwicklung

Mit Blick auf die Akteure in der Forschung und in der Entwicklung in den Forschungsinstitutionen und in den Unternehmen geht es 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 wie oben schon erwähnt Ergebnis der Technikgeneseforschung – gehören ohne Zweifel Leitbilder. Wenn es gelingt, die z. B. auch der Entwicklung der Nanotechnologie zugrunde liegenden (mehr oder minder expliziten) Leitbilder herauszuarbeiten und dann entweder auf die weitere Ausdeutung bereits bestehender Leitbilder oder über deren Veränderung oder gar über die Entwicklung neuer Leitbilder Einfluss zu nehmen, dann würde dieses Technologiefeld gegenüber dem öffentlichen und demokratischen Diskurs ein Stück weit geöffnet.

Erfolgreiche technische Innovationen basieren in der Regel auf einer Verknüpfung des Machbaren mit dem Wünschenswerten, also auf einer Verknüpfung von (oft neuen) technischen Möglichkeiten mit bisher unbefriedigten gegenwärtigen oder zukünftigen gesellschaftlichen Bedürfnissen 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 Wünschenswerte und das Machbare in ihnen verknüpft werden.[20] Deshalb gilt: Leitbilder beeinflussen die Technikentwicklung und mit Hilfe von Leitbildern lässt sich ggf. die Technikentwicklung gezielt beeinflussen. Die prinzipielle Wirksamkeit von Leitbildern wird kaum bestritten, auch wenn der empirische Nachweis, wie sie nun genau in bestimmten Technologielinien gewirkt haben, selten und wohl auch sehr schwierig ist.[21] Ob und inwiefern Leitbilder tatsächlich gezielt und quasi instrumentell zur Beeinflussung bzw. Gestaltung von Technologien eingesetzt werden können, ist noch unklarer (vgl. dazu z.B. Mambrey et al. 1995; Meyer-Krahmer 1997; Kowol 1998). Im strategischen Unternehmensmanagement wird dagegen oft von einem vergleichsweise erfolgreichen Einsatz verschiedener ‚management by' Ansätze berichtet, zu denen auch das ‚management by guiding principles' zu zählen ist, also dem Management mit Hilfe von Unternehmensleitbildern (vgl. Matje 1996; Blättel-Mink & Renn 1997; KPMG 1999; Bea & Haas 2001).

Wer mit Hilfe von Leitbildern Einfluss nehmen und gestalten möchte, muss versuchen, die Wirkungsvoraussetzungen und Wirkungsweisen *erfolgreicher Leitbilder* zu verstehen. Leitbilder

[20] Vgl. Dierkes u. a. 1992. Dort wird im Übrigen auch schon auf eine weitere interessante Parallele hingewiesen, angesichts der Unterscheidung zwischen dem ‚Machbaren' und dem ‚Wünschenswerten' 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 Bedürfnisse und zu lösender Probleme spielen Leitbilder eine wichtige Rolle.

[21] Vgl. (Hellige 1996) Besonders wichtig dürften Leitbilder für so genannte Basisinnovationen sein und zwar in den Phasen vor dem technologischen lock-in in einen Pfad und in Zeiten des Umbruchs bei bevorstehenden technologischen Pfadwechseln.

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, ihre Leitfunktion sowie der Bezug zu Wünschen und Machbarkeiten gleichermaßen; kurz gesagt ihre Resonanzfähigkeit im Bewusstsein der Akteure.[22] Die Bildhaftigkeit hat einen hohen 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' könnte dem gemäß als Leitbild zu komplex, zu abstrakt und zu defensiv sein. Zumindest im Hauptdiskurs, wie er in Rio mit den Themen Umwelt und Gerechtigkeit, Klimaschutz, Artenschutz und Ressourcenschutz begonnen wurde, ist das Nachhaltigkeitsziel noch zu sehr auf das bloße Überleben (Ressourcenverfügbarkeit, Tragekapazitäten) und noch zu wenig auf das ‚Gute Leben' bezogen. Es geht damit eher um das Notwendige und weniger um das Wünschenswerte. Wirksamer könnten 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' (Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages Schutz des Menschen und der Umwelt 1997). Zu abstrakt sind wohl auch die auf der strategischen Ebene vieldiskutierten Leitorientierungen wie Ressourcen-Effizienz, Suffizienz (Genügsamkeit) und Konsistenz (Einbettung des gesellschaftlichen Stoffwechsels in den natürlichen). Ein Beispiel für ein wirksames technikorientierendes Leitbild auf mittlerer Konkretisierungs- und Operationalisierungsebene ist ohne Zweifel das Konzept der Kreislaufwirtschaft. Auch Bionik (Vorbild Natur) und im englischsprachigen Raum green chemistry haben schon eine starke Wirkung entfaltet[23].

Meist wird davon ausgegangen, dass das Risikomanagement auf einer möglichst vollständigen Risikoabschätzung, also auf weit reichendem Wirkungswissen, aufbaut. Doch auch die Vorsorge und die Vermeidung von Risiken gehören zum Risikomanagement. Beide Strategien müssen auch bei unzureichendem Wissen über mögliche Gefahren und Wirkungsmodelle greifen. Leitbildorientiertes Gestalten wird hier als ein Beitrag zu einer Strategie der Vorsorge und der Risikovermeidung vorgeschlagen. Wir werden immer zu wenig wissen über die möglichen Folgen von Technologien bzw. von 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 für einen angemessenen ‚Umgang mit dem Nichtwissen' besteht somit darin, dem Versuch einer prospektiven Technikfolgenabschätzung (durch Technikcharakterisierung und konkreter Kontextbewertung) gleichberechtigt den Versuch einer leitbildorientierten Technikentwicklung an die Seite zu stellen. Das bedeutet, dass man das prinzipiell unlösbare Prognoseproblem der

---

[22] Bei den Punkten ‚Bildhaftigkeit', ‚Komplexitätsreduktion', ‚Strukturierung der Wahrnehmung', ‚Motivation' ‚Herstellung einer Gruppenidentität', ‚Koordinierung und Synchronisation','Bezug zur Realisierbarkeit' und zu ‚bevorzugten Instrumenten und idealtypischen Lösungswegen' fallen wieder zahlreiche interessante Überschneidungen zwischen dem Leitbildbegriff und dem Paradigmabegriff bei Thomas Kuhn auf (Kuhn 1975).

[23] (Vgl. Ahrens & Gleich 2002)

Technikfolgenabschätzung nicht nur dadurch angeht, dass die Ansätze und die Instrumentarien einer prospektiven Technikfolgenabschätzung weiter entwickelt werden, 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 Erfolg versprechendste Methode sein, um Prognose und ‚Realentwicklung' zur Deckung zu bringen. Klar ist, dass dies keine absolute Sicherheit erzeugen kann. Das viel zitierte Nullrisiko kann es nicht geben. Die aktive Verfolgung des Ziels ‚Risikominimierung' dürfte aber bessere Ergebnisse zeitigen, als der bisher allzu oft verfolgte Weg, bei dem man sich um dieses Ziel erst kümmert, wenn das Kind schon in den Brunnen gefallen ist.

4 Technologiespezifische Wirkungen der Nanotechnologie

4.1 Charakterisierung der Nanotechnologie

Der Umgang mit den neuen Möglichkeiten, die sich durch die Nanotechnologie eröffnen, ist derzeit noch recht widersprüchlich. Einerseits wird zu Recht die wissenschaftliche, technische und ökonomische Revolution, insbesondere das wirklich fundamental Neue der technischen Möglichkeiten betont. Andererseits wird nicht vergleichbar intensiv debattiert, dass derartige technische Revolutionen wohl kaum ohne Probleme, Neben- und Folgewirkungen stattfinden werden, und dass sich mit fundamental neuen technischen Möglichkeiten in der Regel auch neue Risikopotentiale eröffnen. Tatsächlich verhalten sich Objekte in der Nanodimension z. T. völlig anders als Objekte in der makroskopischen Welt. Zu diesem ‚neuen Verhalten' gehören auch für die Toxikologie und Ökotoxikologie so wichtige Eigenschaften wie Löslichkeit, Reaktivität, Selektivität, Katalyse sowie die Ausbreitung in den Umweltmedien, Mobilität und Durchgängigkeit durch Zellmembranen. Das bedeutet, dass wir aus unseren Erfahrungen aus der Makrowelt nicht unbedingt auf entsprechend erwartbares Verhalten in der Nanowelt schließen können[24]. Andererseits haben sich unsere Mechanismen der Gefährdungsabschätzung und Regulation noch nicht auf diese ‚neuen Qualitäten' eingestellt. Anlagen zur Herstellung von Nanopartikeln werden noch nach den klassischen Regeln und Gefährdungsabschätzungsverfahren des Arbeits- und Umweltschutzes aus der Makrowelt genehmigt[25].

Es lohnt sich also diejenigen Qualitäten etwas näher zu betrachten, welche die Nanotechnologie einerseits so interessant machen und in denen andererseits die Quellen für ungewollte Nebenwirkungen und Folgeprobleme ihres Einsatzes vermutet werden können. Es sind dies insbesondere i) die Wirkmächtigkeit und Eingriffstiefe der Nanotechnologie, ii) die mit Hilfe der Nanotechnologie erzielbaren ‚neuen Effekte' sowie iii) die Vielseitigkeit der Nanotechnologie.

Fangen wir mit den einfachsten Bausteinen an. ‚Nanopartikel' verhalten sich meist völlig anders, als größere Teilchen derselben Stoffzusammensetzung. So führt z.B. das drastisch größere Verhältnis von Teilchenoberfläche zu Teilchenvolumen in der Regel zu einer anderen chemischen Reaktivität und Selektivität. Derartige oberflächengebundene Effekte, zu denen insbesondere auch die katalytischen Effekte gehören, können sich in der Nanodimension sowohl qualitativ stark verändern als auch quantitativ enorm verstärken (neue und/oder stärkere Effekte). Zudem gewinnen in dieser Dimension Quanteneffekte stark an Bedeutung. Sie sind jedoch zu ihrer technischen Nutzbarkeit meist auf ‚wohldefinierte technische Umgebungen'

---

[24] So hat sich z. B. herausgestellt, dass Titandioxid, ein als Weißpigment weit verbreitetes Metalloxid, das in der Makro- und Mikrowelt als ‚inert', d. h. als chemisch und biologisch nicht reaktiv gilt, in der Nanopartikelform durchaus chemisch aktiv werden kann (vgl. (Jefferson & Tilley 1999)). Bleibt zu erwähnen, dass nanopartikuläres TiO_2 schon seit geraumer Zeit in großem Stil in Sonnenschutzcremes mit besonders hohem Lichtschutzfaktor eingesetzt wird. Aber auch, dass sich im Tierversuch die toxischen und entzündlichen Wirkungen von ultrafeinem TiO_2 durch einen ‚hydrophoben Überzug' deutlich verringern ließen (vgl. Höhr & Steinfartz 2001).

[25] Vgl. dazu die gerichtlichen Auseinandersetzungen anlässlich der Genehmigung einer Anlage der Bayer-Tochter H.C. Starck in Laufenburg am Hochrhein. Zu weitergehenden Überlegungen, die auch derzeit noch nicht realisierbare Entwicklungen der Nanotechnologie wie Nanoroboter mit einbeziehen, vgl. (Forrest 1999) (Reynolds 2001)

angewiesen. Insofern sind unerwartete Umweltwirkungen wohl eher unwahrscheinlich. Man muss auf der Basis von Quanteneffekten allerdings umgekehrt auf die Wirkung von ‚Verunreinigungen' und ‚Störungen' in den hochdefinierten Systemen als relevante Quellen für ‚Fehler' und ‚technisches Versagen' achten, mit womöglich sehr weit reichenden Folgen (Frage nach Eigensicherheit und Fehlerfreundlichkeit im Anwendungssystem). Derzeit scheint noch eine sehr von makroskopischen und ‚mechanischen' Denken geprägte Nano-Vision eines kontrollierten und systematischen Aufbaus von Materie bzw. Objekten vorzuherrschen, sozusagen Baustein um Baustein, Atom um Atom, Molekül um Molekül. Viel faszinierender sind allerdings die ‚Selbstorganisationsprozesse', die auf dieser Ebene ablaufen, bei denen sich Moleküle wie von einer unsichtbaren Hand gesteuert selbst systematisch anordnen bzw. ausrichten. Wenn es in Zukunft gelänge, sich mit diesen Selbstorganisationsprozessen technisch zu ‚verbünden', könnte dies zu einer enormen Einsparung an Stoffen, Energie, aber auch an ohnehin kaum zu leistender ‚externer Steuerungsarbeit' führen. Auf der anderen Seite könnten derartige Selbstorganisationsprozesse womöglich aber auch in unkontrollierbare, sich verselbständigende Prozesse münden.

Für eine Technologiecharakterisierung der Nanotechnologie sind aber auch noch weitere Punkte von Bedeutung. Nanopartikel sind in der Regel so klein und leicht, dass sie in der Luft schweben bleiben, also nicht zu Boden sinken. Die Partikel können aufgrund ihrer Kleinheit extrem mobil sein, sie können in der Luft oder im Wasser weite Strecken zurücklegen Lecoanet & Wiesner 2004; Dionysiou 2004), sie können im Körper von Organismen die Blut-Hirnschranke und Zellmembranen durchqueren, ja sogar direkt über den Riechnerv ins Gehirn gelangen (Oberdörster et al 2002; 2004). Zudem sind sie kaum kontrollierbar, sie sind nicht unmittelbar wahrnehmbar und auch wissenschaftlich ist ihre Anwesenheit und ggf. ihre ‚Verantwortlichkeit' für bestimmte Effekte nicht einfach nachweisbar. Auf der anderen Seite dürften gegenläufige Effekte im Bereich der Nanopartikel ihrer unkontrollierten Ausbreitung auch klare Grenzen setzten. So spricht einiges dafür, dass sie sich durch Adhäsions- und Kohäsionsprozesse in der Regel schnell an andere Objekte anlagern bzw. sich per Agglomeration zu größeren Einheiten verbinden[26]. Dadurch würden – sozusagen als Beitrag zur Eigensicherheit – ihre ‚Nanoeigenschaften' teilweise schnell wieder aufgehoben.

Nicht zuletzt sind im Zuge einer Technologie- bzw. Produktlebenszyklusanalyse auch noch die Wege genauer zu betrachten, auf denen die nanostrukturierten Materialien erzeugt werden. Es stellt sich die Frage, inwieweit hinter ihrer Erzeugung ein sehr großer Aufwand steht zur Herstellung der geforderten ‚chemischen Reinheit' der ggf. sehr seltenen bzw. sehr spezifischen chemischen Elemente oder der erwünschten definierten Teilchengröße und ob sich dieser Aufwand ökonomisch und ökologisch auch tatsächlich ‚lohnt' bzw. ‚amortisiert', wenn man den ganzen Produktlebenszyklus betrachtet. Die Recyclingmöglichkeiten sind zu beachten, insbesondere aber auch die Qualität der eingesetzten Stoffe. Werden toxische oder ökotoxische Stoffe oder Stoffe mit einem noch unbekannten Wirkungsspektrum in diesen Bereichen eingesetzt? Werden seltene natürliche Stoffe in einem Umfang ‚mobilisiert' und freigesetzt, so dass man mit problematischen Wirkungen für den Stoffwechsel von Organismen oder von Ökosystemen rechnen muss?

---

[26] Diese Tendenzen der Nanopartikel erschweren im Übrigen auch erheblich das ‚technische Handling', ein Phänomen, das als technisches Problem der so genannten ‚stickiness' schon von der Mikrosystemtechnik her bekannt ist.

Von diesen Grundcharakteristika der Nanotechnologie (Nanodimension und damit verbundene Kleinheit, Mobilität, veränderte Reaktivität und Selektivität, katalytische Effekte, Löslichkeit, Quanteneffekte sowie den dort möglicherweise ablaufenden Selbstorganisationseffekten) können nun - unter zusätzlicher Beachtung weiterer Aspekte wie Herstellungsaufwand und Stoffqualitäten - in einem nächsten Schritt mögliche positive Effekte und Potenziale bzw. mögliche und erwartbare problematische Wirkungen abgeleitet werden (vgl. Tabelle 6).

Das Prinzip der Selbstorganisation ist zu unterscheiden von der absoluten technischen Kontrolle über die ‚Bausteine der Materie', bei der die Materie sozusagen ‚Atom bei Atom' durch technisch kontrollierte Eingriffe gestaltet wird. Die letztgenannten Möglichkeiten scheinen noch vergleichsweise gering zu sein. Derartige erfolgreiche technische Kontrollmöglichkeiten sind zudem meist auf bestimmte, technisch nur aufwendig realisierbare Umgebungsbedingungen angewiesen (Reinraumtechnik?) und damit womöglich in eine „eigensichere Umgebung" eingebettet.

Tabelle 6: Nanoqualitäten und dadurch erwartbare positive Effekte und Potenziale bzw. problematische Wirkungen

Nanoqualität		+ positive Effekte und Potenziale / - Probleme und Gefährdungspotenziale	Nano-Beispiel	Bewertungsansätze
Kleinheit und Mobilität der Partikel	+	Gezielte Nutzung für ressourcen- / ökoeffiziente Technik	Offener Umgang mit erzeugten Nanopartikeln*	Ökobilanz, Ausbreitungs- und Expositionsmodelle, (öko-)toxikologische Prüfung, Tierversuche, Epidemiologie
	-	Staubend, mobil über den Luftpfad, nicht absinkend und damit in der Luft schwebend verbleibend Lungen- bzw. alveolengängig Durchgang durch Zellmembranen, Blut-Hirn-Schranke Mobilität, Persistenz und Löslichkeit als Indizien für Bioakkumulation und Umweltgefährdung		
Definierte Korn-/ Schicht-größen und Reinheitsgrade	+	Gezielte Nutzung für ressourcen- / ökoeffiziente Technik		Ökobilanz, Entropiebilanz, Frage nach ‚ökologischer Amortisierung'
	-	Erhöhter Herstellungsaufwand, höhere Stoff- und Energieströme, erhöhter Ressourcenverbrauch		
Stoffqualität	+	Möglicher Ersatz gesundheits- und umweltgefährdender Stoffe		Toxikologie, Ökotoxikologie, Verhältnis zwischen ‚natürlichen' und ‚anthropogenen' Stoffumsätzen
	-	Gesundheits- und Umweltgefährdung durch problematische (seltene) Elemente oder Stoffgruppen im umweltoffenen Einsatz		
Adhäsion, Kohäsion, Agglomeration	+	‚Eigensicherheit' durch Tendenz zur Adhäsion, Kohäsion und Agglomeration von Nanopartikeln		Ausbreitungs- und Expositionsmodelle, (öko-)toxikologische Prüfung, Tierversuche, Epidemiologie, Atmosphärenchemie, Risikoanalyse
	-	Verhalten ‚freigesetzter' Nanopartikel oder Nano-Fasern in der Umwelt, Mobilisierende und einschleusende Wirkung von Nanopartikeln auf Toxine oder Schwermetalle (Huckepack)		

Neue chemische Effekte, verändertes Verhalten: **Löslichkeit** **Reaktivität** **Selektivität** **Katalyse** **Phasenübergang**	+	Nutzung des veränderten Verhaltens für ressourcen- / ökoeffiziente Technik, z.B. Nutzung der katalytischen Wirkungen für effizientere chemische Prozesse oder im Umweltbereich	Nanotubes als Katalysator in der Styrolsynthese* Autokatalysator Nanolacke* Neuartige Verbundwerkstoffe	Ökobilanz Ausbreitungs- und Expositionsmodelle (Öko-)toxikologische Prüfung z.B. auch auf Allergie / Sensibilisierung Tierversuche, Epidemiologie Atmosphärenchemie Risikoanalyse
	-	Die große spezifische Oberfläche von Nanopartikeln führt zu z. T. völlig unerwarteten Veränderungen bei : Löslichkeit (wichtig für Aufnahme in Organismen und Ausbreitung in Umweltmedien), Reaktivität (überraschende technische, chemische [Explosivität] und toxische Effekte), Selektivität (überraschende toxische Effekte), Katalytische Wirkung verändert und/oder verstärkt (überraschende chemische und toxische Effekte), Photokatalytische Wirkung (Atmosphärenchemie?), Temperaturabhängigkeit von Phasenübergängen (überraschende chemische, technische und ökotoxische Effekte)		
Neue physikalische Effekte, verändertes optisches, elektrisches, magnetisches Verhalten	+	Die relativ geringe Anzahl von Atomen in Nanopartikeln hebt den quasi kontinuierlichen Zustand auf und führt zu abweichenden optischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften. Gezielte Nutzung der Effekte bzw. veränderten Eigenschaften für ressourcen- / ökoeffiziente Technik, z.B. GMR-Effekt, Tyndell-Effekt, Quanten-Effekte, Tunneleffekt	CMR-Sensoren Nanotubes in FED-Displays* OLED* Weiße LED*	Ökobilanz Für technische Systeme: FMEA Fehlerbaumanalyse
	-	Meist auf hochreine und hochdefinierte ‚technische Umgebungen' angewiesen. Dort sind (bei Nichteinhaltung) Überraschungen erwartbar (technisches Versagen). In der freien Natur dürften Nebenwirkungen z.B. des Quanteneffekts in Organismen und Ökosystemen weniger wahrscheinlich sein		
Selbstorganisation	+	Gezielte Nutzung für ressourcen- / ökoeffiziente und konsistente Technik	Self Assembled Monolayers, Biomimetische Materialsynthese	Risikoanalyse Bewertung der Eingriffstiefe Ökobilanz Umweltverträglichkeitsprüfung Szenariotechnik
	-	Problematik des schleichenden Übergangs von Selbstorganisation zu Selbstreplikation in der Nano-Biotechnologie Gefahr unkontrollierter Entwicklungen	Zukunftsvision: selbst-replizierende und sich selbst vermehrende Nano-Bio-Einheiten	

Quelle: verändert nach Gleich (2004) und Steinfeldt (2003)

Die mit * gekennzeichneten Beispiele werden in Fallstudien (s. Kap. 5) vertiefend untersucht.

4.2 Beschreibung und Bewertung von nanotechnologischen Herstellungsverfahren

Neben dieser Charakterisierung der Nanotechnologie auf Technologieebene sollen als zweite Stufe der Charakterisierung die bisher relevanten nanotechnologischen Herstellungsverfahren differenzierter untersucht werden.

Auf Grund des Querschnittcharakters der Nanotechnologie findet sich in der Literatur eine enorme Bandbreite über mögliche Herstellungsverfahren, um nanoskalige Produkte zu erzeugen. Einerseits können sich die Produkte in ihrer nanoskaligen Basisstruktur unterscheiden, wie punktförmige Strukturen (z.B. Nanokristalle, Nanopartikel, Moleküle), linienförmige Strukturen (z.B. Nanoröhren, Nanodrähte, Nanogräben), Schichtstrukturen (Nanoschichten) sowie weitere Strukturen wie Nanoporen etc. Andererseits können Materialien aus der Gasphase, aus der flüssigen Phase und aus Festkörpern so hergestellt werden, dass sie zumindest in einer Dimension nanoskalig sind. Eine Übersicht über ausgewählte nanotechnologiebasierte Produkte mit Anwenderstatus sind im Anhang (Tabelle 42) aufgeführt.

Wertet man nun aber die vielfältigen schon in der Anwendung bzw. noch in der Entwicklung befindlichen nanotechnologischen Produkte hinsichtlich ihrer Herstellungsverfahren aus, ist bisher aus unserer Sicht für die meisten Produkte eine Zuordnung zu folgenden sieben wichtigen Prozesstechnologien möglich:

- Gasphasenabscheidung
- Flammenverfahren
- Sol-Gel-Verfahren
- Fällung
- Molekulares Prägen
- Lithographie
- Selbstorganisation

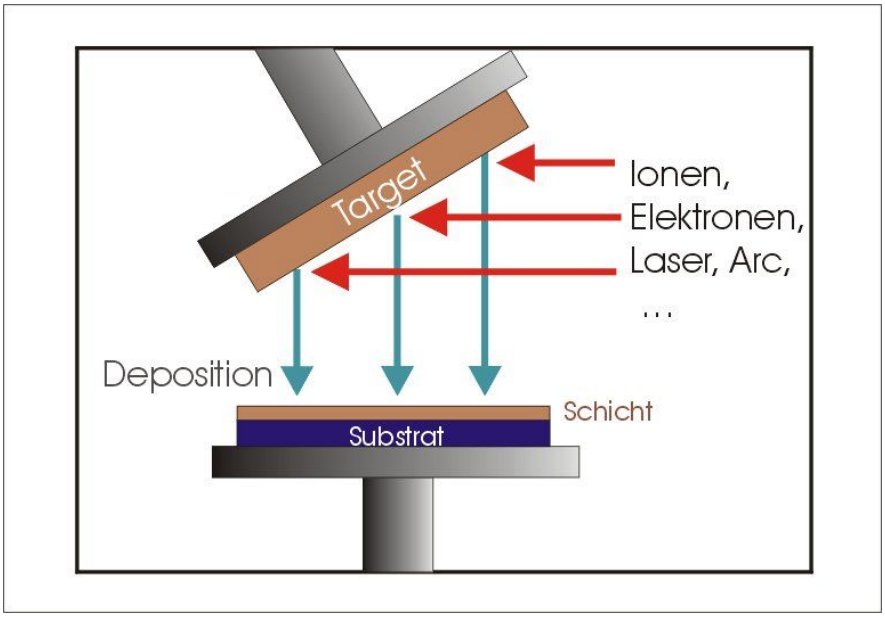
4.2.1 Gasphasenabscheidung (CVD, PVD)

Die Gasphasenabscheidung ist eine wichtige Verfahrensklasse, die hauptsächlich zur Herstellung von dünnen Schichten aus gasphasigen Ausgangssubstanzen eingesetzt wird , aber auch zur Abscheidung von monodispersen Pulvern, Quantenpunkten usw. verwendet wird. Die Gasphasenabscheidung lässt sich grob in chemische (CVD = Chemical Vapour Deposition) und physikalische (PVD = Physical Vapour Deposition) Gasphasenabscheidung unterteilen. Eine Gemeinsamkeit aller Verfahren dieser Klasse liegt darin, dass die Ausgangsstoffe aus der Gasphase zur Substratoberfläche transportiert werden und dort eine dünne Schicht bilden (Köhler 2001).

Beim PVD wird festes Ausgangsmaterial durch physikalische Einwirkungen (z.B. thermische Energie) im Vakuum in die Gasphase überführt. Die Teilchen kondensieren auf einem gegenüber angebrachten Substrat und bilden dort einen dünnen Film. Die verschiedenen

Verfahren des PVD unterscheiden sich durch das Aufdampfverfahren, d.h. der Art wie das zu verdampfende Material aufgeheizt wird. Bei der konventionellen Methode, dem thermischen Verdampfen, wird das Ausgangsmaterial in einem Tiegel im Hochvakuum erhitzt bis es verdampft. Weitere Methoden sind das Sputtern, Arc-Verdampfen, die Molekularstrahl-Epitaxie (MBE) oder das Ionenplattieren (Fraunhofer IPA/IST & BAM 2004b). Den prinzipiellen Ablauf des PVD-Verfahrens zeigt Abbildung 5.

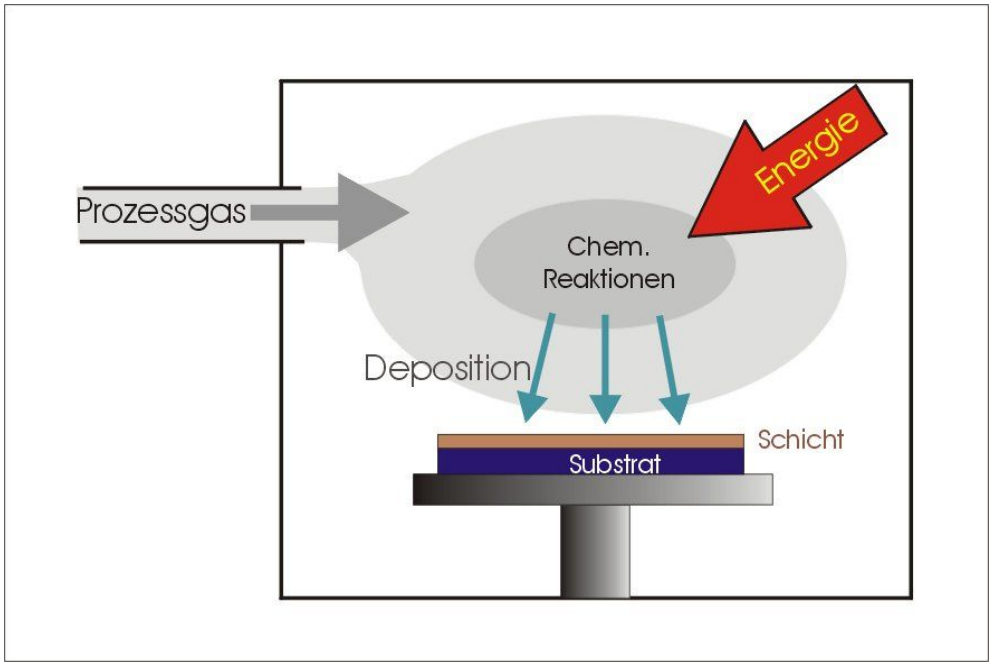
Abbildung 5: Prinzip des PVD-Verfahrens



Quelle: Fraunhofer IPA/IST & BAM (2004b)

CVD umfasst alle Verfahren, die über eine chemische Reaktion der gasförmigen Ausgangsstoffe auf oder in der Nähe des Substrats zu einer Abscheidung fester Produkte führen. Das gasförmige Vorgängermaterial wird in eine Reaktionskammer geleitet und dort durch Energiezufuhr chemisch zerlegt. Die Energiezufuhr erfolgt entweder thermisch, durch Anregung der Reaktanden in einem Plasma oder durch elektromagnetische Strahlung. Ein Teil der gebildeten Zwischenprodukte wird am Substrat absorbiert, wo sich durch eine heterogene Reaktion ein Film bildet. Die nicht am Substrat abgeschiedenen flüchtigen Reaktionsprodukte werden über das Vakuumsystem abgepumpt (Fraunhofer IPA/IST & BAM 2004a). Wichtige CVD-Verfahren sind: thermisches CVD, Plasma-aktivierte CVD (PACVD), Photo-CVD sowie das katalytische CVD, das zunehmend bei der Herstellung von Kohlenstoff-Nanoröhren angewendet wird.

Abbildung 6: Prinzip des CVD- Verfahrens



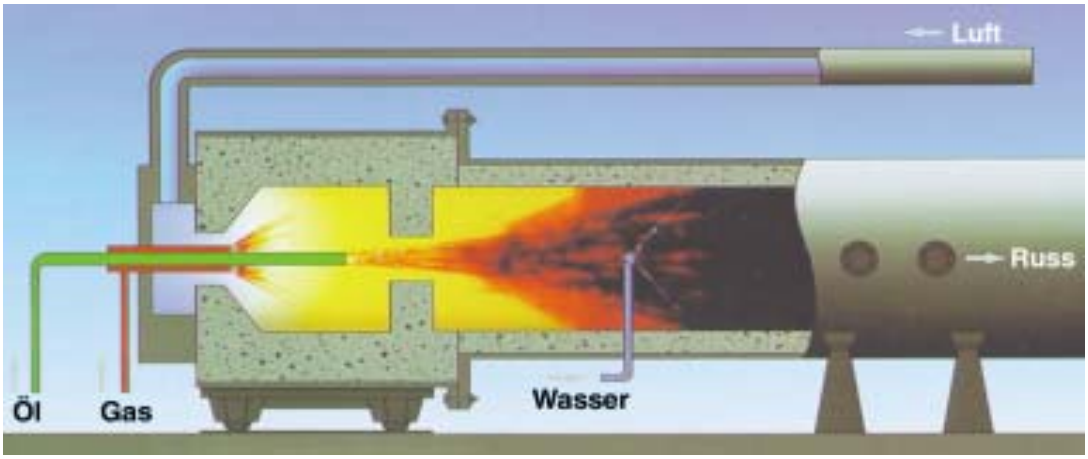
Quelle: Fraunhofer IPA/IST & BAM (2004a)

4.2.2 Flammenverfahren (Flame-Assisted Deposition)

Bei den verschiedenen Flammenverfahren werden Nanopartikel durch die Zersetzung von flüssigen oder gasförmigen Ausgangsstoffen in einer Flamme gebildet (Maichin 2002). Zu den bekanntesten Verfahren zählen die Flammen-Sprüh-Pyrolyse, die Flammenhydrolyse (Aerosil-Verfahren) und die Flammensynthese. Als Brennstoffe dienen mit Argon verdünnter Wasserstoff oder Kohlenwasserstoffe. Ein wesentlicher Vorteil dieser Verfahren ist darin zu sehen, dass die Flamme bereits die notwendige Energie einbringt. Dadurch sind feinkörnige Pulver ohne aufwendige Vor- und Nachbehandlung herstellbar. Darüber hinaus kann bei der Herstellung von Oxiden auf aufwendige Vakuumanlagen oder Reaktoren verzichtet werden.

Durch Variation der Konzentration der Reaktionspartner, der Flammentemperatur und der Verweilzeit der Ausgangsstoffe in der Flamme lassen sich die Teilchengröße und die Kristallstruktur beeinflussen. Mit diesen Parametern lässt sich jedoch die Partikelgröße nur ungenau definieren. Trotzdem erfreuen sich diese Verfahren schon weitläufiger industrieller Anwendung, aufgrund ihrer einfacheren Technologie. Die Produktion von Nanopartikeln mit diesen Verfahren ist schon seit einigen Jahren Standard in der chemischen Industrie.

Abbildung 7: Darstellung eines Reaktors für die Herstellung von Carbon Black®.

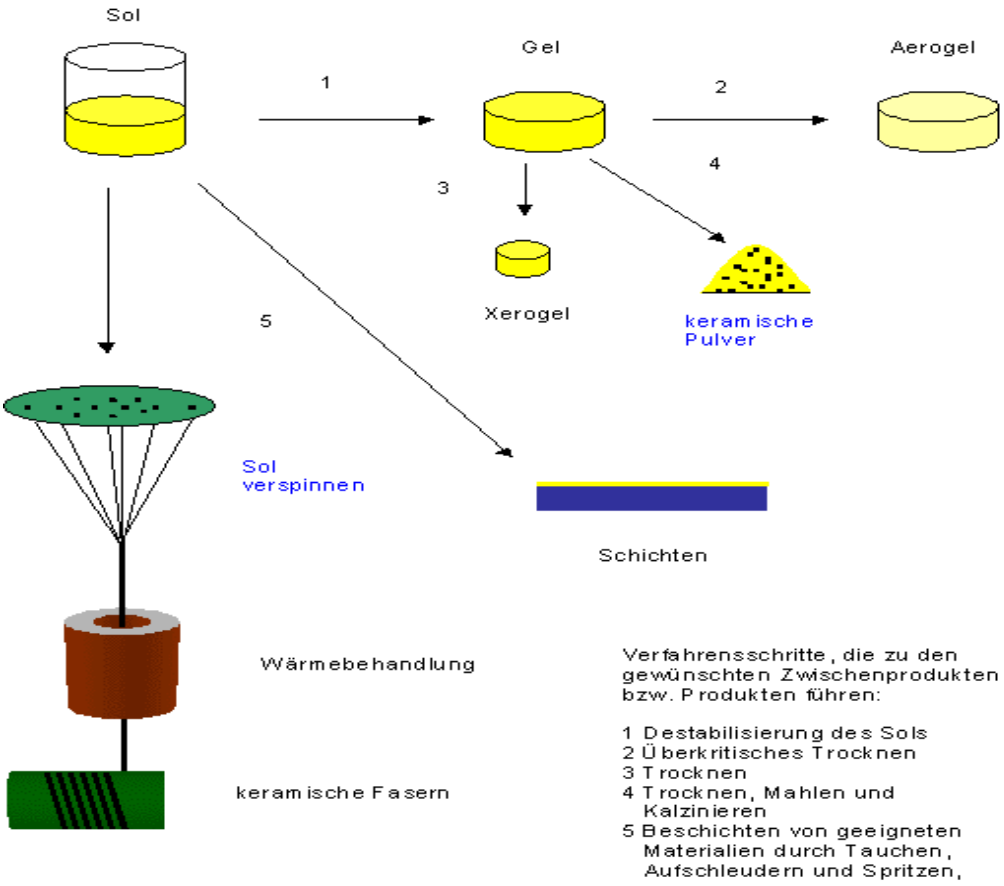


Quelle: Kühner (1999)

4.2.3 Sol-Gel-Verfahren

Das Sol-Gel-Verfahren stellt ein außerordentlich wichtiges nasschemisches Verfahren zur Herstellung verschiedenster nanotechnologischer Produkte wie Pulver, dünne Schichten, Aerogele oder Fasern dar (Abbildung 8).

Abbildung 8: Anwendungsbeispiele für Produkte des Sol-Gel-Verfahrens



Quelle: IMST (2002)

Im ersten Schritt werden in der Sol-Lösung durch die Reaktion der flüssigen Komponenten nanoskalige Kolloide bzw. Nanopartikel gebildet. Anschließend erfolgt die Überführung des Sols in den Gelzustand durch zwei wesentliche Methoden: Die primär im Sol gebildeten Moleküle können entweder über chemische Reaktionen weiter- und zusammenwachsen, bis sie ein einziges Raum füllendes Makromolekül darstellen, oder es werden partikuläre Sole eingedickt, bis sich ein durch elektrostatische Abstoßungskräfte stabilisiertes Gel bildet. Durch Destabilisierung der Sole bzw. Gele lassen sich anschließend Nanopartikel definierter Größe ausfällen. Eine der viel versprechendsten Möglichkeiten bietet der Sol-Gel-Prozess dadurch, dass sich organische und anorganische Komponenten durch ihn verbinden lassen, um organisch modifizierte Produkte zu erzeugen. Ein weiterer Vorteil ist die Unkompliziertheit des Verfahrens; die Herstellung kann im Reagenzglas erfolgen (IMST 2002).

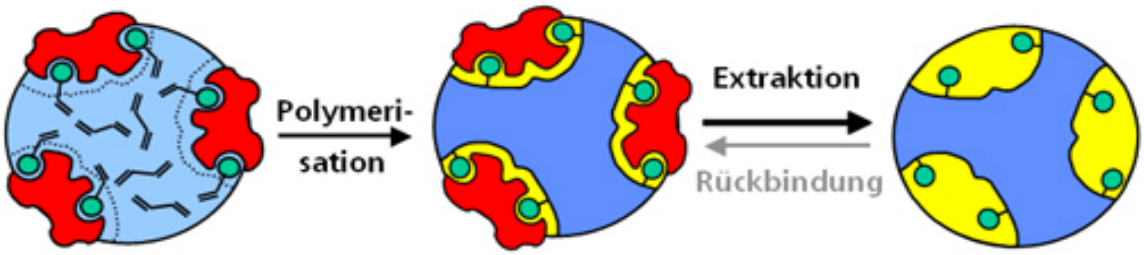
4.2.4 Fällung

Die Fällung ist ein chemisches Verfahren, bei dem aus Lösungen Nanopartikel gewonnen werden. So lassen sich beispielsweise metallische Nanopartikel herstellen. Der abzuscheidende Stoff ist in einem Lösungsmittel – in der Regel Wasser – dispergiert. Durch Zusatz geeigneter Substanzen wird der Fällungsvorgang ausgelöst. Entweder findet dadurch eine Änderung in der Zusammensetzung des Lösungsmittels statt, so dass der auszufällende Stoff in diesem schwer löslich bzw. unlöslich wird, oder es wird eine neue Verbindung gebildet, deren Löslichkeit deutlich geringer als die Konzentration in der Lösung ist. Die Bildung der Nanopartikel verläuft schrittweise über kristalline Keime oder amorphe Primärpartikel bis zu Partikel-Agglomeraten. Zu gewährleisten ist dabei, dass die Keimbildungs- bzw. Nukleationsrate größer als die Wachstumsgeschwindigkeit der Teilchen ist. Bei kontinuierlicher Fällung können Partikelgrößenverteilung und Struktur der Agglomerate verfahrenstechnisch durch die richtige Wahl der Strömungsbedingungen und der Partikel-Partikel-Wechselwirkungen eingestellt werden (Schwarzer 2001).

4.2.5 Molekulares Prägen

Bei diesem Verfahren wird ein hoch vernetztes Polymer in Anwesenheit eines Templatmoleküls synthetisiert. Unter einem Templat versteht man hierbei ein Molekül, das durch seine definierte Geometrie das Wachstum, die Struktur und die Anordnung des darauf aufbauenden Systems kontrolliert. Die funktionellen Gruppen des Monomers werden mit denen des Templats räumlich fixiert und so die äußere Form des Templats nachgebildet. Anschließend werden die Templatmoleküle durch Extraktion entfernt. In dem auf diese Weise gebildeten Polymernetzwerk bleiben Hohlräume mit Bindungsstellen mit definierter räumlicher Anordnung zurück. Das zu selektierende Gastmolekül, das mit dem Templat identisch ist oder ihm in der Struktur stark ähnelt, kann molekular erkannt und gebunden werden.

Abbildung 9: Prinzip des Molekularen Prägens



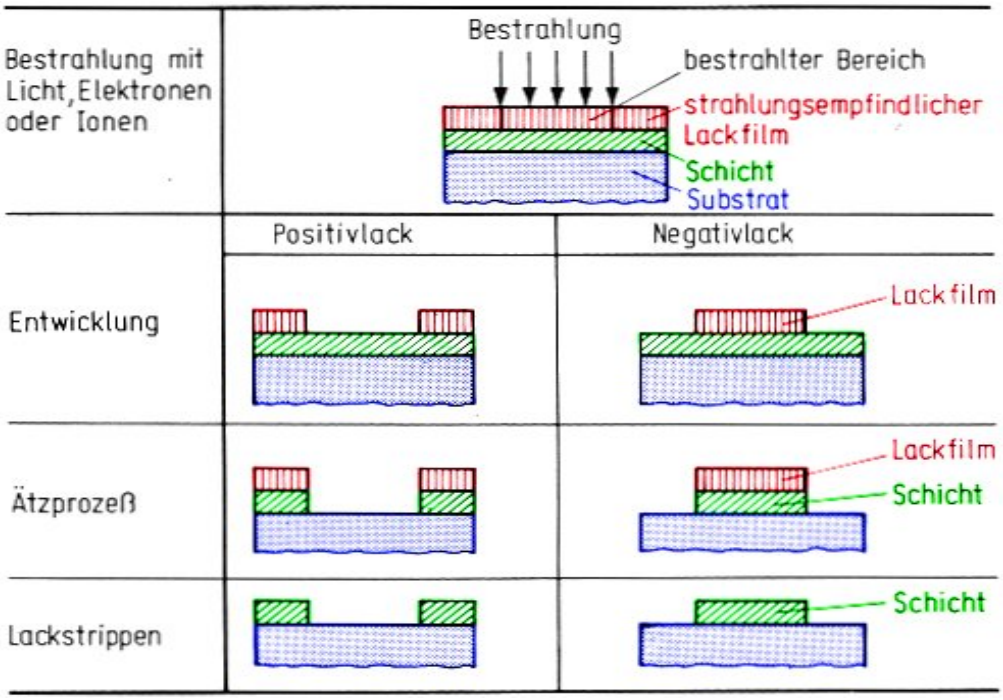
Quelle: IGVT 2003

Mit diesem Verfahren ist es z.B. möglich, einzelne Moleküle aus einem Gemisch zu isolieren (IGVT 2003).

4.2.6 Lithographie

Die zur Herstellung von Nanostrukturen eingesetzten Lithographieverfahren lassen sich in zwei Klassen einteilen: Bei den parallelen Methoden wird die gesamte Oberfläche gleichzeitig strukturiert, wohingegen die Struktur bei den seriellen Methoden sukzessive eingeschrieben wird (Cerrina & Marrian 1996). Zu den parallelen Strukturierungsmethoden gehören optische Lithographie, Elektronenstrahl- und Ionenstrahlprojektionsverfahren, Atomlithographie sowie Röntgenlithographie. Serielle Verfahren sind das Elektronenstrahl- und Ionenstrahlschreiben, sowie die Rastersonden-Lithographie.

Abbildung 10: Schematische Darstellung des Lithographieprozesses mit anschließendem Ätzprozess



Quelle: Rossi (2000)

Die optische Lithographie ist das am meisten verwendete Verfahren zur Herstellung von Nanostrukturen überhaupt. Die mit diesem Verfahren erzeugten Halbleiterstrukturen bilden letztlich die Basis der gesamten Elektronikindustrie. Bei der optischen Lithographie werden Licht- oder Röntgenstrahlen durch Masken mit bestimmter Struktur auf eine mit Photolack überzogene Probenoberfläche projiziert. Nach der Entwicklung des Lacks wird die abgebildete Struktur in der Regel durch Ätzprozesse auf das Substrat übertragen. Die kleinstmögliche Größe der erzielbaren Strukturen hängt dabei von der Wellenlänge des eingesetzten Lichts ab.

Bei der Elektronenstrahl-Lithographie kann sowohl direkt mit einem fokussierten Strahl auf das Substrat geschrieben werden (Elektronenstrahlschreiben), als auch durch eine Maske die Struktur vorgegeben werden (Elektronenstrahl-Projektions-Verfahren). Beim Elektronenstrahlschreiben wird ein dünner Elektronenstrahl mit einem Durchmesser im Nanometerbereich über die mit Photolack beschichtete Substratoberfläche geführt. Die Struktur wird in den Photolack eingeschrieben und kann wiederum durch Ätzung herausgebildet werden. Beim Elektronenstrahl-Projektions-Verfahren werden die Elektronen an einer transparenten Folie aus Siliziumnitrid abgelenkt und somit gezielt auf das Substrat gestreut.

Die Ionenstrahllithographie besitzt einen sehr ähnlichen Ablauf wie die Elektronenstrahl-Lithographie, jedoch ist hier auch das direkte Strukturieren eines Werkstücks, ohne Photolack und Ätzen möglich.

4.2.7 Selbstorganisation

Unter Selbstorganisation kann man im eigentlichen Sinne kein technisches Verfahren verstehen. Vielmehr ist es ein molekulares Bauprinzip nach dem auch Wachstums- und Strukturbildungsprozesse in der Natur ablaufen. Bei diesem Prozess fügen sich einzelne Bausteine, wie Moleküle, Atome oder Partikel, zu funktionierenden Einheiten zusammen. Der Ordnungsprozess ist bedingt durch Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bausteinen (Eickenbusch et al. 2003). Zentrales Merkmal der Selbstorganisation ist dabei, dass die Informationen zur Strukturbildung in den einzelnen Bausteinen gespeichert sind. Die größte Rolle spielen hier bestimmte geometrische Formen, die es den Bausteinen nur erlauben sich in bestimmten Positionen anzuordnen.

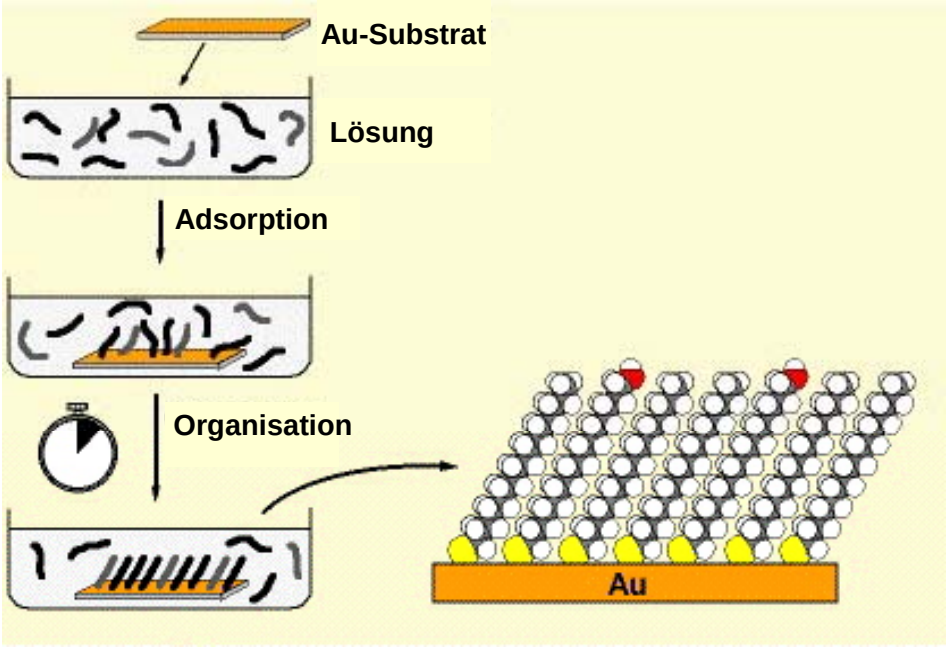
Ein Verfahren zur Erzeugung von selbstorganisierten Strukturen, das bereits in marktfähigen Produkten verwendet wird, stellt die selbstorganisierte Monoschicht (Self-Assembled Monolayer) dar.

Self-Assembled Monolayers (SAM):

Langkettige organische Moleküle bilden durch Adsorption auf oxidischen und metallischen Oberflächen dicht gepackte monolagige Strukturen. So lassen sich ultradünne Schichten herstellen, deren Struktur durch die Anordnung der Substratatome vorgegeben ist, da die angelagerten Moleküle eine chemische Bindung mit diesen eingehen (vgl.

Abbildung 11). Diese Schichten werden als selbstorganisierte Monolagen bezeichnet (Jelinski 1999). Tragen die Moleküle, die in der Monolage abgeschieden werden, neben der funktionellen Gruppe für die Bindung zum Substrat eine weitere Funktionalität am anderen Ende, so lässt sich diese beispielsweise als Templat zur selektiven Abscheidung von anorganischen Materialien nutzen.

Abbildung 11: Herstellung von selbstorganisierenden einlagigen Schichten



Quelle: (Engquist 1996)

4.2.8 Qualitative Bewertung von nanotechnologischen Herstellungsverfahren

Im Folgenden werden die beschriebenen Prozesstechnologien hinsichtlich ihres technologischen und damit in Verbindung stehenden energetischen Aufwandes sowie hinsichtlich ihrer Risikopotenziale für die Freisetzung von nanostrukturierten Materialien qualitativ bewertet.

Tabelle 7: Bewertung von nanotechnologischen Verfahren

	Ausgangs-material	**Verfahren**				**Produkt**
	Medium	**Anlagenaufwand**	**Energieaufwand**	**Stoffumsatz**	**Potenzial für Freisetzung von Nanopartikelemissionen**	**Potenzial für Freisetzung von Nanopartikelemissionen**
Gasphasen- CVD abschei- PVD dung	gasförmig	Technisch sehr aufwändiges Verfahren; Vakuumanlagen; Hohe Reinraum-anforderungen	**Sehr hoch,** da hoher fixer Energieauf-wand (Reinraum, Vakuum) und hoher Energieaufwand abhängig von Verdampfungs-temperatur des Ausgangsstoffs	Mengendurch-satz: gering Stoffumsatz: nahe 100% Ausbeute: mittel	Bezogen auf Arbeitsplatz: **sehr gering** auf Grund der Technologie (Vakuum) und geschlossener Anlagentechnik Bezogen auf Umwelt: **gering – mittel**, da gasförmige Nebenprodukte über Abluftreinigungsanlagen gezielt behandelbar sind[27]	**Gering**, wenn Nanomaterialien fest in einer fixierten Schicht gebunden sind **Mittel**, wenn Nanomaterialien in einer Schicht gebunden sind und diese im Produkt fest eingehaust ist **Groß**, wenn Nanomaterialien als lose Nanopartikel[28] bzw. Röhren hergestellt werden
Flammenverfahren	gasförmig	Eher einfachere Verfahrenstechnik, keine Vor- bzw. Nachbehandlung	**Mittel**, da Energieaufwand nur für Flamme (Temp. ca. 1200-2200°C)[29]	Mengendurch-satz: sehr hoch Stoffumsatz: sehr hoch Ausbeute: hoch	Bezogen auf Arbeitsplatz **: mittel**, direkte Emissionen durch An-lagenleckagen und beim Abfüllen der Nanopartikel möglich Bezogen auf Umwelt: **gering – mittel**, da gasförmige Neben-produkte über Abluftreinigungs-anlagen gezielt behandelbar sind	**Groß**, da Nanomaterialien als lose Nanopartikel hergestellt werden

[27] Diese Bewertung geht davon aus, dass derartige Abluftbehandlungsanlagen diese gasförmigen Emissionen auch behandeln und zurückhalten können. Konkrete Kenntnisse über derartige Fähigkeiten liegen nicht vor.

[28] (Krämer 2002)

[29] (Rössler et al. 2001)

Sol-Gel-Verfahren	flüssig oder gelöst	Eher einfachere chemische Verfahrenstechnik	**Gering**	Mengendurch-satz: mittel bis hoch Stoffumsatz: gesamter Stoff wird verarbeitet Ausbeute: hoch	Bezogen auf Arbeitsplatz **: gering bis mittel**, da Verfahren in flüssigem Medium stattfindet, Luftemissionen sind abhängig von Temperatur und Dampfdruck des Prozessmediums Bezogen auf Umwelt: **gering – mittel**, da Austrag von Nanoma-terial über verunreinigte Prozess-medien und Abwasser möglich, aber in Abwasserbehandlungs-anlagen gezielt behandelbar sind[30]	**Gering**, wenn Zwischenprodukte in flüssiger Form vorliegen bzw. die Nanomaterialien im Endprodukt fest in einer fixierten Schicht eingebunden sind **Mittel**, wenn die Nanomaterialien im Endprodukt in einer Schicht gebunden, aber nicht langzeitstabil sind
Fällung	flüssig oder gelöst	Eher einfachere chemische Verfahrenstechnik	**Gering**	Mengendurch-satz: mittel bis hoch Stoffumsatz: gesamter Stoff wird verarbeitet Ausbeute: hoch	Bezogen auf Arbeitsplatz: **gering bis mittel**, da Verfahren in flüssigem Medium stattfindet, Luftemissionen sind abhängig von Temperatur und Dampfdruck des Prozessmediums Bezogen auf Umwelt: **gering – mittel**, da Austrag von Nanoma-terial über verunreinigte Prozess-medien und Abwasser möglich, aber in Abwasserbehandlungs-anlagen gezielt behandelbar sind	**Gering**, wenn die Nanomaterialien im Endprodukt fest in einer fixierten Schicht eingebunden sind **Mittel**, wenn die Nanomaterialien im Endprodukt in einer Schicht gebunden, aber nicht langzeitstabil sind

[30] Diese Bewertung geht davon aus, dass derartige Abwasserbehandlungsanlagen diese flüssigen Emissionen auch behandeln können. Konkrete Kenntnisse über derartige Fähigkeiten liegen nicht vor.

Molekulares Prägen	flüssig	Eher einfachere chemische Verfahrenstechnik	**Gering**	Mengendurchsatz: mittel bis hoch Stoffumsatz: gesamter Stoff wird verarbeitet Ausbeute: hoch	Bezogen auf Arbeitsplatz **Gering bis mittel**, da Verfahren in flüssigem Medium stattfindet, Luftemissionen sind abhängig von Temperatur und Dampfdruck des Prozessmediums Bezogen auf Umwelt: **gering – mittel**, da Austrag von Nanoma-terial über verunreinigten Prozess-medien und Abwasser möglich, aber in Abwasserbehandlungs-anlagen gezielt behandelbar sind	**Gering**, da das Produkt nur Nanostrukturen besitzt und keine losen Nanopartikel
Nanolithographie	Feststoffe	Technisch sehr aufwändiges Verfahren; Aufwändige Wasch-/Ätzverfahren, Hohe Reinraum-anforderungen	**Hoch,** da hoher fixer Energieaufwand (Reinraum)	Mengendurch-satz: mittel bis gering Ausbeute: mittel	Bezogen auf Arbeitsplatz**: gering bis mittel**, da die aus dem Fest-stoff heraus gelösten Nanoma-terialien in flüssigen Medien vorliegen, Luftemissionen sind abhängig von Temperatur und Dampfdruck des Prozessmediums Bezogen auf Umwelt: **gering – mittel**, da Austrag von Nanoma-terial über verunreinigten Prozess-medien und Abwasser möglich, aber in Abwasserbehandlungs-anlagen gezielt behandelbar sind	**Gering**, da das Produkt nur Nanostrukturen besitzt und keine losen Nanopartikel
Self Assembled Monolayers	flüssig oder gelöst	Eher einfachere chemische Verfahrenstechnik	**Gering**	Mengendurch-satz: mittel bis hoch Stoffumsatz: gesamter Stoff wird verarbeitet Ausbeute: hoch	Bezogen auf Arbeitsplatz **Gering bis mittel**, da Verfahren in flüssigem Medium stattfindet, Luftemissionen sind abhängig von Temperatur und Dampfdruck des Prozessmediums Bezogen auf Umwelt: **gering – mittel**, da Austrag von Nanoma-terial über verunreinigten Prozess-medien und Abwasser möglich, aber in Abwasserbehandlungs-anlagen gezielt behandelbar sind	**Gering**, wenn Nanomaterialien fest in einer fixierten Schicht gebunden sind **Mittel**, wenn Nanomaterialien in einer Schicht gebunden sind und diese im Produkt fest eingehaust ist **Mittel**, wenn die Nanomaterialien im Endprodukt in einer Schicht gebunden, aber nicht langzeitstabil sind

Gegenüber anderen Verfahren besitzen diejenigen Verfahren ein höheres Potenzial für die Freisetzung von Nanopartikelemissionen, die im gasförmigen Medium ablaufen, bei denen am Arbeitsplatz direkt Emissionen auftreten können und außerdem lose Nanopartikel (bzw. nanostrukturierte Materialien) hergestellt werden, wie z.B. bei Flammenverfahren.

Bei den anderen Verfahren sind die Risikopotenziale unter der Voraussetzung, dass die anfallenden Emissionen durch die entsprechenden Abluft- bzw. Abwasserbehandlungsanlagen behandelt werden können, eher gering zu beurteilen.

Außerdem zeichnen sich einige der dargestellten Prozesstechnologien, die z.B. schon als Basistechnologien in der Mikroelektronik und Optoelektronik eingesetzt werden, durch einen immensen technischen und energetischen Aufwand bei eher geringem absolutem Output aus.

Die Eingriffstiefe, die Wirkmächtigkeit, das Gefährdungspotential sowie die Beherrschbarkeit der bisher diskutierten Herstellungsverfahren für nanostrukturierte Materialien sind am ehesten mit vielen in der Chemischen Industrie, der Computertechnik sowie der so genannten ‚Neuen Werkstoffe' schon länger etablierten Verfahren vergleichbar, sodass man sich für die Risikoabschätzung und das Risikomanagement an den dort bisher gemachten Erfahrungen orientieren kann.

4.3 Exkurs: Nanovisionen und deren Risikobewertung

Mit der Entwicklung und Geschichte der Nanotechnologie von Anfang an untrennbar verbunden sind sehr weit reichende Visionen von dem, was alles dereinst auf der Basis dieser Technologie möglich sein würde. Es ist sogar davon auszugehen, dass diese Visionen und nicht zuletzt die vielfältigen und beim Thema Nanotechnologie allgegenwärtigen ‚Science Fiction' Bilder von ‚Nanomotoren', die nur aus wenigen Atomlagen bestehen, von Nanorobotern, die sich in der Blutbahn bewegen und von dort aus Krebszellen sowie Bakterien und Viren bekämpfen, mit konstitutiv dafür waren, dass sich überhaupt so ein Begriff wie ‚Nanotechnologie' etablieren konnte. Genau diese Visionen waren es schließlich, die dem übergreifenden Thema ‚Nanotechnologie' als Paradigma (umbrella concept) zum Durchbruch verhalfen. Sie konnten die Emotionen wecken, die nötig sind, um das Thema in der Politik und im Feuilleton zur Sprache zu bringen und auf dieser Basis auch die enormen Fördergelder zu mobilisieren. Und selbstverständlich spielten dabei Autoren wie Drexler eine wichtige Rolle[31].

Wenn derartig weit reichende Visionen formuliert werden, lassen meist die darauf reagierenden Horrorvisionen nicht lange auf sich warten. Es entwickelte sich eine zunehmend kritischer werdende Debatte über die Gefahr einer Verselbständigung von nanostrukturierten Systemen (nano devices), in der selbstverständlich auch alte Ängste mobilisiert werden, angefangen vom sich verselbständigenden Zauberbesen bis hin zu Robotern, die die Macht über die Menschen übernehmen könnten (vgl. Drexler 1986, Joy 2000). Die Diskussion um die Frage des grey goo oder der mechanischen Selbstreplikation taucht als Horrorszenario regelmäßig wieder auf, um die Gefahren der Nanotechnologien zu beschwören.

Den Ausgangspunkt für entsprechende Vorstellungen lieferte ebenfalls Drexler, der die Vorstellung von „assemblern" entwickelte, Maschinen, die in der Lage sein sollen jede Art von Objekt zu produzieren durch die Auswahl von Atomen aus der Umwelt und diese Atom für Atom zu einem Objekt zusammenführen[32]. Diese „assembler" können programmiert werden und sind ggf. mit einer eigenen Energieversorgung ausgestattet. Da sie alles herstellen, können sie folglich auch sich selbst replizieren, was im Falle von Fehlfunktionen zu einem Umbau der gesamten Biosphäre führen könnte (grey goo). Diese Vision erfordert von daher bestimmte Sicherheitsmaßnahmen für nanotechnologischen Entwicklungen in der Zukunft.

Derzeit scheint die Neigung groß zu sein, diese Debatten dadurch zu beenden zu versuchen, dass die technische Realisierbarkeit von derartigen ‚Assemblern' bezweifelt wird, mit im

31 Summer (o.J.) schreibt dazu: „Die rasante Entwicklung der Nanotechnologie verdankt sich ursprünglich ganz wesentlich den Visionen über zukünftige technische Möglichkeiten und ihrer gesellschaftlichen Implikationen einiger weniger Wissenschaftler, darunter insbesondere K. Eric Drexler (vgl. Drexler et al 1986; Drexler1991; Drexler 1992). Dem Beispiel Drexlers folgend hat inzwischen eine solche Vielzahl von überwiegend amerikanischen Wissenschaftlern und Wissenschaftsjournalisten futuristische Szenarien zur Nanotechnologie entworfen, daß hieraus geradezu eine neue Literaturgattung entstanden ist, aus der offensichtlich auch die Forschungspolitik schöpft, wenn es um populäre Darstellung der Nanotechnologie geht." S. 9f

32 Drexler bewegte sich damit durchaus in der Linie von Feynmans berühmter Rede aus dem Jahr 1959 ‚There is a lot of room at the bottom', die heute so gerne zum Gründungsmythos der Nanotechnologie hochstilisiert wird. Feynman 1959. http://www.its.caltech.edu/~feynman/plenty.html

Wesentlichen technisch-physikalischen Argumenten[33]. Nun dürfte die technische Nicht-Machbarkeit kein besonders starkes Argument sein, angesichts der technischen Entwicklungen der vergangenen 150 Jahre. Hinzu kommt, dass gleichzeitig weiterhin große Debatten geführt und wichtige Reports veröffentlicht werden zum ‚Zusammenwachsen von Informationstechnik, Nanotechnologie, Bio- und Gentechnologie und Kognitionswissenschaften zur Verbesserung des Fortschritts der Menschheit' (Rocco & Bainbridge 2002). Die im Folgenden wiedergegebenen beiden Graphiken stammen aus diesem Bericht über ‚Converging Technologies' und illustrieren die damit verbundenen Visionen der Konvergenz und einer technologischen Architektur des 21. Jahrhundert.

Abbildung 12: Visionen der Konvergenz und einer technologischen Architektur des 21. Jahrhundert

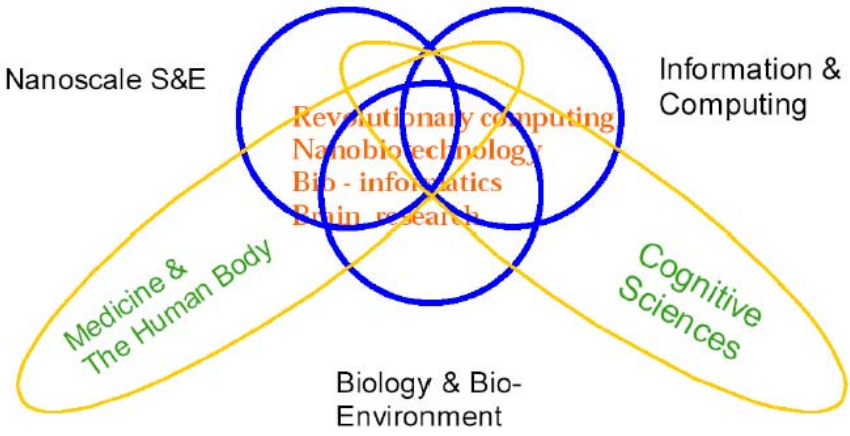


Abb. 1.: Kohärenz und Synergien im Bereich der Schnittmengen von Nano-, Bio-, Info-, und Cogno-Wissenschaften (sowohl Natur- als auch Ingenieurwissenschaften) *(Quelle: NSF 2002)*

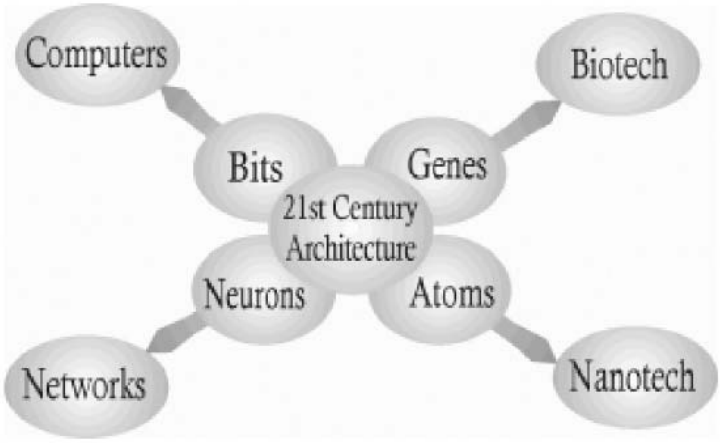


Abb. 2: Die „Architektur" des 21. Jahrhunderts (*Quelle: NSF 2002*)

[33] Dabei geht es oft um Probleme der Energieversorgung, Thermodynamik und der (Selbst)steuerung vgl. z. B. die Debatte zwischen Drexler und Smalley in den Chemical and engineering News December 2003 http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html.

Damit dürfte zumindest eines deutlich werden. Die Debatte über derartige Langfristvisionen über faszinierende Möglichkeiten und die damit verbundenen Horrorbilder geht weiter, sie wird sich kaum 'per ordre de mufti' beenden lassen. Die gesellschaftliche Debatte über Nanotechnologie lebt letztendlich auch von ihnen.

Das bedeutet aber nicht, dass diese Visionen und Spekulationen in der gleichen popularisierten Form die wissenschaftliche Technikbewertung bestimmen müssen, im Gegenteil. Wir sollten uns auch angesichts dieser Problematik auf dasjenige konzentrieren, was wir schon wissen können. Das heißt, es muss auch diesbezüglich der oben schon eingeschlagene Weg einer Gefährdungsabschätzung auf der Basis einer ‚Charakterisierung der Technologie' konsequent weiter verfolgt werden. Aus dieser Sicht sind dann schon einige wichtige Differenzierungen vorzunehmen, die sich auch im jüngst veröffentlichten Bericht der ‚Royal Commission' wieder finden, insbesondere die Unterscheidung zwischen einer eher ‚mechanischen' und einer eher biologischen Linie bei der Entwicklung von ‚nano devices'. Im Hinblick auf die Abschätzung von Gefahren einer möglichen Verselbständigung bzw. eines Übergangs von der Selbstorganisation in eine Selbstreplikation bestehen große Unterschiede zwischen diesen beiden Linien. Die Wahrscheinlichkeit, dass ‚eher mechanisch strukturierte' Nanoroboter (nanobots oder self-assembler) sich (ungewollt) selbst vermehren, dürfte ziemlich gering sein. Dies gilt aber nicht in gleichem Maße, wenn es sich um nanostrukturierte Einheiten auf der Basis ‚biologischer' Moleküle handelt (insbesondere z. B. um DNA mit der sich derzeit viele nano-biotechnologische Experimente und Projekte beschäftigen), auf der Basis von Organellen oder gar von Zellen. In gewissem Sinne sind ja selbst die SAMs, die self assembled monolayers auf der Basis ‚polarer' Moleküle, Modellsysteme nach dem Vorbild ‚biologischer Membranen'. Der ‚biologische Weg' hin zu ‚nano devices' dürfte ohnehin der weitaus viel versprechendste sein. David Pescovitz vom UC Berkeley's College of Engineering hat dies jüngst schön auf den Punkt gebracht: "Biology is the nanotechnology that works" (Pescovitz 2004). Oder wie es die Royal Society in ihrem Gutachten 'Nanoscience and nanotechnologies - opportunities and uncertainties' formuliert: „Where we can find self-replicating machines is in the world of biology"(The Royal Society 2004).

Nicht erst dann, wenn - wie im vorliegenden Projektansatz - durchaus große Hoffnungen gesetzt werden auf Schritte in Richtung auf ein nachhaltigeres Wirtschaftens auf der Basis von Nanotechnologien, die Prinzipien der Selbstorganisation von Molekülen nutzen[34], ist für eine Bewertung unter Risikogesichtspunkten der Unterschied zwischen Selbstorganisation und Selbstreproduktion wichtig. Techniken, die auf Selbstorganisationsprinzipien beruhen versprechen auch schon auf der Ebene des Anorganischen (z. B. bei templatgesteuerter Strukturbildung, bei gerichteter Kristallisation oder bei den schon erwähnten SAMs) einen geringeren Aufwand an Stoffen, an Energien und nicht zuletzt einen wesentlich geringeren Aufwand an Steuerung und Kontrolle. Selbstreplikation bzw. Selbstreproduktion bezieht sich dagegen auf die Fähigkeit zur Selbstvervielfältigung, zu der eben Organismen z. B. auch gentechnisch veränderte Organismen in der Lage sind. Selbstorganisation und Selbstreplikation sind also durchaus verschiedene ‚Fähigkeiten'. Trotzdem sind zwischen ihnen durchaus

[34] Und dies sind ja durchaus verbreitete Erwartungen. Vgl. z. B. die Technologieanalyse zur Nanobiotechnologie (VDI-Technologiezentrum 2002, S. 105f). Dort wird der bottum-up Aufbau von Materialstrukturen, im Sinne einer technischen Nutzung von Selbstorganisationsphänomenen, als besonders viel versprechend herausgehoben und eine weitere Technologieanalyse speziell zu diesem Themenbereich empfohlen. Diese ist dann im Jahre 2003 auch erschienen (vgl. VDI-TZ 2003) und unterstreicht nachdrücklich dieses Potential.

graduelle Übergänge möglich. Im Zuge der biologischen Evolution muss die Fähigkeit zur Selbstreplikation ja zumindest einmal ‚real' aus der Fähigkeit zur Selbstorganisation hervorgegangen sein, allerdings in unermesslich langen Zeiträumen.

Bei der Bewertung von Risikogesichtspunkten weitergehender Anwendungsfelder von Selbstorganisation (also z.B. bei der Kombination oder bei der Konversion oder Verschmelzung von Nanotechnologie und Biotechnologie ggf. auch Nanotechnologie und Robotik) erlangt der Aspekt einer möglichen Selbstreproduktion somit eine gewisse – mit Debatten über technische Machbarkeiten nicht einfach weg zu diskutierende - Bedeutung. Mit dem Schritt von Fähigkeit der Selbstorganisation zur Fähigkeit der Selbstreproduktion dürften sich auf jeden Fall neuartige Risikodimensionen eröffnen.

Solange sich die Nanotechnologie auf den Umgang mit anorganischen Molekülen beschränkt, dürfte ein solcher Schritt von der Selbstorganisation von Molekülen zur Selbstreproduktion und Vervielfältigung von ‚nano devices' – wenn er denn nicht bewusst angestrebt wird – eher unwahrscheinlich sein. Auf der Grundlage einer Verschmelzung der Nanotechnologie mit der gentechnologischen Manipulation von zur Selbstreproduktion fähigen Organismen könnte ein solcher Schritt allerdings durchaus realisierbar werden.

5 Bewertung von Nachhaltigkeitseffekten an konkreten Anwendungskontexten

Aufbauend auf dieser Charakterisierung der Nanotechnologie und ihrer bisherigen Herstellungsverfahren verfolgt der **prozessbegleitende** Bewertungsansatz die Ermittlung von Nachhaltigkeitseffekten an konkreten Anwendungsbeispielen im Vergleich zu bestehenden Produkten und Verfahren, wobei der Fokus auf die ökologischen Chancen und Risiken gerichtet ist. Ziel ist die Erstellung von ökologischen Profilen im Rahmen von vertiefenden Untersuchungen an ausgewählten Fallbeispielen.

5.1 Auswahl der vertiefenden Fallstudien

In einer ersten Recherche wurden die Anwendungskontexte von Nanotechnologie gesichtet und qualitativ bewertet. Die Auswahl der Fallbeispiele hatte dann zum Ziel, das Spektrum an nanotechnologischen Anwendungen (Vielfalt der Herstellungsverfahren und der nanoskaligen Basisstrukturen) möglichst umfassend abzudecken und unterschiedliche Schwerpunkte zu setzen. Die Auswahl der Fallbeispiele erfolgte entsprechend folgender Auswahlebenen und den damit verbundenen Kriterien:

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)

Nach Stoffmengenumsätze

- (groß --- gering).

Bei der Auswahl der konkreten Anwendungskontexte wurden bewusst Schwerpunkte gesetzt. Aus dem Spektrum an nanotechnologischen Anwendungen wurden gezielt vier Fallbeispiele mit potenziell erwartbaren Ökoeffizienzpotenzialen ausgewählt. Mögliche Risiko- und Gefährdungspotenziale nanotechnologischer Anwendungen wurden fokussiert am Thema Nanopartikel analysiert und diskutiert. Als Ergebnis dieses Prozesses wurden fünf Anwendungskontexte mit entsprechenden Zielstellungen für die vertiefenden Fallstudien ausgewählt.

Tabelle 8: Übersicht der untersuchten Fallstudien

Anwendungskontexte	Zielstellung
Ökoeffiziente Nanolacke	Darstellung des Ökoeffizienzpotenzials von Nanobeschichtungen in Form eines vergleichenden Ökoprofils (Nanolack auf Basis der Sol-Gel-Technologie im Vergleich zu Wasserlack, Lösemittellacken und Pulverlack)
Nanotechnologische Prozessinnovation der Styrolsynthese	Darstellung des Ökoeffizienzpotenzials von Nanotechnologie in einer katalytischen Anwendung in Form eines vergleichenden Ökoprofils (Nanotube-Katalysator im Vergleich zu Katalysator auf Eisenoxidbasis)
Nanoinnovationen im Displaybereich	Abschätzung möglicher Ökoeffizienzpotenziale der Displayinnovationen durch einen qualitativen Vergleich (Organic Light Emitter Display und Nanoröhren-Feldemitterdisplays im Vergleich zu Kathodenstrahlröhre, Flüssigkristallbildschirm und Plasmabildschirm)
Nanoanwendungen im Lichtbereich	Darstellung des Ökoeffizienzpotenzials von Nanoanwendungen im Lichtbereich in Form eines vergleichenden Ökoprofils (Weiße LED und Quanten Dots im Vergleich zu Glühlampe und Kompaktleuchtstofflampe)
Risikopotenziale nanotechnologischer Anwendungen	Exemplarische Diskussion möglicher Risiko- und Gefährdungspotenziale unter anderem am Beispiel Titandioxid, weniger Betrachtung der Umweltauswirkungen

Nachfolgend werden die Projektergebnisse zu diesen Fallstudien dargestellt.

5.2 Fallstudie 1: Ökoeffiziente Nanolacke

5.2.1 Inhalt, Ziel und Methode der Fallstudie

Im Rahmen dieser Fallstudie wird das ökologische Potenzial von auf Nanotechnologie basierenden neuen Beschichtungsverfahren untersucht. Als konkretes Beispiel wird die mögliche Beschichtung von Aluminium durch einen neuartigen Nanolack auf Basis der Sol-Gel-Technologie betrachtet. Die Einschätzung der ökologischen Relevanz wird hierbei mit Hilfe einer vergleichenden ökobilanziellen Abschätzung vorgenommen.

Die Untersuchung der ökologischen Aspekte erfolgt im Vergleich zu anderen Lacksystemen, namentlich Wasserlacken, Lacken auf Lösungsmittelbasis und Pulverlacken und den damit verbundenen Vorbehandlungen.

5.2.2 Eingrenzung des Untersuchungsbereichs

5.2.2.1 Grundlagen der Lackiertechnologie und ihre Umweltrelevanz

Die Beschichtung von Oberflächen mit aushärtenden oder aushärtbaren organischen Stoffen bezeichnet man als Lackieren. Die organischen Stoffe werden in dünner Schicht aufgebracht. Durch chemische Reaktion oder physikalische Vorgänge bildet sich ein auf dem Werkstück haftender, fester Film. Zum Lackierprozess rechnet man auch die Vorbehandlung der zu beschichtenden Oberfläche sowie die Nachbehandlung. Die wesentlichsten Arbeitsvorgänge sind:

- Vorbehandeln (Strahlen, Schleifen, Entfetten, Beizen, Phosphatieren, Chromatieren, Passivieren)
- Lackieren
- Nachbehandeln

Allen flüssigen Lacken liegt ein gemeinsamer Grundaufbau zugrunde, der aus vier Hauptkomponenten besteht:

- Bindemittel
- Lösungsmittel
- Farbmittel (organische oder anorganische Pigmente)
- Füllstoffe und Additive

Vorbehandlung:

Die Oberfläche des zu lackierenden Werkstückes muss durch physikalisch-chemische Behandlungsschritte fettfrei und staubfrei gemacht werden. Verbesserung des Korrosionsschutzes und Erhöhung des Haftvermögens der späteren Lackierung sind weitere Aufgaben der Vorbehandlung.

Gängige Vorbehandlungsschritte sind:

- bei unlegierten Stählen: Entfetten, Beizen, Phosphatieren, Passivieren
- bei Aluminium: Entfetten, Desoxidieren, Chromatieren oder Aufbringen chromatfreier Konversionsschichten auf der Basis von Zirkonium, Molybdän, Titan oder Silikat

Oberflächen bei Werkstücken aus Aluminium werden zumeist chromatiert. Nach der Entfettung und Dekapierung werden die Werkstücke in ein Chromatierbad eingebracht. Das Bad ist stark sauer (pH - Wert 1 bis 2) und enthält als wichtigste Bestandteile Chromsäure und komplexe Fluoride. Chromatiert werden aus Korrosionsschutzgründen auch Zinkoberflächen, um Weißrostbildung zu verhindern. Teil der Vorbehandlung kann im Einzelfall auch eine mechanische Bearbeitung sein (z.B. Schleifen bei Lackschäden von Fahrzeugoberflächen). In manchen Fällen wird als Bindeglied zwischen Werkstückoberfläche und Lackierung eine Grundierung aufgebracht. Die Grundierung dient auch dem Korrosionsschutz und besteht aus Chromaten sowie Zink- und Bleiverbindungen.

Rolle der Chromatierung

Bisher war die Chromatierung von Aluminium und anderen Metallen unabdingbar für die Lackhaftung. Besonders bei Aluminium bildet sich innerhalb von kürzester Zeit unter Einwirkung von Luftsauerstoff eine dünne Aluminiumoxidschicht. Um die Haftung des Lackes auf den Oxidoberflächen von Metallen zu ermöglichen, wurden die Metallteile bislang mit Chromsäure behandelt. Dabei wird die Dicke der vorhandenen Oxidschicht verringert, Partikel anderer Metalle eliminiert und eine neue gemischte Aluminium-Chromoxid-Schicht gebildet. Das Ergebnis ist eine gegen Korrosion geschützte Aluminiumoberfläche und die Ausbildung einer Haftschicht für eine anschließende Lackierung. Der Chromatierungsvorgang gilt besonders wegen der Umweltschädlichkeit der Chromverbindungen als großes Problem.

Darüber hinaus ist die Toxikologie der eingesetzten Chromverbindungen problematisch: Chromsäure wirkt sehr stark ätzend. Bei der Chromatierung fallen Chrom(III)- und Chrom(VI)-haltige Abwässer an, die aufwendig in Wasseraufbereitungsanlagen gereinigt werden müssen. Chrom(VI)-haltige Substanzen gelten als besonders giftig und darüber hinaus als kanzerogen. Anfallende Chrom(VI)-haltige Schlämme müssen teuer auf Sonderabfalldeponien entsorgt werden (Anger 1982; Funk 2003). In Folge der EU-Fahrzeugrichtlinie (2000/53/EG) ist deshalb der Einsatz von chromhaltigen Produkten in der Vorbehandlung zu lackierender Bauteile bis zum Jahr 2007 gänzlich zu vermeiden.

Schon seit einiger Zeit werden aus diesem Grund Alternativen in der Korrosionsschutz-beschichtung bei Aluminiumteilen gesucht. Eine ganze Reihe von Verfahren, wie beispielsweise die Voranodisierung, werden deshalb entwickelt; dennoch weisen diese Verfahren bisher nicht den gleichen Korrosionsschutz wie die Chromatierung auf.

Als besonders interessantes Verfahren gilt der auf organisch-anorganischen Polymeren beruhende so genannte Nano-Lack, der von der Firma Nano Tech Coatings GmbH entwickelt wurde. Bei diesem Lack kann auf eine Vorbehandlung durch Chromatierung oder ein gleichwertiges Verfahren gänzlich verzichtet werden.

Lackiervorgang

Die wesentlichen Lackbestandteile sind die Bindemittel, die Farb- und Zusatzmittel sowie die Lösungsmittel. Die Bindemittel (Lackharze) bestimmen durch ihre Zusammensetzung die Eigenschaften der Beschichtung wie Haftfestigkeit, mechanische und chemische Widerstandfähigkeit, den Glanz und die Wetterfestigkeit. Die Farb- und Zusatzmittel dienen primär der Farbgebung. Sie können auch Zusätze für Korrosionsschutz (z.B. Zinkstaub, Bleimennige) oder Stabilisatoren gegen UV-Einwirkung enthalten. Pigmente erfüllen bei Grundierungen auch die Aufgabe des Abdeckens von Unebenheiten der Werkstückoberfläche (Füller). Zusatzmittel verbessern auch die lacktechnischen Eigenschaften. Die Lösungsmittel sind während des Trocknungsvorganges abdampfende flüchtige Stoffe. Sie halten die Harzbestandteile des Lackes in Lösung und entscheiden über die bei einem Lack jeweils anzuwendenden Verarbeitungsbedingungen.

Umweltrelevanz der Lackierung

In einer Emissionsschätzung aus dem Jahr 1995 wurden die zwölf für die Lackanwendung wichtigsten Branchen – ohne die Großserienlackierung von Automobilen – untersucht (Mink & Rzepka 1995). Danach werden dort 335.000 t Lösemittel p.a. emittiert. Die Emissionen aus der Automobilserienlackierung sind vergleichsweise gering. Sie dürften um 30.000 t liegen, was in etwa den Emissionen bei der Autoreparaturlackierung entspricht. Die Lackierstraßen in der Automobilindustrie weisen somit bereits einen sehr hohen Umweltstandard auf.

Einschließlich der Automobilindustrie liegen die Emissionen somit bei rund 370.000 t p.a. Dies sind rund 40% der Lösemittelemissionen insgesamt bzw. 15% der VOC-Emissionen.

5.2.2.2 Untersuchungsgegenstand und Untersuchungsrahmen

Untersuchungsgegenstand ist die Oberflächenbehandlung von Leichtmetallbauteilen, wie sie verstärkt in der Automobilindustrie zum Einsatz kommen. Als funktionelle Einheit soll hierbei die Oberflächenbehandlung von 1 m² Aluminium-Automobilteil mit verschiedenen Klarlacken verwendet werden.

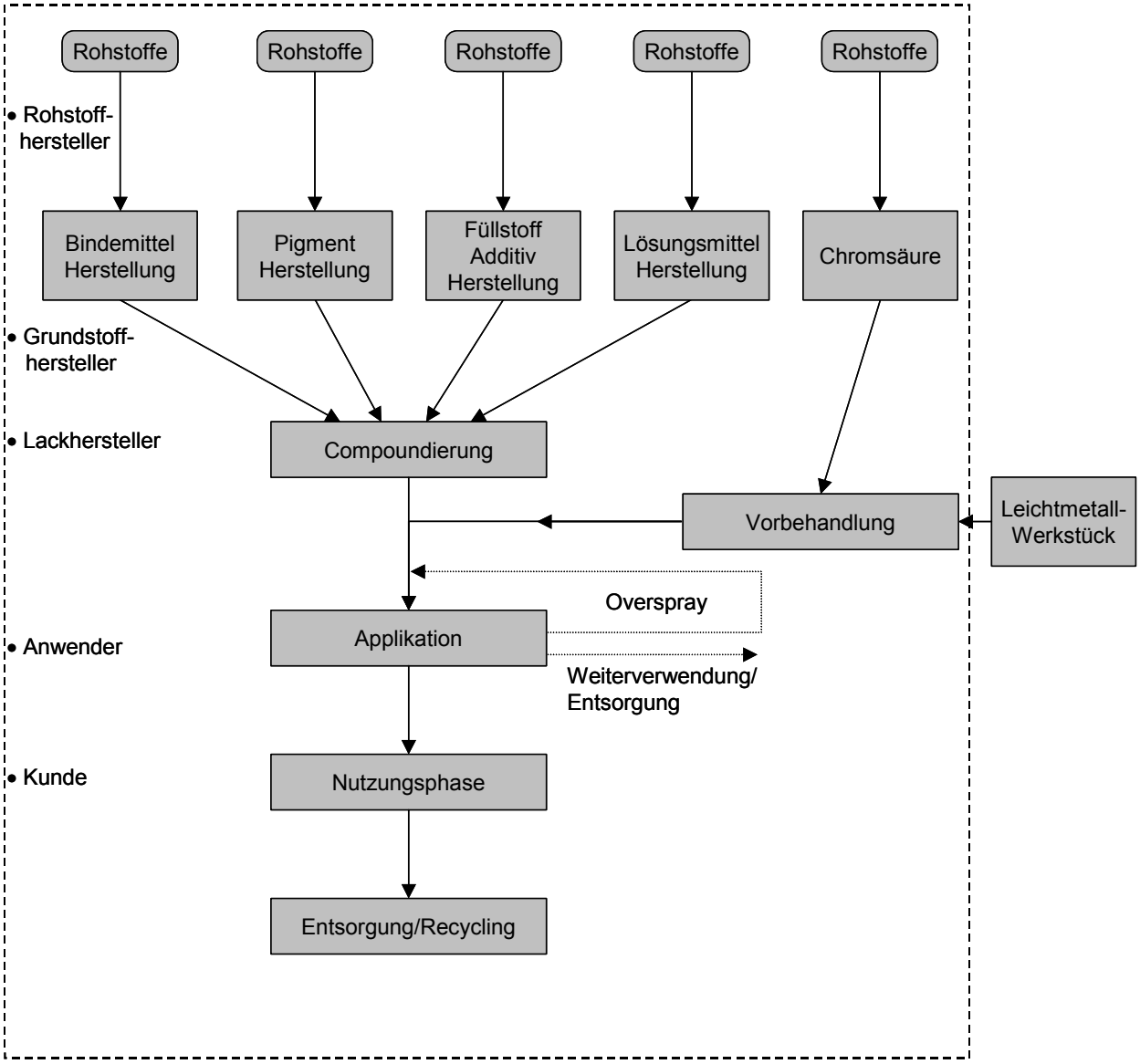
Der Bilanzraum stellt den gesamten Lebenszyklus des Produktes Lack inklusive der Oberflächenvorbehandlung dar (siehe Abbildung 13). Die einzelnen Lebenswegstufen sind hierbei:

- Rohstoffgewinnung
- Grundstoffherstellung (Bindemittel, Lösungsmittel usw.)
- Lackherstellung
- Oberflächenvorbehandlung
- Applikation (Lackiervorgang)
- Nutzungsphase
- Entsorgung/Recycling

Für die Profilbetrachtung muss einschränkend angemerkt werden, dass der Prozessschritt der Oberflächenvorbehandlung auf Grund von Datenlücken nur qualitativ behandelt werden kann und die letzte Phase Entsorgung/Recycling als identisch angenommen und nicht betrachtet

wird. Die relevantesten Umweltauswirkungen sind in den Lebenswegstufen Lackherstellung inkl. Rohstoffherstellung, der Vorbehandlung, der Applikation sowie der Gebrauchsphase zu erwarten.

Abbildung 13: Systemgrenze für die vergleichende Ökobilanz



5.2.2.3 Auswahl der Varianten

Kriterien für die Auswahl der Varianten:

- Unterscheidung nach Einsatz der Grundstoffarten (Bindemittel usw.) und der eingesetzten Menge des jeweiligen Grundstoffs
- Unterscheidung nach Art der notwendigen Oberflächenvorbehandlung
- Unterscheidung nach der Art der Aufbringung

Für die Umweltrelevanz der zu betrachtenden Lacksysteme konnten folgende Einflussparameter bestimmt werden:

- Lackzusammensetzung
- Notwendige Oberflächenvorbehandlung
- Schichtdicke

Anhand dieser Parameter konnten vier Varianten abgeleitet werden, die zur Zeit den Stand der Technik wiedergeben. Als fünfte Variante wird der so genannte Nanolack betrachtet, wobei dieser bislang in der Autoserienlackierung noch nicht zum Einsatz kommt, was ihn von den anderen vier Varianten unterscheidet.

Variante 1 und 2: 1- und 2-Komponenten-Klarlacke (konventionelle Lacke)

Unter den betrachteten Klarlacksystemen ist der 1-Komponenten-Klarlack (1 K CC) das älteste Verfahren. Deshalb ist auf diesem Gebiet ein hohes Verfahrens-Know-how und ein hoher Entwicklungsstand vorhanden. 2-Komponenten-Klarlack (2 K CC) wird hauptsächlich für Anwendungen mit hohen Ansprüchen an Qualität und Beständigkeit verwendet. Für beide Lacke gilt im Automobilbereich, dass sie zunehmend durch Wasser- und Pulverlacke ersetzt werden, da sie den hohen Anforderungen der TA-Luft nicht mehr voll gerecht werden können. Der Anteil der Lösemittel liegt bei beiden Lacksystemen bei ungefähr 50%. Als Bindemittel kommen bei beiden Systemen verschiedene (synthetische) Harze zum Einsatz. Der Anteil der Additive ist hingegen relativ gering und besteht hauptsächlich aus Verlaufsmitteln und Lichtschutzmitteln.

Variante 3: Wasser-Klarlack

Wasser-Klarlack ist das in der Automobilindustrie am häufigsten eingesetzte Lacksystem. Der Einsatz von Lösemitteln ist beim Wasserlack zwar noch höher als bei den herkömmlichen Lacken, das hauptsächlich eingesetzte Lösemittel ist jedoch Wasser (39,8%), welches beim Austrocknen des Lacks vollständig verdunstet und somit ökologisch völlig unbedenklich ist. Die Verwendung von Wasser als Lösungsmittel zeigt sich auch im Primärenergiebedarf für das Lacksystem, der mit 62,9 MJ/kg weit unter dem von konventionellen Lacken und des Pulverlacks liegt.

Variante 4: Pulver-Klarlack

Pulverlack enthält im Gegensatz zu allen anderen Lacksystemen keine Lösungsmittel und gilt deshalb als besonders umweltfreundlich. Zurzeit werden erhebliche Anstrengungen unternommen, um Pulverlacke in immer mehr Einsatzbereichen anwenden zu können. Aufgrund der fehlenden Lösemittel besitzt er nämlich einige Nachteile: Beispielsweise ist eine Applikation durch Tauchlackierung selbstverständlich unmöglich.

Variante 5: Nanoklarlack der Fa. NTC

Der neu entwickelte Nanolack unterscheidet sich durch mehrere Merkmale grundsätzlich von herkömmlichen Lacken:

Der Lackaufbau ist ein grundsätzlich anderer. Zwar besteht der Klarlack wie die anderen Flüssiglacke auch aus Bindemitteln, Lösemitteln, Füllstoffen und Additiven. Das Bindemittel ist

jedoch nicht wie üblich von organischer Struktur, sondern ein so genanntes anorganisch-organisches Hybridpolymer.

Die Herstellung des Nanolacks erfolgt mittels Sol-Gel-Technik. Der Sol-Gel-Prozess ist ein bereits seit langem bekannter Prozess, hat allerdings durch vermehrte Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten in den letzten Jahren eine wesentlich breitere Bedeutung erlangt. Er gilt als ein besonders viel versprechendes Feld der Nanotechnologie.

Der Nanolack lässt sich mit den in der Industrie üblichen Verfahren verarbeiten. Während des Austrocknens des Sols (der Lack in seiner flüssigen Form), verbinden sich die Partikel zum so genannten Gel. Das Material wird auf etwa 160°C erhitzt, das Lösungsmittel verdampft völlig aus der Schicht, und die Teilchen verbinden sich zu einem stabilen Polymernetz (Van Ooij et al. 2002).

Bedeutende Vorteile dieses Lackes sollen einerseits darin liegen, dass eine geringere Schichtdicke für die gleiche Funktionalität ausreichend ist und andererseits die Chromatierung als Vorbehandlung überflüssig wird.

Tabelle 9: Übersicht der betrachteten Varianten

		Variante 1: 1 K CC	**Variante 2: 2 K CC**	**Variante 3: Wasserlack**	**Variante 4: Pulverlack**	**Variante 5: Nanolack**
Zusammensetzung	Bindemittel	46,7%	51,5%	41,6%	95%	55%[35]
	Additive	2,6%	3,5%	1,4%	4,6%	3%
	Lösemittel	50,7%	45%	57%, davon Wasser: 39,8%	0,4%	42%
Oberflächenvorbehandlung	Eingesetzte Verfahren	Chromatieren Phosphatieren Anodisieren	Chromatieren Phosphatieren Anodisieren	Chromatieren Phosphatieren Anodisieren	Chromatieren Phosphatieren Anodisieren	Mildalkalische Reinigung
	Eingesetzte Stoffe (Chromatieren)	Chrom(VI) bzw. Chrom(III)	Chrom(VI) bzw. Chrom(III)	Chrom(VI) bzw. Chrom(III)	Chrom(VI) bzw. Chrom(III)	Mildalkalische Reiniger
	Badanzahl	10-12	10-12	10-12	10-12	3
	Schichtdicke	35 µm	35 µm	35 µm	65 µm	5 µm
	Primärenergie-bedarf	87 MJ/kg	97,7 MJ/kg	62,9 MJ/kg	124 MJ/kg	

Quelle: Harsch & Schuckert (1996) und eigene Darstellung

[35] Das Bindemittel besteht zu gleichen Teilen aus Epoxidharz und Silan. Zur genauen Struktur und Funktion des Bindemittels im Nanolack vgl. Kap. 5.2.2.4. und Wagner et al. (o.J.).

5.2.2.4 Beschreibung der Lebenswegstufen und der verwendeten Datengrundlagen

Als Datengrundlage für die weitere Betrachtung der Lebenswegstufen dient die Studie „Ganzheitliche Bilanzierung der Pulverlackiertechnik im Vergleich zu anderen Lackiertechnologien“ von Harsch und Schuckert (1996), in der die Pulverlackierung mit anderen Lackiertechnologien ökobilanziell verglichen wurde.

Rohstoff- und Grundstoffherstellung (Lackkomponenten)

Chromsäure

Chromerz ist der Rohstoff aus dem die Chrom(VI)-haltigen Produkte für die Chromatierung hergestellt werden.

Südafrika ist weltweit der größte Produzent von Chromerz mit einem Anteil zwischen 30% (1992) und fast 42% (1996), gefolgt von Kasachstan, der Türkei und Indien. Die sechs größten Produzenten erbrachten im Jahr 1996 etwa 86% der Weltförderung, die ca. 12 Mio t umfasst[36].

Chromerze werden hauptsächlich in der Eisenmetallurgie, zur Erzeugung von Edelstählen mit besonderen Eigenschaften, eingesetzt. In der chemischen Industrie werden aus Chromerzen zahlreiche Verbindungen für unterschiedliche Einsatzgebiete hergestellt. Darunter auch das für die Chromatierung notwendige Chrom(VI) (Chromtrioxid CrO_3).

Nach Untersuchungen des U.S. Bureau of Mines wurden 1993 in den OECD-Ländern rund 77% des Chroms in der Metallurgie, 9% in der Feuerfestindustrie und 14% in der chemischen Industrie verbraucht. Die Teilmärkte der chemischen Industrie – darunter auch die Herstellung von Chromsäure – sind aus Umweltschutzgründen im Schrumpfen begriffen.

Bindemittel

Als Bindemittel für Lacksysteme kommt eine große Anzahl von organischen und synthetischen Harzen zum Einsatz. Eingesetzt werden die Bindemittel in allen Lacken, je nach Anforderung in verschiedenen Anteilen und Mengen.

- Acrylatharze werden aus verschiedenen Vorprodukten synthetisiert
- Epoxidharze werden durch Kondensation gewonnen und dienen zur Herstellung besonders haftfester und beständiger Lacksysteme
- Polyurethanharze werden gebildet aus Polyether und Polyester und bieten hervorragende Oberflächeneigenschaften
- Polyesterharze sind Kondensationsprodukte aus gesättigten Monomeren
- Alkydharze werden aus mehrwertigen Alkoholen und mehrbasischen Carbonsäuren hergestellt
- Melaminharze werden durch die Ausgangsstoffe Melamin und Formaldehyd synthetisiert

[36] Daten zur Weltförderung von Chromerz sind im Anhang in Tabelle 43 aufgeführt.

Härter

- Isophorondiisocyanat (IPDI)
- Hexamethylendiisocyanat (HMDI)
- Phtalsäureanhydrid (PSA) bei Pulverlacken
- Triglycidylisocyanurat (TGIC)
- **Silane bei Nanolack**

Einen Überblick über die eingesetzten Bindemittel und Härter gibt Tabelle 10.

Tabelle 10: Eingesetzte Bindemittel und Härter bei den betrachteten Varianten

	Variante 1: 1 K CC	Variante 2: 2 K CC	Variante 3: Wasserlack	Variante 4: Pulverlack	Variante 5: Nanolack
Bindemittel- und Härteranteil	46,7%	51,5%	41,6%	95%	55%
Eingesetzte Bindemittel	Acrylatharz, Melaminharz, Polyurethanharz	Acrylatharz	Acrylatharz, Melaminharz, gesättigter Polyester	Acrylatharz	Epoxidharz (Anteil: 50%)
Eingesetzte Härter		HMDI-Präpolymer		Säurehärter (PSA)	Silane (Anteil: 50%)

Quelle: Harsch und Schuckert (1996) und eigene Darstellung

Lösemittel

Als Lösemittel dienen zumeist organische Stoffe. Vor dem Auftragen dienen sie dazu, dass der Lack flüssig bleibt. Nach dem Auftragen verflüchtigen sich die Lösemittel und der Lack wird fest. Eingesetzte Lösemittel sind:

- Diacetonalkohol
- n-Methylpyrollidon
- Aromate
- Butylacetat
- Butyldiglykolacetat
- n-Butanol
- Sekundär-Butanol
- Butyl(poly)glykol

Darüber hinaus werden in geringen Mengen noch Pigmente, Füllstoffe und Additive zugefügt, die in den weiteren Berechnungen aber unberücksichtigt bleiben.

Lackherstellung

Flüssiglacksysteme

Die Lackherstellung erfolgt im Wesentlichen durch die Mischung aller notwendigen Komponenten. Verluste treten hierbei in so geringem Maße auf, dass diese vernachlässigt

werden können. In einem Vormischer werden Bindemittel, Lösemittel, Pigmente und Füllstoffe miteinander gemischt und anschließend vermahlen. Im Komplettierer werden schließlich die restlichen Zusatzstoffe zugefügt. Nach einer Filterung wird das Gemisch abgefüllt.

Pulverlacksysteme

Bei der Pulverlackherstellung werden alle Inhaltsstoffe genau abgewogen über einen Extruder zugeführt. In mehreren Stufen wird die Mischung weiter pulverisiert und abschließend in eine Absackanlage überführt. Bei der Pulverlackherstellung sind die Verluste größer als bei nasschemischen Lacken, sie liegen bei ca. 2 bis 5%.

Nanolacksysteme

Die Herstellung des Nanolackes unterscheidet sich weniger von der Prozedur, sondern vielmehr durch die eingesetzten Bindemittel des Lackes. In der Regel sind die in Lacken eingesetzten Bindemittel von organischer Struktur. Aber auch anorganische Bindemittel kommen in gewissen Anwendungsbereichen zum Einsatz. Ihr Vorteil liegt vor allem in ihrer Härte und chemischen Beständigkeit. Breite Anwendungsfelder für diese Beschichtungsstoffe bleiben allerdings verschlossen, weil sie auch gravierende Nachteile, wie die schwierige Applikation und das spröde Verhalten nach dem Aushärten, besitzen.

Bei der Klasse der auf Nanotechnologie basierenden Lacke kommen so genannte anorganisch-organische Hybridpolymere zur Anwendung. Diese neuartigen Bindemittel stellen eine Mischform aus organischen und anorganischen Bindemitteln dar und vereinigen viele Vorteile dieser beiden Stoffe. Beim Aushärten bilden die anorganischen Partikel ein glasähnliches Netzwerk mit verknüpfenden organischen Elementen.

Die grundsätzlichen chemischen Reaktionen bei der Herstellung des Nanolackes basieren auf dem Sol-Gel-Prozess. Bei diesem Prozess werden häufig siliziumorganische Verbindungen, die so genannten Silane eingesetzt. Die Synthese des Bindemittels erfolgt durch die Hydrolyse[37] von Alkoxysilanen. Speziell bei dem in dieser Fallstudie untersuchten Lack kommt hierbei das Produkt Dynasylan® Glymo von Degussa zum Einsatz. Dieser Teil der Reaktion führt zur Bildung des anorganischen Teils des Bindemittels.

Zeitgleich erfolgt die Bildung des anorganischen Teils des Bindemittels. Organische Seitenketten an den Silanverbindungen reagieren zu organischen Ketten. Durch die Bildung dieses anorganisch-organischen Netzwerks härtet der Lack aus.

Der Verarbeitungszustand des Lackes entspricht jedoch dem Zustand vor dem Aushärten. Das Bindemittel liegt als dünnflüssiges kolloidales System vor, dessen Kolloidpartikel einen Durchmesser von ca. 40 bis 50 nm haben. Im Lösemittel befinden sich zu diesem Zeitpunkt unreagierte Silane, Silanole sowie bereits teilweise gebildete Polysiloxane. Dieses kolloidale System befindet sich im in der Chemie so genannten Sol-Zustand. Nach dem Auftragen und Aushärten des Lacks liegt der Gel-Zustand vor. Der gesamte Prozess kann deswegen als Sol-Gel-Prozess bezeichnet werden (Wagner o.J.).

---

[37] Unter Hydrolyse versteht man die Spaltung einer chemischen Verbindung unter Anlagerung eines Wassermoleküls. Die Reaktion erfolgt in diesem Fall mittels Katalysatoren und unter Bildung von Silanolen. Diese sind reaktiv und können mit weiteren Silanen zu Polysiloxanstrukturen umgesetzt werden. Vgl. auch hierzu (Wagner).

Datengrundlage und Annahmen:

Als Datengrundlage der vier vorhandenen Lacktechnologien werden die vorhandenen zusammengefassten Ökobilanzdaten der Studie von Harsch und Schuckert (1996) zu Grunde gelegt. Da keine quantifizierten Daten der Vorproduktion der Nanolackbestandteile, insbesondere des eingesetzten Silans vorhanden sind, werden für den Nanolack die Daten des 2-Komponenten-Lacks übernommen und mit einem „Sicherheitfaktor“ von 1,5 belegt. Die verwendeten Basisdaten für jeweils 1 kg applikationsfähigem Lack sind im Anhang (Tabelle 44) aufgeführt.

Oberflächenvorbehandlung

Stahl- und Aluminiumbauteile müssen in der Regel vor der Lackierung durch verschiedene aufeinander folgende Oberflächenbehandlungen vor Korrosion geschützt werden. Dies wird erreicht durch das Aufbringen einer chemischen Konversionsschicht. Das gängige Korrosionsschutz-Verfahren stellt, vor allem bei Aluminium, die Chromatierung dar. Die Vorbehandlung erfolgt hierbei entweder durch ein Tauchbad oder im Sprühverfahren unter Einsatz chrom(VI)-haltiger Produkte. Die Oberflächenvorbehandlung bei Aluminium kann aber auch durch eines der folgenden Verfahren geschehen: chemisches Oxidieren, Phosphatieren oder Anodisieren.

Chromatieren

Beim Chromatieren bildet sich eine Konversionsschicht aus komplexen Chromaten heraus. Die charakteristische Schichtdicke des so entstandenen Überzugs misst nur etwa zwischen 0,01 und 10 Mikrometer. Der Prozessablauf bei der Chromatierung ist außerordentlich komplex. In automatisierten Anwendungsbereichen, wie beispielsweise der Karosserien-beschichtung, durchlaufen die zu behandelnden Werkstücke oftmals zehn oder mehr sich teilweise wiederholende Bäder. Die folgenden Prozessstufen müssen allerdings zwangsläufig durchlaufen werden:

- Reinigen: Die Oberfläche wird mit Hilfe anderer chemischer Verfahren und Lösungsmittel von Fett, Öl und sonstigen Verschmutzungen befreit.
- Zwischenspülen: Die Lösungsmittel und Reinigungschemikalien werden mit kaltem oder warmem Wasser abgespült. Wurden beim Reinigen nur organische Lösungsmittel verwendet, so entfällt dieser Schritt.
- Aktivieren: Durch den Einsatz von Aktivierungsmitteln (z.B. salpeter- und schwefelhaltigen Lösungen) erhält man Kristallüberzüge, die in ihrer Struktur wesentlich feiner sind.
- Chromatieren
- Spülen: Mit voll entsalztem Wasser werden die überschüssigen Chromatierungs- und Phosphatierungsmittel weggespült. Dabei darf beim Chromatieren die Wassertemperatur nicht über 50 – 60 °C liegen.
- Passivieren: Mit Hilfe von stark verdünnten chromsäure- bzw. chromsäurephosphor-säurehaltigen Lösungen wird durch Spritzen oder Tauchen eine Passivierung der aufgetragenen Schicht erreicht.

- Trocknen: Das Trocknen wird mit warmer Luft direkt nach der Naßbehandlung durchgeführt. Dieses sollte zum Vermeiden von pulvrigen oder abwischbaren Schichten bei der Gelb- und Transparentchromatierung 60 °C, bei der Grünchromatierung 80 – 90 °C nicht überschreiten (Gersing).

Die Konversionsschicht besteht aus Oxidhydraten des Chrom(VI), des Chrom (III) und des Aluminiums. Die Schichtdicke wird üblicherweise in drei Klassen eingeteilt (Jelinek 1997):

Klasse 1: Schichtgewicht 3,2 bis 11 g/m²;
Anwendung für höchste Korrosionsbeständigkeit auch ohne weitere Lackierung

Klasse 2: Schichtgewicht 1,1 bis 3,8 g/m²;
Korrosionsschutz und Vorbehandlung vor dem Lackieren

Klasse 3: Schichtgewicht < 1 g/m²;
Nur für dekorative Zwecke, kaum Korrosionsschutz

Die Eigenschaften – z.B. Schichtdicke und Korrosionsbeständigkeit – der durch Chromatierung erlangten Konversionsschicht sind von der Badtemperatur, der Behandlungszeit und der Zusammensetzung des Chrombades abhängig. Einen Überblick über verschiedene Badzusammensetzungen gibt Tabelle 11.

Tabelle 11: Typische Zusammensetzungen von unterschiedlichen Chrombädern:

Zusammensetzung	Mengenanteil (g/l)	PH-Wert	Temperatur (°C)	Behandlungszeit (min)
Chromsäure Na-(oder K-) dichromat Kaliumfluorid	3 – 7 3 – 6 0,5 - 1	1,2 – 1,8	30 – 35	2 - 5
Chromsäure Natriumdichromat Natriumfluorid	3,5 – 4 3 – 3,5 0,3	1,5	30	3
Chromsäure Natriumdichromat Natriumfluorid	5 7 0,6	1,8	30 – 35	2 – 3
Ammoniumdichromat Fluorwasserstoffsäure	10 – 350 0,25 – 11	< 3	30	1 - 5

Quelle: Jelinek (1997)

Phosphatieren

Phosphatierungsverfahren werden standardmäßig bei der Vorbehandlung von Stahl und Eisen eingesetzt. Aber auch bei der Vorbehandlung von Aluminium stellt sie eine Alternative zur Chromatierung dar.

Wird Aluminium mit einer verdünnten Phosphorsäurelösung behandelt, entsteht ein dünner Film aus Aluminiumphosphat. Im Vergleich zu Chromatierung und Anodisierung ist die

Phosphatierung zwar teurer und komplizierter, ergibt jedoch korrosionsbeständigere Filme, die eine bessere Haftungsgrundlage für Beschichtungen gewährleisten.

Zum Phosphatieren von Aluminium werden in der Regel Lösungen mit ähnlicher Zusammensetzung verwendet wie bei der Behandlung von Stahl. Wesentliche Inhaltsstoffe sind (Brock et al. 1998):

1. Metallhydrogenphosphate
2. Oxidationsmittel
3. komplexe Fluoride

Anodisieren

Der Prozessablauf der Anodisierung ist von der Anzahl der Bäder und der Komplexität des Prozesses mit der Chromatierung vergleichbar. Allerdings bietet er deutliche Vorteile in Bezug auf die ökologischen Aspekte (chromfrei, fluoridfrei). Die bei der Chromatierung verwendeten chrom(VI)- und fluoridhaltigen Prozesslösungen können durch handelsübliche Schwefelsäure ersetzt werden. Dies führt zu einer stark verbesserten Abwasser- und Abfallqualität. Darüber hinaus ist die entstehende Konversionsschicht korrosionsbeständiger als beim Chromverfahren.

Vorbehandlung bei der Nanolack-Anwendung

Eine spezielle Vorbehandlung ist bei der Nano-Lackierung nicht notwendig. Nur die ersten Prozessschritte, wie die mildalkalische Reinigung, werden benötigt.

Tabelle 12: Vergleich der Verfahren anhand der Bäderanzahl

Becken-anzahl	Chromatieren	Anodisieren	Vorbehandlung für Nanolack-Anwendung
1	Mildalkalische Entfettung	Alkalische Entfettung	Mildalkalische Reinigung
2	Spülen	Spülen	Spülen
3	Alkalisches Beizen	Alkalisches Beizen	
4	Spülen	Spülen	
5	Spülen	Spülen	
6	Dekapieren/Aktivieren	Dekapieren/Aktivieren	
7	Spülen	Spülen	
8	Chromatieren	Anodisieren	
9	Spülen	2x Spülen	
10	VE-Spülen	Verdichten	

Quelle: Funk (2003) und eigene Darstellung

Tabelle 13: Ökologische Vor- und Nachteile der Verfahren

		Gelbchromatierung		Anodisation		Vorbehandlung für Nanolack	
Einsatzstoff	**Einsatzstoff**	**Chromsäure (CrO3)**		**Schwefelsäure (H2SO4)**		**Mildalkalische Reiniger (pH-Wert 8 bis 10)**	
	Wassergefähr-dungsklasse	WGK 3		WGK 1		WGK 2	
	Lagerung	Rechtlich und baulich aufwendige Gefahrstofflagerung		einfachere Gefahrstofflagerung		Einfache Lagerung	
	Gefahrenhinweise und Sicherheits-ratschläge (R-/S-Sätze)	- Spezielle Anweisungen beim Umgang mit Chromsäure erforderlich (Arbeitsschutz) - Sehr giftig für Wasserorganismen - krebserregend		- Spezielle Anweisungen beim Umgang mit Schwefelsäure erforderlich (Arbeitsschutz) - Verursacht schwere Verätzungen		- Gesundheitsschädlich nur bei Einatmen oder Verschlucken	
Anlagentechnik		**Tauchen**	**Sprühen**	**Tauchen**	**Sprühen**	**Tauchen**	**Sprühen**
Input / Output	Abwassermenge	bei Beckentechnik wesentlich höher	kann durch gezieltes Sprühen minimiert werden	bei Beckentechnik wesentlich höher	kann durch gezieltes Sprühen minimiert werden	bei Beckentechnik wesentlich höher	kann durch gezieltes Sprühen minimiert werden
	Abfallqualität	$Cr^{3+/6+}$ sehr giftig		saure sulfathaltige Lösung		90% biologisch abbaubar	
	Abluft	enthält Chromsäuredämpfe		enthält Schwefelsäuredämpfe, die nach Kondensation zurückgeleitet werden		keine Auswirkungen	
	Energie	Badtemperatur 25-40°C, größeres Volumen muss auf Temperatur gehalten werden	Badtemperatur 25-40°C	Badtemperatur auf RT, bei größerem Durchsatz Kühlung notwendig	Badtemperatur auf RT, Kühlung kann evtl. entfallen	Statt wie üblich 10 bis 12 verschiedene Bäder, nur noch 3 Bäder notwendig	
Techn. / wirtsch. Merkmale	Prozess-/Taktzeit	ca. 5 Minuten		ca. 5 Minuten			
	Platzbedarf der Anlagen	ca. 100 m²	ca. 20 m²	ca. 100 m²	ca. 20 m²	Wesentlich geringer	
	Durchsatz	100 - 200 m²/h	200 - 400 m²/h	100 - 200 m²/h	200 - 400 m²/h		
	Schichtdicke (Konversions-schicht)	3 - 8 µm		10 µm		keine	
	Bereitzustellende Volumen	ca. 20 m³ pro Bad und Spüle	ca. 5-10 m³ pro Aktivbad und ca. 5 m³ Spülen	ca. 20 m³ pro Bad und Spüle	ca. 5-10 m³ pro Aktivbad und ca. 5 m³ Spülen		
	Rechtliche Vorgaben	Richtlinie 2000/53/EG					

Quelle: Funk (2003) und eigene Darstellung

Datengrundlage und Annahmen:

Da geeignete quantifizierte Daten zu den dargestellten Vorbehandlungsmethoden nicht zur Verfügung stehen, kann dieser Prozessschritt bei den weiteren Berechnungen der Umweltauswirkungen keine Berücksichtigung finden. Andererseits wird allein schon aus der Gegenüberstellung deutlich, dass der Nanolack eindeutige ökologische Vorteile besitzt.

Lackiervorgang (Applikation)

Der Nano-Klarlack, auf den im Rahmen dieser Fallstudie besonderes Gewicht gelegt wird, lässt sich nach der Oberflächenvorbehandlung mit den gleichen Verfahren auftragen wie ein 1-Komponenten-Klarlack. Hauptunterschied zu den anderen Lacksystemen ist, dass nur in etwa ein Zehntel der normalen Lackmenge benötigt wird. Aufgrund des gleichen Applikationsverfahrens für den Nanolack werden sich die weiteren Ausführungen stark an Harsch und Schuckert (1996) anlehnen.

Der Vergleich der unterschiedlichen Lacksysteme bei ihrer Applikation erfolgt anhand der Auslegungsdaten von Neuanlagen mit der gleichen Produktionskapazität. Den allgemeinen Ablauf der Applikation zeigt Tabelle 14. Daraus wird ersichtlich, dass die Applikation im Wesentlichen in drei Schritten erfolgt: Innenraum, Außenhaut und manuelle Nacharbeit.

Tabelle 14: Verfahrenstechnischer Ablauf der Klarlackbeschichtung

1 K CC, 2 K CC, Nanolack	Wasserklarlack	Pulverklarlack
Zwischentrockner	Zwischentrockner	Zwischentrockner
Kühlzone	Kühlzone	Kühlzone
Luftschleuse	Luftschleuse	Luftschleuse
Beschichtung Karosserie-Innenseite Roboter-Station	Beschichtung Karosserie-Innenseite Roboter-Station	Beschichtung Karosserie-Innenseite Roboter-Station
Beschichtung Karosserie-Außenseite ESTA-Station	Beschichtung Karosserie-Außenseite ESTA-Station	Beschichtung Karosserie-Außenseite Tribo-Station
Manuelle Nacharbeit	Manuelle Nacharbeit	Manuelle Nacharbeit
Luftschleuse	Luftschleuse	Luftschleuse
	IR-Vortrockner	
Trockner	Trockner	Trockner

Quelle: Harsch und Schuckert (1996) und eigene Darstellung

Bei der Applikation lassen sich bestimmte Größen, die Einfluss auf die Qualität und Quantität des Outputs haben, beeinflussen. Zu diesen variablen Größen gehören der Lackeinsatz, das

Lacksystem, die Art der Energiebereitstellung und die Produktionskapazität. Es wurden im Rahmen dieser Fallstudie durchschnittliche Ausprägungen dieser Größen angenommen.

Die verwendeten Basisdaten für die Applikation sind im Anhang (Tabelle 45) aufgeführt.

Tabelle 15: Veränderliche Größen und deren durchschnittliche Ausprägung für die verschiedenen Lacksysteme

Lacksystem		**1 K CC**	**2 K CC**	**Wasserlack**	**Pulverlack**	**Nanolack**
Produktionskapazität		40 Karossen pro Stunde				
Lackierte Oberfläche		20 m²				
Lackeinsatz	Schichtdicke	35 µm	35 µm	35 µm	65 µm	5 µm
	Auftrags-wirkungsgrad	63,6%	63,6%	61,5%	64,7%	63,6%
	Overspray-recycling	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
	Lackeinsatz kg / Karosse		2,303	3,174	2,421	0,32

Quelle: Harsch und Schuckert (1996) und eigene Darstellung

Nutzungsphase, Entsorgung und Recycling

In der Nutzungsphase werden die unterschiedlichen Umweltauswirkungen der betrachteten Variante bestimmt, die sich durch die verschiedenen aufgetragenen Lackmengen ergeben. Als Laufleistung des Automobils wurden 200.000 km angenommen. Die von Harsch und Schuckert (1996) verwendete Minderverbrauchsregel wurde ebenfalls übernommen.

Diese so genannte Minderverbrauchsregel besagt, dass ausgehend vom Gewicht und Verbrauch eines bestimmten Automobiltyps, eine Reduzierung des Gewichts um 10% eine Reduzierung des Verbrauchs um 2,5% – 6% verursacht. In diesem Bereich zwischen 90 und 100% des ursprünglichen Gesamtgewichts wird angenommen, dass eingespartes Gewicht und eingesparte Treibstoffmenge proportional seien. Als Grundlage für den Verbrauch wurde aus der Datenbank GEMIS 4.1 ein Autotyp mit mittlerem Benzinverbrauch ausgewählt.

Bei der Entsorgung des Automobils nach seiner Nutzungsphase wird angenommen, dass sich diese nicht wesentlich unterscheiden und werden deshalb in der Bilanzierung nicht berücksichtigt.

5.2.3 Sachbilanz

In der Sachbilanz erfolgt eine Aufzeichnung der stofflichen und energetischen Beziehungen zwischen dem betrachteten Beschichtungssystem und der Umwelt, d.h. dass die Inputflüsse, die der Umwelt entnommen werden, und die Outputflüsse, die an die Umwelt abgegeben werden, erfasst werden. Ziel der Sachbilanz ist es, für die ausgewählten Varianten unter Beachtung der funktionellen Äquivalenz ein Dateninventar zu erstellen.

Da quantitative Daten für die Vorbehandlung nicht vorliegen sowie die Lebenswegstufe Entsorgung/Recycling keine Berücksichtigung findet, ergeben sich für die jeweiligen Variantenbetrachtungen nur Berechnungen für die Lackerstellung inklusive der Rohstoffherstellung, Applikation sowie für die Gebrauchsphase.

5.2.3.1 Ergebnisse der Sachbilanz

Die folgenden Tabellen stellen die berechneten Input- und Outputströme für die betrachteten Varianten dar.

Tabelle 16: Einsatzmengen für die Chromatierung und die Lackierung (g/m² lackierter Aluminium-Automobilfläche)

	1 K CC	2 K CC	Wasser CC	Pulver CC	Nanolack
Chromatierung	2,50	2,50	2,50	2,50	0,00
Bindemittel / Härtersystem	59,99	59,30	66,02	115,00	8,80
Additive	3,34	4,03	2,22	5,57	0,48
Lösemittel	65,12	51,82	27,30	0,48	6,72
Wasser	0,00	0,00	63,16	0,00	0,00
Gesamt	130,95	117,65	161,20	123,55	16,00

Quelle: Harsch und Schuckert (1996) und eigene Berechnungen

Tabelle 17: Primärenergieverbrauch (MJ/m² lackierter Aluminium-Automobilfläche)

	1 K CC	2 K CC	Wasser CC	Pulver CC	Nanolack
Lackherstellung	11,175	11,250	9,982	15,010	2,345
Applikation	38,225	38,305	38,605	31,970	33,600
Gebrauchsphase	7,37	7,37	7,66	13,87	1,02
Gesamt	56,769	56,925	56,248	60,849	36,961

Quelle: Harsch und Schuckert (1996) und eigene Berechnungen

Tabelle 18: Outputströme bezogen auf 1 m² lackierter Aluminium-Automobilfläche

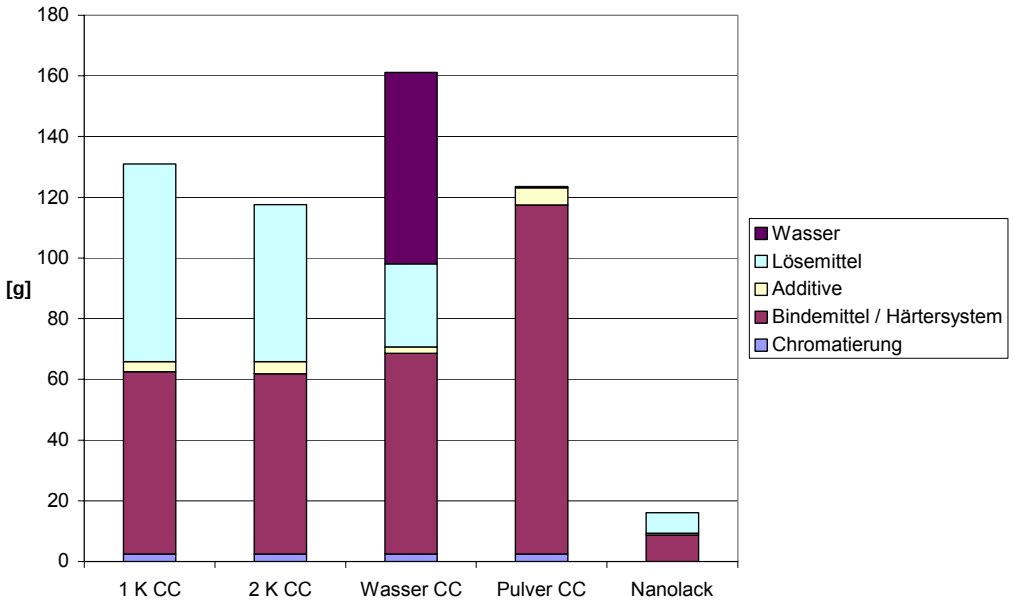
Emissionen in Luft	1 K CC	2 K CC	Wasser CC	Pulver CC	Nanolack
CO2 [kg]	3,001	3,010	2,935	3,171	1,984
NM VOC [g]	4,835	4,722	4,323	5,780	1,590
Methan [g]	5,821	5,796	5,899	6,109	3,989
Nox [g]	5,894	5,793	5,029	5,968	3,279
SO2 [g]	2,421	2,651	2,547	2,938	1,489
CO [mg]	10471,992	10485,588	10777,813	18944,114	1869,001
Staub [mg]	626,099	743,811	598,365	548,658	484,093
HCl [mg]	79,733	79,229	86,987	77,724	65,225
HF [mg]	27,692	27,356	29,831	24,910	23,314
N2O [mg]	63,868	63,875	66,396	120,205	8,812
NH3 [mg]	40,096	40,100	41,683	75,464	5,532
Emissionen in Wasser					
Abwasser [l]	198,255	195,246	203,430	171,742	165,012
CSB [g]	1,054	1,405	1,242	1,046	0,419
TOC [g]	0,956	1,123	1,005	0,972	0,519
BSB [g]	0,240	0,171	0,232	0,270	0,054
Feststoffe [g]	0,491	1,142	0,508	0,537	0,492
HC [mg]	14,409	12,612	10,969	17,101	3,374
NaCl [g]	36,622	10,746	11,486	20,955	2,353
Eisen [mg]	5,581	5,374	5,506	32,584	3,765
Nickel [mg]	0,225	0,200	0,260	0,454	0,086
Chrom [mg]	0,074	0,063	0,063	0,067	0,038
Blei [mg]	0,330	0,376	0,350	0,299	0,282
Kupfer [mg]	0,044	0,035	0,038	0,044	0,021
Cadmium [mg]	0,008	0,007	0,008	0,010	0,004
Abfälle					
Industriemüll [g]	7,964	7,087	8,227	21,806	2,928
Hausmüll [g]	2,274	1,747	2,275	2,158	0,486
Sondermüll [g]	4,379	3,506	8,822	10,674	0,773
Radioaktive Abfälle [g]	0,227	0,230	0,221	0,345	0,104

Quelle: Harsch und Schuckert (1996) und eigene Berechnungen

5.2.3.2 Auswertungen der Sachbilanz

Die Lackeinsatzmengen werden durch die notwendigen aufzutragenden Beschichtungsdicken bestimmt. Die geringe Schichtdicke des Nanolackes ist die wesentliche Ursache für die hohe Ressourceneffizienz. Trotz des hohen Anteils an Lösemitteln im Nanolack ist die absolute Lösemittelmenge ebenfalls im Verhältnis zu den anderen Varianten sehr gering.

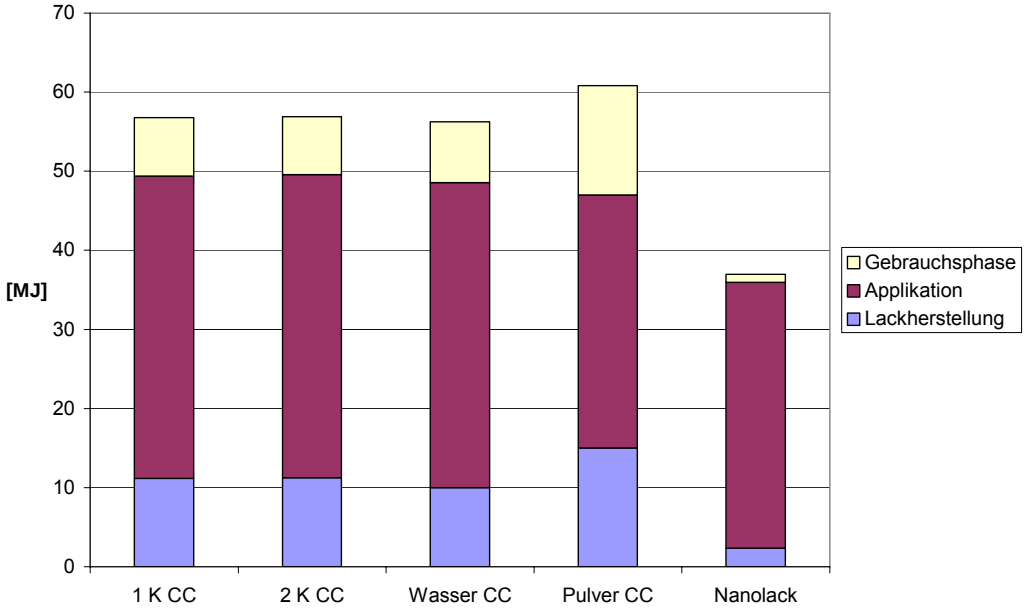
Abbildung 14: Lack- und Chromatierungsmengen (g/m² lackierter Aluminium-Automobilfläche)



Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Harsch und Schuckert 1996)

Der Primärenergieverbrauch wird überwiegend durch den energetischen Aufwand der Applikation bestimmt und umfasst neben dem eigentlichen Beschichtungsprozess auch die Aufwendungen für die Trocknung etc. Die Unterschiede zwischen den betrachteten Varianten sind hierbei gering. Der um ca. 35% geringere Primärenergieverbrauch des Nanolackes resultiert einerseits in der Lackherstellung durch die geringere Lackmenge. Andererseits wird auf Grund der eingesparten Masse in der Gebrauchsphase Treibstoff eingespart.

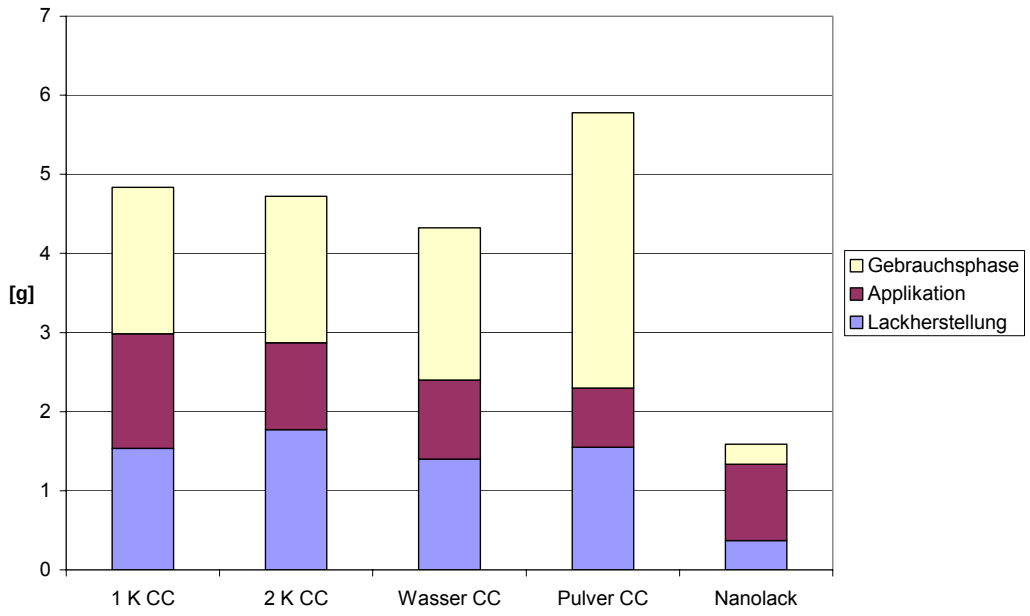
Abbildung 15: Primärenergieverbrauch (g/m² lackierter Aluminium-Automobilfläche)



Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Harsch und Schuckert 1996)

Auch bei den VOC-Emissionen wird der Vorteil des Nanolackes insbesondere in den Lebenswegstufen Lackerstellung sowie Gebrauchsphase sehr deutlich. Die VOC-Emissionen des Nanolackes sind um ca. 65% niedriger als die Emissionen der anderen Varianten.

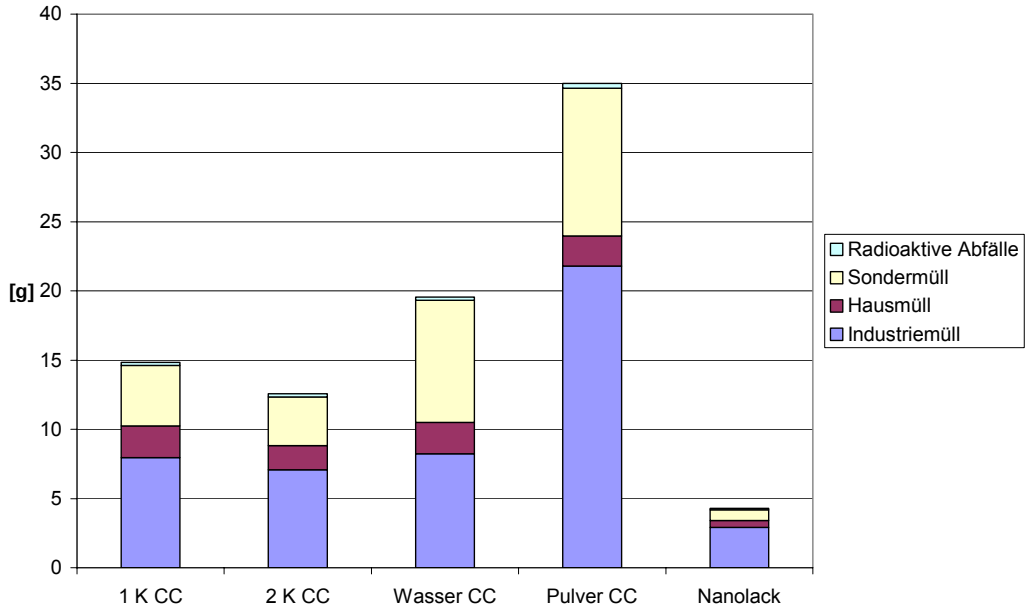
Abbildung 16: VOC-Emissionen (g/m² lackierter Aluminium-Automobilfläche)



Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Harsch und Schuckert 1996)

Ähnlich verhalten sich auch die anderen aufgeführten Emissionswerte in der Tabelle 18. Auch im Abfallanfall zeigt sich die ökologische Vorteilhaftigkeit des Nanolackes.

Abbildung 17: Abfallanfall (g/m² lackierter Aluminium-Automobilfläche)



Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Harsch und Schuckert 1996)

5.2.4 Wirkungsabschätzung

Für eine Wirkungsabschätzung ist es erforderlich über Emissionsdaten zu verfügen, die sich bestimmten Umweltwirkungen zuordnen lassen. Bei den vorliegenden Daten ist es nur für die Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Versauerung und Eutrophierung sinnvoll, eine Auswertung darzustellen.

5.2.4.1 Beschreibung der Umweltwirkungen

Treibhauseffekt

Die im Tagesverlauf auf die Erdoberfläche einfallende Sonnenstrahlung wird als Wärme gespeichert und während der Nacht als Infrarotstrahlung wieder abgegeben. Ein Teil dieser Infrarotstrahlung wird von Spurengasen, die sich in der Troposphäre (0 - 10 km) befinden, absorbiert und auf die Erdoberfläche reflektiert. Dieser natürliche Treibhauseffekt ist lebenswichtig, da die Erdoberfläche ansonsten unwirtliche Minusgrade aufweisen würde. Der als Umweltproblem diskutierte Treibhauseffekt umschreibt nun die zusätzliche Erwärmung der Erdoberfläche, hervorgerufen durch die Zunahme der Spurengase und das Auftreten neuer Treibhausgase in der Troposphäre wie bspw. der FKW (Fluorkohlenwasserstoffe). Die wichtigsten Treibhausgase sind Kohlendioxid, Methan, Ozon, FKW und Distickstoffoxid, die zu 50% aus dem Energieverbrauch, zu 20% aus der chemischen Industrie, zu 15% aus der Landwirtschaft und zu weiteren 15% aus der Zerstörung der Regenwälder herrühren.

Mit dem Treibhauseffekt wird eine Vielzahl von Wirkungen umschrieben, die aus der Erwärmung der Atmosphäre resultieren. Dazu gehören neben einem steigenden Meeresspiegel auch die Zunahme extremer klimatischer Wetterlagen wie Orkane, Sturmfluten, Dürrekatastrophen etc. Auch Änderungen in der Zusammensetzung und dem Verbreitungsgebiet von Flora und Fauna sind bereits zu beobachten.

Versauerung

Die Versauerung stellt einen Sammelbegriff für mehrere unterschiedliche Wirkungen dar. Zurückzuführen ist das Phänomen im Wesentlichen auf Schwefeldioxid- und Stickoxidemissionen aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe in Kraftwerken und in zunehmendem Maße aus dem motorisierten Verkehr. Darüber hinaus tragen auch Emissionen von Ammoniak, Chlor- und Fluorwasserstoff zur Versauerung bei. Schwefeldioxid- und Stickoxidemissionen reagieren mit Luftsauerstoff und Wasser zu Schwefel- oder Salpetersäure.

In der vorliegenden Wirkungsabschätzung wird das Versauerungspotenzial, englisch Acidification Potential (AP), mit den Faktoren einer Studie des holländischen „Centre for Environmental Science (CML)“ (Heijungs 1992) gebildet. Substanzen, die erst nach der Oxidation (wie z.B. Ammoniak) oder der Hydrolyse (wie z.B. SO_2) zur Versauerung beitragen, gehen dabei ebenfalls ein. Im Modell von CML werden nur Luftemissionen berücksichtigt, Wasseremissionen fließen nicht ein.

Eutrophierung

Unter Eutrophierung ist der vermehrte Nährstoffeintrag in Böden und Gewässer zu verstehen. Der anthropogene Eintrag von Stickstoffverbindungen (Nitraten u.a.) aus übermäßigem Düngemitteleinsatz sowie von Phosphorverbindungen (Phosphaten u.a.) aus Waschmitteln oder Exkrementen aus Abwässern führt zur Überdüngung von Gewässern. Neben diesen beiden Stoffgruppen wird der CSB (chemischer Sauerstoffbedarf) als Maß für den Eintrag organischer Schadstoffe herangezogen. Eine Folge des überhöhten Nährstoffangebotes ist das massenhafte Algenwachstum. Absterbende Algen werden unter hohem Sauerstoffverbrauch zersetzt und führen so zu Sauerstoffmangel im Gewässer. Als Folgeerscheinung treten Fäulnisprozesse auf, toxische Substanzen wie Schwefelwasserstoff werden gebildet, die wiederum zum Fischsterben führen. Das bedeutet, daß mit dem erhöhten Nährstoffeintrag in Gewässer ein sensibles Wirkungsgefüge nachhaltig und z.T. unwiderruflich gestört wird.

Für die Wirkungsabschätzung wurden folgende Wirkungsfaktoren zu Grunde gelegt.

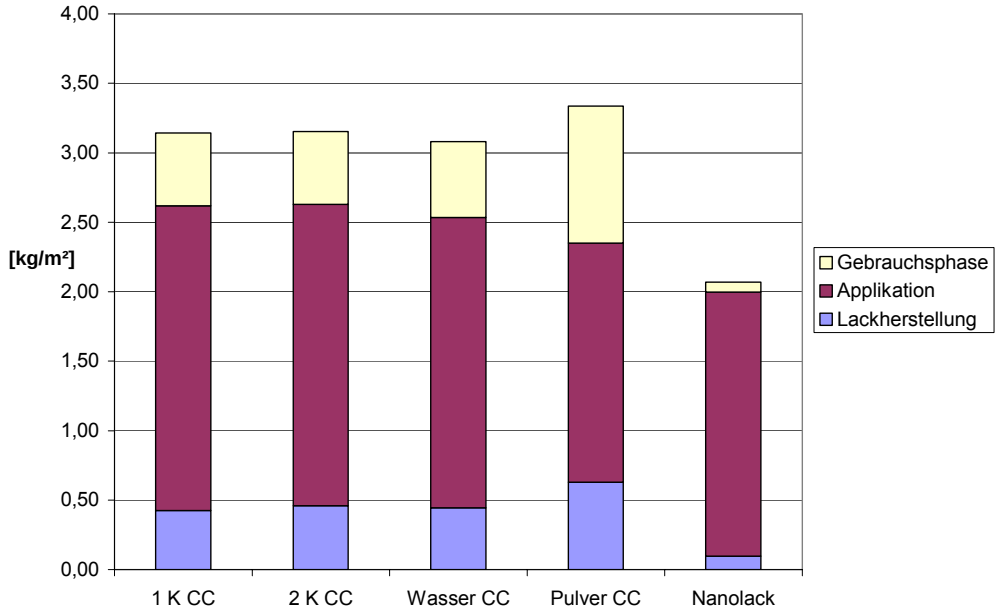
Tabelle 19: Verwendete Wirkungsfaktoren

Luftbelastungen	Treibhauspotential (GWP 100)	Versauerungspotential (AP)	Eutrophierungspotential (NP)
Kohlendioxid (CO_2)	1		
Methan (CH_4)	21		
Stickoxide (NO_x)		0,70	0,13
Lachgas (N_2O)	310		
Schwefeldioxid (SO_2)		1,00	
Salzsäure (HCl)		0,88	
Fluorwasserstoff (HF)		1,60	
Ammoniak (NH_3)		1,88	

5.2.4.2 Quantitative Auswertung der Wirkungsabschätzung

Der Treibhauseffekt wird im Untersuchungssystem durch Emissionen von Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Distickstoffoxid (N_2O) hervorgerufen, wobei die Kohlendioxidemissionen aus dem Verbrauch fossiler Energieträger den größten Anteil ausmachen. Ähnlich dem Primärenergieverbrauch ist der Nanolack um ca. 1/3 besser als die anderen Beschichtungsvarianten.

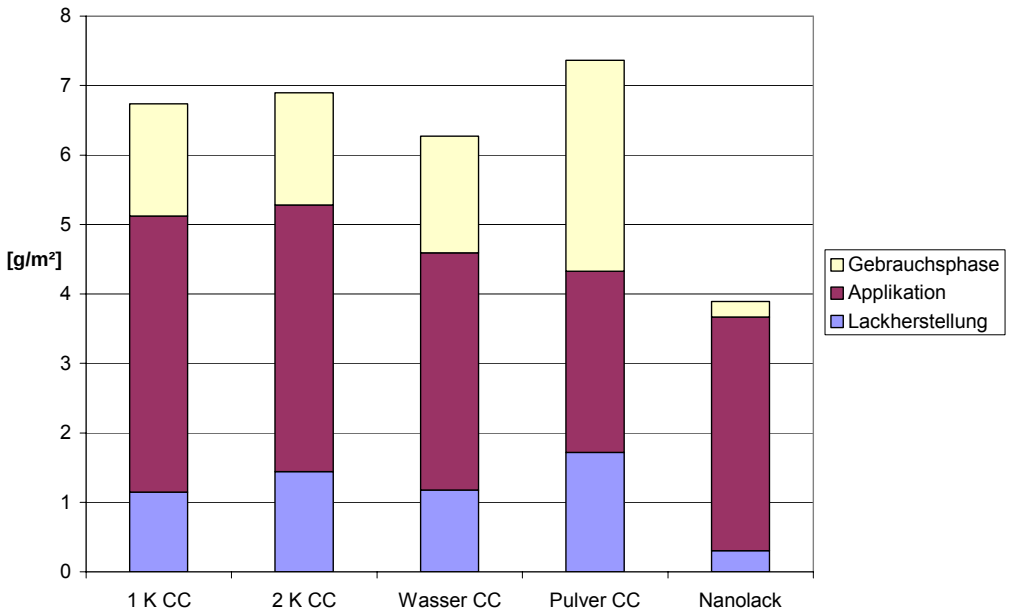
Abbildung 18: Treibhauspotenzial (kg/m² lackierter Aluminium-Automobilfläche)



Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Harsch und Schuckert 1996)

Die Versauerung wird durch Emissionen von Stickoxiden, Schwefeldioxid, Ammoniak, Salzsäure und Fluorwasserstoff hervorgerufen, wobei die drei letztgenannten Stoffe in den betrachteten Szenarien nur eine untergeordnete Rolle spielen.

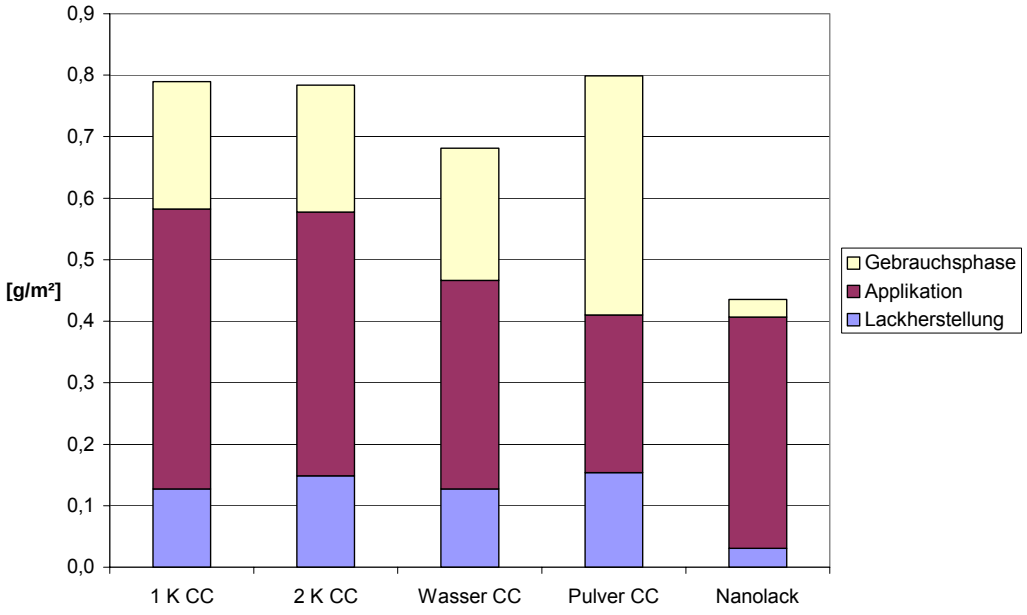
Abbildung 19: Versauerungspotenzial (g/m² lackierter Aluminium-Automobilfläche)



Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Harsch und Schuckert 1996)

Zur Eutrophierung tragen neben Phosphorverbindungen aus Waschmitteln auch die Stickoxidemissionen und organische Schadstoffe bei, die durch den chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) ausgedrückt werden. In unserem Fall können hauptsächlich die Stickoxidemissionen dafür verantwortlich gemacht werden. Auch bei dieser Wirkungskategorie wird die Vorteilhaftigkeit des Einsatzes von Nanolack deutlich, der ca. 40% besser als die anderen Varianten abschneidet.

Abbildung 20: Eutrophierungspotenzial (g /m² lackierter Aluminium-Automobilfläche)



Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Harsch und Schuckert 1996)

5.2.4.3 Qualitative Aspekte der Wirkungsabschätzung

Zur Darstellung der Human- und Ökotoxizität in Ökobilanzen existiert noch kein allgemein akzeptiertes quantitatives Verfahren. An dieser Stelle werden daher kurz einzelne Substanzen, die human- und ökotoxisch wirken, qualitativ behandelt. Methodenbedingt können in der Wirkungsabschätzung keine lokalen und zeitabhängigen Aussagen getroffen werden.

Es sollten solche Substanzen erfasst werden, die über die Emissionsquelle hinaus von globaler Bedeutung sind. Ferner sollten Stoffe einbezogen werden, die keine Wirkschwelle besitzen. Ziel sollte es sein, derartige Stoffe möglichst zu minimieren bzw. zu ersetzen.

Kohlenmonoxid

Im Bereich der Luftbelastungen stellte Kohlenmonoxid (als erbgutverändernd eingestuft) lange Zeit ein Problem dar, insbesondere durch die Emissionen durch den Verkehrssektor. Durch die Erfolge der CO-Minderung durch den Einsatz von Katalysatoren konnten die Emissionen sehr stark gesenkt werden, so dass das Umweltbundesamt in einer Veröffentlichung zu technischen Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen zu dem Ergebnis kommt, dass Kohlenmonoxid kein lufthygienisches Problem mehr darstellt (UBA1999).

5.2.5 Zusammenfassung

Diese Fallstudie verdeutlicht eindrucksvoll, dass im Bereich Beschichtungen bei allen betrachteten Emissionen und Umweltwirkungen sehr hohe Ökoeffizienzpotenziale durch den Einsatz von nanotechnologiebasierten Beschichtungen bestehen. Darüber hinaus konnte der weitere Vorteil einer einfachen Vorbehandlung nur qualitativ aufgezeigt werden. Durch die geringe notwendige Beschichtungsdicke wird eine hohe Ressourceneffizienz erreicht; Vorteile aus der Gebrauchsphase sind insbesondere im Transportsektor im Zuge des Leichtbautrends zu erwarten. Neben der Automobilindustrie würden sich diese Potenziale noch stärker in der Flugzeugindustrie und in der Bahnindustrie auswirken. Weiteres Optimierungspotenzial besteht beim Nanolack noch darin, den Lösemittelanteil in der Lackapplikation zu senken.

5.3 Fallstudie 2: Nanotechnologische Prozessinnovation der Styrolsynthese

5.3.1 Inhalt, Ziel und Methode der Fallstudie

Katalyseanwendungen sind einer der ältesten Einsatzbereiche von Nanotechnologie. Grundsätzlich lässt sich die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit von Katalysatoren durch immer kleinere Nanopartikel verbessern. Auch das Verständnis für die Katalyse ändert sich drastisch: War man lange bei der Entwicklung der Katalysatoren auf empirische Methoden und Erfahrungswerte angewiesen, ist man jetzt in der Lage durch Methoden der Nanoanalytik, wie sie z.B. die Rastertunnelmikroskopie darstellt, die Mechanismen katalytischer Reaktionen im Detail aufzuklären.

Im Rahmen dieser Fallstudie wird exemplarisch das ökologische Potenzial von auf Nanotechnologie basierenden Katalyseanwendungen untersucht. Als konkretes Beispiel wird der Einsatz eines nanostrukturierten Katalysators auf Basis von Nanotubes[38] in der Styrolsynthese betrachtet. Die Einschätzung der ökologischen Relevanz wird hierbei mit Hilfe einer vergleichenden ökobilanziellen Abschätzung auf der konkreten Prozessstufe sowie in Bezug auf den gesamten Produktlebensweg von Styrol vorgenommen. Die Untersuchung der ökologischen Aspekte erfolgt im Vergleich zum bestehenden chemischen Prozess der Styrolsynthese.

5.3.2 Eingrenzung des Untersuchungsbereiches

5.3.2.1 Einführender Überblick: Katalytische Verfahren und Nanotechnologie

Bei einer großen Anzahl von Dingen des täglichen Gebrauchs sind Katalysatoren an der Herstellung beteiligt. Katalysatoren kommen zum Einsatz um Kraftstoffe zu raffinieren, Energie in Batterien und Brennstoffzellen freizusetzen, zur Herstellung von Medikamenten und Agrochemikalien, Kunststoffe und Farben und bei einer ganzen Reihe von Umweltanwendungen wie z.B. dem Drei-Wege-Katalysator im Auto.

Die allgemein gültige Definition für einen Katalysator stammt von Wilhelm Ostwald, der für seine Arbeiten zur Katalyse 1909 den Nobelpreis erhielt:

> „Ein Katalysator ist ein Stoff, der die Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion erhöht, ohne selbst dabei verbraucht zu werden und ohne die endgültige Lage des thermodynamischen Gleichgewichts dieser Reaktion zu verändern."

Diese Definition gilt für alle Katalysatoren, die sich zwar in ihrer Arbeitsweise jedoch nicht in ihrer Wirkungsweise unterscheiden können. Drei verschiedene Katalysator-Typen lassen sich aufgrund der Art des Katalysators und dessen Beschaffenheit unterscheiden:

---

[38] Nanotubes sind, wie der Name schon besagt, lange Röhrchen mit einem Durchmesser von wenigen Nanometern. Das Längen-Durchmesser-Verhältnis kann dabei bis zu 1000 betragen. Nanotubes bestehen aus geordnetem Kohlenstoff. Jedes Kohlenstoff-Atom hat dabei genau drei Nachbarn, somit ergibt sich eine Wabenstruktur, die aufgerollt ein Nanotube ergibt. Diese Strukturen haben besonders ungewöhnliche Eigenschaften, die sie u.a. zu einem Werkstoff der Zukunft machen könnten.

a) Heterogene Katalysatoren

b) Homogene Katalysatoren

c) Biokatalysatoren

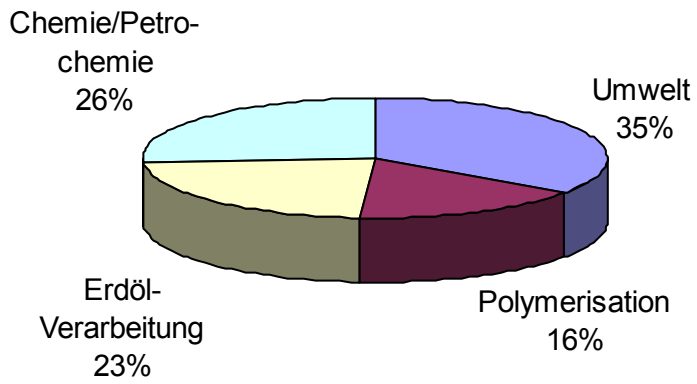
Unter **heterogenen** Katalysatoren versteht man Katalysatoren, die sich in einer anderen Phase befinden als die Reaktanten.

Bei der **homogenen** Katalyse befindet sich der Katalysator in derselben Phase wie die Reaktanten. Dies hat den entscheidenden Vorteil, dass mehr aktive Katalysatormoleküle existieren, da nicht nur die Oberflächenmoleküle aktiv sind, wie bei einem heterogenen Katalysator.

Biokatalysatoren, auch Enzyme genannt, sind die am weit verbreitetsten Katalysatoren. Ohne sie wäre Leben nicht möglich, denn nahezu alle Vorgänge in der Natur werden durch Biokatalysatoren kontrolliert.

Die Katalyse besitzt eine weitreichende Bedeutung für die chemische Industrie: 90% der chemischen Produktionsprozesse basieren auf Katalyse. Mehr als 80 % der Wertschöpfung der chemischen Industrie wird mit Prozessen erzielt, die in Gegenwart von Katalysatoren ablaufen. Bei einem weltweiten Katalysatormarkt von derzeit ca. 12 Mrd. US-$ beträgt der Wert der damit umgesetzten Produkte nach verschiedenen Schätzungen zwischen 1,2 und 6 Bio. US-$. Der Anteil deutscher Katalysatorhersteller am Weltmarkt von ca. 4 % entspricht allerdings nicht dem Gewicht der chemischen Industrie in der deutschen Volkswirtschaft (Herrmann 2000).

Abbildung 21: Anwendungsbereiche von Katalysatoren



Quelle: Herrmann (2000)

Katalysatoren sind eine der ältesten Einsatzbereiche von Nanotechnologie. Z.B. ist der Autoabgaskatalysator von Anfang an eine Nanotechnologieanwendung. Fortschritte durch Nanotechnologie bei der Entwicklung neuer Katalysatoren können schon jetzt durch bessere Möglichkeiten in der Produktion nanoskaliger Partikel erreicht werden. Die Gründe hierfür liegen darin, dass diese Nanopartikel, durch ihren geringen Durchmesser, die Katalysebedingungen verbessern: Katalytische Reaktionen vollziehen sich auf katalytisch wirksamen Oberflächen, d.h. je kleiner der Durchmesser, desto größer ist im Verhältnis zum Volumen die spezifische Oberfläche. Daraus lassen sich bedeutende Vorteile ableiten: die Größe der Katalysatoren

kann, bei gleich bleibender reaktiver Oberfläche, verringert werden, genauso wie die Menge der reaktiven Atome an der Oberfläche bei gegebener Masse vergrößert werden kann. Ebenso wie die Fortschritte bei der Herstellung von Nanopartikeln, kommen auch Weiterentwicklungen im Bereich der nanoporösen Materialien und der nanostrukturierten Oberflächen der Katalyse zu gute.

Dieser Sachverhalt konnte in einer Studie zu Technologieentwicklungen bei Autoabgaskatalysatoren nachgewiesen werden (Steinfeldt et al. 2002). Der Einsatz immer kleinerer und homogenerer nanoskaliger Edelmetallpartikel im Autoabgaskatalysator bewirkt auf Grund des damit in Verbindung stehenden Oberflächen/Volumen-Effektes eine erhöhte katalytische Wirkung dieser Platingruppenmetalle (PGM)-Partikel. Dies sowie die Fähigkeit, diese Partikel immer besser im Katalysator thermostabil zu binden und Alterungsprozesse zu vermindern, führt einerseits zur Verminderung der notwendigen PGM-Einsatzmenge sowie andererseits zur Fähigkeit, die sich verschärfenden Grenzwerte der international geltenden Normen zu erfüllen. Ökologische Entlastungseffekte werden also dadurch erzielt, dass sich die Schadstoffemissionen der Autoabgase verringern und dass durch die „ersparte“ Rohstoffgewinnung von PGM, die mit sehr hohen Aufwendungen verbunden ist, Umweltauswirkungen vermieden werden. Je nach betrachteter Emissionsart bewegen sich die Ökoeffizienzpotenziale im Bereich zwischen 10 – 40 % (Steinfeldt et al. 2002).

Auch das Verständnis für die Katalyse ändert sich drastisch. Bei der Entwicklung von Katalysatoren war man lange Zeit auf empirische Methoden und Erfahrungswerte angewiesen. Durch Methoden der Nanoanalytik, wie sie z.B. die Rastertunnelmikroskopie erlaubt, ist man jetzt in der Lage, die Mechanismen katalytischer Reaktionen im Detail zu untersuchen und immer besser aufzuklären und zu modellieren.

5.3.2.2 Untersuchungsfokus: Styrol-Synthese

Die Styrol-Synthese gilt als einer der zehn wichtigsten petrochemischen Prozesse und das Syntheseprodukt Styrol als eine der wichtigsten Grundchemikalien in der chemischen Industrie. Aus dem Monomer Styrol werden zahlreiche wichtige polymere Kunststoffe – hauptsächlich Polystyrol – gefertigt. Neben Ethylen und Vinylchlorid ist es eines der wichtigsten Monomere.

Styrol: Wirtschaftliche Bedeutung und Marktdaten

Weltweit wird der Bedarf an Styrol auf über 20 Mio. Tonnen geschätzt mit einer Steigerungsrate von 5% p.a. (Rohden 2001). Im Jahr 2001 hatte die Styrolindustrie zwar mit einem Nachfragerückgang von 1,8% zu kämpfen, doch schon im folgenden Jahr war die Nachfrage wieder um 5,1% gestiegen (Childre 2003). Einen Überblick über die Entwicklung der Styrolproduktion geben die Tabelle 20 und Tabelle 21.

Tabelle 20: Produktionsdaten und Kapazitäten in Westeuropa

Styrol-Produktion und -Kapazitäten in Westeuropa in 1000 Tonnen						
Jahr	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Kapazität	4 850	4 940	5 347	5 537	5 552	5357
Produktion	4 432	4 491	4 561	5 007	4 908	4965

Quelle: CEFIC (2003)

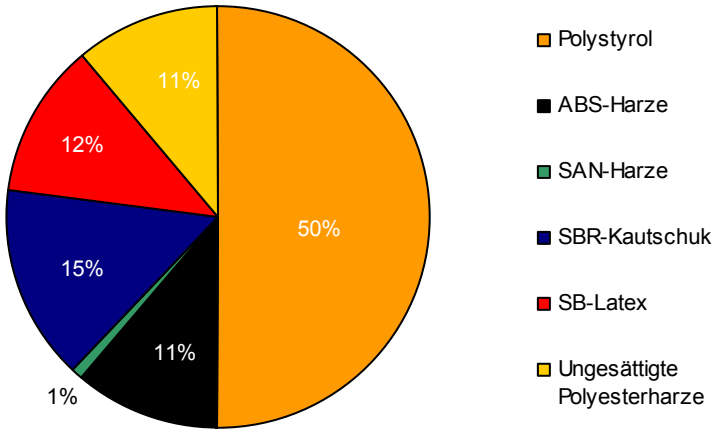
Tabelle 21: Styrol-Weltproduktion

Weltproduktion an Styrol in 1000 Tonnen					
Jahr	1997	1998	1999	2000	2001
Produktion	17 600	18 400	19 100	19 900	20 400

Quelle:VCI (2003)

Weiterverarbeitet wird Styrol ausschließlich zu polymeren Produkten, hauptsächlich Polystyrol. Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind das Styrolacrylnitril-Copolymer (SAN), Terpolymere aus Acrylnitril, Butadien und Styrol (ABS) sowie SBR-Kautschuke und ungesättigte Polyesterharze. Der Polystyrol-Anteil an den Nachfolgeprodukten ist allerdings im Absinken begriffen. Lag der Polystyrol-Anteil bei den Produktgruppen 1975 weltweit noch bei über 60%, so ist es heute nur noch etwa 50% (vgl. Abbildung 22).

Abbildung 22: Styrol-Verbrauch (in %) aufgegliedert nach Produktgruppen



Quelle: ISIF (2001)

Styrol ist wie alle anderen petrochemischen Zwischenprodukte stark von Rohölpreisen abhängig und seine Preisentwicklung somit großen Schwankungen unterworfen (vgl.Tabelle 22).

Tabelle 22: Styrol-Preise

Preise für Styrol in Euro/t				
Jahr	1999	2000	2001	2002
niedrigster Wert	391	713	557	512
höchster Wert	619	960	902	757
Veränd. Jan.-Dez.	53,3%	26,5%	-38,2%	30,9%

Quelle: VKE (2004)

Beschreibung der Styrolherstellung

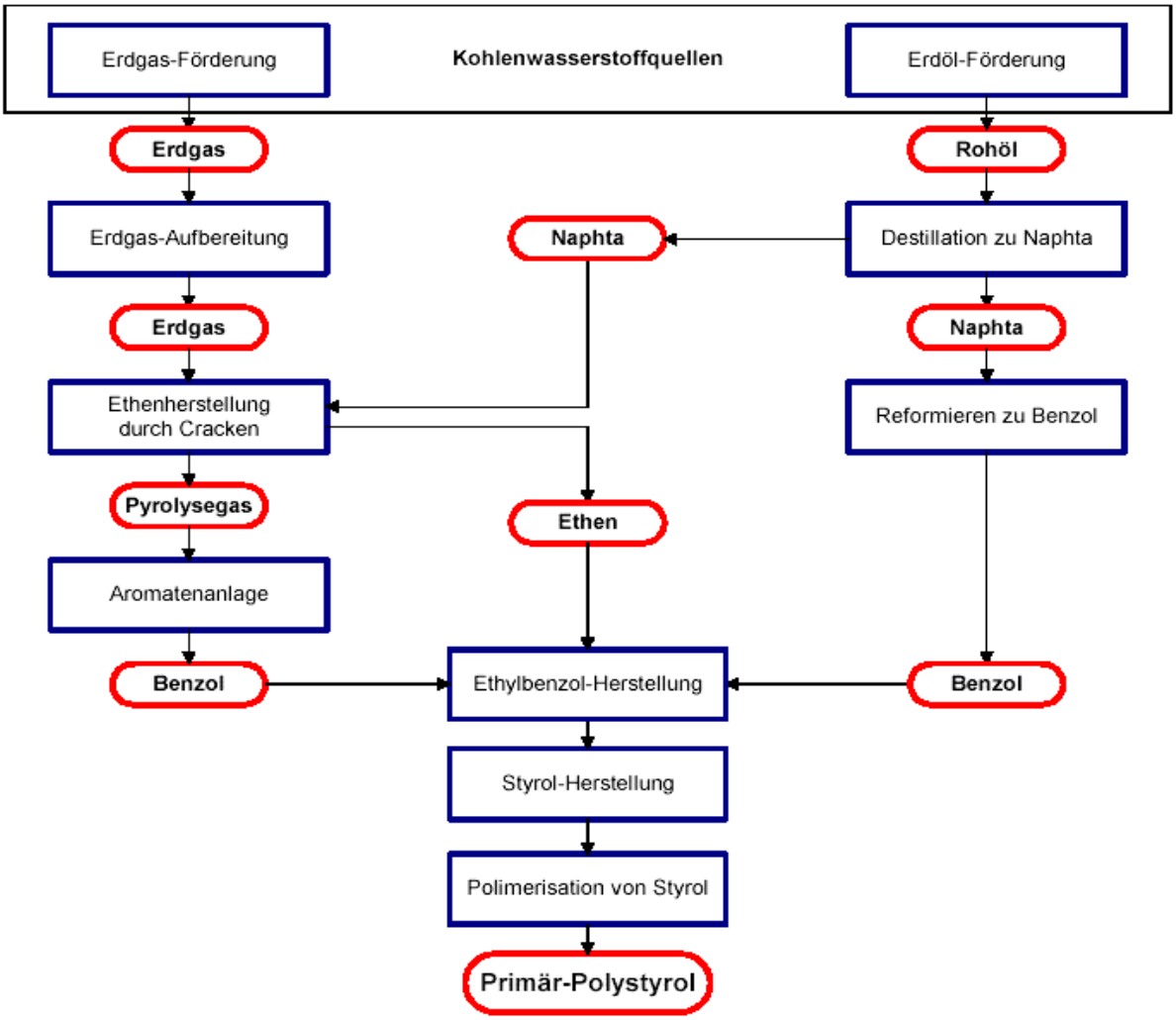
Die Herstellung von Styrol erfolgt in mehreren Prozessschritten, die sich bis zur Rohstoffgewinnung verfolgen lassen. Da die Produktion von Styrol auf Zwischenprodukten basiert, die aus petrochemischen Rohstoffen gewonnen werden, erstreckt sich der gesamte Produktionsprozess von der Erdöl- bzw. Erdgas-Exploration, der Extraktion und Aufbereitung über die Raffinerie bis hin zur eigentlichen Styrolsynthese in der Raffinerie. Eine Übersicht über den gesamten Herstellungsprozess gibt Abbildung 20.

Aus Rohöl wird durch atmosphärische Destillation bei Normaldruck und Temperaturen von 350 bis 370°C Naphta und andere Mineralölprodukte hergestellt. Anschließend werden mittels Steam-Cracken die langkettigen gesättigten Kohlenwasserstoffe des Naphta in niedermolekulare Verbindungen wie Butan (C_4H_{10}), Benzol (in kleinen Mengen) und Ethen (C_2H_4) aufgespalten. Ebenso werden aus Erdgas durch Cracken Ethen, Propen, Butan und andere Produkte gewonnen.

Ethylbenzol wird durch Alkylierung von Benzol mit Ethen katalytisch (mit $AlCl_3$ oder Kieselgel) unter Druck gewonnen. Es handelt sich um eine Ethylierung in flüssiger Phase, bei einem Ethen-Benzol-Verhältnis von ca. 0,6/1, einem Benzol Umsatz von 52-55%, einer Temperatur von 85-95°C und Normaldruck oder einem geringen Überdruck.

Styrol ($C_6H_5C_2H_3$) wird unter Einsatz eines Katalysators aus Ethylbenzol ($C_6H_5C_2H_5$) hergestellt. In einem weiteren Prozessschritt wird das Styrol durch Polymerisation zu Polystyrol umgesetzt, welches die Grundlage für die Erzeugung vielfältiger Kunststoffanwendungen darstellt.

Abbildung 23: Verfahrensablauf der Herstellung von Styrol und Weiterverarbeitung zu Polystyrol



Quelle: Würdinger et al. (2000)

5.3.3 Untersuchungsrahmen und Datenverfügbarkeit

Der Bilanzraum für diese Fallstudie ist primär nicht der gesamte Produktlebensweg des Styrols, sondern fokussiert auf den Prozessschritt der eigentlichen Styrol-Synthese. Außerdem erfolgt der Bezug auf den gesamten Produktlebensweg von Styrol, d.h. es werden dann die Lebenswegstufen Rohstoffgewinnung, Vorproduktion bis zur Herstellung des Styrols mit betrachtet, um die möglichen Ökoeffizienzpotenziale im Gesamtkontext abschätzen zu können.

Als funktionelle Bezugsgröße für die vergleichende Betrachtung wird 1 kg Styrol gewählt.

Für die Bilanzierung der klassischen Styrolherstellung liegen umfangreiche aktuelle Daten zu Stoff- und Energieströmen von der Vereinigung der Europäischen Kunststoffverarbeiter (APME) vor. Diese umfassen einerseits summarische Ökobilanzdaten für die gesamte klassische Styrolherstellung, d.h. diese Daten enthalten sämtliche Prozesse von der Erdöl- und Erdgasgewinnung und Aufbereitung bis hin zur Styrolproduktion (APME 1999). Außerdem werden von APME Ökobilanzdaten auch für die Vorprodukte Benzol und Ethen bereitgestellt.

Zwischen den genannten Vorprodukten und dem Produkt Styrol liegen noch zwei Prozesse, der Ethylbenzolprozess sowie der Styrolprozess, so dass auf dieser Datenbasis keine eindeutige Differenzierung auf den eigentlichen Styrolprozess möglich ist.

Desweiteren existieren Ökobilanzdaten in der Gabi-Stoffdatenbank (Gabi 4 Datenbank 1999b) und zwar einerseits wiederum für den gesamten Styrolherstellungsprozess aber andererseits auch für den Ethylbenzolprozess (hierzu sind Daten einer Produktionsanlage in den Niederlanden hinterlegt (Gabi 4 Datenbank 1999a)). Ein Abgleich aller vorliegenden Datensätze ergab leider für die Emissionsdaten des eigentlichen Styrolprozess keine hinreichende Übereinstimmung. Ursache hierfür können unterschiedliche Berechnungsprozeduren bzw. unterschiedliche Datenquellen sein. Aus diesem Grund wird nur eine differenzierte Auswertung der Energieverbräuche der Styrolsynthese möglich sowie spezielle Abschätzungen zu einzelnen Stoffströmen (Schwermetalle).

Für den alternativen Styrolprozess auf Basis eines Katalysators aus Kohlenstoff-Nanotubes liegen keine quantifizierten Prozessdaten vor. Aus der Technologiebeschreibung können aber Annahmen für den Energieverbrauch abgeleitet werden.

5.3.3.1 Auswahl der Varianten

Der Prozessschritt der Styrolherstellung ist ein chemischer Prozess, dessen Effizienz stark vom Einsatz geeigneter Katalysatoren abhängig ist. Gegenüber dem verfahrenstechnisch etablierten Einsatz von Katalysatoren auf Eisenoxidbasis liegt eine Katalysator-neuentwicklung auf der Grundlage von nanostrukturierten Kohlenstoffröhren den so genannten Nanotubes vor.

Variante 1: Klassische Styrolsynthese mit Katalysator aus Eisenoxidbasis

Die Synthese von Styrol läuft nach einem seit rund sechzig Jahren bekannten industriellen Verfahren ab: der Dehydrierung von Ethylbenzol. Die Dehydrierung von Ethylbenzol zu Styrol ist eine reversible endotherme Gleichgewichtsreaktion (Lieb & Hildebrand 1982):

$$C_6H_5C_2H_5 \leftrightarrow C_6H_5C_2H_3 + H_2 \quad \square H^{600°C} = 124.9 \text{ kJ/mol} \qquad (1)$$

Die Dehydrierung von Ethylbenzol zu Styrol erfolgt bei Temperaturen um 600°C in einem Ethylbenzol-Wasser-Gasgemisch mit Hilfe kaliumpromotierter Eisenoxidkatalysatoren. Neben dieser Hauptreaktion finden weitere Nebenreaktionen statt, die im Anhang (Abbildung 58) aufgeführt sind.

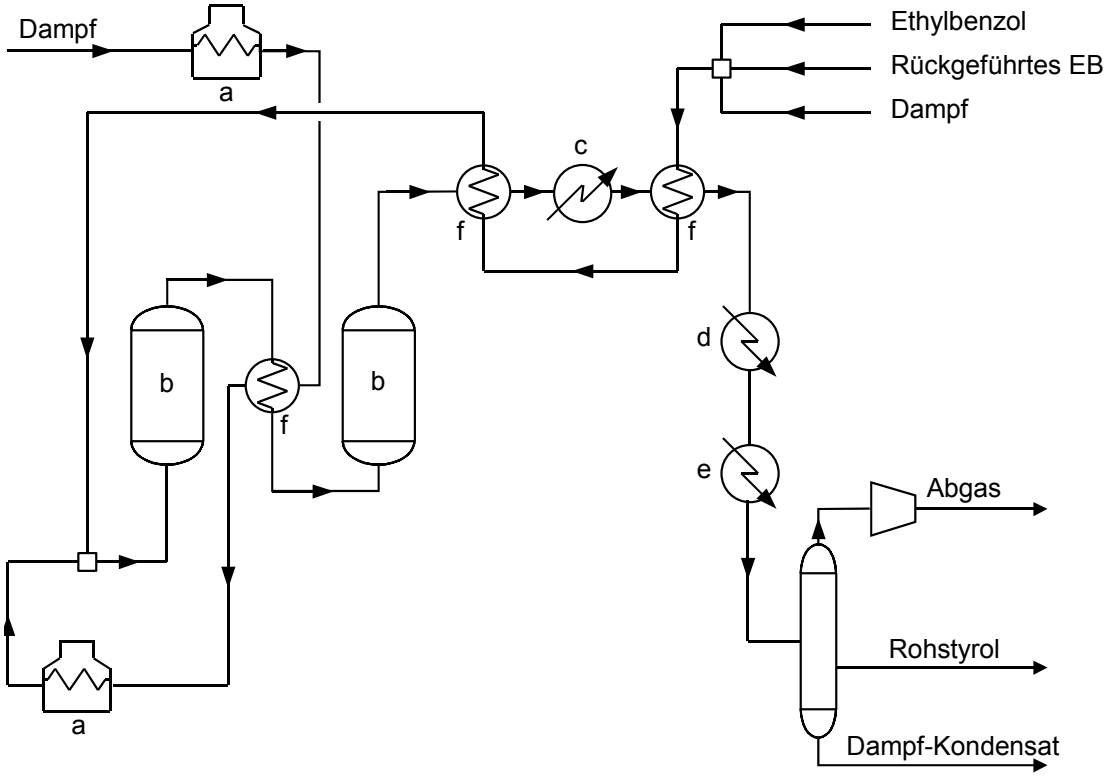
Verfahrenstechnisch sind in der Industrie zwei Verfahren realisiert, die sich im Wesentlichen durch die Art der Wärmezufuhr für die endotherme Reaktion unterscheiden (Lieb & Hildebrand 1982; Schoen 2002). In über 75 Prozent der weltweit betriebenen Styrol-Produktionsanlagen wird die Dehydrierungsreaktion adiabatisch ausgeführt. Dabei kommen mehrstufige Reaktoren oder in Reihe angeordnete Reaktorbetten zum Einsatz.

1. **Das adiabatische Verfahren entwickelt von der Dow Chemical Company**:

   Die für die Reaktion notwendige Wärmeenergie wird mit Hilfe von überhitztem Wasserdampf (ca. 830°C) zugeführt, der dem Ethylbenzoldampf vor dem Katalysator zugeführt wird. Das Massenverhältnis von Ethylbenzol zu überhitztem Wasserdampf liegt hierbei zwischen 1,5:1 und 2:1. Die Temperatur des Reaktionsgemischs beim Eintritt in den Reaktor beträgt ca. 650°C und beim Verlassen ca. 570°C. Die Ausbeute an Styrol ist nach dieser ersten Stufe

noch relativ gering, deshalb wird das Reaktionsgemisch in einer zweiten (und ggf. dritten) Stufe erneut auf 640°C erhitzt und durchläuft erneut eine Dehydrierstufe. Die Produktionskapazitäten dieser Anlagen liegen momentan bei ca. 500.000 t/a.

Abbildung 24: Prozessschema für die Adiabatische Dehydrierung von Ethylbenzol (EB)



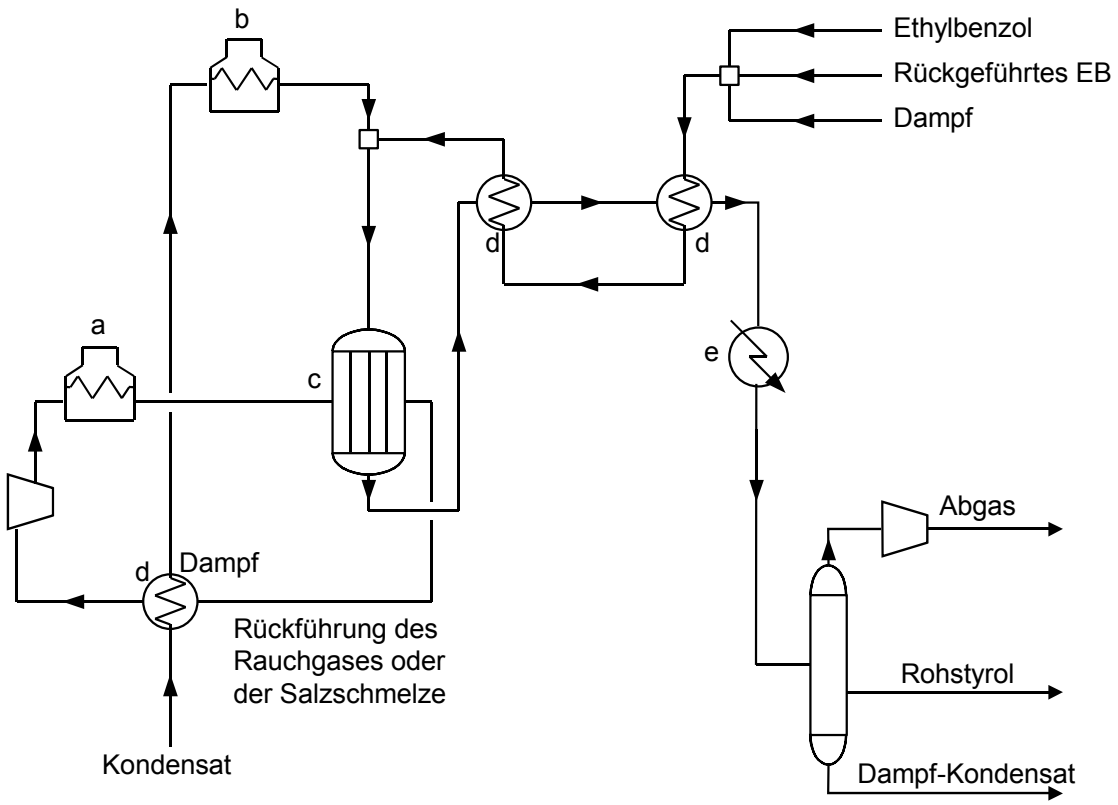
Quelle: Denis & Castor (1994)

a) Dampfüberhitzer; b) Reaktor; c) Hochdruckdampf; d) Niederdruckdampf; e) Kondensator; f) Wärmetauscher

2. Der isotherme Dehydrierprozess der BASF:

Bei diesem Verfahren wird die Temperatur in den durch ein umlaufendes Rauchgas oder eine Salzschmelze beheizten Rohrbündelreaktoren konstant gehalten. Die Zulauftemperatur des Reaktionsgemischs beträgt ca. 600°C und kann während der Reaktion an der Katalysatorschicht weitgehend konstant gehalten werden. Dadurch kann die Zufuhr von überhitztem Wasserdampf im Vergleich zum adiabatischen Verfahren etwa um die Hälfte niedriger gehalten werden. Heute gebaute Dehydrieröfen weisen eine Kapazität von bis zu 150.000 t/a pro Einheit auf.

Abbildung 25: Prozessschema für die Isotherme Dehydrierung von Ethylbenzol

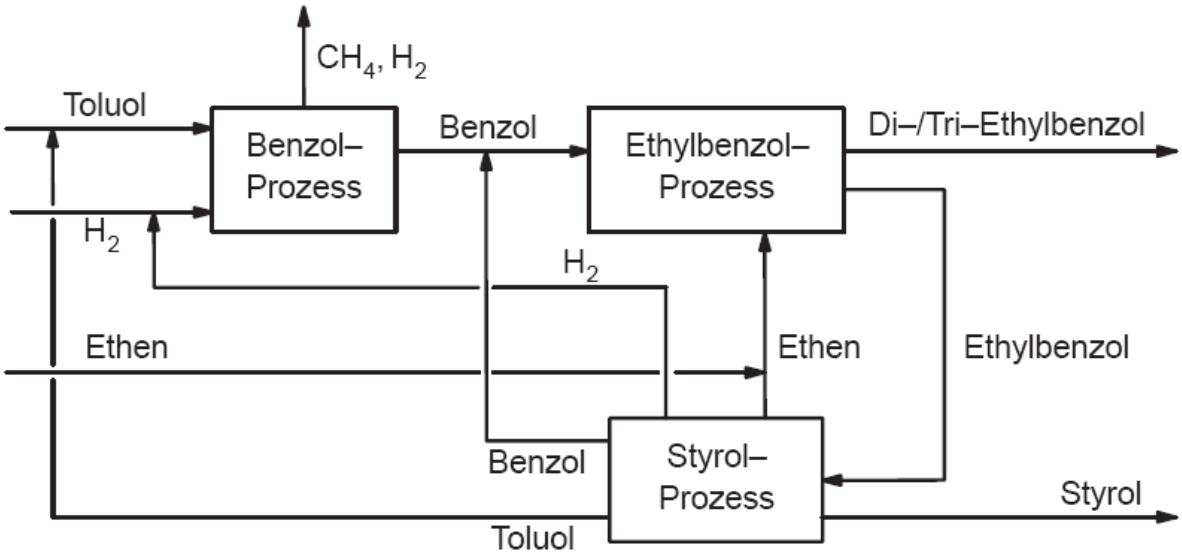


Quelle: Denis & Castor (1994)
a) Heizung; b) Dampfüberhitzer; c) Reaktor; d) Wärmetauscher; e) Kondensator

Die Zugabe von Wasserdampf ist ein inhärenter Nachteil beider Verfahren, da die Energie zur Erzeugung des überhitzten Dampfs nur in geringem Ausmaß zurück gewonnen werden kann. Ein weiterer Schwachpunkt liegt in der Reversibilität des Dehydrierungsprozesses begründet, der maximale Styrolausbeuten verhindert. Der maximale Umsatz an Styrol ist deshalb auch in modernen Anlagen im ersten Durchgang auf 40 bis maximal 50% beschränkt. Durch eine mehrstufige Ausführung der Anlage lässt sich der Umsatz allerdings auf 65 bis 70% erhöhen, um eine ausreichende Selektivität (möglichst wenig unerwünschte Nebenreaktionen) zu gewährleisten. Dies bedeutet, dass 30 bis 35% des eingesetzten Ethylbenzols die Reaktoren unumgesetzt passiert und in einem energieaufwendigen Verfahren abgetrennt und zurückgeführt werden muss.

Um das Styrol für nachfolgende Prozesse, wie die Polymerisation, nutzbar zu machen ist ein Reinheitsgrad von mehr als 99,8% erforderlich. Die Abscheidung des Ethylbenzols und anderer Nebenprodukte vom Styrol gestaltet sich, durch die Neigung des Styrols zur Polymerisation und den geringen Siedepunktunterschied zwischen Styrol und Ethylbenzol von nur 9°C, besonders schwierig und ist sehr kostenintensiv.

Abbildung 26: Der Styrolprozess



Aspekte des Katalysatoreinsatzes

Der Katalysator besteht im Wesentlichen aus Eisenoxiden (80%), Kalium (10%), Chromoxid sowie weiteren selektivitätssteigernden Schwermetallpromotoren (wie Cr, Ca, Al, V, W oder Li). Der Styrolkatalysator wird zur Klasse der SLP-Katalysatoren (Supported Liquid Phase) gezählt. Diese bestehen aus einem porösen, festen Träger, der katalytisch inert oder aktiv sein kann. Auf dem Träger befinden sich die eigentlich katalytisch wirksamen Aktivkomponenten (Promotoren), welche als Schmelze oder im flüssigen Zustand vorliegen (Hagen 1999).

Der kaliumpromotierte Eisenoxidkatalysator wird durch die Benutzung langsam deaktiviert und muss üblicherweise alle ein bis zwei Jahre ersetzt werden. Zieht man die enorme Größe der beim industriellen Prozess eingesetzten Reaktoren in Betracht, kann man folgern, dass dies ein äußerst kostenintensiver Prozess ist. Neben dem bereits erwähnten Grund für die Deaktivierung des Katalysators – die Verblockung durch Koksablagerungen – werden drei weitere Gründe für den allmählichen Ausfall des Katalysators angeführt (Maximova 2002):

- Der Verlust oder die Umverteilung der Kaliumpromotoren
- Starke Änderungen beim Oxidationszustand des Eisenoxids
- Physikalischer Abbau des Katalysators

Alle diese Ursachen bedingen sich gegenseitig und finden gleichzeitig statt, was dazu führt dass die Deaktivierung des Eisenoxidkatalysators als ein außerordentlich komplexer Prozess angesehen werden kann.

Variante 2: Styrolsynthese mit Katalysator aus Kohlenstoff-Nanotubes

Durch die Möglichkeit bei der katalytischen Styrolsynthese bis in den Nanometerbereich zu „schauen“, konnten die tatsächlichen Abläufe während der Styrolsynthese durch

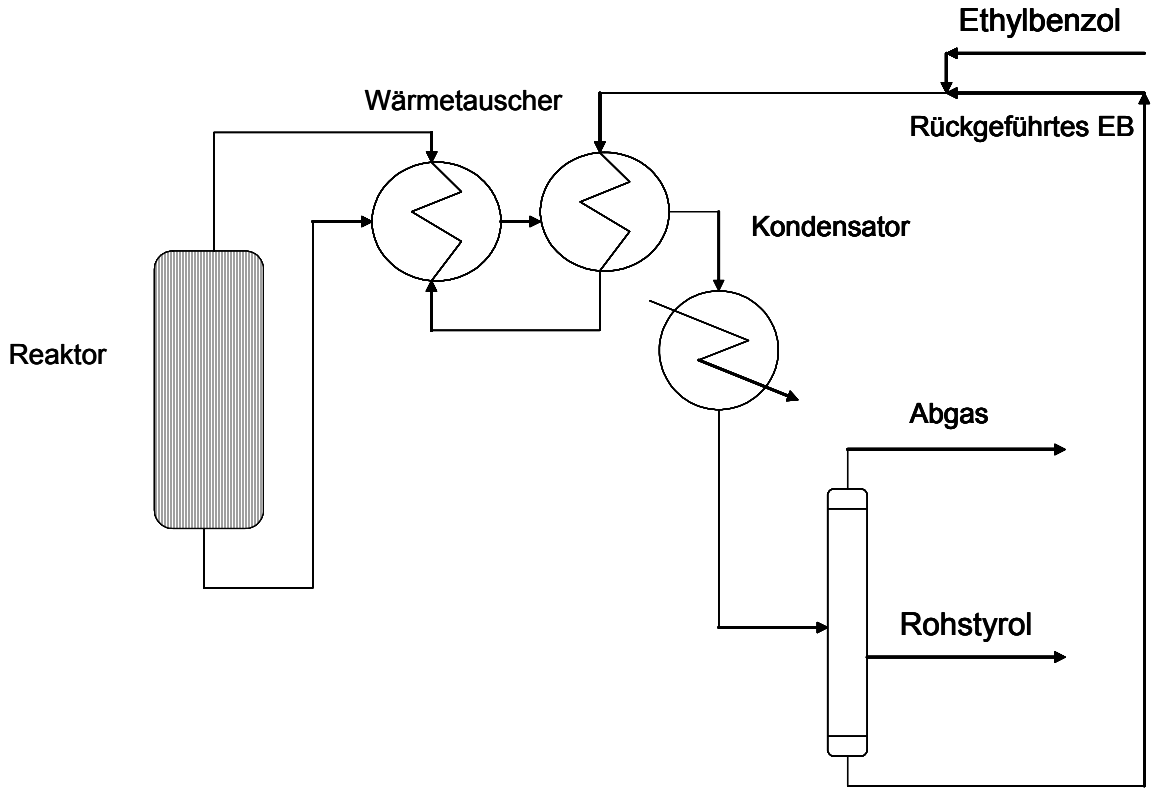
Wissenschaftler des Fritz-Haber-Instituts der Max-Planck-Gesellschaft erfasst werden. Neue Forschungen belegen, dass die Koksschicht während der Styrol-Synthese auch auf der aktiven Katalysatoroberfläche ständig vorhanden ist. Die Kohlevergasung und die Koksbildung befinden sich in einem Gleichgewichtszustand. Deshalb geht man nun davon aus, dass Koks nicht nur eine die Deaktivierung fördernde, schwarze Schicht ist, sondern dass es unterschiedliche Koksarten mit unterschiedlichen Eigenschaften gibt (Ketteler 2002).

Durch diese Untersuchungen muss davon ausgegangen werden dass, der sich bildende Kohlenstofffilm die eigentlich katalytisch aktive Spezies enthält, und dass der Kaliumeisenoxidfilm nur zur Bildung dieser aktiven Kohlenstoffspezies notwendig ist, er dient also nur als „Co-Katalysator“. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass verschiedene Kohlenstoffspezies (Russ, Graphit, „Nanozwiebeln“, „Nanofilamente“) eine ausgezeichnete Aktivität und Ausbeute zeigen (MPG 2002).

Mit der Umsetzung dieser Ergebnisse aus der Grundlagenforschung hin zur technischen Anwendung beschäftigt sich das 2001 gegründete Unternehmen Nanoscape AG. Das Ziel der Nanoscape AG ist es, eine neue technische Styrol-Synthese mit einem auf Nanotubes basierenden Katalyse-Verfahren zu entwickeln. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wird die im Kleinstmaßstab erfolgreich durchgeführte Styrolsynthese im Rahmen eines EU-Projektes mit einem Reaktor mit 100g Katalysatorvolumen upgescaled. Darauf aufbauend ist dann eine entsprechend größere Pilotanlage geplant.

Zum Einsatz kommt ein neuer nanostrukturierter Katalysator, bestehend aus mehrwandigen Nanotubes. Dadurch lässt sich nicht nur die Ausbeute an Styrol erhöhen, sondern das Verfahren ändert sich von einem energieaufwendigen endothermen Prozess in einen energetisch günstigeren exothermen Prozess. Zusätzlich erlaubt der neue Katalysator die Führung der Reaktion unter Zusatz von Luft anstelle von Wasser. Bei gleicher Umsatzrate kann außerdem die Selektivität gesteigert werden und eine um 200°C niedrigere Betriebstemperatur gefahren werden, so dass der spezifische Energieaufwand stark verringert wird.

Abbildung 27: Prozessschema für die oxidative Dehydrierung von Ethylbenzol (EB)



Quelle: Mestl (2004)

Aus dem Anlagenschema wird deutlich, dass sich diese Synthese gegenüber der klassischen Styrolsynthese auch durch einen einfacheren Anlagenaufbau auszeichnet.

Die Vorteile der neuen Styrolsynthese auf Basis von Nanotubes-Katalysatoren und die damit in Verbindung stehenden ökologischen Effekte lassen sich wie folgt zusammengefasst darstellen.

Tabelle 23: Vorteile der neuen Styrolsynthese mit Katalysator aus Kohlenstoff-Nanotubes

Vorteile des neuen Verfahrens	**Ökologischer Effekte**
Veränderung des Reaktionstyps von endotherm ($\Delta H^{600°C}$ = 124.9 kJ/mol) zu exotherm ($\Delta H^{400°C}$ < 0 kJ/mol)	Verringerung des spezifischen Energieverbrauches um mindestens 1,2 MJ/kg Styrol bei Annahme ΔH = 124,9 kJ/mol, Je nach Exothermie, die anlagentechnisch sicherlich gering zu halten ist, könnte darüber hinaus die Reaktorabwärme für weitere Prozesse genutzt werden; z.B. Vorheizen der Reaktionsgase; Beheizen der Rohrleitungen etc. so ähnlich wie bei Kraft-Wärme-Kopplung.
Reduzierung der Reaktionstemperatur um ca. 200°C von 600°C auf 400°C	Verringerung des spezifischen Energieverbrauches

Veränderung des Reaktions-mediums von überhitztem Wasserdampf auf Stickstoff / Sauerstoff bzw. Luft	Verringerung des spezifischen Energieaufwandes, da Erzeugung und Aufbereitung von Wasserdampf sehr energieintensiv ist; Verringerung des Anlagenaufwandes, Anforderungen an Reaktoraufbau, Wärmeaustauscher, (Prozesswasserabscheidung z.B. entfällt komplett) etc., Rohrleitungsauslegungen verringern sich einerseits durch das geringere Temperaturniveau und andererseits durch unterschiedliches Korrosionsverhalten der Reaktionsmedien
Höhere Selektivität bei gleicher Umsatzrate	Verringerung des spezifischen Energieaufwandes für geringere Destillations- und Kreislaufführungen
Einsatz von Kohlenstoff-Nanoröhren-Katalysator	Substitution von Schwermetallen, keine Schwermetall-verunreinigungen Einfachere Katalysatorentsorgung (Vermutung)
Katalysatorherstellung	Höherer (energetischer) Herstellungsaufwand des Nanotube-Katalysators durch CVD-Verfahren ist zu erwarten, wobei die technischen Herstellungsanforderungen an mehrwandige Nanotubes nicht mit denen von einwandigen Nanotubes zu vergleichen sind

Detaillierte Ökobilanzdaten für die alternative Styrolsynthese stehen nicht zur Verfügung. Auf Basis der Technologiebeschreibungen werden aber folgende Ableitungen zum Energieverbrauch für diesen Prozess gemacht, um für den Energieverbrauch auf dieser Prozessstufe eine Abschätzung vornehmen zu können:

1. Durch die Veränderung des Reaktionstyps ergibt sich eine Verringerung des spezifischen Energieverbrauches um 1,2 MJ/kg Styrol.
2. Durch die Reduzierung der Reaktionstemperatur um ca. 200°C von 600°C auf 400°C wird eine 25% Energieeinsparung erreicht.
3. Durch die Veränderung des Reaktionsmediums von überhitztem Wasserdampf auf Stickstoff /Sauerstoff bzw. Luft sowie die höhere Selektivität bei gleicher Umsatzrate kann mit einer weiteren 5%igen Energieeinsparung gerechnet werden.

5.3.4 Sachbilanz

In der Sachbilanz erfolgt eine Aufzeichnung der stofflichen und energetischen Beziehungen der Herstellungsprozesse für Styrol mit Blick auf mögliche Umweltwirkungen, d.h. dass die Inputflüsse, die der Umwelt entnommen werden, und die Outputflüsse, die an die Umwelt abgegeben werden, erfasst werden. Ziel der Sachbilanz ist es, für die ausgewählten Varianten unter Beachtung der funktionellen Äquivalenz ein Dateninventar zu erstellen.

5.3.4.1 Auswertungen der Sachbilanz

Ökobilanzdaten liegen summarisch für die klassische Styrolherstellung vor. Diese Daten enthalten sämtliche Prozesse von der Erdöl- und Erdgasgewinnung und Aufbereitung bis hin zur Styrolproduktion. Es sind sowohl die Vorprozesse als auch Energie- und Transportprozesse enthalten (APME 1999). Als Beispiel werden nachfolgend die Bruttoenergiebedarfe dargestellt. Weitere Ökobilanzdaten sind im Anhang dargestellt.

Tabelle 24: Bruttoenergiebedarf zur Produktion von 1 kg Styrol

Fuel type	Fuel prod'n & delivery energy (MJ)	Energy content of delivered fuel (MJ)	Energy use in transport (MJ)	Feedstock energy (MJ)	Total energy (MJ)
Electricity	1.36	0.62	0.01	<0.01	1.98
Oil fuels	0.80	12.12	0.26	16.68	29.86
Other fuels	2.07	19.76	0.05	30.26	52.14
Totals	4.22	32.50	0.32	46.94	83.98

Quelle: APME (1999)

Tabelle 25: Bruttobedarf an Roh- und Treibstoffen in MJ zur Produktion von 1 kg Styrol

Fuel type	Fuel prod'n & delivery energy (MJ)	Energy content of delivered fuel (MJ)	Fuel use in transport (MJ)	Feedstock energy (MJ)	Total energy (MJ)
Coal	0.39	1.21	<0.01	<0.01	1.60
Oil	0.69	12.18	0.27	16.68	29.82
Gas	2.49	23.10	0.04	30.26	55.89
Hydro	0.04	0.03	<0.01	-	0.07
Nuclear	0.53	0.25	<0.01	-	0.78
Lignite	0.06	0.03	<0.01	-	0.09
Wood	-	-	-	<0.01	<0.01
Sulphur	-	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Biomass	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01
Hydrogen	<0.01	0.04	<0.01	-	0.04
Recovered energy	-	-4.34	<0.01	-	-4.34
Unspecified	0.01	<0.01	<0.01	-	0.01
Peat	<0.01	<0.01	<0.01	-	<0.01
Totals	4.22	32.50	0.32	46.94	83.98

Quelle: APME (1999)

Für die weitere Diskussion stellt sich nun die Frage, welchen Anteil an diesen Stoff- und Energieströmen bzw. an den damit verbundenen gesamten Umweltwirkungen der betrachtete Styrolprozess besitzt.

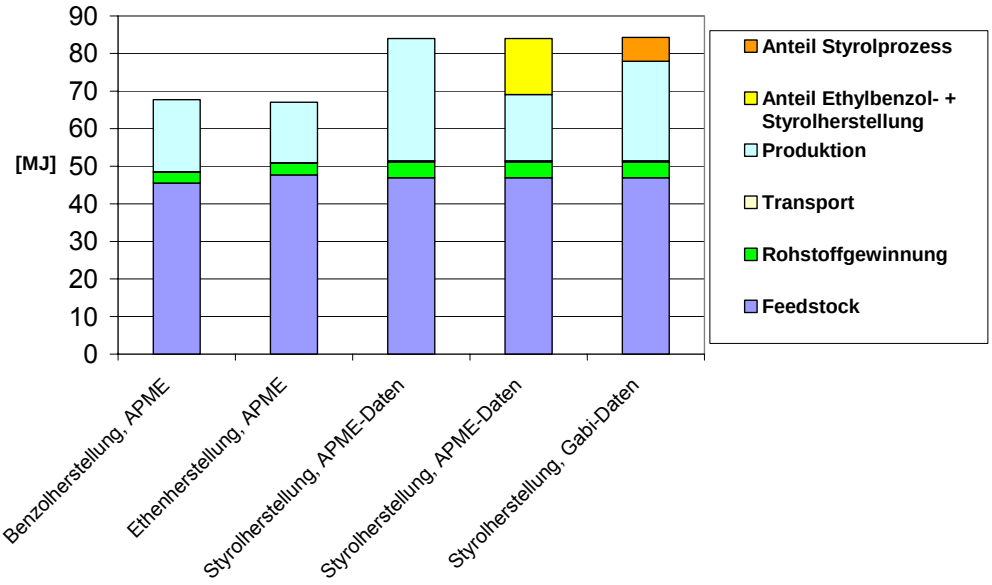
Aus den vorliegenden Daten ist hierzu wie eingangs diskutiert nur eine genaue Differenzierung bezüglich der Energiebedarfe zur Produktion von Styrol möglich. Aus dieser wird ersichtlich, dass der Anteil des feedstocks, darunter wird der Energiegehalt des Materials verstanden, mit 56% bezogen auf den Bruttoenergiebedarf den größten Anteil ausmachen. Auf den reinen Energiebedarf zur Styrolherstellung entfallen mit 37,04 MJ/kg somit 44% des Bruttoenergiebedarfes.

Tabelle 26: Energiebedarfe in MJ zur Produktion von 1 kg Styrol bzw. der Vorprodukte

	Benzol-herstellung, APME	**Ethen-herstellung, APME**	**Styrol-herstellung, APME-Daten**	**Styrol-herstellung, APME-Daten**	**Styrol-herstellung, Gabi-Daten**
Feedstock	45,54	47,73	46,94	46,94	46,94
Rohstoffgewinnung	2,83	3,08	4,22	4,22	4,22
Transport	0,21	0,12	0,32	0,32	0,32
Produktion	19,14	16,1	32,5	17,62	26,45
Anteil Ethylbenzol- + Styrolherstellung				14,88	
Anteil Styrolprozess					6,36

Quelle: (APME 1999; Gabi 4 Datenbank 1999b; Gabi 4 Datenbank 1999a), eigene Berechnungen

Abbildung 28: Energiebedarfe zur Produktion von 1 kg Styrol bzw. der Vorprodukte



Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, APME 1999; Gabi 4 Datenbank 1999b; Gabi 4 Datenbank 1999a)

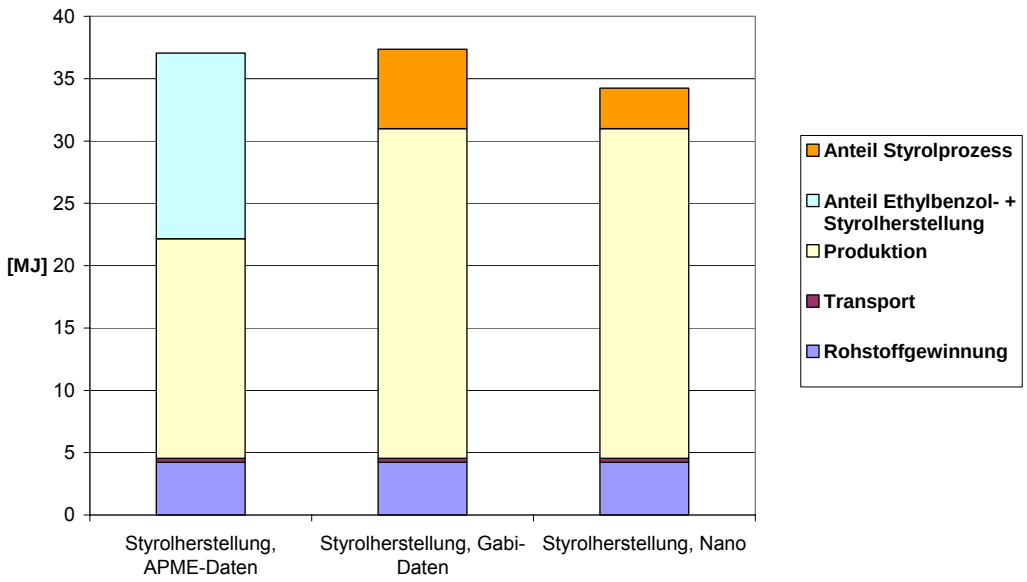
Der eigentliche Styrolprozess wiederum benötigt von den 37,04 MJ/kg etwa 6,4 MJ/kg. Dies entspricht einem Anteil von 17% des Energiebedarfs zur Styrolherstellung. Dieser Anteil wird durch den alternativen Styrolprozess durch seine höhere Energieeffizienz beeinflusst.

Tabelle 27: Energiebedarf der alternativen Styrolsynthese

	Klassische Styrolsynthese	Alternative Styrolsynthese
Energieeinsparpotenziale		
Veränderung des Reaktionstyps		- 1,20 MJ/kg
Reduzierung der Reaktionstemperatur		- 1,59 MJ/kg
Veränderung des Reaktionsmediums, höhere Selektivität bei gleicher Umsatzrate		- 0,32 MJ/kg
Energiebedarf	6,36 MJ/kg	3,25 MJ/kg

Mit dem alternativen Verfahren zur Styrolsynthese auf Basis eines Nanotubes-Katalysators ergibt sich somit auf dieser Prozessstufe ein Energieeinsparpotenzial von knapp 50%.

Abbildung 29: Vergleich der Energiebedarfe der betrachteten Styrolsynthesen

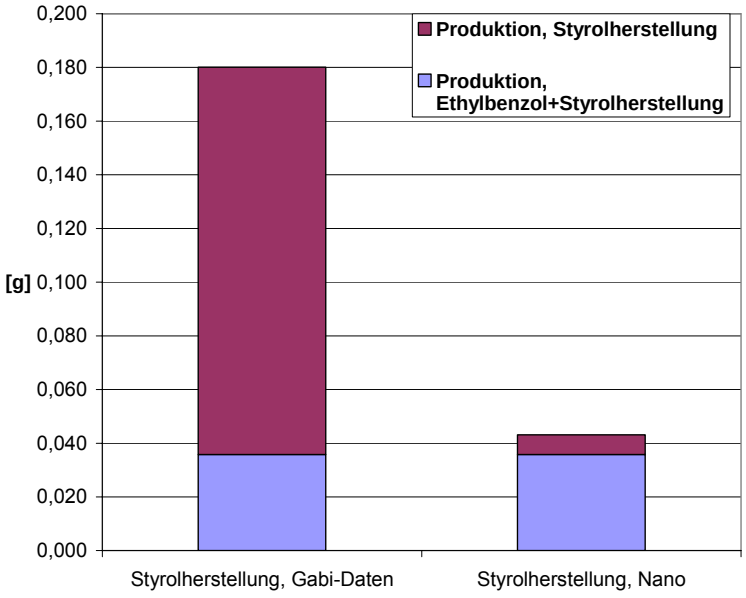


Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, APME 1999; Gabi 4 Datenbank 1999b; Gabi 4 Datenbank 1999a)

Bezogen auf den gesamten Energiebedarf zur Styrolherstellung ergebe sich eine Energieeffizienzsteigerung von ca. 8-9%.

Ein weiterer Vorteil der alternativen Styrolsynthese besteht in der Substitution von Schwermetallen, die bisher im Katalysator enthalten sind. Betrachtet man die Schwermetallemissionen in Wasser bei der Produktion von Styrol würden sich diese um ca 75% verringern.

Abbildung 30: Vergleich der Schwermetallemissionen in Wasser der betrachteten Styrolsynthesen



Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Gabi 4 Datenbank 1999b; Gabi 4 Datenbank 1999a)

Auf der anderen Seite muss natürlich für den neuen Katalysator aus Basis von Kohlenstoff-Nanotubes im realen Anwendungsfall darauf geachtet werden, dass Emissionen von Nanotubes möglichst unterbunden werden.

Die Nanotubes sollten fest in dem Trägermaterial des Katalysators eingebunden sein, um ein „Wegreißen“ der Nanotubes von der Trägeroberfläche zu verhindern. Außerdem wäre durch eine abgeschlossene Anlagentechnik dafür zu sorgen, dass Nanotube-Emissionen unterbunden werden.

Die Diskussion möglicher Risiko- und Gefahrenpotenziale, die von Nanotube-Emissionen ausgehen können, wird in der spezifischen Fallstudie mit dem Fokus Risikopotenziale geführt.

5.3.5 Wirkungsabschätzung

Für die Wirkungsabschätzung ist es erforderlich über Emissionsdaten zu verfügen, die sich bestimmten Umweltwirkungen zuordnen lassen. Da mit den vorliegenden Daten nur eine sinnvolle Berechnung der Energiebedarfe möglich war, konnte keine zusätzliche Wirkungsabschätzung erfolgen.

Markteintrittshemmnisse von Nanotechnologien

Im Zusammenhang mit dieser Fallstudie bietet es sich an, das Thema Markteintrittshemmnisse von Nanotechnologien kurz zu diskutieren. Nanotechnologische Verfahren wie die beschriebene neuartige Styrolsynthese, die im Rahmen der Ökobilanzierung als ökologisch vorteilhaft und auch ökonomisch als positiv bewertet werden kann, müssen sich nicht zwangsläufig auf dem Markt durchsetzen.

Im Kontext dieser Studie wurde ein vertiefendes Interview im Hinblick auf die wirtschaftliche Verwertung dieser nanotechnologischen Lösung durchgeführt. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass dieses Verfahren einer Reihe von Styrolherstellern vorgestellt und die potenzielle Vorteilhaftigkeit des Verfahrens nicht bestritten wurde.

Da es sich um ein Verfahren handelt, das bislang erst im Laboratoriumsmaßstab realisiert wurde, ist das Up-Scalen bis zur großtechnologischen Anlage erforderlich, um die wirtschaftliche Machbarkeit des nanotechnologischen Verfahrens nachzuweisen. Damit sind erhebliche Investitionen in die Weiterentwicklung des Verfahrens erforderlich mit den Unsicherheiten, die in einer solchen Entwicklung noch bestehen. Deren Finanzierung ist noch offen.

Auf der anderen Seite stehen die Anlagenhersteller und –betreiber des traditionellen Verfahrens, die einerseits keine Reinvestition planen und andererseits auf die bestehenden Erfahrungen mit dem bisherigen System verweisen. In der Summe sind es die abzuschreibenden Investitionen (sunk costs) (sowohl hinsichtlich des eingesetzten Kapitals als auch der Erfahrungen im Umgang mit den Anlagen) bei den Anlagenbetreibern, die die Aufnahme des neuen Verfahrens letztlich verhindern können.

5.3.6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Fallstudie wird exemplarisch das ökologische Potenzial von auf Nanotechnologie basierenden Katalyseanwendungen untersucht. Als konkretes Beispiel wird der Einsatz eines nanostrukturierten Katalysators auf Basis von Nanotubes für den chemischen Prozess der Styrolsynthese betrachtet.

Durch den Einsatz des neuen Katalysators wäre eine sehr hohe Energieeffizienzsteigerung auf der Prozessebene erreichbar, die im Bereich von fast 50% liegt. Zwei besondere Effekte führen zu dieser Effizienzsteigerung, einerseits ist es gelungen, die bisher endotherme Reaktion durch eine exotherme Reaktion zu ersetzen, andererseits kann die Reaktionstemperatur bedeutend gesenkt, das Reaktionsmedium verändert und der Anlagenaufwand minimiert werden. Bezogen auf den gesamten Produktlebensweg bis zum Styrol würde dies eine Effizienzsteigerung beim Energiebedarf von ca. 8-9% bedeuten.

Des Weiteren wäre durch den neuen Katalysator eine hohe Reduktion der Schwermetallemissionen im Produktlebensweg möglich.

Mögliche Risikopotenziale durch den Einsatz von Nanotubes sind noch weiter zu untersuchen und in dem Anlagenkonzept entsprechend zu berücksichtigen.

5.4 Fallstudie 3: Nanoinnovationen im Displaybereich

5.4.1 Inhalt, Ziel und Methode der Fallstudie

Der Display-Markt[39] ist aufgrund der wichtigen Rolle von Bildschirmen in der Informations- und Kommunikationstechnik ein dynamischer und stark wachsender Markt. Nach Berechnungen wird der Umsatz von heute 26,5 Mrd. Dollar im Jahr 2005 auf 49,6 Mrd. Dollar im Jahr 2005 wachsen (Euroforum 2003). Andere Quellen gehen sogar von einem Wachstum auf 100 Mrd. Dollar im Jahr 2005 aus (Mounier 2002).

Derzeitig sind, zumindest im Computerbereich, die CRT-Displays noch am weitesten verbreitet (Socolof et al. 2001). Diese werden aber zunehmend durch Flüssigkristallbildschirme (LCD) verdrängt. Neue Display-Technologien können sowohl bessere technische Eigenschaften (z.B. weniger Strahlung) besitzen, als auch hinsichtlich ihrer Handhabbarkeit (z.B. geringere Größe und Gewicht) Vorteile aufweisen. Bisher spricht neben der teilweise verminderten Benutzerfreundlichkeit (Blickwinkel, Helligkeit etc.) vor allem der höhere Kostenfaktor gegen eine noch schnellere Ausbreitung der neuen Technologien.

Mehrere verschiedene Basistechniken konkurrieren auf dem Displaymarkt miteinander. Dabei wurde im vergangenen Jahrzehnt die Erforschung und Entwicklung von Displaytechnologien auch hinsichtlich des Einsatzes von Nanomaterialien verstärkt.

Im Rahmen der Fallstudie erfolgt eine vergleichende Untersuchung von konventionellen und nanotechnologiebasierten Displaytechniken in Form von Ökoprofilbetrachtungen. Mögliche Ökoeffizienzpotenziale werden so weit wie möglich quantifiziert dargestellt.

5.4.2 Eingrenzung des Untersuchungsbereiches

5.4.2.1 Untersuchungsgegenstand

Die genaueren Untersuchungen dieser Fallstudie beschränken sich auf folgende Display-Technologien:

- Kathodenstrahlröhre (Cathode ray tube – CRT)
- Flüssigkristallbildschirme (Liquid crystal display – LCD)
- Organische Licht-Emittierende Dioden (Organic Light Emitter Display – OLED)
- Plasmabildschirme (plasma display panel – PDP)
- Feldemitterdisplays auf Basis von Nanoröhren (carbon nanotube - field emitter display - CNT-FED)

Der CRT-Technik auf Grundlage der "Braunschen Röhre" als konventionelle und derzeit noch am weitesten verbreitete Displaytechnik sowie der ebenfalls schon etablierten LCD-Technik stehen mit den OLEDs sowie den CNT-FEDs zwei nanotechnologiebasierte Anwendungen gegenüber. Letztgenannte Techniken befinden sich überwiegend noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium; einzelne Produktanwendungen von OLEDs sind schon auf dem Markt.

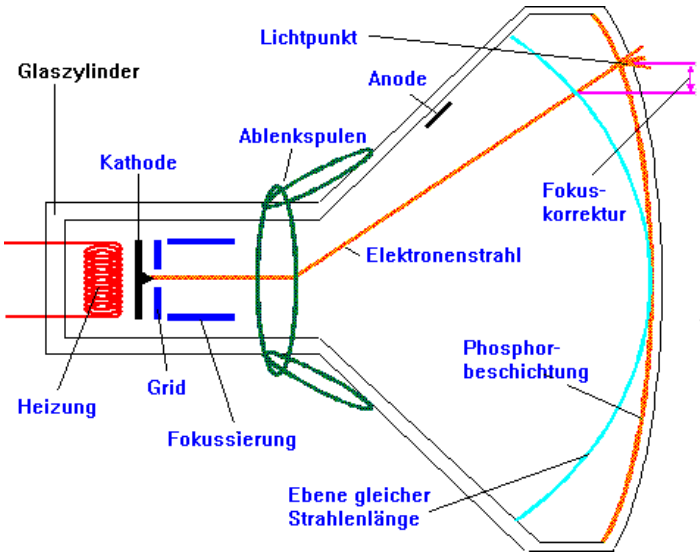
[39] Displays können allgemein nach Art ihrer Betrachtung in „Direktsicht-Anzeigen“, „Projektions-Anzeigen“ sowie „schirmlose Anzeigen“ unterteilt werden (Theis 2000). Der maßgebliche Teil der Displays gehört zu den Direktsicht-Anzeigen, so dass in der Fallstudie nur diese betrachtet werden.

Die Plasmadisplays sind in vielfältiger Form schon kommerziell erhältlich und werden als die beste Lösung für große Displays und Anzeigen propagiert. Genau für dieses Marktsegment wird jedoch auch den FEDs ein großes Potenzial vorausgesagt, so dass auch ein Vergleich mit der Plasmatechnik vorgenommen wird.

Variante 1: Kathodenstrahlröhre (CRT)

Die Kathodenstrahlröhre ist die älteste und bekannteste Möglichkeit, bewegte Bilder zu erzeugen. Ein CRT-Monitor besteht aus einem vakuumgefüllten (10-6 bis 10-7 Torr) Glaskolben mit einer beheizten Kathode (Spannung etwa 25 kV), auch Glühkathode oder Elektronenkanone genannt (Abrams et al. 2003). Mittels der Heizung werden die Elektronen der negativ geladenen Kathode in Schwingungen versetzt und aus ihr herausgelöst. Zwischen Kathode und Anode besteht eine Beschleunigungsspannung von mehreren kV. Durch diesen Ladungsunterschied werden die Elektronen in Richtung der Anode beschleunigt und erzeugen beim Auftreffen auf die Phosphorschicht einen Lichtpunkt (Tannas 1985). Eine Farbdarstellung wird durch drei einzelne Elektronenstrahlen erreicht, die durch eine Loch oder Schlitzmaske auf unterschiedlich dotierte Phosphorschichten fallen und dort ein rotes, grünes oder blaues Leuchten erzeugen. Über das Grid wird die Intensität der Elektronenstrahlen reguliert, d. h. die Helligkeit des resultierenden Lichtpunktes. Das Helligkeitssignal steuert das Grid. Um jeden Punkt des Bildschirmes zu erreichen, durchläuft der Elektronenstrahl ein elektromagnetisches Feld (deflection Yoke). Mittels der Fokussierung sowie Magnetspulen und Loch- oder Schlitzmasken wird der Elektronenstrahl gebündelt und auf ein entsprechendes Pixel gelenkt (vgl. u.a. Lohmann 1997; Blankenbach 1999).

Abbildung 31: Schematische Darstellung eines CRT Bildschirmes



Aufgrund ihrer Bauform sind die CRT im Vergleich zu den anderen Displaytechnologien sehr schwer, besitzen einen hohen Platzbedarf und zeichnen sich durch einen hohen Stromverbrauch aus. Langangezeigte Bildinhalte wirken sich durch ihr Einbrennverhalten

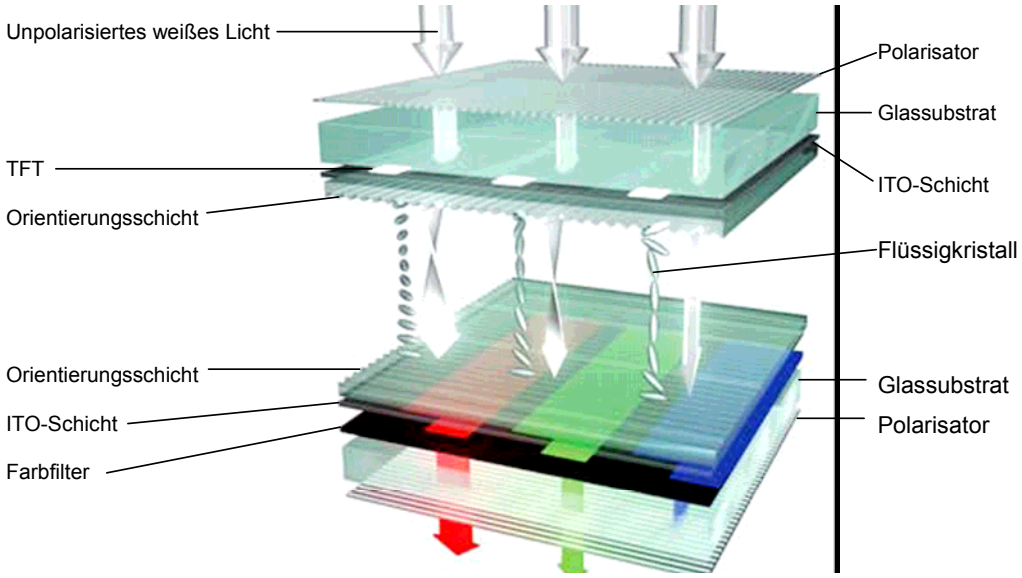
nachteilig auf die Bildqualität aus. Vorteilhaft gegenüber den anderen angebotenen Technologien ist der wesentlich geringere Preis.

Variante 2: Flüssigkristall-Displays (LCD)

Flüssigkristallanzeigen sind passive, also nicht selbstleuchtende (transmissive) Displays, bei denen eine Lichtquelle vor oder hinter dem Schirm modelliert wird. Sie wirken wie ein Ventil, welches das Licht passieren lässt oder es zurückhält. Dies beruht auf den anisotropen Materialeigenschaften der Flüssigkristalle. Deren flüssigkristalliner Aggregatzustand vereint die Ausrichtung der Moleküle in der festen, kristallinen Phase mit der Beweglichkeit des flüssigen Zustandes.

Ein LC-Display besteht aus einem System von zwei gitterförmig mit Leiterbahnen bedampften Glasplatten, zwischen denen sich die Flüssig-Kristalle befinden. Zusätzlich ist ober- und unterhalb der Glasplatten je eine Polarisationsfolie angeordnet. Diese Folien sind kreuzweise angeordnet. Wird ein Lichtstrahl durch die untere Polarisationsfolie geschickt, so bleibt nur eine Polarisations-Komponente übrig. Sofern keine Spannung anliegt, wird das Licht in seiner Polarisationsebene gedreht und kann so den oberen Polarisationsfilter passieren; es entsteht ein heller Punkt. Bei Anlegen einer Spannung wird das Licht nicht gebrochen und kann den oberen Filter nicht passieren, es entsteht ein dunkler (Bild-)Punkt (vgl. u.a. Chalamala 2000; Theis 2000; Lueder 2001). Es existieren verschiedene Entwicklungen, wie Passiv-Matrix-Display, Aktiv-Matrix-LCD (AMLCD), Twisted Nematic-LCD (TN-LCD), Ferroelektrische Display (ferroelectric liquid crystal display, FLCD) u. a. (Nocula & Olbrich 2003), auf die jedoch im Rahmen dieser Fallstudie nicht weiter eingegangen werden soll.

Abbildung 32: Schematischer Aufbau eines LC-Display



Quelle: Merck KGaA Darmstadt (2000)

Der größte Vorteil der LCD-Technologie liegt in der relativ geringen Baugröße der Displays und ihrem niedrigen Leistungsverbrauch (vgl. u.a. Nocula & Olbrich 2003).

Variante 3: Plasmadisplays (PDP)

Plasmadisplays (PDP - Plasma Display Panels) bestehen aus einem System von zwei gitterförmig mit Leiterbahnen bedampften Glasplatten, zwischen denen sich ein Gemisch aus den Edelgasen (z.B. Argon oder Neon) befindet. Durch Anlegen einer Spannung an die Leiterbahnen entsteht an den Kreuzungspunkten ein elektrisches Feld. Durch dieses Feld werden die Gasatome auf ein höheres Energieniveau gehoben. Beim Zurückfallen auf das ursprüngliche Niveau wird die aufgenommene Energie in Form von Lichtquanten wieder abgegeben.

Jeder einzelne Bildpunkt wird hier durch eine eigene Lichtquelle direkt "vor Ort" erzeugt. Zwischen flachen Glaspanelen befindet sich eine große Matrix von Bildpunkten. Dabei besteht jeder Bildpunkt wiederum aus drei Zellen, die jeweils mit Edelgas gefüllt sind. Neon und Xenon sind in der Regel die Hauptbestandteile, bei manchen Herstellern kommt noch Helium dazu. Insgesamt ist die Gasmenge aber gering, der Druck also niedrig. Die drei Zellen unterscheiden sich in ihren Wandbeschichtungen, die aus unterschiedlichen Phosphormischungen bestehen. Aufgeladene Elektroden erzeugen winzige Gasexplosionen, die zu einer kurzfristigen Aggregatszustandsänderung von Gas in Plasma führen. Die entstehende ultraviolette Lichtstrahlung erzeugt - je nach Wandbeschichtung der Zellenrück- und -wandseiten - rotes, grünes und blaues Phosphorlicht. Dieses Phosphorlicht ist durch das vordere Glaspanel als Farbpunkt sichtbar. Der Prozess der Lichterzeugung entspricht dem in Leuchtstoffröhren, jedoch in weitaus geringerem Maßstab, wodurch die Energieeffizienz der Entladung auch nur etwa sechs Prozent beträgt (Jüstel et al. 2000).

Als besondere Vorteile der Plasmadisplays gelten die ausgezeichnete Bildqualität (vollkommen verzerrungs- und flimmerfrei, sehr hohe Auflösung), der große Betrachtungswinkel sowie die Unempfindlichkeit gegenüber magnetischen Einflüssen (Blankenbach 1999). Nachteile der PDP-Technologie sind vor allem hohe Leistungsaufnahme, großes Gewicht und die Schwierigkeit, gleichzeitig hohe Helligkeit und guten Kontrast zu erreichen (vgl. u.a. Deschamps 2000).

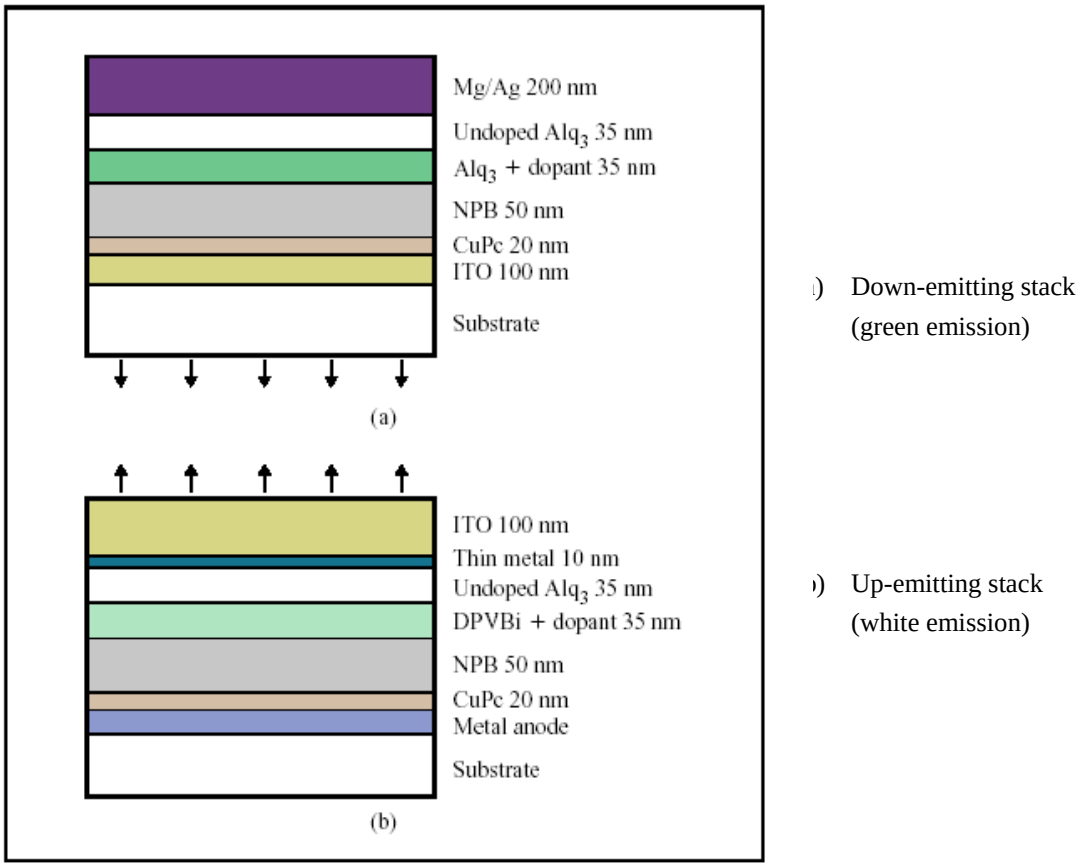
Variante 4: OLED

OLEDs (Organic Light Emitting Diode) unterscheiden sich gegenüber den herkömmlichen LED-Displays durch den Einsatz von organischen Emittermaterialien. Die prinzipielle Funktionsweise einer OLED beruht ähnlich wie die der anorganischen LED auf Injektionselektrolumineszenz. Dabei werden positive und negative Ladungsträger, die an den jeweiligen Elektroden injiziert werden, in einer Emissionsschicht zur strahlenden Rekombination gebracht. Für die Injektionselektrolumineszenz ist eine Gleichspannung von einigen Volt ausreichend. Ein großer Vorteil der OLED ist die weitgehende Unabhängigkeit vom Substratmaterial (Scott et al. 2000; Steuber 2000).

Organische Licht-Emittierende Dioden wurden durch C. W. Tang and S. A. Van Slyke (1987) von Kodak erfunden, die als erste herausfanden, dass organische Halbleiter vom p-Typ und n-Typ kombiniert werden können um daraus – in Analogie zur Bildung von p-n-Übergängen in kristallinen Halbleitern – Dioden herzustellen. Überdies erzeugen die Polymere Licht durch Rekombination von Löchern und Elektronen mit hoher Effizienz, ähnlich wie Galliumarsenid und die III–V Halbleiter. Im Gegensatz zur Herstellung von III–V LEDs, wo kristalline Perfektion

notwendig ist, können organische Halbleiter als amorphe Schichten aufgedampft werden. Möglichkeiten des Aufbaus von OLEDs sind in Abbildung 33 dargestellt.

Abbildung 33: Schematischer Aufbau eines OLED



Durch einen derartigen Schichtaufbau wurde bspw. eine helle Emission von grünem Licht mit einer Quanteneffizienz von etwa 10 –12 cd/A und einer Energieeffizienz von rund 4 lm/W bei 2000 cd/m² erreicht und in Produkten von Pioneer Corporation eingesetzt.

T. A. Ali, A. P. Ghosh, and W. E. Howard von IBM und eMagin Corporation haben diesen Aufbau modifiziert, um die OLEDs auf einem Silizium-Chip unterzubringen mit dem Ziel, dies für Mikrodisplays für Headsets zu verwenden. Sie starten mit einer Metallanode mit hoher Austrittsarbeit und enden mit einer transparenten Kathode und einer ITO-Schicht. Die Transparenz der metallischen Kathode wird durch die geringe Dicke von nur 10nm erreicht. Sie haben auch die aktive, Licht emittierende Schicht geändert. Durch Nutzung von Diphenylene-vinylene (DPV) als Blau-Grün Emitter und Dotierung mit einem roten Farbstoff wurde weißes Licht erzeugt (Ali et al. 1999).

Die Technologieentwicklung für OLEDs besitzt weltweit eine hohe Dynamik; in Deutschland konnte bspw. eine Gruppe am Institut für Angewandte Photophysik der TU Dresden durch p-Dotierung der Hole Transport Layer (HTP) die Betriebsspannung für OLEDs deutlich auf etwa 3 V reduzieren und die Leistungseffizienz verbessern (Blochwitz 2001). Treiber der Technologieentwicklung ist das im Vergleich zu anderen Displays erwartete große Kosteneinsparpotenzial bei der Herstellung.

Variante 5: CNT-FED

Basisbestandteile eines Feldemitter-Displays allgemein sind die rückwärtige Platte mit der Kathodenschicht, eine Vakuumlücke und anschließend die Frontplatte mit einer auf der Innenseite gelegenen ITO-Schicht als Anode.

Die Kathodenschicht auf der rückwärtigen Platte (Emitterschicht) ist eines der entscheidenden Bestandteile von FE-Displays. Die Art, Charakteristik und Beschaffenheit der Emitter ist entscheidend für Bildqualität, Stromverbrauch in der Gebrauchsphase und Lebensdauer.

Es sind verschiedene Emittermaterialien bekannt. Am weitesten fortgeschritten sind die Forschungen und Entwicklungen von Microtips aus Molybdän oder Wolfram sowie Emitterschichten aus Kohlenstoff-Nanoröhren.

Aufgrund ihrer Eigenschaften sind Kohlenstoff-Nanoröhren schon kurz nach ihrer Entdeckung hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit als Feldemitter untersucht worden.

Als allgemeine Anforderungen an Feldemitter können genannt werden:

- möglichst geringe Größe/Durchmesser
- Stabilität bei hoher Stromdichte
- hohe Leitfähigkeit
- geringer Energieverlust
- große chemische Stabilität

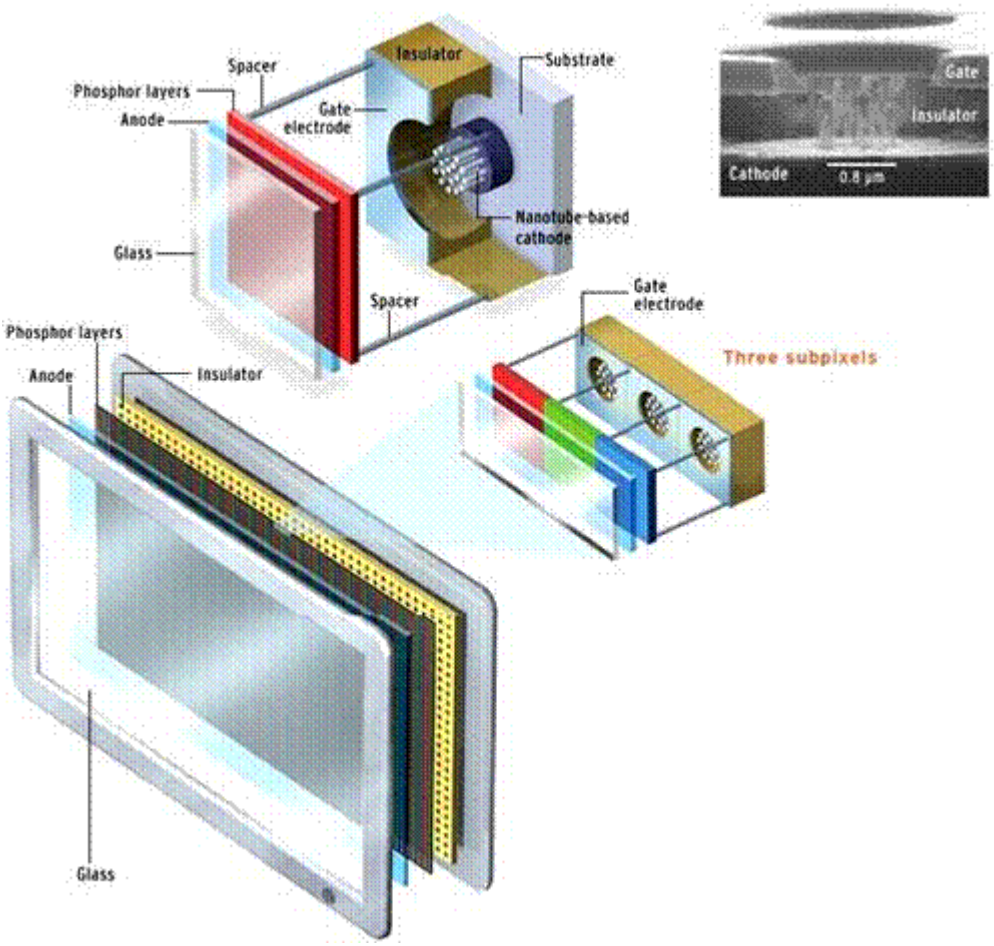
Diese Anforderungen werden von Nanoröhren sehr gut erfüllt. Das sehr hohe Längen/Durchmesserverhältnis, die hohe Stromdichte bei geringer Spannung sowie neben der chemischen auch die hohe thermische Stabilität prädestinieren die Nanoröhren als ein sehr geeignetes Material für Feldemitter. Des Weiteren sind Feldemitterschichten aus Nanoröhren leichter herzustellen als Microtips und können im Gegensatz zu Feldemitterspitzen wie Wolfam und Molybdän, die ein Vakuum von 10^{-10} Torr benötigen, schon bei einem Vakuum von 10^{-8} Torr hergestellt werden (Baughman et al. 2002). Dies ermöglicht eine kostengünstigere Herstellung von CNT-FEDs gegenüber Microtips (Information Society Technologies 2003).

Der komplexeste Bestandteil eines CNT-FED ist die Kathodenschicht. Dort ist auf dem Glassubstrat zunächst eine Schicht "Leiterbahnen(-drähte)" aufgetragen. Über dieser Schicht liegt die "kalte Kathode", die Emitterschicht aus Nanoröhren. Darüber liegt nochmals eine Elektrodenschicht, deren Bahnen rechtwinklig zur ersten Elektronenschicht liegen. Damit wird die zweite Richtung der Pixel definiert, welche an den jeweiligen Kreuzungspunkten der ersten und zweiten Elektrodenschicht liegt. Durch die in die zweite Schicht eingeätzten Lücken können die Elektronen aus der Emitterschicht ins Vakuum und zur Anodenschicht gelangen.

Zwischen Kathodenschicht und Anodenschicht besteht ein Vakuum und der Abstand (i.d.R. weniger als 1 mm) ist durch so genannte Spacer ("Abstandshalter") festgelegt. Gegenüber jedem Pixel der Kathodenschicht liegt ein Phosphorbereich ähnlicher Größe über einem transparenten Leitermaterial, welches die Anode bildet. Die Anodenschicht liegt auf einem Glassubstrat.

Der rückwärtige Elektroden-Kontakt wird durch eine Metallschicht auf dem Glassubstrat sichergestellt (Burden 2001).

Abbildung 34: Schematischer Aufbau sowie vergrößerte Aufnahme eines CNT-FED



Quelle: Amaratunga (2003)

Feldemitter-Flachbildschirme allgemein arbeiten wie Kathodenstrahlröhren mit vielen parallel emittierenden kalten Feldelektronenquellen pro Bildelement und erreichen dieselben Charakteristika wie herkömmliche CRT in Bezug auf Bildhelligkeit, Farbwiedergabe, Blickwinkel und Wiedergabegeschwindigkeit.

Während des Betriebes liegt eine Spannung von einem bis sieben kV an der Anode an, abhängig von der Größe der Vakuumlücke und Erfordernissen des Displays. Damit entsteht ein Potenzialunterschied (Spannungsunterschied) zwischen Anode und Kathode, welcher ein Emittieren von Elektronen aus der (Nanoröhren-)Emitterschicht bewirkt. Entscheidend ist dann die Beschleunigung der Elektronen in der Vakuumlücke. Die Stromstärke, die Energie der Elektronen sowie die Art und Beschaffenheit des Phosphors bestimmen die Farbe und Helligkeit des Pixels.

Ein großer Vorteil der Feldemitterdisplays besteht darin, dass es durch das Anlegen eines elektrischen Feldes zu einem „kalten“ Elektronenaustritt aus der Spitze kommt, womit weitaus weniger Energie verbraucht wird, als bei der herkömmlichen Kathodenstrahlröhre, welche stark aufgeheizt werden muss, um Elektronen zu entsenden.

5.4.2.2 Untersuchungsrahmen und Datenverfügbarkeit

Der Bilanzraum für die vergleichenden Betrachtungen sollte den gesamten Lebenszyklus der jeweiligen Displaytechnologie darstellen. Die einzelnen Lebenswegstufen sind hierbei:

- Rohstoffgewinnung, Vorproduktion
- Displayherstellung
- Nutzungsphase
- Entsorgung/Recycling.

Für die Bilanzierung von CRT und LCD konnte auf eine sehr umfangreiche amerikanische Ökobilanzuntersuchung zurückgegriffen werden. Sie wurde im Auftrag der EPA Design for the Environment (DfE) von Socolof, Overly, Kincaid und Geibig von der Universität Tennessee, Center for Clean Products and Clean Technologies erarbeitet und im Dezember 2001 veröffentlicht (Socolof et al. 2001). Die Studie zeichnet sich durch die Mitarbeit aller wichtigen amerikanischen und asiatischen Hersteller von CRT und LCD aus. In der Studie wurde als funktionelle Einheit der Lebensweg eines Computermonitors untersucht.

Bei den anderen betrachteten Varianten liegen keine quantitativen Ökobilanzdaten für die Herstellung vor. Für diese Technologien erfolgen qualitative Beschreibungen der Herstellungsprozesse, um auf dieser Basis Annahmen für Bilanzabschätzungen treffen zu können.

Bezüglich der besonders relevanten Gebrauchsphase können für alle Technologien quantifizierte Daten zu Grunde gelegt werden.

Daten für die Phase der Entsorgung/Recycling liegen ebenfalls nur für die ersten beiden Varianten vor.

Als funktionelle Einheit für die vergleichenden Ökoprofilbetrachtungen wird in Anlehnung der vorliegenden Ökobilanz der Lebensweg eines PC-Monitors mit der Displaygröße von 15“ bei LCD bzw. entsprechenden 17“ bei CRT gewählt. Die vorliegenden Daten werden insbesondere für die Gebrauchsphase auf diese Displaygröße umgerechnet.

Für die anderen Varianten wird unterstellt, dass sie die gleiche Lebensdauer besitzen wie die bisherigen CRT und LCD. Insbesondere unterstellt diese Annahme für OLEDs, dass das bestehende Problem der Langzeitstabilität der eingesetzten organischen Leuchtstoffe gelöst ist.

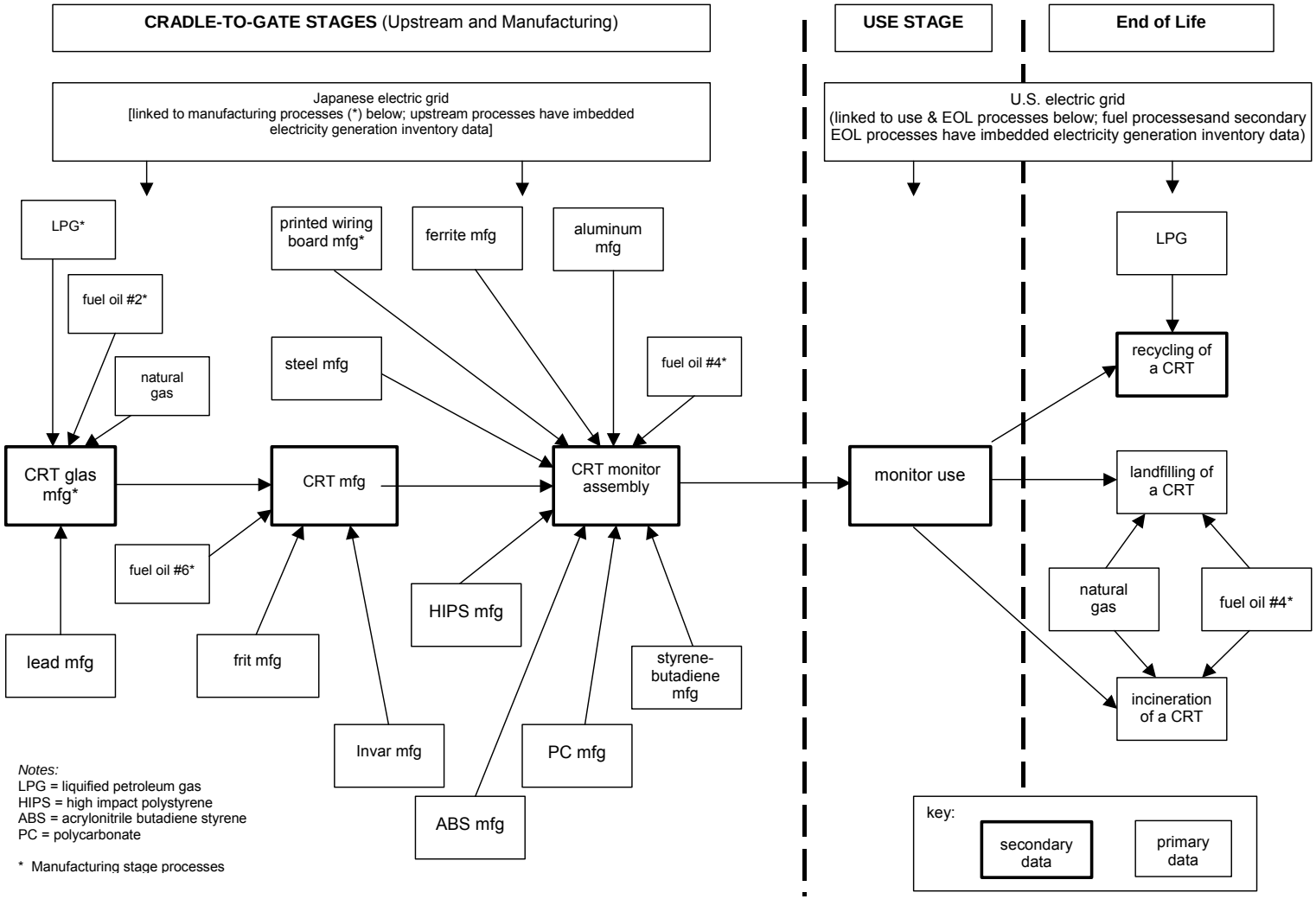
5.4.2.3 Beschreibung der Lebenswegstufen

Für die Herstellung von Displays muss auf eine Vielzahl von Rohstoffen zurückgegriffen werden. Im Folgenden werden die wesentlichen Herstellungsschritte und Rohstoffe der betrachteten Displaytechniken beschrieben und in Übersichten dargestellt. Detaillierte Abbildungen sind außerdem im Kapitel Lebenswegstufen aufgeführt.

Die Herstellung eines **CRT-Monitors** umfasst die Herstellung der beiden Hauptbestandteile, des Bildschirmglases sowie des Konusglases, wobei im Glas ein hoher Anteil an Blei enthalten ist. Im Bildschirm werden dann die einzelnen Leuchtstoffe aufgebracht und mit einer Schutzschicht versehen. Die zuvor gefertigte Loch- bzw. Schlitzmaske wird in den Bildschirm eingebaut. Durch das Zusammenfügen beider Glasteile erfolgt die Fabrikation des Glaskolbens, in dessen Hals dann die Kathode eingeschmolzen wird. Im Anschluss erfolgen das

Vakuumpumpen sowie der Verschluss der Röhre. Nach der Herstellung der Röhre erfolgt in der Endmontage das Anbringen weiterer Bestandteile, wie beispielsweise der Ablenkeinheit.

Abbildung 35: Produktlebensweg eines CRT-Monitors

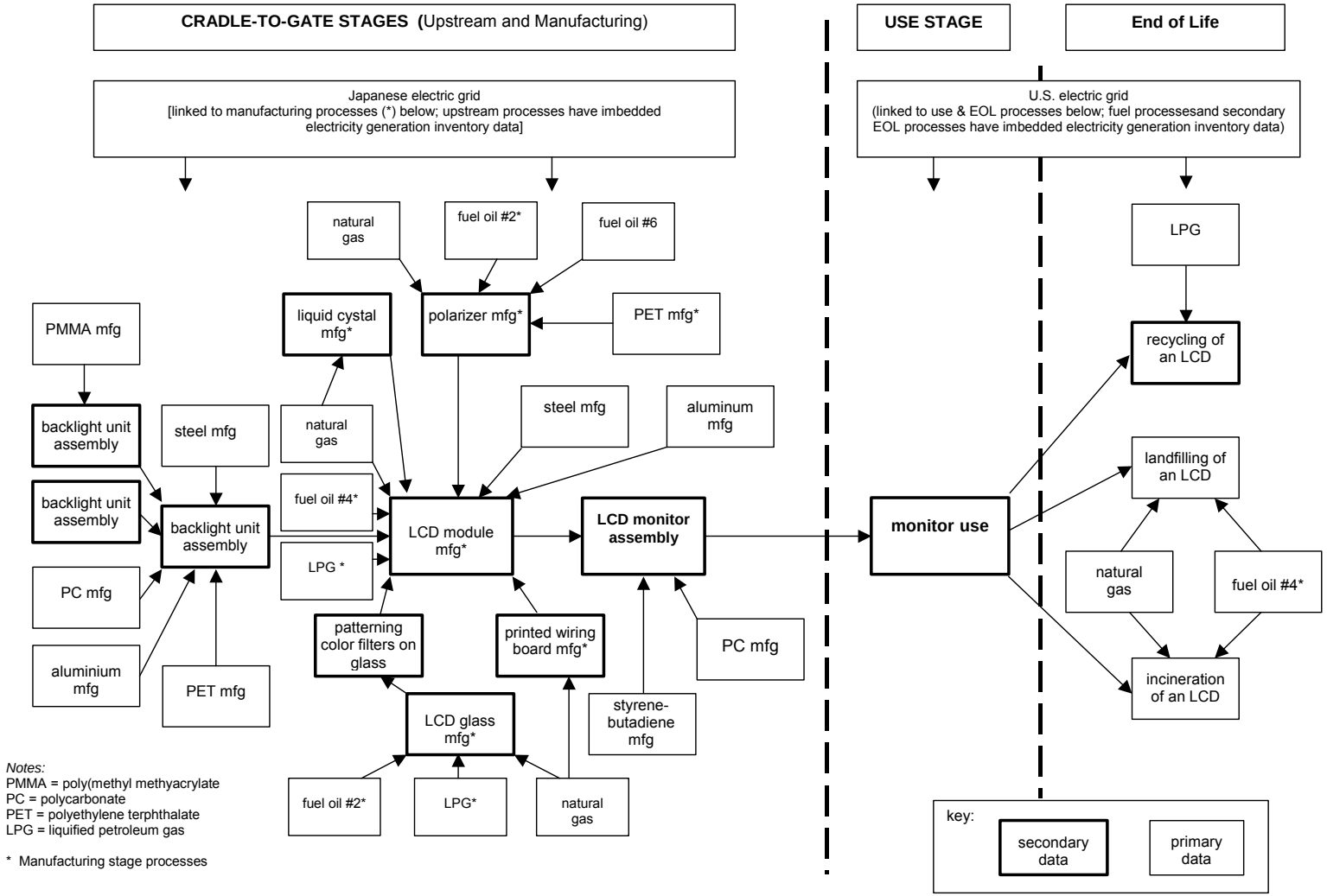


Quelle: Socolof et al (2001)

Nachfolgend werden die üblichen Schritte zur Fertigung von **LCDs** benannt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass insbesondere für die Einbringung der Flüssigkristallschicht verschiedene Methoden angewendet werden können.

Zunächst werden die rückseitige Glasplatte samt TFT-Schicht und die vordere Glasplatte mit Farbfiltern hergestellt. Im Weiteren erfolgt das Aufsputtern bzw. Aufdrucken der ITO-Schicht und das Aufbringung der Hartschicht mit anschließendem Tempern. Dann werden die Polyimid (PI) Schichten aufgedruckt und die ausgehärtete PI-Schicht wird gerieben, um die spätere Ausrichtung der LC-Moleküle zu ermöglichen. Danach erfolgt das Aufsprühen der Abstandshalter (Spacer), die Abscheidung und Aushärtung der Dichtungen sowie das Aufbringung der Kontakte für die spätere Verdrahtung. Bei der anschließenden Zellenmontage werden die beiden Glasplatten ausgerichtet und zu einem Panel zusammengesetzt. Nach der Aushärtung im Heißpressofen erfolgen die Befüllung mit den Flüssigkristallen und die Aufbringung der Polarisationsfolien (Crystec Technology Trading GmbH 2003).

Abbildung 36: Produktlebensweg eines LCD-Monitors



Quelle: Socolof et al. (2001)

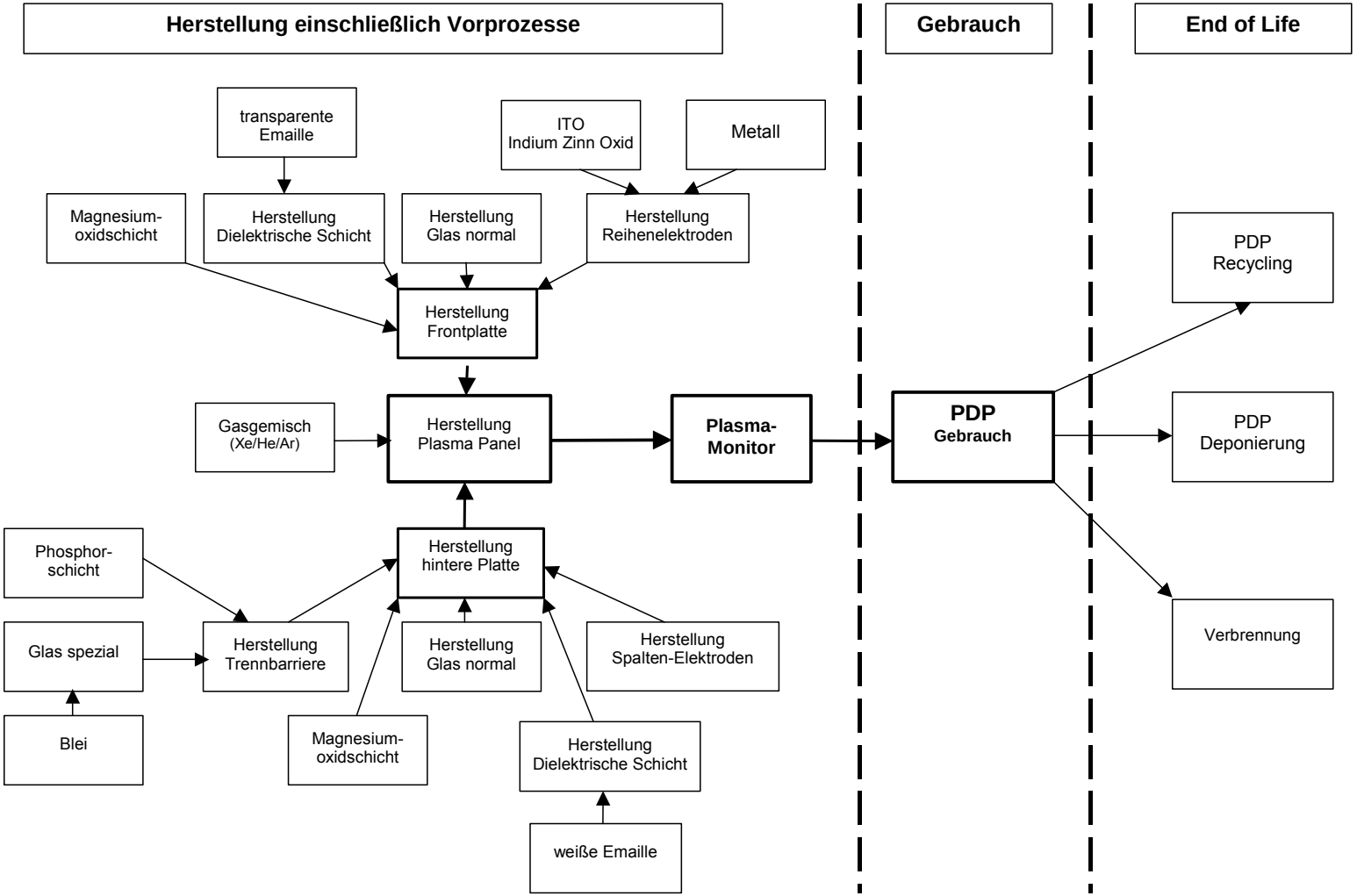
Bei der Herstellung von **Plasmadisplays** werden zunächst die beiden Glasplatten, welche in der Regel etwa eine Stärke von ca. drei Millimetern aufweisen, fabriziert und nachfolgend gereinigt.

Auf der Frontplatte werden die Metallelektroden reihenförmig aufgebracht. Als nächster Schritt erfolgt die Präparation der Black Matrix. Die gesamte Frontplatte wird dann mit einer transparenten dielektrischen Schicht aus Keramik überzogen, welche bei knapp 600°C aushärtet. Bevor die Frontplatte noch mit einer dünnen Schicht Magnesiumoxid (MgO) überzogen wird, erfolgt noch die Aufbringung der Abstandshalter (Spacer).

Auf der Rückplatte werden ebenfalls zunächst die Elektroden (in Spaltenform/Matrix) aufgebracht und auch mit einer Schicht von Keramik (dielektrische Schicht) überzogen. Nach Aushärtung der Keramikschicht erfolgt die Aufbringung der Magnesiumoxidschicht. Nachfolgend werden bei jeder der Spaltenelektroden die so genannten "barrier ribs" präpariert und in die entstandenen Räume werden die Phosphorstoffe deponiert. Anschließend wird die fertig präparierte Rückplatte gebrannt.

Die beiden Platten werden zu einem Panel zusammengesetzt und miteinander verschmolzen. Zuletzt wird aus dem Zwischenraum die Luft entfernt und bei einem Druck von etwa 500 Torr das Gasgemisch (meist Helium und Xenon) eingefüllt (Deschamps 2000).

Abbildung 37: Produktlebensweg eines Plasmadisplay



Quelle: eigene Darstellung

Bei der **Herstellung von OLEDs** wird zunächst auf einem Glassubstrat die transparente ITO-Schicht aufgebracht. In den nächsten Schritten werden alle anderen organischen und metallischen Schichten durch thermische Verdampfung hergestellt. Während die Verdampfer für die organischen Materialien bei 300-500°C arbeiten, sind für die Verdampfung von Silber 1200°C notwendig. Die Aufbringung der Schichten erfolgt in genau einzuhaltenden komplexen Prozessschritten im Vakuum. Anschließend wird die Frontscheibe angebracht und das ganze mit einer Art Epoxidharz luftdicht verkapselt.

Derzeit befindet sich aber nur bei der SK Display Corp., einem Joint Venture von Kodak und Sanyo, eine Produktionsanlage in Betrieb, die erste OLEDs in Serie fertigen kann (Webelsiep 2003). Ein durch das BMBF geförderter Prototyp eines In-Line OLED Fertigungs-Systems steht im Fraunhofer IPMS in Dresden (IPMS 2003). Die Anlage besteht aus 11 Prozessmodulen, in denen die Beschichtung von 300 mm x 400 mm Proben durchgeführt wird. Die Substrate bewegen sich dabei vertikal durch die Depositionskammern. Für die Abscheidung der organischen Schichtsysteme stehen bis zu 12 Linienquellen zur Verfügung. Zusätzlich sind für die Elektrodendeposition je zwei PVD- und anorganische Verdampferquellen integriert.

Die beiden nächsten Abbildungen verdeutlichen, in wie weit sich die Herstellung einer OLED im Unterschied zur Herstellung der schon beschriebenen LCD vereinfacht.

Abbildung 38: Vergleich von LCD und OLED (1)

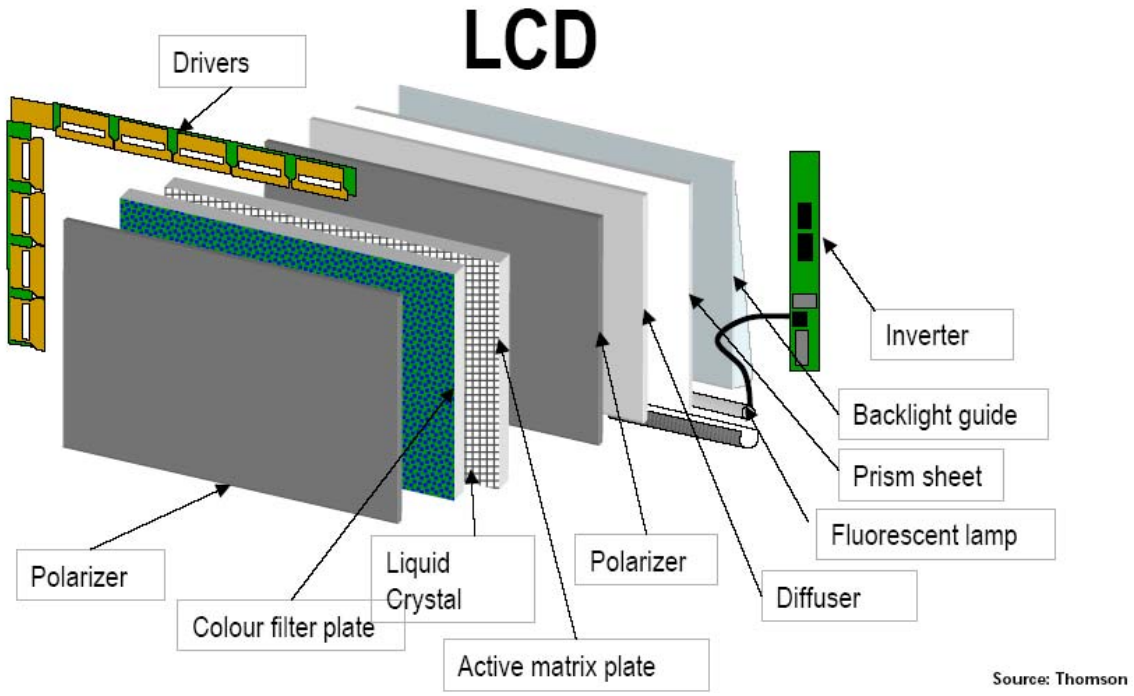
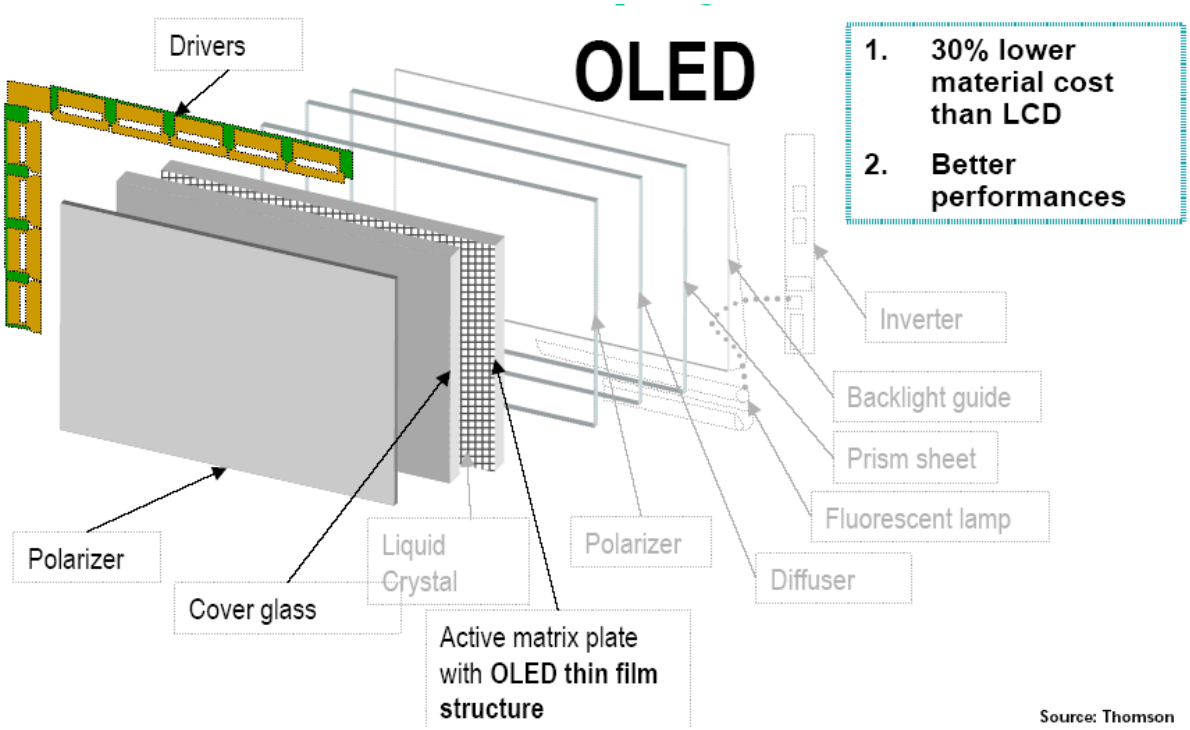


Abbildung 39: Vergleich von LCD und OLED (2)



Aus diesen Darstellungen wird ersichtlich, dass sich die Herstellung von OLEDs viel material- und energieeffizienter gestalten lässt als die Herstellung von LCDs, da z.B. der Aufwand für die Hintergrundbeleuchtung komplett entfällt. Dadurch ist es möglich, die Bildschirmtiefe von 5,5 mm bei LCD auf 1,8 mm bei OLED zu verringern.

Eine Abschätzung des Materialverbrauchs für einen typischen OLED-Schichtaufbau

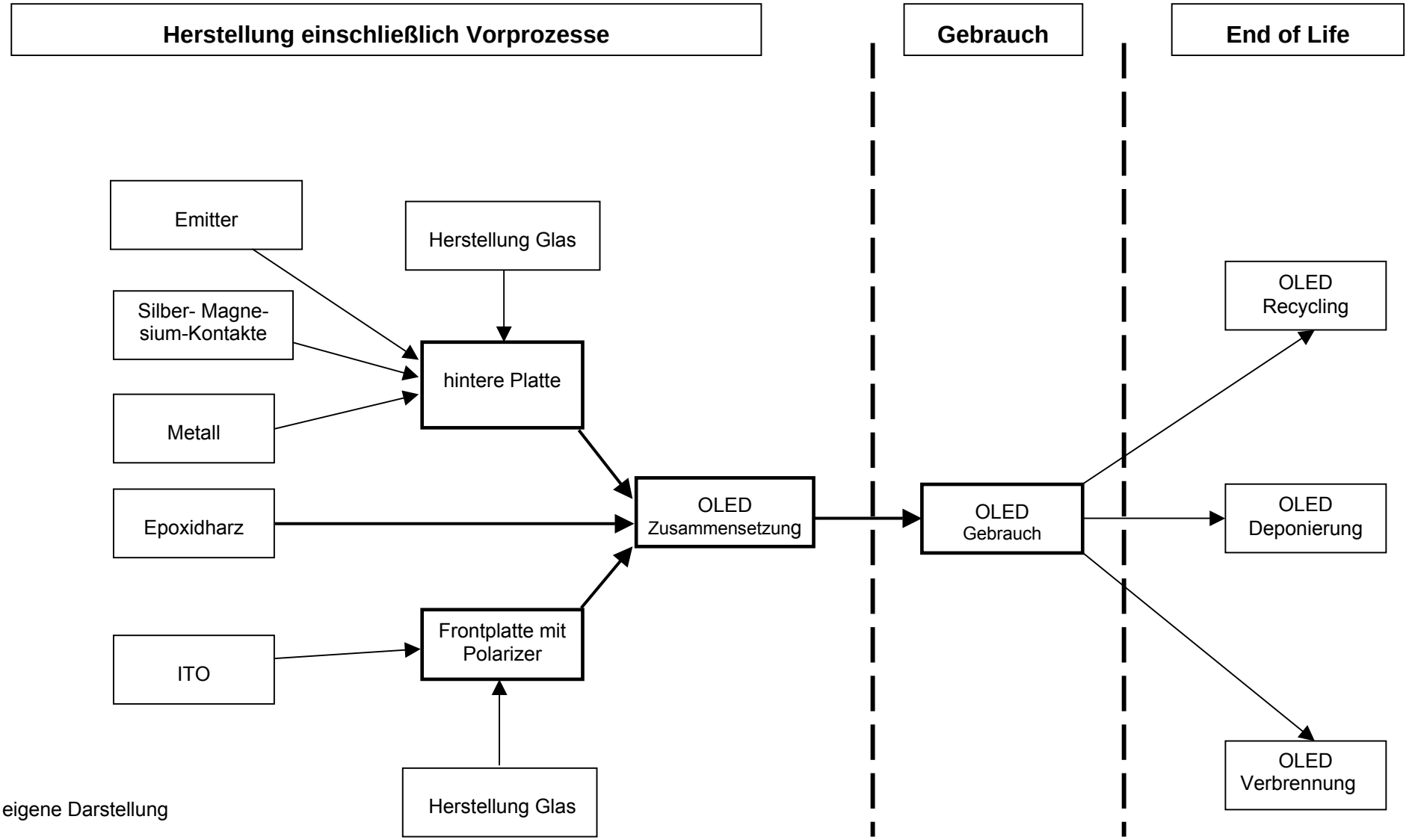
- Glas (0,7 mm)
- 100 nm ITO
- 100 nm Organisches Material
- 100 nm Mg:Ag (für Kontaktierung)
- Glas (0,7 mm)

ergibt für ein 17“ Display mit einer sichtbaren Fläche von 918 cm² unter Beachtung von anfallenden Abfällen beispielsweise einen Verbrauch an organischen Materialien von ca. 370 mg pro 17“ Monitor. Für die Herstellung von 1 Mio. 17“-Displays pro Jahr würden etwa 0,4 t organische Materialien verbraucht.

Tabelle 28: Abschätzung von Verbrauchsmengen typischer OLED-Materialien

	Im Display enthalten		Gesamtverbrauch mit Herstellung	
ITO	12 µg/cm²	11 mg bei 17“	25 µg/cm²	23 mg bei 17“
Organ. Materialien	16-20 µg/cm²	15-18 mg bei 17“	400 µg/cm²	370 mg bei 17“
Mg, Ag	100 µg/cm²	92 mg bei 17“	ca. 200 µg/cm²	184 mg bei 17“

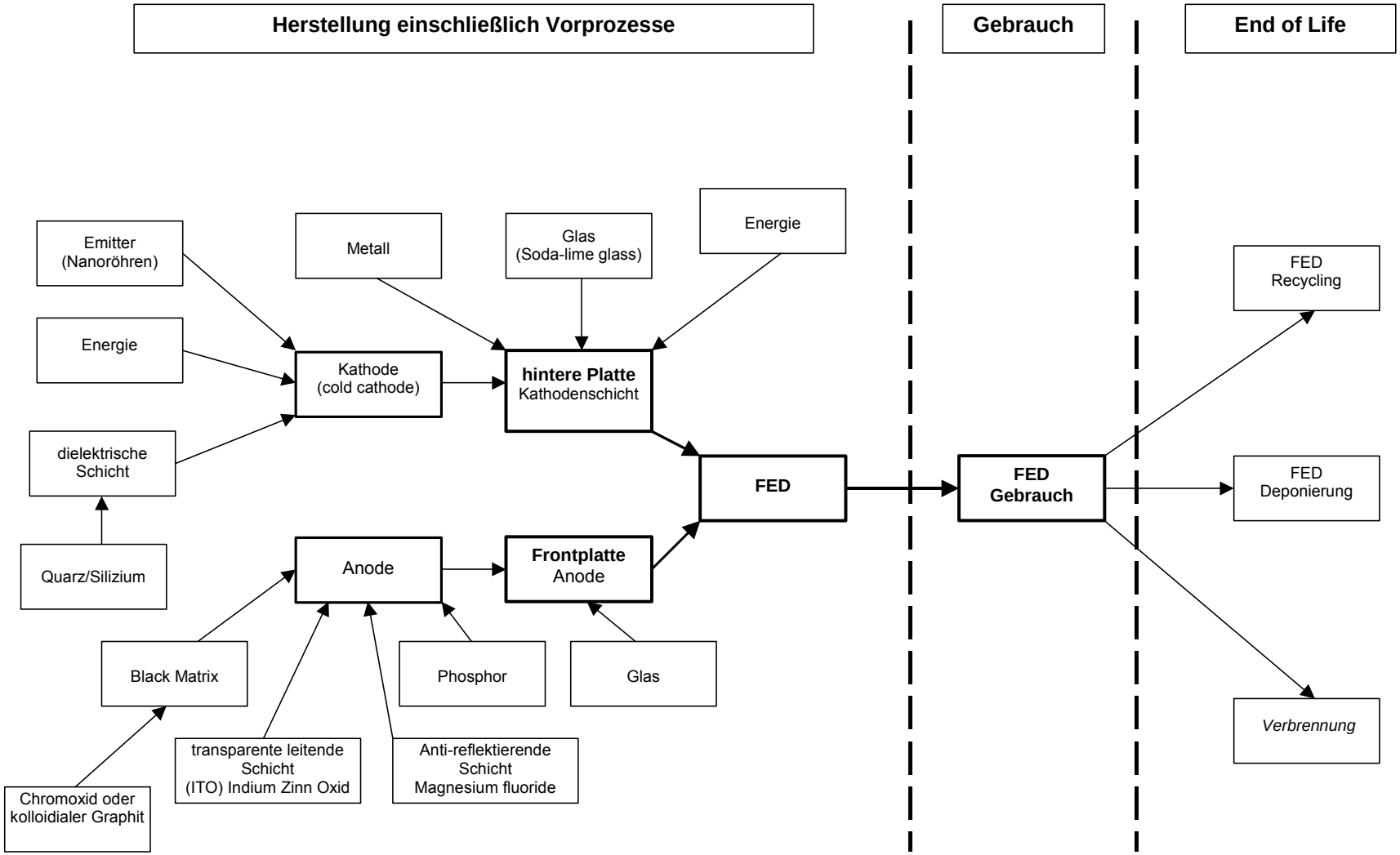
Abbildung 40: Produktlebensweg eines OLED-Display



Quelle: eigene Darstellung

Nach Herstellung der rückwärtigen Glasplatte des **CNT-FED** werden durch verschiedene Verfahren (Sputtern, Lithographie, Microcontact-Printing und ink jet printing) auf den Pixelteilen des Glassubstrates Metallkatalysatoren aufgebracht. In einem genau definierten CVD-Prozess bei niedrigen Temperaturen (Temperaturen von weniger als 500°C und nur wenige Minuten) erfolgt das definierte Wachstum der CNT an den Katalysatoren (NEDO). Auf die Frontplatte, die ebenfalls aus Glas besteht, wird auf die Innenseite eine ITO-Schicht als Anode aufgebracht und mit einer Phosphorschicht präpariert. Zum Schluss werden beide Glasplatten zu einem Panel zusammengeschmolzen.

Abbildung 41: Produktlebensweg eines CNT-FED



Quelle: eigene Darstellung

Die Vorteile der neuen nanotechnologiebasierten Displaytechnologien und die damit in Verbindung stehenden ökologischen Effekte lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Tabelle 29: Vorteile der neuen nanotechnologiebasierten Displaytechnologien

Displaytechnologie	**Ökologische Effekte**
OLED	
Einfacher Aufbau, Verringerung der Fertigungsschritte	Verringerung des Anlagenaufwandes
Geringe Bildschirmtiefe (1,8 mm statt 5,5 mm TFT-LCD), geringer Materialeinsatz	Erhöhung der Materialeffizienz
Geringere Verdampfungstemperatur der organischen Moleküle (300-500°C) gegenüber Metallen (Ag 1200°C)	Verringerung des Energieverbrauchs bei der Herstellung
Organische Leuchtstoffe	Problem mit Langzeitstabilität (geringere Lebensdauer)?
Verringerung des spezifischen Stromverbrauches in der Gebrauchsphase	Erhöhung der Energieeffizienz
CNT-FED	
Verringerung des spezifischen Stromverbrauches in der Gebrauchsphase	Erhöhung der Energieeffizienz
Geringe Bildschirmtiefe (3,5 mm), geringer Materialeinsatz	Erhöhung der Materialeffizienz
Sehr hohe Auflösung	
Einsatz von Nanotubes	Komplizierter Fertigungsprozess durch gezieltes partielles Wachsen der Nanotubes

Detaillierte Ökobilanzdaten für die Herstellung sowie die davor liegenden Prozesse stehen nur für CRT und LCD zur Verfügung. Für die anderen betrachteten Display-Technologien konnten die notwendigen Prozesse nur qualitativ beschrieben werden, da keine Stoff- und Energiedaten zur Verfügung stehen. Ein differenzierter ökobilanzieller Vergleich ist auf dieser Datenbasis nicht möglich.

Auf Basis der Technologiebeschreibungen werden aber für die drei Varianten folgende Annahmen zum Energieverbrauch zur Vorproduktion und Herstellung getroffen, um zumindest für den Energieverbrauch eine Abschätzung vornehmen zu können:

PDP Hier wird der gleiche Energieverbrauch wie bei LCD unterstellt.

OLED Auf Grund des einfacheren Aufbaus kann mit geringeren Energieverbräuchen gerechnet werden (Variante A: 10% Energieeinsparung, Variante B: 30% Energieeinsparung).

CNT-FED Auf der Grund des einfacheren Aufbaus kann für die Vorproduktion mit geringeren Energieverbräuchen gerechnet werden (Annahme: Wie Variante OLED A 10% Energieeinsparung). Auch der Energieaufwand für die Herstellung dürfte bei Beherrschung der am anspruchsvollsten erscheinenden Technologie geringer als bei LCD sein; es wird aber ein gleicher Aufwand wie bei LCD zu Grunde gelegt, um einen Sicherheitsfaktor für die Nanotube-Herstellung zu berücksichtigen.

Gebrauchsphase

Sind aus technischer Sicht die Bildqualität und Handhabbarkeit wichtige Kriterien, ist für die ökologische Beurteilung von Displaytechnologien auf Grund ihrer langen Gebrauchsphase der Stromverbrauch der alles entscheidende Parameter.

Um einen Vergleich der betrachteten Displaytechnologien vornehmen zu können, bedarf es Energieverbrauchwerte für eine Displaygröße. Bei CRT und LCD wurden Displays mit der Größe von 15“ verglichen. In der Literatur lassen sich Energieverbräuche für Anwendungen mit unterschiedlichsten Displaygrößen finden, die sich nur schwer miteinander vergleichen lassen. Vom Cambridge University's engineering department wird der Stromverbrauch eines 38" CNT-FED mit vergleichbaren Bildqualitäten wie ein CRT- oder Plasmabildschirm auf 50-70 Watt geschätzt (Amaratunga 2003). Nach Schätzung von Samsung wird ein 42" CNT-FED etwa 150 Watt verbrauchen (Samsung 2003). Futuba stellte ein 8" großes Vollfarbendisplay einer Helligkeit von etwa 1000 cd/m² her, das nur 7 Watt verbraucht. Nach Angaben von Mounier (2002) wird ein 10" FED nur etwa zwei Watt verbrauchen. Ein neues 20“ OLED-Display von IDTech (IBM) mit 1280x768 Pixeln hat einen Energieverbrauch von 25 W bei einer Helligkeit von 300-500 cd/m². Zum Vergleich dazu beträgt der Energieverbrauch eines 19“ LCD-Bildschirms 40 W (VDI-Nachrichten 2003).

Die für die Fallstudie verwendeten Energieleistungsdaten sind in der folgenden Tabelle aufgeführt und einer Road Map zu Displaytechnologien entnommen, deren ausführlichen Daten im Anhang (siehe Tabelle 52) dargestellt sind. Die Daten für das Prognosejahr 2005 werden in der Fallstudie entsprechend auf die entsprechende Displaygröße umgerechnet.

Tabelle 30: Energieleistungsaufnahmen von Displaytechnologien

Jahr	Technik	2000	2005	2010
Größe		**32"**	**50"**	**50"**
Energie-leistungsaufnahme	LCD	140 W	120 W	100 W
	PDP	300 W	200 W	100 W
	CNT-FED	70 W	70 W	40 W
	OLED	k.A.	60 W	30 W
	CRT	200 W	230 W (HVTV)	200 (HVTV)

Quelle: (New Energy and Industrial Technology Development Organization 2000)

Entsorgung / Recycling

Konkrete Daten für diese Lebenswegstufe sind in der Ökobilanz von Socolof et al. (2001) für CRT und LCD enthalten. Für die anderen Displaytechnologien liegen keine quantitativen Daten vor. Aus den vorliegenden Bilanzdaten für CRT und LCD ist ersichtlich, dass diese Phase in der Gesamtbetrachtung nur eine untergeordnete Rolle spielt und wird bei den weiteren Betrachtungen quantitativ nicht weiter berücksichtigt.

5.4.3 Sachbilanz

In der Sachbilanz erfolgt eine Aufzeichnung der stofflichen und energetischen Beziehungen zwischen der betrachteten Display-Technologie und der Umwelt, d.h. dass die Inputflüsse, die der Umwelt entnommen werden, und die Outputflüsse, die an die Umwelt abgegeben werden, erfasst werden. Ziel der Sachbilanz ist es, für die ausgewählten Varianten unter Beachtung der funktionellen Äquivalenz ein Dateninventar zu erstellen.

Quantitative Sachbilanzdaten liegen komplett für CRT und LCD vor. Auf dieser Basis und den beschriebenen Annahmen wird eine Abschätzung der Energieverbräuche aller Display-Technologien für die Phasen Vorproduktion, Herstellung und Gebrauch vorgenommen.

5.4.3.1 Auswertungen der Sachbilanz

Bei der Betrachtung der reinen Massebilanzen der Hauptbestandteile eines 17“ CRT-Monitor mit einem 15" LCD-Monitors wird der gravierende Gewichtsunterschied zwischen der klassischen Röhrentechnologie und der Flachbildschirmtechnologie deutlich, der auch für die anderen Display-Technologien gilt.

Tabelle 31: Massebilanzen von CRT und LCD

	CRT		**LCD**	
Bestandteil	**Masse in kg**	**Anteil in %**	**Masse in kg**	**Anteil in %**
Glas (bei CRT Bleiglas)	9,76	46,1	0,59	10,3
Stahl	5,16	24,4	2,53	44,1
Kunststoffe	3,04	14,4	1,78	31,0
etc.	3,2	15,1	0,83	14,6
Summe	21,16	100,0	5,73	100,0

Quelle: Socolof et al. (2001)

Auch die Stoff- und Energiebilanzen über den gesamten Lebensweg untermauern den Vorteil der Flachbildschirmtechnologien. Beispielsweise ist der Gesamtenergieverbrauch eines CRT-Monitors auf Grund der großen Energiemenge zur Glasherstellung und des erhöhten Stromverbrauches in der Gebrauchsphase um den Faktor 7,3 größer als der Gesamtenergieverbrauch eines entsprechenden LCD-Monitors. Detaillierte Daten zu

Materialbilanzen und Stoff- und Energiebilanzen der zu Grunde gelegten Ökobilanz sind im Anhang (Tabelle 53ff) aufgeführt.

Die ökologische Vorteilhaftigkeit der LCD gegenüber der CRT verdeutlicht insbesondere die vergleichende Darstellung der untersuchten Umweltkategorien. Bis auf zwei Umweltwirkungen ist die LCD jeweils besser als die CRT.

Tabelle 32: Quantitativer Vergleich der Umweltkategorien von CRT und LCD

Impact category	Units per monitor	CRT	LCD
Renewable resource use	Kg	**1.31E+04**	2.80E+03
Nonrenewable resource use	Kg	**6.68E+02**	3.64E+02
Energy use	m3	**2.08E+04**	2.84E+03
Solid waste landfill use	m^3	**1.67E-01**	5.43E-02
Hazardous waste landfill use	m^3	**1.68E-02**	3.61E-03
Radioactive waste landfill use	m^3	**1.81E-04**	9.22E-05
Global warming	kg-CO2 equivalents	**6.95E+02**	5.93E+02
Ozone depletion	kg-CFC-11 equivalents	2.05E-05	1.37E-05
Photochemical smog	kg-ethene equivalents	**1.71E-01**	1.41E-01
Acidification	kg-SO2 equivalents	**5.25E+00**	2.96E+00
Air particulates	Kg	**3.01E-01**	1.15E-01
Water eutrophication	kg-phosphate equivalents	4.82E-02	**4.96E-02**
Water quality, BOD	Kg	**1.95E-01**	2.83E-02
Water quality, TSS	Kg	**8.74E-01**	6.15E-02
Radioactivity	Bq	**3.85E+07**	1.22E+07
Chronic health effects,	tox-kg	**9.34E+02**	6.96E+02
Chronic health effects, public	tox-kg	**1.98E+03**	9.02E+02
Aesthetics (odor)	m^3	**7.58E+06**	5.04E+06
Aquatic toxicity	tox-kg	2.25E-01	**5.19E+00**
Terrestrial toxicity	tox-kg	**1.97E+03**	8.94E+02

Quelle: Socolof et al. (2001)

Für die weitere Diskussion stellt sich nun die Frage, welche weiteren Potenziale durch die anderen Display-Technologien insbesondere durch die nanotechnologiebasierten Displays im Vergleich dazu erwartbar sind.

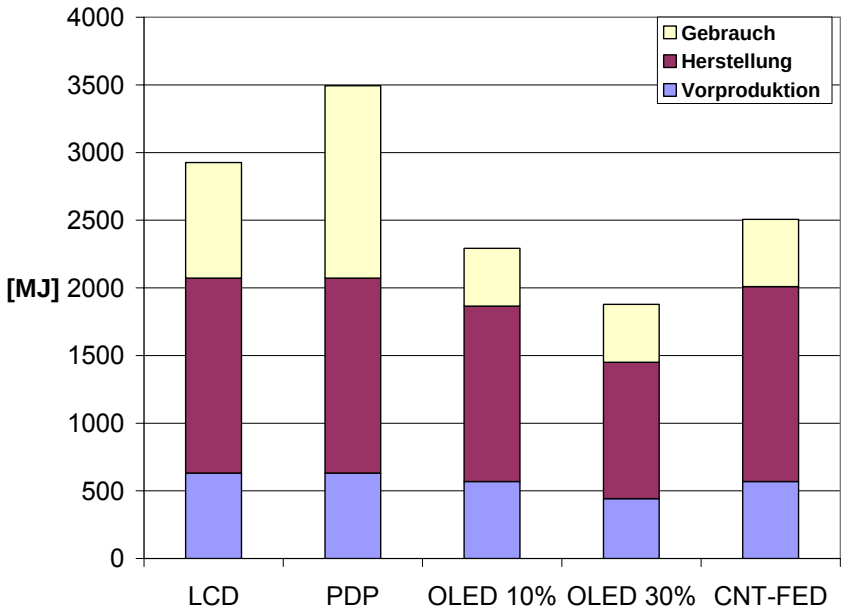
Da keine quantitativen Auswertungen bezüglich der Stoffeinsätze möglich sind, da hierzu keine Daten verfügbar sind, können nur im Bereich Energieverbrauch mögliche Ökoeffizienzpotenziale abgeschätzt werden. Hierzu wurden auf Basis der vorhandenen Daten für CRT und LCD sowie den abgeleiteten Annahmen für die Produktlebenswegstufen Vorproduktion, Herstellung sowie Gebrauch Energieverbrauchswerte ermittelt.

Tabelle 33: Energieverbrauch der betrachteten Display-Technologien in den einzelnen Lebenswegstufen

	Vorproduktion	Herstellung	Gebrauch
Technologie	[MJ]	[MJ]	[MJ]
CRT	366	18300	2290
LCD	633	1440	853
PDP	633	1440	1422
OLED 10%	570	1296	427
OLED 30%	443	1008	427
CNT-FED	570	1440	498

Quelle: Socolof et al. (2001) und eigene Berechnungen

Abbildung 42: Energieverbrauch der betrachteten Display-Technologien in den einzelnen Lebenswegstufen



Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Socolof et al. 2001)

Bei den dargestellten Energieverbräuchen wird deutlich, dass die OLED-Varianten auf Grund ihres geringeren Energieverbrauchs in der Gebrauchsphase sowie in der Herstellung gegenüber den bisherigen LCDs besonders gut abschneiden.

Energieeffizienzsteigerungen und damit verbundene Steigerungen der Ökoeffizienz von ca. 20% für die Variante OLED 10% bzw. ca. 35% für die Variante OLED 30% für den gesamten Produktlebensweg liegen durchaus im Bereich des Möglichen für diese Technologie. Hierzu muss es der Forschung und Entwicklung natürlich gelingen, die anvisierten Material- und

Energieeffizienzen einerseits zu erreichen und das bisherige Problem der Langzeitstabilität der Leuchtstoffe zu lösen.

Auch CNT-FED würde unter den getroffenen Annahmen durch den Vorteil der Energieeinsparung in der Gebrauchsphase gegenüber LCD deutlich besser abschneiden. Die Ökoeffizienzpotenziale hängen sehr stark davon ab, ob sich der Herstellungsprozess der CNT-FED genauso effektiv wie die LCD-Herstellung realisieren lassen wird.

5.4.3.2 Qualitative Stoffbewertungen

Hinsichtlich besonders kritisch zu beurteilender Stoffe wurden in der Ökobilanzstudie von Socolof et al. (2001) die drei Stoffe Blei, Quecksilber sowie Flüssigkristalle diskutiert.

Blei ist im Glas sowie in der Lötfritte der CRT in beträchtlichen Mengen enthalten, wobei das Blei im Glas fest eingebunden ist.

Quecksilber wird in geringen Mengen für die Hintergrundbeleuchtung (backlight) der LCD (3,99 mg) benötigt. Das Quecksilber wird durch Anlegen einer Spannung verdampft und erzeugt Licht im ultravioletten Bereich. Bei der Herstellung der Hintergrundlampen besteht eine Gefährdung durch Quecksilberemissionen durch Zerbrechen der Lampen, Auslaufen von Quecksilber oder Abfallmaterial. Das Risiko kann durch Prozessoptimierung und Schutzmaßnahmen stark verringert werden, besteht jedoch grundsätzlich.

Außerdem entstehen Quecksilberemissionen bei der Erzeugung von Strom, wie schon in der Fallstudie zu Lichtanwendungen diskutiert. Für die LCD wird diesbezüglich eine Quecksilbermenge von 3,22 mg angegeben, wohingegen für die CRT auf Grund des höheren Stromverbrauches 7,75 mg genannt werden. Derartige Quecksilberemissionen werden auch bei den anderen Display-Technologien auftreten.

Über die Toxikologie der eingesetzten Flüssigkristalle konnte auf Grund fehlender Informationen keine abschließende Bewertung getroffen werden. Toxikologische Tests bei LC-Herstellern zeigten z.B., dass für 95,6% (562 von 588) der getesteten Flüssigkristallen für den Menschen kein akutes toxisches Gefahrenpotenzial bestand. Bei 99,9% (614 von 615) der getesteten Flüssigkristalle konnte nachgewiesen werden, dass keine krebserregende Gefahr von den Stoffen ausgeht. Auch das Umweltbundesamt kommt in einer Stellungnahme zu dem Ergebnis, dass LC-Substanzen der Fa. Merck nur eine sehr geringe Gefährdung aufweisen und dass an die Entsorgung von LCDs keine besonderen Anforderungen gestellt werden (Merck KGaA 2000). Im Gegensatz zu den Flüssigkristallen werden in OLEDs andere organische Materialien eingesetzt. Risikopotenziale durch besonders gefährliche Inhaltsstoffe sind bei OLED eher nicht zu erwarten. Die uns vom Fraunhofer IPMS zur Verfügung gestellten Sicherheitsdatenblätter zu einigen Einsatzstoffen in OLEDs[40] lassen keine besonderen Gefahrenpotenziale vermuten.

Bei den CNT-FEDs werden Kohlenstoff-Nanoröhren als Feldemitter eingesetzt, wobei diese in einem genau definierten CVD-Prozess auf dem Substrat wachsen und im Produkt letztlich fest verschlossen sind. Potenziale zur Freisetzung von Kohlenstoff-Nanoröhren sind daher als sehr gering einzuschätzen.

---

[40] Hierbei handelt es sich um SDB von dem Emitter- und Elektronen-Transportmaterial Alq3 sowie organischen Materialien mit den Summenformeln C66H48N4, C32H20N2O2 und C44H32N2.

5.4.4 Wirkungsabschätzung

Für die Wirkungsabschätzung ist es erforderlich, über Emissionsdaten zu verfügen, die sich bestimmten Umweltwirkungen zuordnen lassen. Da es sich bei den vorliegenden Daten nur um Schätzwerte handelte und außerdem ein direkter Zusammenhang zwischen Energieverbrauch und den relevanten Emissionen besteht, würde dieser Sachverhalt auch bei den Wirkungskategorien, wie Treibhauseffekt, deutlich werden und keinen neuen Erkenntnisgewinn mit sich bringen. Daher wird auf eine derartige Darstellung verzichtet.

5.4.5 Zusammenfassung

Diese Fallstudie hat zum Ziel, mögliche Ökoeffizienzpotenziale durch den Einsatz von neuen sich in der Entwicklung befindlichen nanotechnologiebasierten Produkten im Displaybereich zu untersuchen. Hierzu werden OLEDs sowie CNT-FEDs mit den konventionellen Displays CRT, LCD und Plasmadisplays verglichen.

Auf Basis der vorliegenden Daten ist es sehr schwer, konkrete Abschätzungen zu möglichen Ökoeffizienzpotenzialen zu formulieren. Im gesamten Produktlebensweg verursacht die Phase der Herstellung einen immer größeren Anteil an Umweltwirkungen. Wenn es gelingt, bei OLEDs die sich abzeichnenden Möglichkeiten zur Steigerung der Material- und Energieeffizienz in einer Massenproduktion umzusetzen, sind beträchtliche Ökoeffizienzpotenziale erreichbar. Eine 20%ige Energieeinsparung gegenüber LCDs über den gesamten Lebensweg erscheint möglich.

Auch für CNT-FEDs wird das Erzielen von Ökoeffizienzpotenzialen möglich sein, wenn es gelingt, die Herstellungsphase, insbesondere die hochkomplexe Nanotube-Herstellung als Feldemitter, gegenüber bisherigen Herstellungsverfahren genauso effizient zu gestalten. Risikopotenziale durch diese neuen Technologien sind eher nicht zu erwarten.

5.5 Fallstudie 4: Nanoanwendungen im Lichtbereich

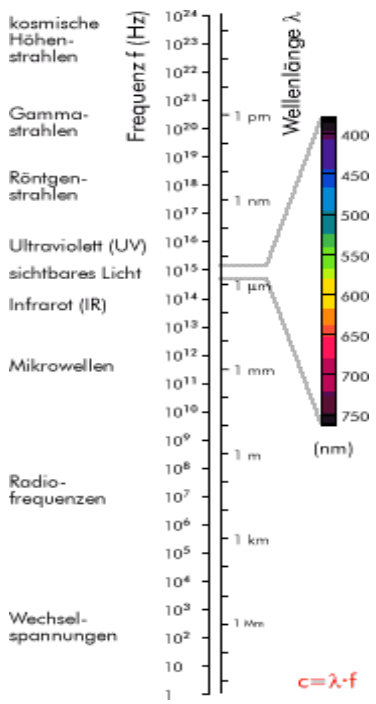
5.5.1 Inhalt, Ziel und Methode der Fallstudie

Licht in seinen vielfältigen Anwendungen verursacht einen hohen Energieverbrauch. Etwa zehn Prozent der elektrischen Energie wird in der Bundesrepublik Deutschland für Beleuchtung verbraucht (ZVEI 2003).

Im Rahmen dieser Fallstudie wird das ökologische Potenzial von neuen nanotechnologie-basierten Lichtlösungen untersucht. In der Deutschen Agenda Optische Technologien für das 21. Jahrhundert werden Leuchtdioden als effiziente und umweltschonende Lichtquellen identifiziert und speziell mit dem Themenfeld „NanoLux – Weiße Leuchtdioden für die Beleuchtung“ im Rahmen des Förderprogramms „Optische Technologien“ gefördert. Als konkretes Beispiel werden in der Fallstudie Weiße LED (Licht Emittierende Dioden) betrachtet und mit konventionellen Lichtquellen (Glühlampe, Kompaktleuchtstofflampe) verglichen. Die Einschätzung der ökologischen Relevanz wird hierbei mit Hilfe einer vergleichenden ökobilanziellen Abschätzung vorgenommen. Außerdem werden Quanten Dots und deren Potenziale zur Effizienzsteigerung im Lichtbereich qualitativ diskutiert.

5.5.2 Eingrenzung des Untersuchungsbereiches

5.5.2.1 Einführender Überblick



Quelle: Haller (2003)

Licht lässt sich als eine elektromagnetische Welle definieren, deren Frequenz im sichtbaren Bereich liegt und damit in einer bestimmten Helligkeit oder Farbe gesehen wird. Wellen mit anderen Frequenzen haben keine Farbe, sondern haben Namen, die vorwiegend ihren Verwendungszweck charakterisieren. Die vorliegende Grafik gibt einen Überblick über das gesamte elektromagnetische Spektrum.

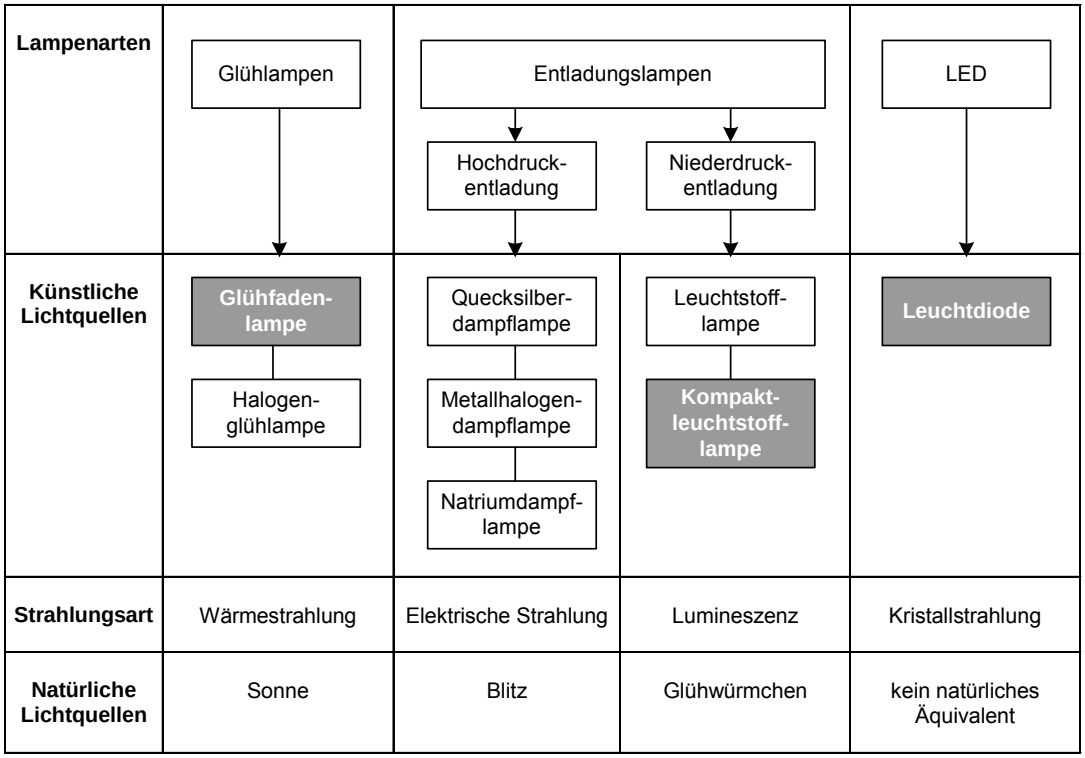
Wie aus der Grafik zu erkennen, umfasst das Spektrum des sichtbaren Lichtes nur einen sehr kleinen Bereich. Er liegt bei etwa 370 nm (kurze Wellen) in der Farbe violett bis 750 nm (langwelligere Wellen) in der Farbe rot, mit der entsprechenden Frequenz. Dazwischen liegen alle anderen Farben.

Viele der heutzutage verwendeten Lichtquellen sind Temperaturstrahler. Dazu gehören die Sonne, Kerzen, Glüh- und Halogenlampen. Die Lichtfarbe des Gegenstandes hängt von seiner Temperatur ab, d.h. diese Lichtquellen erzeugen Licht als Nebenprodukt der Erwärmung.

Die andere Gruppe von Lichtquellen erzeugt Licht durch elektrische Strahlung, Lumineszenz oder Kristallstrahlung. Dazu gehören die Entladungslampen (inkl. Kompaktleuchtstofflampe) und auch die noch fortschrittlicheren Leuchtdioden, die ständig und in rasantem Tempo weiterentwickelt werden, um sie für den Massenmarkt konkurrenzfähig zu machen.

Die folgende Abbildung stellt einen Überblick über die heutigen wichtigsten Lampenarten dar. Weitere Lampen – den Entladungslampen zugehörig – sind die Natriumdampflampe im Niederdruckbereich, außerdem UV–Strahler, Natrium–Xenon–Reflektoren, Xenonlampen, Hochvolt–Reflektoren, diverse Kfz–Lichtlampen etc.

Abbildung 43: Überblick über die wichtigsten Lampenarten



Quelle: in Anlehnung an Grezcmiel (2001)

5.5.2.2 Untersuchungsgegenstand

Untersuchungsgegenstand der Fallstudie ist die Nutzung von Lichtquellen zur Beleuchtung. Dazu werden drei Varianten verglichen: Die beiden konventionellen Lichtquellen Glühlampe und Energiesparlampe und die auf nanoskaligen Schichten beruhende Weiße Leuchtdiode.

Variante 1: Glühlampe

Die Glühlampe mit einer Lichtausbeute von ca. 15 lm/W (WKO 2003) ist die am weitesten verbreitete elektrische Lichtquelle. Sie ist beliebig an- und ausschaltbar und findet in sämtlichen Bereichen der Innen- und Außenbeleuchtung Anwendung. Die durchschnittliche Lebensdauer beträgt etwa 1.000 – 1.500 Stunden.

Der Glühfaden, ein doppelt gewendelter Metallfaden zwischen zwei Stromzuführungselektroden im Inneren einer Glasbirne, wird mit Hilfe von durchfließendem elektrischem Strom zum Leuchten gebracht. Innerhalb der Glasbirne befindet sich ein Gasgemisch, das ein schnelles Verdampfen des Glühfadens verhindern soll. Für den Faden wird Wolfram verwendet, da es mit ca. 3.400°C einen sehr hohen Schmelzpunkt hat und damit die Lebensdauer der Lampe höher ist, als wenn andere Metalle dafür genutzt werden (Wuelfert 2000).

Wenn der elektrische Strom durch die Glühlampe fließt, wird der Glühfaden sehr schnell auf eine Temperatur von ca. 2.600°C erhitzt. Dabei wird helles Licht ausgesendet. Die elektrische Energie wird in Licht und Wärme umgewandelt, wobei das Verhältnis sehr ungleich ist und mindestens 90 – 95% der Energie zu unerwünschter Wärme werden. Die Glühlampe hat einen sehr schlechten Wirkungsgrad. Nur wenige Prozent der Energie werden in für den Menschen sichtbares Licht umgewandelt. Zur Erhöhung des Wirkungsgrades kann die Temperatur des Glühfadens erhöht werden, womit aber einhergeht, dass die Glasbirne mit einem Halogengemisch gefüllt wird, um die Lebensdauer der Lampe nicht einzuschränken. Diese Weiterentwicklung wird Halogen-glühlampe genannt. Dabei kann der Wolframfaden eine Temperatur von ca. 3.000°C erreichen.

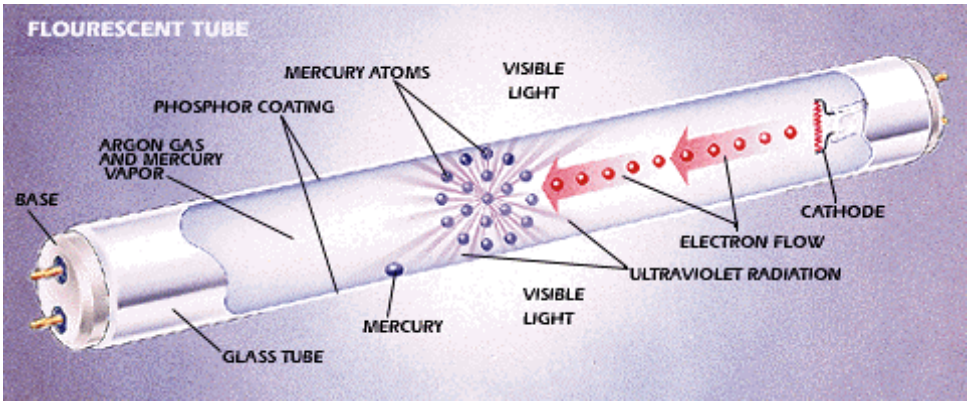
Variante 2: Energiesparlampe

Ein zentrales Leitbild unserer Zeit ist der sparsame Umgang mit Energie und Ressourcen. Durch Nutzung von Entladungslampen kann die Energie viel effektiver zur Beleuchtung eingesetzt werden als bei den konventionellen Glühlampen. Zu den Entladungslampen zählen auch die im Haushalt oft genutzten Leuchtstofflampen, die umgangssprachlich auch Neonröhren genannt werden.

Insbesondere die Energiesparlampen (Kompaktleuchtstofflampen) – eine kompakte Weiterentwicklung der Leuchtstofflampe – nutzen die elektrische Energie gegenüber der Glühlampe vier- bis fünfmal besser aus. Sie sind in der Anschaffung teurer als normale Glühlampen, wandeln aber bis zu 25% der eingesetzten Energie in Licht um und besitzen eine Lichtausbeute von ca. 60 lm/W (WKO 2003). Außerdem liegt die Lebensdauer der Kompaktleuchtstofflampen zwischen 8.000 und 14.000 Stunden (KEVAG 2003).

Als Hauptkomponente für die Entladung kommt bei den Entladungslampen ein Gasgemisch, z.B. Quecksilber, zum Einsatz.

Abbildung 44: Aufbau einer Entladungslampe



Quelle: Popular Mechanics (2002)

Wenn Strom in Folge der angelegten Spannung fließt, bewegen sich Elektronen von einer Elektrode zur anderen. Dabei kollidieren die Elektronen mit den Quecksilberatomen, die in einem Gasgemisch im Inneren des Glasrohres eingeschlossen sind. Bei der Kollision wird Energie in Form von ultraviolettem Licht frei. Das UV–Licht wird von dem Leuchtstoff (z.B. Metallsalze), mit dem die Röhre auf der Innenseite beschichtet ist, aufgenommen. Der Leuchtstoff wird nun zum Leuchten angeregt, wodurch das für den Menschen sichtbare Licht entsteht. Für den Betrieb der Entladungslampe ist ein Vorschaltgerät nötig, das die notwendige Hochspannung für den Zündvorgang und die normale Betriebsspannung liefert.

Variante 3: (Weiße) Leuchtdiode

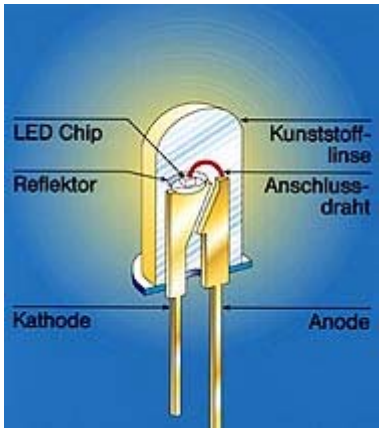
Seit kurzem wird der Einsatz von Weißes Licht Emittierenden Dioden (LED) als Alternative zu konventionellen Lichtquellen, wie Glühlampen und Leuchtstoffröhren, diskutiert, weil oft angenommen wird, dass LEDs effizienter für die Lichterzeugung genutzt werden können. Die Lichterzeugung mittels Leuchtdioden beruht auf der Halbleiter – Lichttechnik. Dadurch wurde es erstmals möglich, ein Kaltlicht ohne irgendwelche Wärmeanteile zu erzeugen. Das technische Problem ist, dass die interne Quantenausbeute einer LED zwar sehr hoch ist, aber nur ein geringer Teil des Lichts aus dem Bauteil ausgekoppelt werden kann. Intern können bis zu 90 % der Energie in sichtbares Licht umgewandelt werden, aber nur ca. 20 – 30 % (Tendenz steigend) sind außen verfügbar (CJ-Light GmbH 2003).

Die Leuchtdioden besitzen eine sehr hohe Lebensdauer. Die Lebensdauer von Leuchtdioden wird durch die Zahl der in einer bestimmten Zeit ausgefallenen Bauteile und durch den Rückgang des Lichtstromes gegenüber dem Ausgangswert (50%) charakterisiert. Ein Totalausfall etwaiger Bauteile ist bei Beachtung der angegebenen Grenzwerte während der Lebensdauer praktisch ausgeschlossen. Die Lebensdauer, die Effizienz und die Lichtfarbe der LED sind stark temperaturabhängig, so dass beim Einsatz der Leuchtdioden auf den Wärmehaushalt geachtet werden muss. Darüber hinaus kann durch Anlegen einer zu hohen Spannung die Leuchtdiode zerstört werden. Zusätzliche Elektronik in Form von Vorschaltgeräten ist somit für die LED–Systeme oder –Module notwendig.

Die längste Lebensdauer mit 100.000 Stunden erreichen die roten, gelben und orangefarbenen LEDs bei normaler Umgebungstemperatur und 50% des maximal zulässigen Stroms, der vom Hersteller angegeben wird. Die Weißen Leuchtdioden arbeiten am längsten bei einer um 30 K reduzierten Umgebungstemperatur gegenüber dem Ausgangswert und mit 50% der Strommenge des Ausgangswertes (FGL 2003). Als durchschnittliche Lebensdauer können bei den Weißen LEDs ca. 15.000 Stunden angesetzt werden.

Das Kernstück der Leuchtdioden sind Halbleiterkristalle, die Licht erzeugen, wenn Strom durch sie geleitet wird.

Abbildung 45: Aufbau einer LED



Quelle: FGL (2003)

In den Kristallen existiert ein n – leitender Bereich mit einem Überschuss an Elektronen (negative Ladungen) und ein p – leitender Bereich mit einem Mangel an Elektronen (positive Ladungen). Dazwischen liegt der Übergangsbereich (pn – Übergang oder Sperrschicht genannt). Durch das Anlegen einer Spannung besitzen die Elektronen im n – Bereich genügend Energie, um die Sperrschicht zu überwinden. Wenn diese Elektronen dann im p – Bereich ankommen, verbinden sie sich mit den positiven Ladungen.

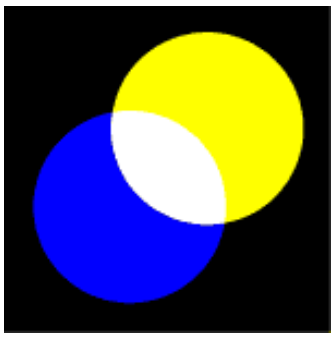
Dabei wird Energie frei, die in Form von elektromagnetischer Strahlung abgegeben wird. Je nach Halbleitermaterial wird jeweils Licht in einer bestimmten Farbe abgegeben. Es werden die Farben rot, grün, gelb und blau erzeugt. Die Materialien werden auf der Basis von Aluminium-Indium-Gallium-Phosphid oder Aluminium-Gallium-Arsenid (AlnGaP oder AlGaAs) für rote und gelbe LEDs und (Indium-)Gallium-Nitrid (InGaN oder GaN) für grüne und blaue Dioden hergestellt (FGL 2003).

Es bestehen zwei Möglichkeiten Weiße LED herzustellen: Durch eine additive Farbmischung oder durch die Luminiszenzkonversion.

Quelle: Haller (2003)

Bei der additiven Farbmischung entsteht eine Weiße LED, in dem verschieden farbig leuchtenden LED–Chips in einer LED kombiniert werden. Die verschiedenen Strahler (z.B. rote, grüne und blaue Farbfläche) liegen im Gehäuse so dicht nebeneinander, dass sie bei ausreichendem Abstand nicht mehr aufgelöst werden und dem Menschenauge als einheitliche Farbfläche erscheinen; so entsteht dann der weiße Lichteindruck. Mit dieser Methode können auch viele andere Lichtfarben erzeugt werden.

Die LEDs mit so erzeugten Farben (auch weiß) nennt man auch Multi LED. Die Realisierung des weißen Lichtes durch Multi LED ist allerdings nicht so überzeugend wie durch Erzeugung des weißen Lichtes mittels Luminiszenzkonversion. Die Wiedergabe der Farbqualität ist schlechter, die unterschiedlichen Helligkeiten und Betriebsbedingungen der verschiedenen LED–Chips machen die Realisierung kompliziert und damit teuer.



Quelle: Haller (2003)

Die Entstehung des weißen Lichtes durch Lumineszenzkonversion erfolgt mittels der Kombination einer blauen oder auch UV emittierenden LED und einem Lumineszenzfarbstoff. Bei Stromfluss wird ein Teil des kurzwelligen, energiereichen Lichtes durch die Schicht absorbiert und dabei der Farbstoff zum Leuchten angeregt. Es wird gelb–orangenes (langwelligeres, energieärmeres) Licht emittiert. Die Überlagerung der verschiedenen Spektralfarben wird als weißes Licht wahrgenommen.

Interessant für Beleuchtungszwecke wurden LEDs erst mit der Entwicklung der Weißen LEDs. Nachdem die japanische Firma Nichia 1995 erstmals Weißlicht-LED entwickelt hatte, die auf den dort erfundenen blauen LED basieren, werden sie dort seit 1997 hergestellt. Mit Nichia zeitgleich hat das Fraunhofer-Institut IAF weiße LED und in enger Zusammenarbeit mit Osram OS (Infineon) den Fertigungsprozess entwickelt. Dorthin wurde das Know-how transferiert und im Sommer 1998 die Produktion aufgenommen. Ebenso hat Agilent (Lumileds) im Sommer 1998 die Massenproduktion der weißen Leuchtdioden gestartet. General Electric (GELcore) und Toyoda Gosei produzieren seit 1999. Inzwischen werden weiße LED von nahezu allen Herstellern angeboten.

Heute werden die LEDs immer häufiger für die verschiedensten Beleuchtungszwecke genutzt. Tabelle 34 zeigt den möglichen Einsatz der Leuchtdioden nach ihren Eigenschaften.

Tabelle 34: Eigenschaften und Einsatzbereiche von Leuchtdioden

Eigenschaften	Einsatz
UV – und IR – freie Strahlung	Museums- und Vitrinenbeleuchtung Bilderleuchten Kühlthekenbeleuchtung medizinische Beleuchtung Beleuchtung empfindlicher Materialien
Kleinspannung	Feuchtraum- und Unterwasserleuchten mobile Leuchten
geringe Größe	Möbelleuchten Orientierungsleuchten Displays Aufputzmontage Flächen- und Kabinenleuchten
geringe Wärmeerzeugung	Möbelleuchten Kühlthekenbeleuchtung explosionsgefährdete Umgebungen
Energieeinsparung und Langlebigkeit fest oder mobil	Haltestellenbeleuchtung Not- und Hinweisleuchten Gartenleuchten
Robustheit	mobile Leuchten mobile Geräte mit Beleuchtung öffentlicher Raum Signal- und Notbeleuchtung Arbeitsleuchten (Reparatur)

Quelle: Haller (2003)

5.5.2.3 Untersuchungsrahmen und Datenverfügbarkeit

Der Bilanzraum für die vergleichenden Betrachtungen sollte den gesamten Lebenszyklus der jeweiligen Lichtquelle darstellen. Die einzelnen Lebenswegstufen sind hierbei:

- Rohstoffgewinnung, Vorproduktion
- Lichtquellenherstellung
- Nutzungsphase
- Entsorgung/Recycling

Für die Bilanzierung der Glüh- und Energiesparlampe konnte auf die hierzu aktuellste verfügbare Untersuchung zurückgegriffen werden. Sie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft der Schweiz von Mani ausgearbeitet und im August 1994 veröffentlicht. Mani arbeitete eng mit der Herstellerfirma OSRAM zusammen, um die benötigten Daten zu erhalten. Insbesondere die Daten zur Rohstoffgewinnung und Lichtquellenherstellung wurden dieser Studie entnommen.

Für die dritte Variante Weiße LED liegen quantitative Daten nur für die Herstellung des 0,35 g schweren Halbleiterchips, dem Kernstück einer LED, zur Verfügung. Diese Daten zur LED-Chipherstellung, die auch die Vorproduktion und Rohstoffgewinnung enthalten, sind der Datenbank GABI entnommen und repräsentieren Daten aus dem Jahr 1999. Für die weiteren Bestandteile der Weißen LED (z.B. Gehäuse, Vorwiderstand, Leuchtstoff) waren keine detaillierten Bilanzdaten zugänglich. Der sich daraus ergebende Fehler relativiert sich aber, da der größte Anteil der Umweltwirkungen aus der Gebrauchsphase resultiert.

In der vorliegenden Ökobilanz zu Glüh- und Energiesparlampe (Mani 1994) wurde eine 75 Watt Glühlampe von OSRAM (Variante 1) mit einer 15 Watt Energiesparlampe Dulux EL mit integriertem elektronischem Vorschaltgerät von OSRAM (Variante 2a) verglichen. Da sich die Energiesparlampen in ihren Leistungsparametern (insbesondere in der Lebensdauer) weiterentwickelt haben, wird in der Fallstudie ebenfalls die aktuelle Energiesparlampe Dulux EL Longlife (Variante 2b) berücksichtigt, wobei die Herstellungsdaten auf den Daten der bisherigen Energiesparlampe Dulux EL basieren.

Diesen konventionellen Leuchtmitteln werden in der Fallstudie zwei Varianten Weiße LED heute (Variante 3a) und Weiße LED Zukunft (Variante 3b) mit einer Leistung von 1 Watt gegenübergestellt. Mit diesen beiden Varianten soll einerseits eine Abschätzung der derzeitigen LED (Lichtausbeuteannahme: 18 lm/W) vorgenommen und andererseits Potenziale durch zukünftige Verbesserungen in der Lichtausbeute (Annahme: 65 lm/W) aufgezeigt werden.

Für die Ökoprofilbetrachtung wird eine bestimmte Lichtmenge gewählt. Als Bezugsgröße und funktionale Einheit der Ökoprofilbetrachtung diente die durchschnittliche Lichtmenge der von Mani gewählten Energiesparlampe Dulux EL mit 6,579 Millionen Lumenstunden. Diese ergibt sich aus der Multiplikation der Lebensdauer der Dulux EL mit dem gemittelten Lichtstrom. Die sich daraus ergebenen und in der Fallstudie verwendeten technischen Daten der fünf Varianten sind in Tabelle 35 aufgeführt.

Tabelle 35: Verwendete technische Daten der betrachteten Varianten

	Variante 1 Glühlampe	Variante 2a Dulux EL 15	Variante 2b Dulux EL Longlife	Variante 3a Weiße LED heute	Variante 3b Weiße LED Zukunft
Leistungsaufnahme (W)	75	15	15	1	1
Lebensdauer (h)	1000	8000	13000	15000	15000
Lichtstrom (lm) deklariert Lichtstrom (lm) gemittelt	960 897,5	900 822,4	 900	 18	 65
Lichtausbeute (lm/W)	12	55	60	18	65
Lichtmenge pro Lebenszyklus (Mlmh)	0,898	6,579	11,7	0,27	0,98
Bezugsgröße (Mlmh)	6,579	6,579	6,579	6,579	6,579
Lampenbedarf für Bezugsgröße	7,33	1,00	0,56	24,36	6,71
Gewicht der Lichtquelle mit Verpackung (g)	42,8	177,1	177,1	0,35*	0,35*

* Hierbei handelt es sich wie beschrieben nur um den LED-Chip und nicht um eine komplette LED-Lichtquelle.

Quelle: Mani (1994), Gabi 4 Datenbank (2001) und eigene Berechnungen

5.5.2.4 Beschreibung der Lebenswegstufen

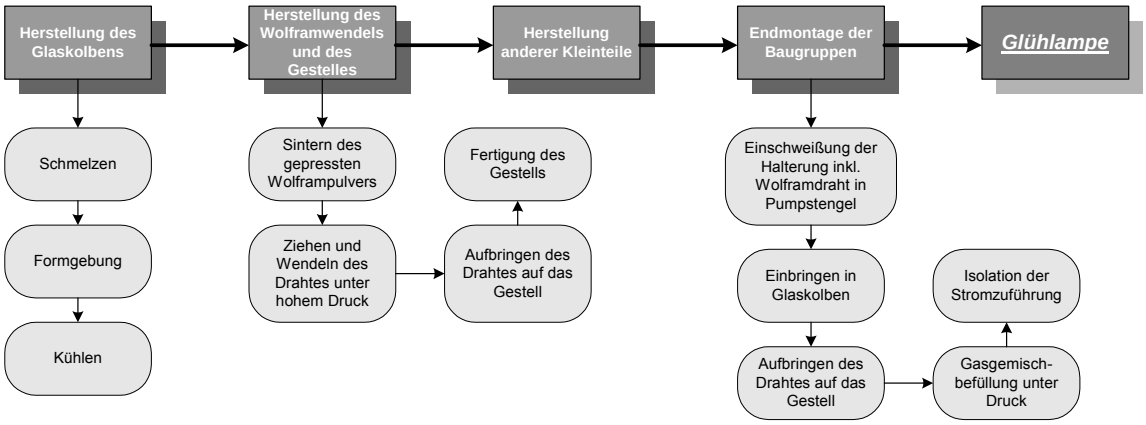
Rohstoffgewinnung und Herstellung

Für die Herstellung der Lichtquellen muss auf eine Vielzahl von Rohstoffen zurückgegriffen werden, die in den ausführlichen Darstellungen zu den einzelnen Produktionsprozessen für jede betrachtete Lichtquelle im Anhang (Abbildung 59 und Abbildung 60) aufgeführt sind.

Im Folgenden werden die wesentlichen Herstellungsschritte der drei Lichtquellen dargestellt, wobei auf die Herstellung der Leuchtdioden näher eingegangen wird.

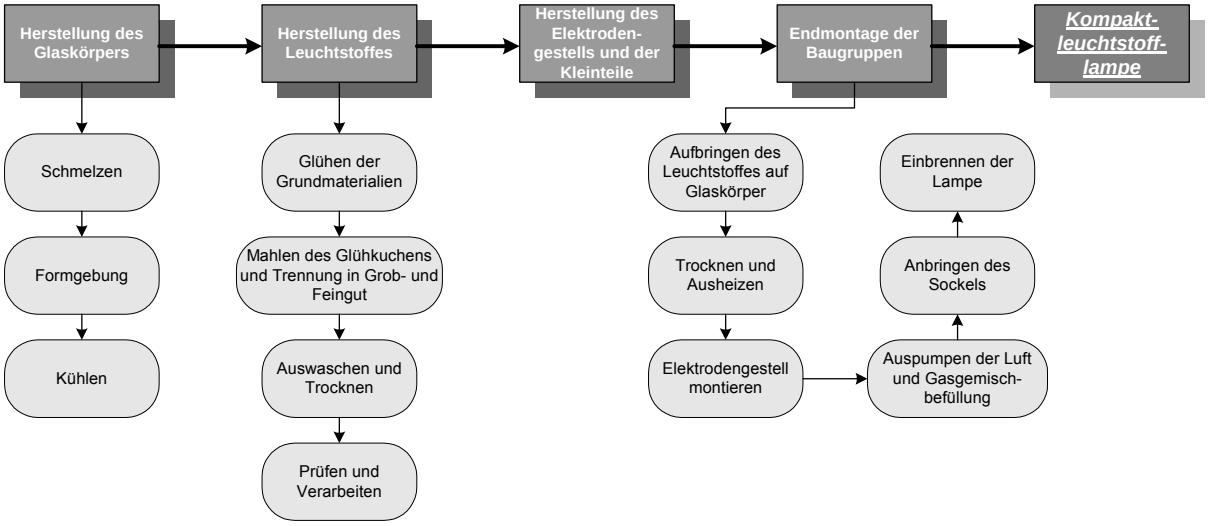
Die Produktion der Glühlampen kann in vier Hauptschritte unterteilt werden: Die Herstellung des Glaskolbens, die Herstellung der Wolframwendel und des Gestelles, die Herstellung diverser Kleinteile und die Endmontage der einzelnen Baugruppen.

Abbildung 46: Phasen der Glühlampenproduktion



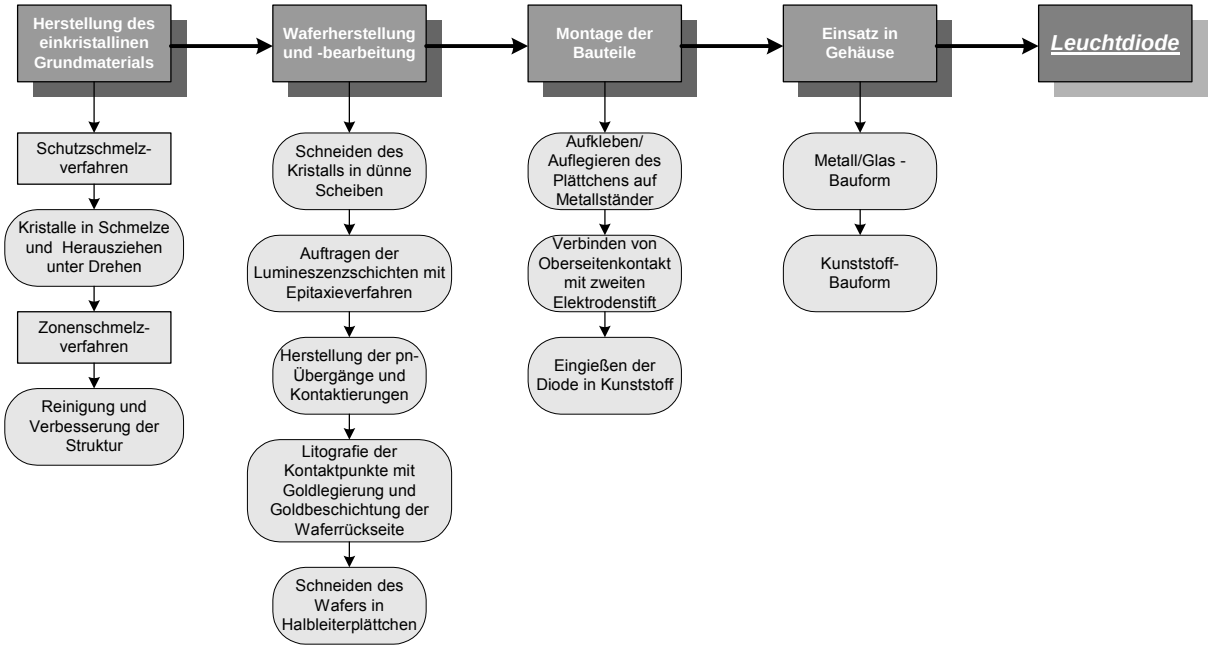
Die Produktion der Kompaktleuchtstofflampen unterteilt sich ebenfalls in vier Hauptschritte: Die Herstellung des Glaskörpers, die Herstellung des Leuchtstoffes, die Herstellung des Elektrodengestells und diverser Kleinteile und die Endmontage der Baugruppen.

Abbildung 47: Phasen der Produktion der Kompaktleuchtstofflampe



Die Herstellung von Leuchtdioden erfolgt auf grundsätzlich anderen Verfahren als zuvor beschrieben und ist in folgender Abbildung im Überblick dargestellt. Der Schritt der Waferbearbeitung und nachfolgende Schritte sollen im Folgenden noch näher erläutert werden.

Abbildung 48: Phasen der Produktion der LED



Das Kernstück einer Leuchtdiode ist der LED–Chip (aus Elementen der dritten und fünften Gruppe des Periodensystems), der im Schritt der Waferbearbeitung entsteht. Nach dem

Schneiden des einkristallinen Grundmaterials werden auf den Waferscheiben unterschiedliche Halbleiterschichten im Epitaxieverfahren aufgetragen. Darunter wird das geordnete Aufwachsen einer Substanz auf einer einkristallinen Unterlage, dem Substrat, verstanden.

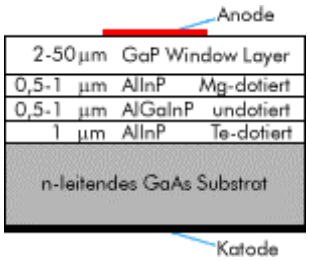
Als Schlüsseltechnologie für die Herstellung von optoelektronischen und elektronischen Halbleiterschichten für moderne Lichtquellen (LED, Laser), Hochleistungssolarzellen und Hochfrequenz- und Leistungselektronik hat sich die metallorganische Gasphasenepitaxie (MOCVD - Metal Organic Chemical Vapor Deposition) als bestes System erwiesen. Marktführend auf diesem Gebiet ist die Aixtron AG, die MOCVD–Anlagen weltweit vertreibt.

Bei der metallorganischen Gasphasenepitaxie wachsen Nanoschichten aus gasförmigen, metallorganischen Substanzen auf Waferscheiben. Vorreaktionen der abzuscheidenden Elemente werden dadurch verhindert, dass sie entweder in hydrierter Form oder mit organischen Molekülen (Metallorganika) assoziiert in den Reaktor geleitet werden. Diese Stoffe werden auch „Precusor“ genannt. Mittels eines Trägergases (Wasserstoff, Stickstoff) werden die Ausgangssubstanzen im Reaktor über eine Substratoberfläche geleitet, die je nach Materialsystem zwischen 350° und 1200° heiß ist. Dabei dissoziieren die Precusor – Moleküle thermisch (Pyrolyse) an der Substratoberfläche (Dadgar 2003).

Kern der MOCVD–Anlage ist der Planeten–Reaktor. Die geometrisch angeordneten Wafer drehen sich wie Planeten auf der ebenfalls rotierenden Trägerscheibe. Dadurch sind die Wafer den Prozessgasen gleichmäßig ausgesetzt. Das Wachstum der Schichten auf dem Wafer wird definiert durch Menge und Zusammensetzung der Prozessgase, Temperatur, Druck und Zeit. Für die Funktionalität der Chips werden bis zu 50 verschiedene Schichten benötigt und in einem 5 – 6 stündigen „Run“ auf die Wafer aufgebracht. Damit ist der MOCVD–Prozess abgeschlossen und die beschichteten Wafer verlassen die Anlage. Die kristalline Abscheidung der Materialien ist sehr gut zu kontrollieren. So können die verschiedenen Materialien aufeinander abgeschieden werden, um gezielt die gewünschten Schichteigenschaften zu gewinnen. Zum Beispiel besteht eine moderne blaue Leuchtdiode aus einer Vielzahl verschiedener Materialien wie Gallium–Nitrid als Basismaterial, Indium–Gallium–Nitrid als leuchtende Schicht und Aluminium–Gallium–Nitrid zur Effizienzsteigerung. Silizium und Magnesium werden dabei für die n- und p–Bereiche eingesetzt (Krost & Dadgar 2002).

Im MOCVD–Verfahren ist es weiterhin möglich, die Gasventil–Schaltzeiten und die Gasflüsse so zu beeinflussen, dass ultradünne Schichten und abrupte Grenzflächen hergestellt werden können. Die Prozessparameter können problemlos auf große Reaktoren für die Massenproduktion überführt werden. Das Verfahren ist universell einsetzbar, da praktisch zu jedem chemischen Element ein entsprechender metallorganischer Precusor existiert (Grahn 2003).

Abbildung 49: Schematische Darstellung der Struktur des Chips einer AlInGaP – Leuchtdiode



Nach dem Verlassen der Wafer aus der Anlage werden sie charakterisiert (Kontaktierungen der pn – Übergänge). Danach erfolgt die Lithografie der elektrischen Kontaktpunkte aus einer Goldlegierung und einer Goldbeschichtung der Wafer–Rückseite. Um den Energieverlust durch die Goldlegierung zu minimieren, wird ihr Widerstand durch Hitzebehandlung auf einen Bruchteil reduziert. Im nächsten Schritt kommt der Wafer auf eine Klebefolie, wird mit einem Spannring umschlossen und mit einer Diamantsäge in 0,35mm mal 0,35mm große Chips zerteilt. Die Chips werden nun auf Funktionalität geprüft (Aixtron AG 1999). Bei den blauen oder UV–emittierenden Chips wird zur Herstellung der Weißen LED der in der Reflektorwanne liegende Diodenchip mit einem Tropfen Lumineszenzfarbstoff bedeckt. Danach erfolgt die Vervollständigung der Bauelemente zur Leuchtdiode.

Es existiert eine große Vielfalt an Bauformen für LED. Es werden die verschiedensten Metall/Glas–Gehäuse oder häufiger die Kunststoffbauformen eingesetzt. Letztere sind auch problemlos in größeren Stückzahlen für die Massenproduktion herzustellen.

T – Typ–LED:

Quelle: Haller (2003)

Diese Bauform ist die ursprüngliche Bauform der Leuchtdiode. Sie besteht aus dem LED–Chip, der Kontaktierung, Gold- oder Aluminiumdraht und dem Kunststoffgehäuse. Im Herstellungsprozess erfolgt nach der Fixierung des Chips auf dem Reflektor des Metallständers die Überbrückung des Kontaktes zum zweiten Bein mittels eines dünnen Goldfadens. Zuletzt wird alles mit Epoxydharz (auch anderer Kunststoff) zu einer stabilen Einheit vergossen. Die optische Abstrahlcharakteristik einer LED wird durch die Geometrie des Reflektors, die Form des Kunststoffgehäuses und die Chipposition innerhalb des Gehäuses festgelegt (Vossloh Schwabe Deutschland GmbH 2003).

SMD (SMT)–LED:

Quelle: Haller 2003

Weiterhin existieren je nach Verlötungsverfahren der elektronischen Bauelemente die auf der Rückseite der Platine verlöteten und die SMD–Bauform (Surface Mounted Device), die eine extrem miniaturisierte Form der LED ist. Die SMD–LED haben keinen metallischen Reflektor wie die bedrahteten LED.

Es gibt sehr viele unterschiedliche SMD–Bauformen und –größen. Sie variieren je nach Verwendungszweck.

COB–LED:

Enggepackte und gut wärmeableitende Lösungen können mit der Chip on Board – Technologie realisiert werden. Dabei werden die rohen Chips direkt auf der Leiterplatte installiert. Danach werden die Chipanschlüsse und die Leiterplatte mit einem Golddraht verbunden. Der Chip wird mit einem Tropfen Epoxydharz abgedeckt und geschützt. Durch diese Technologie kann aus einer kleineren Fläche mehr Licht abgestrahlt werden.

LED–Module:

LED–Module sind standardisierte oder kundenspezifisch entwickelte mit mehreren Leuchtdioden bestückte Platinen. Diese werden gerne von Leuchtenherstellen z.B. für Display- oder Signalleuchtentechnik, eingesetzt. Die Platinen, auf denen die Dioden befestigt sind, können die verschiedensten Formen haben. Durch variierende Abmessungen, Bestückungen und Beschaltungen ist es möglich, die Gehäuseformen relativ frei zu gestalten (Haller 2003).

Luxeon Ring von Lumileds (Quelle: www.lumileds.com)

Weiterhin existieren bereits erste Leuchtdiodenmodule, die die konventionellen Leuchtmittel ersetzen könnten: Die gesockelten LED–Module. Sie kombinieren die LED, die nötige Elektronik und standardisierte Lampensockel (z.B. E 27) zu einer kompletten Lampe, die in schon vorhandene Leuchtengehäuse eingesetzt werden kann.

Sonstige:

Besonders für Beleuchtungszwecke bieten sich Bauformen an, die durch ihre besondere Gehäuseform einen höheren Strom erlauben und damit auch einen höheren Lichtstrom erzeugen. Dabei wird die entstehende Wärme entsprechend abgeleitet.

Luxeon von Lumileds (Quelle: Haller 2003)

Super Flux von Lumileds (Quelle: Haller 2003)

Gebrauchsphase

Die Nutzung der Glüh- und Energiesparlampen kann überall, z.B. in Industrie, Gewerbe und privaten Haushalten erfolgen, wobei die Haushalte einen weitaus höheren Verbrauch an Glühlampen im Verhältnis zum Gewerbe oder der Industrie zu verzeichnen haben. In Unternehmen werden zumeist Leuchtstoffröhren als energiesparende Lichtquellen eingesetzt.

Weiße LED werden bisher auch aus ökonomischen Gründen wie zuvor beschrieben eher in Spezialanwendungen eingesetzt. Um aber trotzdem mögliche ökologische Entlastungspotenziale für den gesamten Beleuchtungsbereich abschätzen zu können, werden die Weißen LED in dieser Fallstudie mit konventionellen Beleuchtungslichtquellen verglichen.

Für die Ökoprofilbetrachtung ist insbesondere die Gebrauchsphase von größter Bedeutung, da die Leuchtquellen zur Erzeugung von Licht entsprechende Strommengen verbrauchen.

Dieser Energieverbrauch bezieht sich auf die Erzeugung einer bestimmten Bezugslichtmenge (BLM), die als funktionale Äquivalenzgröße fungiert. Die spezifischen Energieverbräuche für die einzelnen Varianten ergeben sich aus Multiplikation der Leistungsaufnahme, der Lebensdauer sowie dem Lampenbedarf.

Tabelle 36: Energieverbräuche der einzelnen Varianten

BLM= 6,579 Mlmh	Variante 1 Glühlampe	Variante 2a Dulux EL 15	Variante 2b Dulux EL Longlife	Variante 3a Weiße LED heute	Variante 3b Weiße LED Zukunft
Leistungsaufnahme (W)	75	15	15	1	1
Lebensdauer (h)	1000	8000	13000	15000	15000
Lampenbedarf für BLM (Stück)	7,33	1,00	0,56	24,36	6,71
Energieverbrauch für BLM (kWh)	550	120	109	365	101

Quelle: Mani (1994), Gabi 4 Datenbank (2001) und eigene Berechnungen

Grundlage für die Berechnung der Umweltauswirkungen in der Nutzungsphase bilden Emissionsfaktoren für den aktuellen „Strommix“ Deutschland, die der Datenbank GEMIS 4.1 entnommen und im Anhang (Tabelle 57) aufgeführt sind (GEMIS 4.1 2003).

Entsorgung

Für Glühlampen existiert keine gesetzliche Regelung bezüglich ihrer Entsorgung, da fast alle Inhaltsstoffe aufgrund ihrer Beschaffenheit und Menge ökologisch unbedenklich sind. Deshalb erfolgt die Entsorgung der Glühlampe fast ausschließlich über den Hausmüll.

Für Kompaktleuchtstofflampen gibt es im Gegensatz zu den Glühlampen eine gesetzliche Verordnung. 1996 trat das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz in Kraft. Danach handelt es sich bei Entladungslampen (im Falle der Beseitigung und im Falle der Verwertung) um besonders überwachungsbedürftigen Abfall. Die Entladungslampen müssen getrennt erfasst, entsorgt und als Sondermüll klassifiziert oder weiterverwertet werden.

Seit 2002 haben sich bei der Entsorgung von Elektro– und Elektronikaltgeräten rechtliche Veränderungen ergeben. Mit der Änderung des Europäischen Abfallkatalogs vom Januar 2002 werden fast alle Elektro- und Elektronikaltgeräte als besonders überwachungsbedürftiger Abfall eingestuft. Dieser darf nicht über den Hausmüll oder hausmüllähnlichen Gewerbeabfall entsorgt werden. Die Leuchtstofflampe und die Leuchtdioden sind auch in diesem Katalog enthalten. Sie gehören in die Kategorie des besonders zu behandelnden oder als besonders überwachungsbedürftig zu beseitigenden Schrotts, die Energiesparlampe aufgrund ihres Quecksilbergehaltes, die Leuchtdioden aufgrund von möglichem Inhaltsstoffen wie Arsen, Gallium, Phosphor und deren Verbindungen (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin 2003). Neuere Entwicklungen sind die von der EU erlassenen Europäischen Regelungen zu Elektro- und Elektronik – Altgeräten, die seit Februar 2003 in Kraft sind. Die Richtlinie 2002/96/EG regelt dabei die Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten, während die Richtlinie 2002/95/EG die Verwendung von bestimmten gefährlichen Stoffen in Elektro- und Elektronikaltgeräten beschränkt. Den europäischen Richtlinien nach müssen die aufgeführten Produkte (auch Leuchtstofflampen und Leuchtdioden) von den Herstellern kostenlos

zurückgenommen und fachgerecht entsorgt werden. Weiterhin enthält die Richtlinie 2002/95/EG bezüglich der Vermeidung bestimmter gefährlicher Stoffe in Produkten verschiedene Ausnahmefälle. Unter anderem wird explizit erwähnt, dass das Quecksilber in Kompaktleuchtstofflampen bis zu einer Menge von 5 mg weiterhin erlaubt ist. Die Richtlinien sollen bis August 2004 in nationales Recht umgesetzt sein, der Entwurf einer Elektro- und Elektronikaltgeräteverordnung auf der Grundlage des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz liegt schon vor.

Konkrete Daten für diese Lebenswegstufe sind in der Ökobilanz von Mani (1994) für die Glühlampe sowie für die Energiesparlampe enthalten. Für LED liegen keine quantitativen Daten vor. Da aus den Bilanzdaten für die Glühlampe sowie für die Energiesparlampe ersichtlich wird, dass diese Phase für die Gesamtbetrachtung nur eine untergeordnete Rolle spielt, wird die Entsorgungsthematik bilanziell nicht berücksichtigt, sondern anhand der problematischen Einsatzstoffe (Quecksilber) diskutiert.

5.5.3 Sachbilanz

In der Sachbilanz erfolgt eine Aufzeichnung der stofflichen und energetischen Beziehungen zwischen dem betrachteten Beleuchtungssystem und der Umwelt, d.h. dass die Inputflüsse, die der Umwelt entnommen werden, und die Outputflüsse, die an die Umwelt abgegeben werden, erfasst werden. Ziel der Sachbilanz ist es, für die ausgewählten Varianten unter Beachtung der funktionalen Äquivalenz ein Dateninventar zu erstellen.

Da quantitative Daten für die Entsorgung nicht vorliegen, ergeben sich für die jeweiligen Variantenbetrachtungen nur Berechnungen für die Herstellung inklusive der Rohstoffherstellung sowie für die Gebrauchsphase.

5.5.3.1 Auswertungen der Sachbilanz

Die aufsummierten absoluten Material- und Primärenergiemengen für die Herstellung der Lampenmenge, die zur Erzeugung der festgelegten Bezugslichtmenge (BLM) von 6,579 Millionen Lumenstunden benötigt werden, sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Die gesamten bilanzierten Stoffströme für die betrachteten fünf Beleuchtungsvarianten sind in Tabelle 53 im Anhang zusammengefasst.

Tabelle 37: Material- und Energiebedarfe zur Herstellung des Lampenbedarfs für BLM

BLM= 6,579 Mlmh	Variante 1: Glühlampe	Variante 2a: Dulux EL15	Variante 2b: Dulux EL Longlife	Variante 3a: Weißer LED-Chip heute	Variante 3b: Weißer LED-Chip Zukunft
Materialbedarf	669,4 g	453,3 g	253,8 g	2671,5 g	735,9 g
Produktmenge, gesamt	313,7 g	177,1 g	99,2 g	8,5 g*	2,3 g*
Primärenergiebedarf	14,7 MJ	32,6 MJ	18,3 MJ	5,9 MJ	1,6 MJ

* Hierbei handelt es sich wie beschrieben nur um den LED-Chip und nicht um eine komplette LED-Lichtquelle.

Quelle: Mani (1994), Gabi 4 Datenbank (2001) und eigene Berechnungen

Bei der Betrachtung der Materialmengen für die ersten drei Varianten muss berücksichtigt werden, dass hier auch die Verpackungen enthalten sind. Das Verhältnis von Materialbedarf zu Produktmenge liegt im Bereich 2,1-2,6:1. Die großen Materialmengen für die Leuchtdiodenchipherstellung im Verhältnis zur Produktmenge spiegeln die Tatsache wider, dass die Halbleitertechnologien beträchtliche Rohstoffmengen an Erzen und Gestein sowie Hilfsmaterialien benötigen, um letztlich eine geringe hochkomplexe Produktmenge zu erzeugen. Das Verhältnis beträgt 314:1. Außerdem muss noch beachtet werden, dass bei einer Bilanzierung eines gesamten LED-Beleuchtungssystem die Materialmengen für Gehäuse, Vorwiderstand, Verpackung etc. berücksichtigt werden müssten.

Bei den benötigten Primärenergiemengen zeigt sich ein anderes Bild. Der Primärenergiebedarf für die LED-Chip-Herstellung ist geringer als der Primärenergiebedarf der konventionellen Leuchtquellen. Dieser Unterschied relativiert sich aber wieder, da die fehlenden Systemteile des LED-Beleuchtungsystems noch mit eingerechnet werden müssten. So benötigt die Herstellung der Leiterplatte des elektronischen Vorschaltgeräts für die Energiesparlampe Dulux EL15 allein die Energiemenge von 17,3 MJ von den angegebenen 32,6 MJ/BLM. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass der Primärenergiebedarf zur Herstellung eines LED-Beleuchtungssystems dem der konventionellen Leuchtquellen in der gleichen Größenordnung liegen.

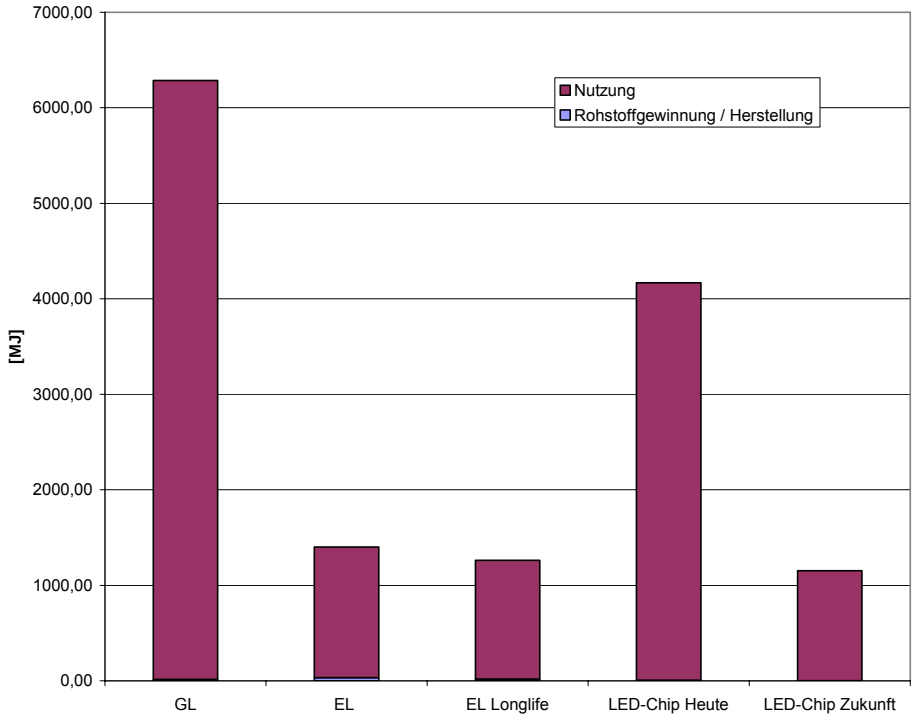
Vergleicht man nun den Energiebedarf für die Gebrauchsphase mit denen der Herstellungsphase wird deutlich, dass je nach Variante über 97-99% der Energie in der Gebrauchsphase verbraucht werden, so dass der Fehler durch die nur teilweise Betrachtung des LED-Beleuchtungssystems als gering eingeschätzt werden kann.

Tabelle 38: Energiebedarfe für die Gebrauchsphase zur Erzeugung von BLM

BLM= 6,579 Mlmh	Variante 1 Glühlampe	Variante 2a Dulux EL 15	Variante 2b Dulux EL Longlife	Variante 3a Weiße LED heute	Variante 3b Weiße LED Zukunft
Primärenergiebedarf	6271 MJ	1368 MJ	1243 MJ	4161 MJ	1152 MJ

Quelle: Mani (1994), Gabi 4 Datenbank (2001) und eigene Berechnungen

Abbildung 50: Primärenergiebedarf für die Herstellung inklusive der Rohstoffgewinnung sowie der Gebrauchsphase bezogen auf BLM



Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Mani 1994, Gabi 4 Datenbank 2001)

Zentraler Maßstab für die ökologische Beurteilung von Lichtquellen für Beleuchtungszwecke sind der Energieverbrauch in der Gebrauchsphase und die damit verbundenen Emissionen. Der Energieverbrauch für die Rohstoffgewinnung und Herstellung der betrachteten Lichtquellen ist sehr gering. Außerdem wird sehr deutlich, dass die heutige Weiße LED gegenüber der Energiesparlampe um den Faktor 3 im Nachteil ist. Erst wenn das Zukunftsszenario der Weißen LED eintrifft, d.h. wenn eine Lichtausbeute oberhalb von ca. 65 lm/W durch Weiße LED erreicht wird, liegt der Energieverbrauch im Bereich der Energiesparlampen.

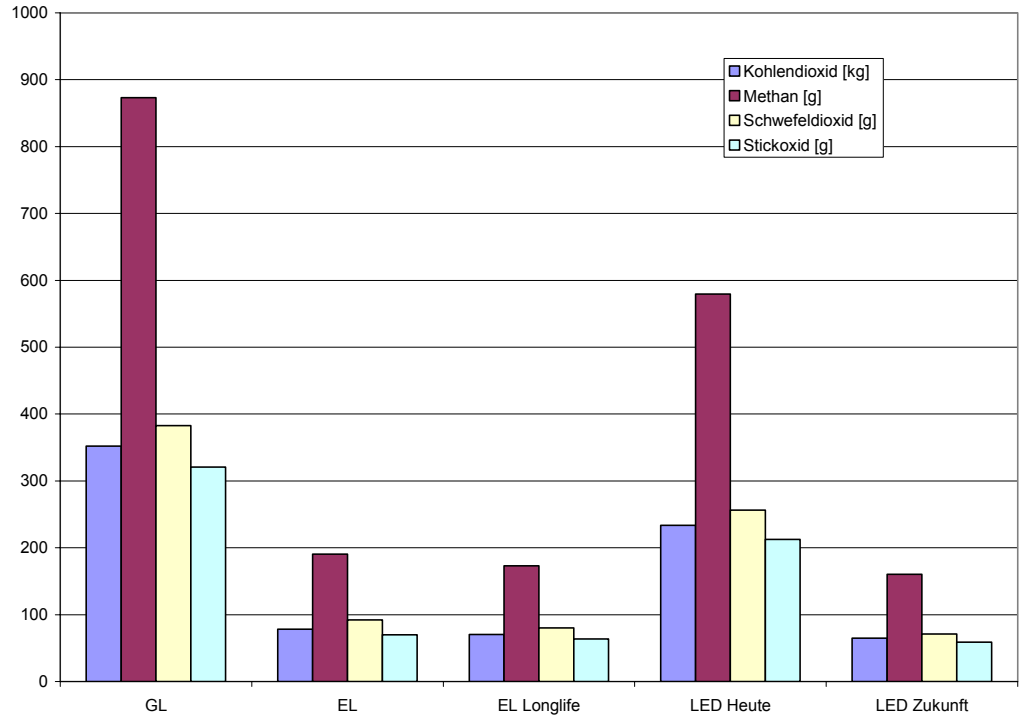
Dieser Sachverhalt wird zumeist auch durch die berechneten Emissionsmengen bestätigt, die in relevanten Mengen anfallen. Auch hier überwiegen die Emissionen, die aus dem Stromverbrauch der Gebrauchsphase resultieren. Diese Emissionsmengen sind in der folgenden Tabelle exemplarisch und im Anhang in Tabelle 57 ausführlich dargestellt.

Tabelle 39: Ausgewählte Emissionsmengen der betrachteten Varianten

BLM= 6,579 Mlmh	Variante 1 Glühlampe	Variante 2a Dulux EL 15	Variante 2b Dulux EL Longlife	Variante 3a Weiße LED heute	Variante 3b Weiße LED Zukunft
Kohlendioxid	352,1 kg	78,2 kg	70,5 kg	233,7 kg	64,7 kg
Methan	873,1 g	190,5	173,0 g	579,4 g	160,3 g
Schwefeldioxid	382,6 g	92,0 g	80,2 g	256,4 g	70,9 g
Stickoxid	320,7 g	70,0 g	63,6 g	212,8 g	58,9 g

Quelle: Mani (1994), Gabi 4 Datenbank (2001) und eigene Berechnungen

Abbildung 51: Ausgewählte Emissionsmengen der betrachteten Varianten bezogen auf BLM



Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Mani 1994, Gabi 4 Datenbank 2001)

Auch bei den dargestellten Gesamtemissionsmengen wird deutlich, dass die heutige Weiße LED zwar besser als die klassische Glühlampe abschneidet aber im Vergleich zur Energiesparlampe um den Faktor 3 schlechter ist. Erst wenn das Zukunftsszenario der Weißen LED eintrifft, liegen die Emissionen im Bereich der Energiesparlampen.

Hinsichtlich kritischer Einsatzstoffe sind bei den betrachteten Lichtquellen besonders die beiden Stoffe Quecksilber (in der Energiesparlampe enthalten) sowie Arsen (in den Herstellungsprozesse der Weißen LED eingesetzt) zu betrachten.

5.5.3.2 Weitere Stoffbewertungen

Der Anteil von **Quecksilber** konnte durch technologische Verbesserungen in den letzten Jahren in der Leuchtstofflampe und in der Energiesparlampe stark reduziert werden. Die Energiesparlampe Dulux EL von OSRAM enthielt 1994 ca. 10 mg Quecksilber; derzeit enthalten die von OSRAM hergestellten Kompaktleuchtstofflampen nur noch ca. 4 mg Quecksilber. Dies stellt somit das Emissionspotenzial dar, welches bei der unsachgemäßen Entsorgung freigesetzt werden kann. Wenn die Lampen auf der Mülldeponie zerbrechen, kann das Quecksilber direkt in die Umwelt entweichen. Das Quecksilber und zahlreiche Quecksilberverbindungen sind leicht flüchtig und hoch giftig, weshalb dies einer der Hauptgründe für die Entsorgung der Lampen über den Sondermüll oder durch Recycling ist.

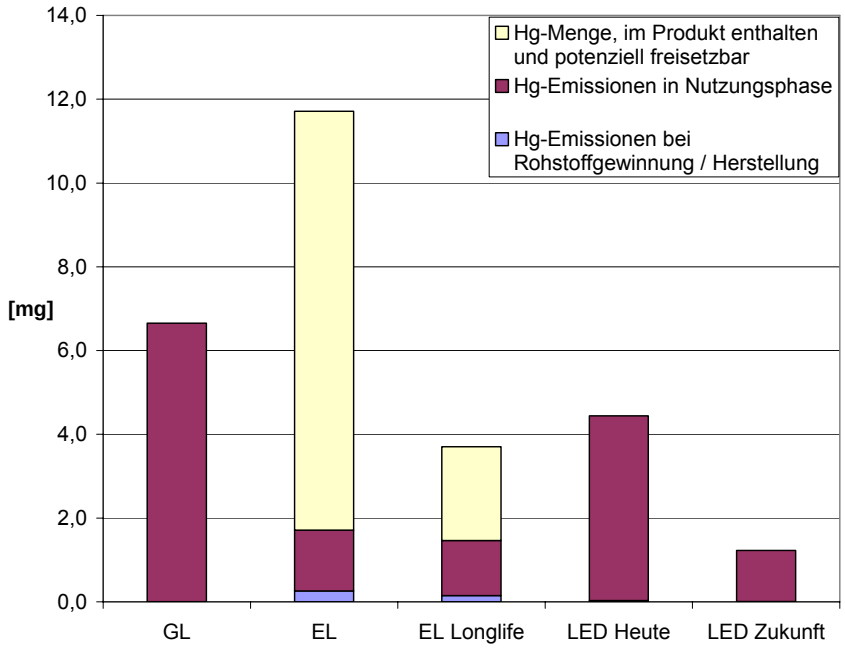
Darüber hinaus sind für die Gesamtbetrachtung auch die Quecksilberemissionen der Herstellungsphase sowie der Gebrauchsphase zu berücksichtigen, da z.B. auch bei der Stromerzeugung entsprechende Emissionen anfallen.

Tabelle 40: (Potenzielle) Quecksilberemissionen der betrachteten Varianten

BLM= 6,579 Mlmh	Variante 1 Glühlampe	Variante 2a Dulux EL 15	Variante 2b Dulux EL Longlife	Variante 3a Weiße LED heute	Variante 3b Weiße LED Zukunft
Hg-Emissionen in Rohstoffgewinnung / Herstellung (mg)	0,004	0,26	0,15	0,03	0,01
Hg-Emissionen in Nutzungsphase (mg)	6,65	1,45	1,32	4,41	1,22
Hg-Menge, im Produkt enthalten und potenziell freisetzbar (mg)		10,00	2,24		
Gesamt (mg)	6,65	11,71	3,70	4,44	1,23

Quelle: Mani (1994), Gabi 4 Datenbank (2001) und eigene Berechnungen

Abbildung 52: Ausgewählte Emissionsmengen der betrachteten Varianten bezogen auf BLM



Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Mani 1994, Gabi 4 Datenbank 2001)

Die (potenziellen) Quecksilberemissionen stammen zumeist aus der Nutzungsphase. Nur bei der Energiesparlampe kommen bedeutende Emissionsmengen durch das im Produkt enthaltene Quecksilber hinzu. Hierbei wird deutlich, dass die heutigen Energiesparlampen in der Gesamtmenge trotzdem noch besser sind als die heutigen Weißen LEDs. Erst im Zukunftsszenario der Weißen LED würden sich beträchtliche Einsparungen an Quecksilberemissionen ergeben.

Für **Arsen** und seine Verbindungen liegen keine quantitativen Daten vor, die ausgewertet werden könnten.

Die häufigsten Materialien, die zur Herstellung der LED-Chips verwendet werden, sind Aluminium-Indium-Gallium-Phosphid oder Aluminium-Gallium-Arsenid (AlInGaP oder AlGaAs) für rote und gelbe LEDs und Indium-Gallium-Nitrid (InGaN oder GaN) für grüne und blaue Dioden (u.a. FGL 2003). Da man für die Produktion von Weißen LED blau-, grün- und rot- bzw. nur blau- emittierende Chips benötigt, können die genannten Materialien auch in den Weißen LEDs enthalten sein.

Galliumarsenid gehört, ebenso wie z.B. Galliumnitrid, Galliumphosphid, zur Gruppe der III/V – Halbleiter. Bezüglich der Handhabung und Entsorgung spielt vor allem das Arsen und seine entsprechenden Verbindungen eine Rolle. Die Toxizität von Arsen und seinen Verbindungen ist sehr unterschiedlich, doch tendenziell besitzen die in der Halbleiterindustrie genutzten Stoffe ein gewisses Gefährdungspotenzial. Die erbgutschädigende, fruchtschädigende und krebserregende Wirkung von einigen Arsenverbindungen ist unbestritten (BLU 2002).

Als Halbleitermaterial ist Galliumarsenid ungiftig. Unter Vorhandensein von Luftsauerstoff und Wasser kann sich an der Oberfläche des Materials eine hauchdünne Schicht bilden, die stark

toxisch ist und auf einer normalen Müllhalde Umweltschäden anrichten könnte. Weiterhin fällt bei der Herstellung von Galliumarsenid ein extrem giftiges Gas an: Arsin (Arsenwasserstoff) mit der chemischen Formel AsH3, das die Reinheit des Halbleitermaterials gewährleisten soll. Bereits geringste Konzentrationen von einigen Molekülen Arsin auf eine Million Gasteilchen von Luft führen zu schwersten Gesundheitsschäden oder können tödlich sein. Hochgiftig dabei ist die Arsen–Wasserstoff–Bindung. Diese blockiert Nervenrezeptoren und kann den Sauerstofftransport im Körper behindern.

Deshalb gehören auch die Leuchtdioden zum besonders zu behandelnden oder besonders überwachungsbedürftigen Abfall aufgrund ihrer möglichen Inhaltsstoffe Arsen, Gallium, Phosphor und deren Verbindungen. Den europäischen Richtlinien zu Elektronik- und Elektronik-Altgeräten nach müssen die aufgeführten Produkte von den Herstellern kostenlos zurückgenommen und fachgerecht entsorgt werden. Ein Recyclingverfahren für Leuchtdioden existiert bis heute nicht (Grezcmiel 2001).

Eine Alternative zum bisher benötigten Arsin haben Forscher der Universität Marburg schon vor einigen Jahren entdeckt. Die Alternativsubstanz ist schwerflüchtig und hat auch einen viel geringeren Dampfdruck. Sie ist erheblich ungefährlicher für die Umwelt als Arsin. Für die Halbleiterindustrie ist der Stoff interessant, weil das viel kleinere Gefährdungspotenzial die Kosten einer Halbleiterproduktionsanlage stark reduziert. Auch die Menge an erzeugten Abfallstoffen fällt geringer aus (Thimm 1999).

5.5.4 Wirkungsabschätzung

Für die Wirkungsabschätzung ist es erforderlich über Emissionsdaten zu verfügen, die sich bestimmten Umweltwirkungen zuordnen lassen. Da bei den vorliegenden Daten ein direkter Zusammenhang zwischen Energieverbrauch und den relevanten Emissionen besteht, würde dieser Sachverhalt auch bei den Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Versauerung und Eutrophierung deutlich werden und keinen neuen Erkenntnisgewinn mit sich bringen. Daher wird auf eine derartige Darstellung verzichtet.

5.5.5 Lichtquellen mit Quantenpunkttechnologien

5.5.5.1 Definition und physikalische Grundlagen

In der Quantenphysik werden Teilchen mit Wellenfunktionen beschrieben. Dies trifft insbesondere auf Elektronen als die kleinsten stabilen Teilchen mit Ruhemasse zu. Wenn die Ausdehnung der Wellenfunktion der Elektronen in den Größenbereich der geometrischen Abmessungen von Materialien kommt oder sogar darüber liegt, sind quantenmechanische Effekte zu erwarten, wobei interessante neue Eigenschaften auftreten können.

Dies trifft bei Nanopartikeln mit Ausdehnungen unter etwa 20 nm zu (typisch 1-5 nm). Sie liegen damit an der Grenze zwischen Einzelmolekül und Volumenkristall. Die Ausbreitungsmöglichkeiten der Elektronen werden durch die Kleinheit der Nanopartikel begrenzt. Da die elektrischen und optischen Eigenschaften von Festkörpern durch die Elektronen bestimmt werden, zeigt sich bei abnehmender Größe der Materialien eine Diskretisierung der Energiezustände und eine Zunahme der Bandlücke zwischen Valenzband (vollständig durch Elektronen gefüllt) und Leitungsband (nicht voll besetzt, so dass Elektronen beweglich sind) (Haase & Kömpe 2003). Die dabei auftretenden neuen Eigenschaften können

nur mit Hilfe der Quantenphysik erklärt werden. Daher spricht man bei solchen Nanopartikeln von Quantenpunkten oder Quanten Dots, deren Dimension quasi nulldimensional ist.

Die Elektronen fühlen sich durch die engen Partikelgrenzen „eingequetscht“ und damit vergrößert sich der Abstand (Bandlücke) zwischen Grundzustand und angeregtem Zustand mit abnehmender Größe der Partikel. Wenn ein Elektron vom angeregten Zustand in den Grundzustand zurückspringt, wird Licht ausgesendet, dessen Wellenlänge und Energie vom Bandabstand abhängt. Daher wird es durch Quantenpunkte möglich, mit ein und demselben Material Wellenlängen zu erzeugen, die vom ultravioletten über das sichtbare Spektrum bis hin zum Infrarotbereich (350 – 2300 nm) reichen (Evident Technologies 2003). Die optischen Eigenschaften werden nur durch die Größe der Quantenpunkte bestimmt. Dies macht Quantenpunkte für die Lichttechnik so interessant. Bisher konnte Licht verschiedener Wellenlänge nur durch Kombination verschiedener Materialien erzeugt werden. Durch Quantenpunkte wird es sogar möglich, Materialien für die Lichterzeugung zu verwenden, die dafür bisher nicht geeignet waren (Bertram & Weller 2002).

Weiterhin befinden sich durch die geringe Größe der Quantenpunkte mehr als 50% der Atome an der Oberfläche, so dass chemische Prozesse an dieser Stelle eine präzise Abstimmung der lichtemittierenden Eigenschaften erlauben und damit die Emission von mehreren Farben aus einem einzigen Punkt möglich erscheint (SNL 2003). Die Quantenpunktkristalle können in Verbindung mit anderen Kristallen oder Phosphoren jede Farbe ausstrahlen, die gewünscht wird.

Die technische Herstellung von Quantenpunkten kann mittels epitaktischen Wachstums, z.B. bei Vakuumabscheidungsprozessen, oder mit chemischen Methoden aus kolloidalen Lösungen erfolgen (Rubahn 2002).

5.5.5.2 Anwendungen von Quantenpunkten

Durch Bestrahlung eines Festkörpers mit Licht geeigneter Wellenlänge können Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband angehoben werden. Die Energie des Lichtes muss dabei mindestens so groß sein wie der Bandabstand. Nach kurzer Zeit fällt das Elektron in das Valenzband zurück, wobei die überschüssige Energie ebenfalls oft in Form von Licht abgegeben wird. Die Energie bzw. die Farbe dieses ausgesendeten Fluoreszenzlichtes entspricht dabei der Bandlückenenergie.

Um Quantenpunkte zur Lichterzeugung zu verwenden werden verschiedene Wege beschritten.

Direkte Ladungsinjektion:

Bei der direkten Ladungsinjektion werden die Elektronen in den Quantenpunkten durch den Transport von Elektronen oder Elektronenfehlstellen und damit verbundene Stoßprozesse in den angeregten Zustand gebracht. Diese Methode wird z.B. vom Massachusetts Institute of Technology (MIT, Cambridge) erforscht, wobei ihnen 2003 ein entscheidender Entwicklungssprung gelang. Das Problem bei der direkten Ladungsinjektion besteht darin, möglichst viele der Elektronen, die durch das Trägermaterial fließen, zur Elektronenanregung in den Quantenpunkten und damit zur Lichterzeugung zu bewegen. Die MIT-Forscher konnten die Effizienz der direkten Ladungsinjektion um das 25–fache steigern, indem sie CdSe–Dots (Cadmiumselenid) zwischen zwei organische Filme anordneten (Riebeek 2003). Es erscheint möglich, dass mit dieser Technologie bis zu 100% Effizienz (alle injizierten Ladungen erzeugen

Licht) erreicht werden kann und damit mehr als mit jeder anderen Lichtquelle. Dies würde die Energieeffizienz von Lichtquellen in eine neue Größenordnung anheben. Es werden Farben emittiert, die zwei- oder dreimal so rein sind, wie die von gewöhnlichen OLEDs (Riebeek 2003). Wenn diese Technologie ausgebaut werden kann, wird sie als Erweiterung der OLED-Displaytechnologie die Flachbildschirmtechnologie revolutionieren. Hierfür spricht auch die Robustheit und Stabilität von Quantenpunkten.

Anregung mit UV–Licht:

Einen anderen Weg beschreiten beispielsweise die Forscher im Department of Energy's (DOE), Sandia National Laboratories, Albuquerque. Sie haben das erste Weißlicht emittierende Gerät unter Nutzung von Quantenpunkten entwickelt (SNL 2003). Im Gegensatz zur Methode der direkten Ladungsinjektion funktioniert die Anregung mit UV-Licht (380–420nm Wellenlänge) und nicht direkt durch Strom. Die Quantenpunkte werden mit geeigneten organischen Molekülen umhüllt und eingekapselt, so dass sie bei Anregung mit UV-Strahlen Licht im sichtbaren Spektrum erzeugen. Das benötigte UV-Licht wird mit konventioneller LED–Technologie erzeugt. Damit kann die Effizienz nicht höher sein als die der Blaulicht–LEDs. Sie ist jedoch höher als bei konventionellen Weißlicht LEDs, da die dort verwendeten Phosphormaterialien eine schlechte Absorption für die blaue Wellenlänge und damit geringe Effizienz haben. Optische Rückstreuverluste der konventionellen Phosphormaterialien reduzieren die Effizienz um 50%. Dies kann mit der neuen Technologie umgangen werden. 2004 wollen die Forscher die Konzentration der Quantenpunkte in der Kapsel erhöhen, um die Lichtausbeute weiter zu erhöhen und das Verhalten der Quantenpunkte in höheren Konzentrationen zu verstehen.

Bisher haben die Forscher beim MIT und bei Sandia hauptsächlich Quantenpunkte aus den Halbleitermaterialien Cadmiumsulfid und Cadmiumselenid verwendet. Sie enthalten das giftige Schwermetall Cadmium. Daher kommen diese Materialien für Serienfertigungen nicht in Frage. Es existieren jedoch ungefährliche Alternativen an denen geforscht wird, wie z.B. nanokristallines Silizium oder Germanium mit lichtemittierenden Ionen aus Mangan an der Oberfläche. Das Nanoelectronics Research Centre (NRC) an der Universität Glasgow hat schon Si-SiGe–quantenpunktbasierende Leuchtdioden hergestellt, die nach eigener Aussage als Lichtquelle in optischen Schaltungen ideal wären, weil sie direkt in die Si–Chips integriert werden könnten (Tang et al. 2003).

Neben der direkten Lichterzeugung werden Quantenpunkte auch in der Fluoreszenzmikroskopie von biologischen und medizinischen Präparaten als Markierungen eingesetzt. Sie werden an Biomolekülen (z.B. DNA–Fragmenten) verankert und durch Bestrahlung mit UV – oder blauem Licht zum Leuchten in verschiedenen Farben gebracht. Die Quantenpunkte sind gegenüber den bisher verwendeten Farbstoffen stabiler und neigen weniger zum Ausbleichen. Dadurch werden ausgiebigere Untersuchungen an einem Präparat möglich und die Bestimmung von Details vereinfacht. Weiterhin lassen sich durch den Einsatz von Quantenpunkten unterschiedliche Teile des Präparates verschiedenfarbig darstellen, so dass gleichzeitig verschiedene Gewebeteile erkannt und bestimmt werden können (Bertram & Weller 2002). Der Einsatz von Quantenpunkten verspricht schnellere, flexiblere und weniger teure Tests und sofort lieferbare biologische Analysen oder Patientendiagnosen. Allerdings müssen sie mit genügend großer Präzision präpariert werden, damit sie in der Medizin oder Forschung nutzbar sind.

Bauteile mit Quantenpunkten versprechen auch Verbesserungen bei der Entwicklung von Lasern, Detektoren, optoelektronischen Schaltern und Speicherelementen (z.B. optische Hochdichtespeicher). Auch in der Nanoelektronik setzt man große Hoffnungen auf die Anwendung der Quantenpunkte. Aufgrund ihrer hohen Quantisierungsenergie sind die Nanoteilchen in der Lage, diskrete Mengen von Elektronen (Ladungsträgern) zu speichern (Bertram & Weller 2002). Einige Versuche, die Quantenpunkte als Speicherbausteine zu nutzen, sind bereits in mehreren Unternehmen im Gange. Nach Bertram und Weller (2002) wäre eine Kombination von Quantenpunkten als Speicherzelle mit einem molekularen Schalter, der zu einem Geflecht aus Nanodrähten führt, ein erster Schritt auf dem Weg zum Nanocomputer. Allgemein ist festzustellen, dass sich die Forschung an Technologien mit Quantenpunkten in letzter Zeit weltweit intensiviert hat.

5.5.5.3 Zusammenfassung und Ausblick für den Einsatz von Quanten Dots

Quantenpunkte sind nanoskalige Teilchen, die im Grenzbereich zwischen Molekül und Festkörper angesiedelt sind. Ihre Zusammensetzung und kleine Größe gibt den Quantenpunken außergewöhnliche optische Eigenschaften, die durch Größenänderung oder Änderung der chemischen Zusammensetzung (der Oberfläche) an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden können. Durch Anregung können sie zur Lichtemission veranlasst werden. Im Gegensatz zu anderen Lichtquellen erzeugen sie ein extrem reines und helles Licht und können trotzdem ein ganzes Spektrum von Farben durch nur eine einzige Anregungswellenlänge abstrahlen.

Es ist zu erwarten, dass Quantenpunkttechnologien langfristig einen festen Platz in der Displaytechnologie finden werden, insbesondere in Kombination mit OLEDs. Sie stehen jedoch nicht so kurz vor der Einführung wie die OLEDs selbst. Die Nutzung von Quantenpunkten wird die Energieeffizienz von Lichtquellen weiter erhöhen, brillantere Farben erzeugen und die Zahl der notwendigen Prozessschritte bei der Displayherstellung reduzieren.

Dies sind wirtschaftliche wie auch ökologisch relevante Vorteile, die für eine Anwendung der Quantenpunkte und die Ausnutzung ihrer optischen Eigenschaften in der Beleuchtungstechnik sprechen. Eine industrielle Nutzung ist in den nächsten Jahren jedoch noch nicht zu erwarten.

5.5.6 Zusammenfassung

Diese Fallstudie hat zum Ziel, mögliche Ökoeffizienzpotenziale durch den Einsatz von neuen nanotechnologischen Produkten im Lichtbereich zu untersuchen. Hierzu werden Weiße LEDs mit den konventionellen Lichtquellen Glühlampe und Energiesparlampe verglichen und Zukunftspotenziale von Quanten Dots eruiert.

Die Fallstudie zeigt sehr deutlich, dass für die ökologische Beurteilung von Lichtquellen für Beleuchtungszwecke fast nur der Energieverbrauch in der Gebrauchsphase von Bedeutung ist. Hierbei zeigt sich, dass die heutige Weiße LED zwar gegenüber der klassischen Glühlampe besser abschneidet, aber gegenüber der Energiesparlampe um den Faktor 3 im Nachteil ist. Erst bei Lichtausbeuten oberhalb von ca. 65 lm/W, wie sie in der betrachteten Variante Weiße LED Zukunft unterstellt wurden, können die Weißen LEDs mit der Energiesparlampe hinsichtlich der Umweltwirkungen in Konkurrenz treten. Dies wird auch durch Aussagen von Arpad Bergh

(Präsident der US-Verbandes der optoelektrischen Industrie, Interview von Siemens NewsDesk 2003) bestätigt. Er geht davon aus, dass die Lichtausbeute der Weißen LED auf 85 – 100 lm/W erhöht werden muss, um für die alltägliche Beleuchtung interessant werden zu können.

Durch die Nutzung von Quantenpunkten kann in Zukunft davon ausgegangen werden, dass eine weitere Erhöhung der Energieeffizienz von Lichtquellen möglich sein wird. Es ist zu erwarten, dass Quantenpunkttechnologien langfristig einen festen Platz in der Displaytechnologie finden werden, insbesondere in Kombination mit OLEDs. Der konkrete kommerzielle Produkteinsatz von Quantenpunkten wird aber noch einige Jahre auf sich warten lassen.

5.6 Fallstudie 5: Risikopotenziale nanotechnologischer Anwendungen

Im Folgenden werden potenzielle Risiken von nanotechnologischen Anwendungen vorgestellt und diskutiert. Der Schwerpunkt der Diskussion liegt auf Nanopartikeln. Dies ist insofern gerechtfertigt, als dass Nanopartikel bereits in größeren Mengen produziert und eingesetzt werden und die Grundlage für vielfältige andere Anwendungen bilden. Das Kapitel besteht aus vier Teilen.

Im ersten Teil werden die Gefahren thematisiert, die sich aus den Eigenschaften der im Bereich der Nanotechnologie verwendeten Stoffe und Materialien ergeben könnten. Außerdem werden in der wissenschaftlichen Literatur diskutierte problematische Effekte ausgewählter Stoffe auf den Menschen und die Umwelt vorgestellt. Im zweiten Teil wird an Hand der Verwendung von nanoskaligem Titanoxid in Sonnenmilch die Problematik der Gleichsetzung von Stoffen in Mikro- und Nano-Größe diskutiert. Der dritte Teil analysiert den Lebenszyklus von Nanopartikeln. Der vierte Teil führt die Ergebnisse der Studie zusammen und diskutiert mögliche Konsequenzen aus den Erkenntnissen. Im Rahmen der Fallstudie wurde eine schriftliche Befragung mit Experten auf dem Gebiet der Toxikologie von Nanopartikeln aus England, Deutschland und den USA durchgeführt. Die Ergebnisse fließen an jeweils relevanten Stellen dieses Kapitel ein. Eine ausführliche Darstellung der Befragungsergebnisse findet sich im Anhang.

5.6.1 Mögliche Gefahren durch Nanotechnologie

Die Erschließung der Potenziale der Nanotechnologie steht erst am Anfang, mit vergleichsweise „einfachen“ Anwendungen bzw. Produkten, die bereits marktfähig sind oder sich an der Schwelle der Marktfähigkeit bewegen. Bei den marktfähigen Produkten handelt es sich insbesondere um Nanopartikel. Als Beispiel kann der Einsatz von nanoskaligem Ruß in Autoreifen zur Erhöhung der Abriebfestigkeit genannt werden. Insofern können diese Ansätze als eine Weiterverfolgung von Entwicklungslinien betrachtet werden, die bereits seit Jahrzehnten verfolgt werden. Das Neue ist in diesem Kontext zumeist die Nanoskaligkeit dieser Partikel.

Allerdings stellt sich die Frage, inwieweit mit dem Vorstoß in den nanoskaligen Bereich neuartige Wirkungen verbunden sind. Inwieweit verfügen Nanomaterialien über Eigenschaften, die ggf. umwelt- bzw. gesundheitsrelevant sein können? Teilweise sind es gerade die veränderten Eigenschaften der Nanomaterialien, die sie für Produktionszwecke interessant machen.

Die Fragen nach neuen Eigenschaften und ihren möglicherweise negativen Effekten sind allerdings bislang wenig untersucht bzw. problematisiert. Die NGO etc (etc group 2002) verweist bspw. darauf, dass Titandioxid-Nanopartikel, wie sie in Sonnenmilch (in erheblichen Mengen) eingesetzt werden, in den USA keine Neuuntersuchungen erforderlich machten. Das herkömmliche Titandioxid wurde bereits überprüft und zugelassen, die nunmehr einsetzbaren Titandioxid-Nanopartikel werden in den Umwelt- und Gesundheitseigenschaften gleichgesetzt mit denen, die in der Vornanotechnologiephase eingesetzt wurden (vgl. etc group 2002). Ob diese Gleichsetzung gerechtfertigt ist, kann an dieser Stelle nicht entschieden werden. Vor dem

Hintergrund der veränderten Eigenschaften auf Nanoebene, muss sie zumindest diskutiert werden.

Dies gilt insbesondere auch vor dem Hintergrund, dass hinsichtlich der Gesundheits- und Umweltrelevanz von Nanopartikeln bislang noch wenig gesichertes Wissen existiert. Vor allem geben auch Untersuchungen der aus Verbrennungsprozessen stammenden ultrafeinen Partikel durchaus Anlass zur Besorgnis.

Im Hinblick auf Nanotechnologien ist allerdings anzumerken, dass die gemeinsame Charakteristika der Nanotechnologie vorrangig durch die Nanoskaligkeit der Materialien und Produkte gekennzeichnet ist. Konkret bedeutet dies, dass die Nanotechnologie als Querschnittstechnologie zu bezeichnen ist; die jeweiligen Anwendungskontexte divergieren massiv und damit auch die möglichen Gesundheits- und Umweltgefährdungen. Bspw. werden sich die nanotechnologischen Verfahren und damit auch die Wirkungen im Bereich der Biotechnologien von solchen Anwendungsbereichen wie Elektronik und Dünnschichttechnologien unterscheiden. Zudem sind unterschiedliche Wirkungen auf die jeweiligen Umweltmedien zu erwarten.

5.6.1.1 Technologiespezifische Eigenschaften für mögliche Gefahren durch Nanotechnologie

Ein erster Ansatz zur Strukturierung möglicher Gefahren durch die Anwendung von Nanotechnologien kann darin bestehen, die Spezifika der Nanotechnologie zu betrachten und auf potenzielle Gefährdungen zu überprüfen. Charakterisiert man die Nanotechnologien nach Ihren Eigenschaften, so ist als kleinster gemeinsamer Nenner festzuhalten, dass

- es sich um Strukturen im Nanobereich handelt
- in diesem Bereich sich die Eigenschaften der Moleküle verändern (die eben auch zu den positiven gewünschten Effekten führen)
- sich insbesondere das Verhältnis Oberfläche zu Volumen verändert

Zudem ist insbesondere auf solche Stoffe zu verweisen, die wie Fullerene oder Nanotubes in der natürlichen Umwelt nicht vorkommen. Die Wirkung dieser neuartigen Materialien auf Umwelt und Gesundheit ist schwer einzuschätzen.

Neben den genannten Eigenschaften nanoskalierten Materials sind insbesondere folgende Aspekte zu berücksichtigen

- Mobilität und Reaktionsfreudigkeit
- Umweltoffene / umweltgeschlossene Anwendung
- Möglichkeiten der Bioakkumulation
- Persistenz
- Lungengängigkeit
- Wasserlöslichkeit
- sowie weitere Eigenschaften.

Betrachtet man Nanomaterialien typisierend, ergeben sich folgende Aussagen: Nanotechnologische Verfahren und Produkte insbesondere Nanopartikel sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt im Wesentlichen Weiterentwicklungen bisheriger Verfahren.

Zentraler Unterschied ist, dass es zunehmend gelingt, auf der Ebene der Atome und Moleküle auch gestaltend zu wirken. Das heißt, verschiedene wissenschaftliche Disziplinen können Bausteine und Einheiten in Nano-Größe herstellen.

Erschwerend kommt für eine Beurteilung möglicher Gefahren hinzu, dass industriell hergestellte Nanomaterialien nicht als einheitliche Stoffgruppe betrachtet werden können. Im Gegenteil, es gibt eine außerordentliche Bandbreite an Stoffen in Nano-Größe. Sie zeichnen die dadurch aus, dass:

- es viele verschiedene chemische Elemente und Verbindungen gibt
- es sie trotz ihrer Nanoskaligkeit in verschiedenen Größen und mit verschiedenen Oberflächenstrukturen gibt
- bislang keine besonders bedenkliche Stoffklasse für eine Schwerpunktbildung in Untersuchungen ausgemacht werden konnte

Es wird keine einfache Antwort auf die Frage geben, ob Nanopartikel sicher sind und wie sie auf Menschen und ihre Umwelt wirken. Die Unterschiede in Größe, Form, Oberflächenbeschaffenheit, chemischer Zusammensetzung und Biopersitenz verlangen, dass jedes Nanomaterial für sich auf mögliche Umwelt- und Gesundheitsgefahren untersucht wird. Ganz ähnliche Verbindungen können ganz unterschiedliche Effekte haben. Auch ist aus der Toxizitätsforschung bekannt, dass Stoffe ungefährlich sind so lange sie dermal oder oral appliziert werden, bei Inhalation aber toxisch wirken (Colvin 2003a; Hoet 2004). Ob sich momentan schon allgemeine Aussagen zumindest zu bestimmten Gruppen machen lassen, wird in einem folgenden Teil des Berichts diskutiert.

Nanopartikel

Nanopartikel können in den Übergangsbereich zwischen einzelnen Atomen oder Molekülen einerseits und größeren Ensembles aus beiden andererseits eingeordnet werden.

Diese neuen Eigenschaften sind unter anderem durch das veränderte Verhältnis zwischen der Oberfläche und dem Volumen bestimmt. Nanopartikel besitzen durch ihre Winzigkeit im Vergleich zu ihrem Volumen eine enorme Oberfläche. Aufgrund dessen sind sie sehr reaktiv und reagieren verhältnismäßig schnell und heftig, teilweise spontan mit ihrer Umgebung. Dies liegt daran, dass Oberflächen der Nanopartikel sehr viel mehr „freie“ Moleküle besitzen, die aufgrund ihrer Positionierung an der Oberfläche reaktionsfähig mit ihrer Umgebung sind. Dadurch sind Materialien und Stoffe in Nano-Größe reaktiver als Moleküle mit einer kleineren Oberfläche. Aus diesem Grund können auch existierende Stoffe, die nun in Nano-Größe produziert werden können, auch ganz andere Eigenschaften haben als ihre größeren Pendants.

Auf die Frage, ob Effekte von Nanopartikeln eher von der Größe, eher von der Substanz oder eher von der Beschaffenheit der Oberfläche ausgingen, gaben die im Rahmen des Projekts befragten Experten folgende Antworten:

- Negative Effekte gehen sowohl von Größe, chemischer Zusammensetzung und Oberflächenstruktur aus. Eine Gewichtung unter den drei Eigenschaften ist momentan nicht möglich.
- Ebenfalls Einfluss auf die Wirkung haben Höhe der Dosis, Beschichtung, Form, Verteilung im Gewebe, die Höhe elektrischer Spannungen zwischen Molekülen, Grad der Agglomeration.
- Effekte werden auch vom Zustand des aufnehmenden Körpers bedingt: Zustand des Immunsystems, Aufnahmeweg (Haut, Atmung, direkte Injektion etc.), Gesundheitszustand.
- Auch gibt es nach Ansicht eines Experten möglicherweise Unterschiede hinsichtlich der Effekte bei einzelnen, freien Nanopartikeln und eingebundenen, etwa in einen Verbundstoff.

Nanopartikel können außerdem molekulare Fremdstoffe adsorbieren. Die Adsorption kann den Fremdstoffen Zugang zu Körperregionen und Zellbereichen verschaffen, die ihnen sonst verwehrt wären. Der Transport von Unreinheiten könnte nach Einschätzung von Wissenschaftlern für biologische Systeme ein größeres Problem sein als die Nanopartikel an sich (New Scientist 2003).

Verhalten von Nanopartikel bei Freisetzung

Zu einer Einschätzung der Effekte von Nanopartikel kommt weiter erschwerend hinzu, dass mögliche negative Wirkungen auch vom Agglomerationsverhalten der Nanopartikel abhängen. So ist etwa von ultrafeinen Partikeln aus Verbrennungsprozessen bekannt, dass sie sich bereits kurz nach der Verbrennung aneinander anlagern und größere Partikelhaufen (Klumpen) bilden. Oberdörster weist darauf hin, dass agglomerierte Nanopartikel nicht mehr oder nicht weniger problematisch als andere Partikelformen seien, einzelne Nanopartikel aber schwerwiegende Probleme verursachen können. Es ist ebenfalls bekannt, dass nanoskaliges Titandioxid in wässrigen Lösungen eher verklumpt als in ipophilen Lösungen. Bislang lassen sich aber keine generalisierten Annahmen über das Verhalten von Nanopartikeln treffen. Diese Aussage wird auch von den befragten Experten bestätig. Generelle Aussagen wie „Alle Fullerene klumpen“ seien nicht zu treffen. Die angegebenen Aussagen über gemeinsame Verhaltensweisen sind wesentlich weniger generell und wurden alle unter Vorbehalt formuliert:

- Mit Sicherheit können sich Nanopartikel in gasförmigen und flüssigen Medien zu Aggregaten verbinden.
- Aggregate verteilen sich weniger gleichmäßig als einzelne Nanopartikel.
- In der Luft befindliche Partikel agglomerieren in hoher Konzentration (10^7-10^8 Partikel/cm³) homogen innerhalb von zehn Sekunden. Niedrigere Konzentrationen brauchen erheblich länger.
- Das Agglomerationsverhalten hängt von der Oberflächenbeschichtung, der chemischen Reaktivität und der elektrischen Spannung ab.

- Bilden sich Agglomerationen durch die Anlagerung von weiteren Atomen und Molekülen, so können sich die Gesamtoberfläche und damit auch die Reaktivität des Agglomerats erneut ändern.
- Je größer die Oberfläche, desto größer die Möglichkeit, dass sich Stoffe anlagern. Die Anlagerung wird gleichzeitig von der Oberflächenreaktivität bestimmt.
- Aggregierte Partikel können sich im menschlichen Körper eventuell wieder disaggregieren.
- Die Toxizität von Partikeln kann im Laufe ihrer Lebensdauer abnehmen.

Ultrafeine Partikel und Nanopartikel

Das momentan beschränkte Verständnis von der Wirkung und die Befürchtungen über negative Effekte von Nanopartikeln beruhen teilweise auf dem Wissen über ultrafeine Partikel. Ultrafeine Partikel ($PM_{0.1}$) sind genauso groß wie Nanopartikel. Sie sind aber nicht industriell gefertigt, sondern das Resultat von Verbrennungsprozessen.[41] Ultrafeine Partikel haben einen durchschnittlichen Durchmesser von weniger als 0.1 Mikrometer (µm).

Epidemiologische Untersuchungen zu größeren Partikeln (Durchmesser von weniger als 10 Mikrometern) zeigen, dass chronische Belastungen durch in der Luft gelöste Partikel langfristig das Herz-Kreislauf-System schädigt (Dockery et al. 1993; Kunzli et al. 2000). Es wird momentan diskutiert, ob ultrafeine Partikel aufgrund ihrer größeren Oberfläche automatisch mehr Schaden anrichten als größere. Die Anzahl der Studien mit ultrafeinen Partikeln ist gering, aber es gibt Anzeichen dafür, dass sie gefährlicher sind als größere Partikel (Howard 2004b).

Auch bei in-vitro Untersuchungen haben sich Hinweise auf negative Effekte von ultrafeinen Partikeln ergeben. So schreibt Diabeté (2002): „Mit Hilfe von in vitro Tests wurde gezeigt, dass ultrafeine synthetische Partikel stärker zytotoxisch wirken als größere Partikel gleicher chemischer Zusammensetzung. Flugstaub aus einer Hausmüllverbrennungsanlage, der auch Partikel im Nanometer-Bereich enthält, bewirkt in Lipopolysaccharid-stimulierten Makrophagen eine verstärkte Freisetzung pro-inflammatorischer Zytokine sowie eine Inhibierung der Bildung des NO-Radikals. In Kokulturen aus Makrophagen und Lungenepithelzellen wurde gezeigt, dass diese mehr Zytokine freisetzen als die Summe der entsprechenden Einzelzellkulturen.“ Aus diesen Hinweisen könnte gefolgert werden, dass die teilweise noch kleineren Nanopartikel in ähnlichen Konzentrationen von vorne herein ebenfalls schädlich auf das Herz-Kreislauf-System wirken könnten. Da ultrafeine Partikel aber aus Verbrennungsprozessen stammen, ist die Vergleichbarkeit der beiden Partikeltypen beschränkt. Nanopartikel können zusätzliche und/ oder andere Probleme verursachen (Colvin 2003a; Kreyling et al. 2004).

---

[41] So hat zum Beispiel die Verringerung der Luftverschmutzung durch verbesserte Verbrennung die unbeabsichtigte Konsequenz, dass das Verhältnis der ultrafeinen Partikel zunimmt. 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)

Die oben getroffenen Aussagen werden von der durchgeführten Befragung bestätigt. Nach Angaben der Experten gibt es eine große Datenbasis über die toxikologische Wirkung von ultrafeinen Partikeln im Zusammenhang mit Luftverschmutzung durch natürliche und aus Verbrennungsprozessen stammende Partikeln. Die Wirkung der ultrafeinen Partikel auf Lunge, Herz-Kreislauf-System und Klümpchenbildung im Blut seien gut belegt. Die Aussagen über mögliche schädliche Wirkungen von inhalierten Partikeln aus Verbrennungsprozessen lassen sich aber nicht eins zu eins auf industriell hergestellte Nanopartikel übertragen. Ein Beispiel für mögliche Parallelen zwischen beiden Partikelklassen ist die Eigenheit von ultrafeinen Partikeln körpereigene Abwehrmechanismen zu umgehen, in Zellen einzudringen, durch den Körper zu wandern und entzündliche Reaktionen auszulösen. Die aus der Partikeltoxikologie gewonnenen Erkenntnisse lieferten Verdachtsmomente, die nicht außer Acht gelassen werden dürfen. Andererseits müssten aber neue, auf industriell hergestellte Nanopartikel zugeschnittene Methoden entwickelt werden.

5.6.1.2 Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt

In der Folge sollen einige Aussagen aufgeführt werden, die Hinweise auf mögliche Auswirkungen geben. Dargestellt werden die Ergebnisse von relevanten Studien und die mehr oder weniger begründeten Vermutungen von Forschern in diesem Feld.

Diese Aussagen sollen an dieser Stelle allein typisierend dargestellt werden – sie könnten um weitere Beispiele ergänzt werden – allerdings können damit letztlich keine Aussagen über Nanotechnologien generell generiert werden. Vielmehr wird deutlich, dass es sich um ein Feld mit hochgradiger Unsicherheit und Unwissen handelt, dessen Bewertung bislang noch nicht systematisch angegangen worden ist.

Auswirkungen auf den menschlichen Körper

Nanopartikel sind sehr mobil und können sich bei Labortieren zu Leber, Gehirn und sogar zu Föten bewegen. Howard (University of Liverpool, England) berichtet von möglicher Wanderung von Nanopartikeln zu Föten, seine Untersuchungen waren zum Zeitpunkt der Berichtslegung allerdings noch nicht abgeschlossen. Howard schien aber sicher, bald Beweise für seine ersten Hinweise zu haben (Howard 2004a). Howard vermutet, dass es einen natürlichen Transportweg für Nanopartikel gibt, über den sie Zugang in den Körper bekommen und sich dann in ihm fortbewegen können. Er geht davon aus, dass Nanopartikel durch die Caveolen (Öffnungen) der Zellmembran wandern. Die Öffnungen sind zwischen 40 und 200 nm groß und spielen vermutlich beim Transport von Makromolekülen wie Proteinen eine Rolle. Die Caveolen sind groß genug, um Nanopartikel zu transportieren (Howard 2004b). Über die Effekte im Körper ist allerdings nichts bekannt. Es muss allerdings hinzugefügt werden, dass die von Howard untersuchten Partikel speziell auf die Durchdringung von Membranen ausgerichtet sind.

Oberdörster (University of Rochester, New York) verfolgte die Verbreitung von Kohlenstoffpartikeln mit 35 nm Durchmesser, nachdem sie bei Ratten auf der Nasenschleimhaut aufgebracht wurden. Einen Tag später wurden die Nanopartikel im Gehirn nachgewiesen. Die Enden der Geruchsnerven hatten die Partikel aufgenommen und in den Riechkolben (Bulbus olfactorius) transportiert. Die Konzentration der Partikel stieg, bis das Experiment nach sieben Tagen abgebrochen wurde. Allerdings ist unklar, welche Auswirkungen die Partikel auf das Gehirn haben (Oberdörster 2004). Oberdörster berichtet im Rahmen der Befragung, dass sich der gleiche Effekt mit anderen Stoffen (30 nm Virus, 50 nm Kolloid-Gold,

30 nm Mn-Oxid) und auch bei Primaten einstellt. Mn-Oxid verursachte dabei bei Ratten in einer Konzentration von 450 µg/m³ und zwölf Tagen Belastung Reaktionen, die auf Entzündungen hinwiesen. In einer etwas älteren Studie berichten Öberdörster et al., dass Kohlenstoff von einer Größe zwischen 20 und 29 nm nach sechs Stunden Inhalation bei Ratten in der Leber nachgewiesen werden konnte (Oberdörster et al. 2002). Die Partikel sind über die Lunge in den Blutkreislauf eingedrungen. Oberdörster et al. unterstreichen aber, dass die Translokation zum Blut und zu den Organen bei anderen Nanopartikeln unterschiedlich ablaufen kann.

Zum Blutkreislauf könnten Nanopartikel über die menschliche Lunge vordringen, da sie zu klein sind, um von den beiden Schutzmechanismen der Lunge, Lungenschleim und Makrophagen, gefiltert beziehungsweise zerstört zu werden. Der Lungenschleim, der den äußeren Teil der Lunge wie einen Teppich bedeckt, kann feine und ultrafeine Partikel nicht aus der Atemluft herausfiltern und nach oben tragen. In den dahinter gelegenen Aveolen, wo der Gasaustausch zwischen Lunge und Blut stattfindet, absorbieren Makrophagen (Fresszellen) unerwünschte Stoffe. Allerdings erkennen Makrophagen Stoffe, die kleiner als 70 nm sind, nicht mehr als körperfremd.

Das Problem der Translokation von Nanopartikeln kann sich verschärfen, so Donaldson (Napier University, Edinburgh) im Rahmen der Befragung, wenn - wie geplant - zukünftig im Rahmen von medizinischen Anwendungen Nanopartikel dem menschlichen Blut direkt zugeführt werden. Allerdings wären medizinische Anwendungen wesentlich stärkeren Regulierungen und Tests unterworfen, als die hier im Vordergrund stehenden Partikel industrieller Produktion.

Es gibt ebenfalls den Verdacht, dass Nanotubes schädigend auf den menschlichen Organismus wirken könnten. Lam flößte Mäusen über die Luftröhre 0,1 oder 0,5 mg Kohlenstoff-Nanotubes ein. Nach sieben Tagen entwickelten alle Versuchstiere Granulome[42] oder in einzelnen Fällen Entzündungen, die sich nach 90 Tagen weiter verschlimmert hatten (Lam 2003). Warheit kommt in einer ähnlichen Untersuchung bei Ratten zu ähnlichen Ergebnissen, allerdings verschlimmern sich die Granulome nach 30 Tagen nicht mehr (Warheit et al. 2004). Zwischen den beiden Studien unterschieden sich nicht nur die Versuchstiere, sondern auch die eingesetzten Nanotubes. Warheit benutzte “laser-evaporated Nanotubes”, Lam “HiPco and Carbon arc Nanotubes”. Die verschiedenen Intensitätsgrade der Entzündungen könnten mit den unterschiedlichen Nanotubes zusammenhängen, was auf die unterschiedlichen Wirkungen auch ähnlicher Stoffe hinweist. Warheit berichtet außerdem, dass bei seinem Versuch 15 Prozent der Ratten an einer durch zusammen geklumpte Nanotubes verursachten mechanischen Blockade der oberen Atemwege gestorben wären. Dies weist darauf hin, dass auch das Verhalten freigesetzter Partikel bei einer Beurteilung möglicher negativer Effekte herangezogen werden muss.

Im Rahmen der Befragung wies Kreyling (GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit) darauf hin, dass Nanotubes auch krebserregend sein könnten. Aus der Mineralfaser-Toxikologie wisse man, dass die Inkorporation (insbesondere die Inhalation) von biopersistenten Fasern mit einer Länge von 20 µm und mehr ein deutlich erhöhtes Krebsrisiko zur Folge hat. Wegen ihrer Länge von mehr als 50 µm und ihrer außerordentlichen Stabilität sei nicht auszuschließen, dass Nanotubes erstens biopersistent sind (sie können immerhin in

[42] Granulome sind eine Mischung aus lebendem und totem Gewebe und ein Zeichen für Toxizität.

konzentrierten Säuren nicht gelöst oder zerkleinert werden) und zweitens nach Inkorporation ebenfalls ein erhöhtes Krebsrisiko in sich bergen.

Ungeklärt sind bislang auch die Wirkungen von nanoskaligem Titandioxid bei Inhalation. Diese betreffen in erster Linie die Beschäftigten in den Fabrikationsstätten von nanoskaligem Titandioxid. Colvin weist darauf in, dass Titandioxid Entzündungen in der Lunge verursachen kann (Colvin 2003a). Rehn et al. verabreichten jeweils eine beschichtete und eine unbeschichtete Art von ultrafeinem Titandioxid (Durchmesser < 100 nm) in Einzeldosen an Ratten in der Höhe von an Arbeitsplätzen relevanten Dosierungen (0.15, 0.3, 0.6, and 1.2 mg). Sie konnten allerdings keine Entzündungen nachweisen und gehen davon aus, dass beide Titandioxid-Formen in der Lunge inaktiv sind (Rehn et al. 2003). Bermudez et al. kommen bei einer anderen Versuchsanordnung zu gegenteiligen Aussagen. Bei dem Inhalationstest wurden Ratten, Mäuse und Hamster für 13 Wochen einer Dauerbelastung von luftgelöstem ultrafeinen Titandioxid ausgesetzt (u.a. 10mg/m³). Bei Ratten und Mäusen zeigten sich Anzeichen für Entzündungen im Lungengewebe, die allerdings mit Abnahme der Belastung wieder verschwanden. Bei beiden Arten schienen die Selbstreinigungsmechanismen der Lunge in dieser Konzentration überlastet zu sein, was sich im verzögerten Abbau der Partikel zeigte. Ratten zeigten schwerere Entzündungssymptome als Mäuse, Hamster dagegen keine, was als Zeichen für die bessere Fähigkeit zur Lungensäuberung gedeutet wurde (Bermudez et al. 2004).

Oberdörster berichtete im Rahmen der Befragung, dass Titandixoid in Nano-Größe Lungenkrebs bei Ratten verursacht. Allerdings seien in dem Test hohe Dosen verabreicht worden und es ist unklar, ob Menschen solch hohen Dosierungen ausgesetzt werden. So war der Lungenkrebs bei Ratten das Resultat einer zweijährigen Zwangsinhalation von nanoskaligem Titandioxid in hoher Konzentration (10 mg/m³ und 250 mg/m³). Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Menschen sei deswegen fragwürdig.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass verschiedene Verdachtsmomente für problematische Wirkungen von Nanopartikeln bestehen. Gleichzeitig unterstrichen die befragten Experten aber, dass es sich bei den Untersuchungen um Laborversuche handelte, bei denen den Versuchstieren zumeist sehr hohe Dosen verabreicht wurden. Die Belastung des Menschen durch solch hohe Dosierungen ist, von schweren Industrie- oder Transportunfällen abgesehen, bislang nur schwer vorstellbar.

Auswirkungen auf die Umwelt

Neben den oben genannten Versuchen, welche anhand von Tierversuchen die Effekte von Nanomaterialien auf den Menschen zu ergründen suchen, gibt es einige wenige Untersuchungen zur Umwelttoxizität von Nanopartikeln. Allgemein muss darauf hingewiesen werden, dass das Verhalten von Materialien und Stoffen in Nano-Größe in der Umwelt beobachtet werden muss (Tomson et al. 2003).

Die Forschung ist über das Verhalten von Nanomaterialien in verschiedenen Umweltbedingungen erst in den Anfängen. Forschungsarbeiten an der Rice University versuchen die Auswirkungen von Nanomaterialien im Boden (Bio persistency, Dissolution, Biodegradation, Aggregation, adsorption to environmental matrix) und aquatischen Umgebungen (Dissolution and suspension in aqueous media, Sedimentation) sowie der Bio-Akkumulation (Earth worms and Aquatic animals) zu identifizieren (Tomson et al. 2003).

Die vorläufigen Ergebnisse dieser Untersuchung sind:

- Die Aggregation von Nanopartikeln kann in verschiedenen wässrigen Umgebungen unterschiedlich sein.
- Die Adsorption von Fremdkörpern an der Oberfläche von Nanopartikeln ist sehr stark.
- Die Adsorption / Desorption von organischen Verbindungen zu Nanopartikeln könnte dauerhaft sein.
- Nanomaterialien in natürlichen, wässrigen Umgebungen können das Verhalten und die Mobilität von Verunreinigungen erheblich verändern.

Brumfiel (2003) berichtet, dass Forscher der Rice University das Verhalten von Buckyballs untersucht haben. Sie lösten Buckyballs in Wasser, welches sie auf gewöhnlichen Erdboden ähnlichen Materials gossen. Die Buckyballs verhielten sich im Boden mit sehr unterschiedlichen Konsequenzen. Wenn die Buckyballs zusammen klumpten und sich zu Partikeln in Mikrometergröße formierten, wurden sie wie jeder andere organische Stoff vom Boden aufgenommen. Verteilten sich die Buckyballs aber ohne zu klumpen, so wurde beobachtet, dass Wasser eine Art Schutzhülle um die Bukyballs bildete. Dadurch könnten die Buckyballs durch den Boden hindurch wandern ohne aufgenommen zu werden und eine Gefahr für das Grundwasser darstellen. Außerdem gibt es Hinweise dafür, dass Nanomaterialien in die Nahrungskette gelangen können. Brumfield berichtet, dass Nanopartikel von Erdwürmern aufgenommen werden können (Brumfiel 2003).

In der Forschung zu den Auswirkungen von Nanotechnologien auf die Umwelt gibt es Bedenken hinsichtlich der Fähigkeit von Nano- und Mikropartikeln Schwermetalle, Radionuklide und andere gefährliche Stoffe als Fremdköper aufzunehmen. Bemerkenswert ist, dass Nanopartikel mit Schwermetallen etc. reagieren und die Möglichkeit haben, diese zu transportieren.

Wiesner (Rice University) 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 sich bei der Vermischung von Abwässern aus Bergwerken und sauberen Fliessgewässern Nanopartikel bilden. Die Nanopartikel nehmen die in hoher Konzentration gelösten giftigen Schwermetalle der Abwässer auf. Auch hier vermuten die Wissenschaftler, dass die Partikel die Gifte durch ihre chemische Bindung weiter flussabwärts transportieren können.

Als Forscher damit erfolgreich waren, nanoskalierte Substanzen wasserlöslich zu machen, um die Arzneimittel mehr oder weniger punktgenau zuführen zu können, erreichten sie damit zugleich, dass sich diese Partikel frei im Grundwasser bewegen können.

Eva Oberdörster (Southern Methodist University, Dallas) berichtete im Rahmen der Befragung von ihrer jüngsten Untersuchung zur Wirkung von Fullerenen auf Forellenbarsche und Wasserflöhe. Während die Fullerene auf die Wasserflöhe toxisch wirkten, starben die Fische nicht und zeigten auch keine Anzeichen von Krankheiten. Allerdings wurden Hinweise auf Gehirnschädigungen und mögliche Entzündungen gefunden, außerdem reagierte der Fisch

insgesamt sehr stark auf die Fullerene. Die in der Untersuchung verabreichten Dosierungen an Fullerenen (1 ppm), so die Expertin, würden allerdings bei der Anwendung von Fullerenen mit Ausnahme von Unfällen selten auftreten. Hohe Konzentrationen von Nanopartikeln mit bedenklichen Folgen könnten aber erreicht werden, wenn sie etwa in Sonnenmilch oder Kosmetika verwendet würden und im Wasser ausgewaschen würden und sich über die Zeit anreicherten. Gleichzeitig sei das Verhalten von Nanopartikeln zu berücksichtigen. Einzelne Nanopartikel hätten vermutlich sowohl bei Inhalation als auch in wässriger Form andere Eigenschaften als verklumpte Nanopartikel.

Zusätzlich berichtete Oberdörster, das nicht alle künstlich hergestellten Nanomaterialien gleich wirken. Zum Beispiel ergaben ihre Untersuchungen, dass Fullerene toxisch auf E. Coli Bakterien wirken. Beschichtete Singel-Walled-Nanotubes wirken allerdings nicht toxisch auf E. Coli.

5.6.2 Nanoskaliges Titandioxid in Sonnencreme

In der folgenden Fallstudie wird die Verwendung von nanoskaligem Titandioxid in Sonnenmilch vorgestellt und diskutiert. Titandioxid wird seit geraumer Zeit zunehmend als effektive Schutzsubstanz gegen UV-Strahlung in verschiedenen Kosmetikprodukten eingesetzt. Nanoskaliges Titandioxid wurde im Wesentlichen aus zwei Gründen als Fallstudie gewählt. Erstens, weil es sich um eine offene Anwendung in großem Umfang handelt. Zweitens, weil sich an dem Einsatz der Substanz die Problematik der Bewertung der Effekte von neuen Nanomaterialien deutlich zeigt.

Der Einsatz ist wissenschaftlich umstritten. Titandioxid hat eine lange Tradition in der Verwendung als Bestandteil in Sonnencremes. Seit einiger Zeit wird nanoskaliges Titandioxid produziert und der Sonnenmilch zugesetzt.

Wie bereits erläutert, kann ein Stoff im Nanometermaßstab völlig verschiedene chemische, optische etc. Eigenschaften haben als das entsprechende Pendant im Mikrobereich. So ist z.B. Nano-Titandioxid transparent, während Mikro-Titandioxid weiß ist und deswegen zum Beispiel als Pigment für Wandfarben verwendet wird. Trotzdem ist nanoskaliges Titandioxid von den entsprechenden Regulierungsbehörden in den USA und der EU mit Mikro-Titandioxid gleichgesetzt worden (Food and Drug Administration 1999)(SCCNFP 2003).

Die Diskussion um nanoskaliges Titandioxid und dessen Wirkungen auch auf den menschlichen Organismus kann als exemplarisch für die Diskussionsprozesse um Nanotechnologien und deren Gefahren und Risiken gelten. Nanoskaliges Titandioxid wurde auch als Fallstudie gewählt, da es der Argumentationsmittelpunkt der etc. group ist, die ein weltweites Moratorium der Forschung mit Nanotechnologie fordert. Die NGO unterstreicht am Beispiel von nanoskaligem Titandioxid die vielfach von Wissenschaftlern geäußerten Bedenken im Hinblick auf mögliche Gefahren bzw. auf das Nichtwissen bezüglich des Umweltverhaltens. Gleichzeitig kritisiert die NGO die Gleichsetzung von makroskaligem und nanoskaligem Titandioxid. Damit würden die unterschiedlichen Verhaltenseigenschaften nicht hinreichend berücksichtigt.

Titandioxid gehört zu der Gruppe der physikalischen Lichtschutzfilter (auch anorganische oder mineralische Filter genannt). Dabei handelt es sich um Metalloxide, die das UV-Licht vor allem durch Reflexion und Streuung filtern. Hauptvertreter sind TiO_2 und ZnO. Sie sind biologisch und chemisch stabil und führen extrem selten zu Irritationen und phototoxischen und

photoallergischen Reaktionen. Nanoskaliges Titandioxid und Zinkoxid eignen sich aufgrund ihrer hohen Absorptionsfähigkeit von UV-Strahlen gut für den Einsatz in Kosmetika.

5.6.2.1 Gefährdung durch nanoskaliges Titandioxid

Die Kosmetikindustrie rechtfertigt die Verwendung von nanoskaligem Titandioxid in Sonnencreme mit eigenen Untersuchungen, die die Unbedenklichkeit von Titandioxid nachweisen. Die Sicherheit von nanoskaligem Titanoxid wurde ebenfalls im Oktober 2000 vom EU-Gremium Scientific Committee on Cosmetic Products and Non-food products intended for Consumers (SCCNFP) bestätigt. Das Komitee entschied, das nanoskaliges Titanoxid ebenso wie das größere Pedant in die Liste mit zugelassenen UV-Filtern für Kosmetikprodukte aufgenommen werden könne: „The SCCNFP is of the opinion that titanium dioxide is safe for use in cosmetic products at a maximum concentration of 25% in order to protect the skin from certain harmful effects of UV radiation. This opinion concerns crystalline titanium dioxide, whether or not subjected to various treatments (coating, doping, etc.), irrespective of particle size, provided only that such treatments do not compromise the safety of the product" (Europäische Kommission 2004). Grundlage für die Entscheidung des SCCNFP waren allerdings allein Industriestudien, die der Öffentlichkeit nicht zugänglich sind.

Beim Auftragen von Sonnenmilch mit nanoskaligem Titandioxid stellt sich die Frage, ob es bis zu den lebenden Zellen vordringt, an diesen andockt und entweder in den Zellen selbst Schaden anrichtet, oder noch tiefer in den Körper transportiert wird. Außerdem stellt sich die Frage, ob Titandioxid-Partikel unerwünschte Stoffe in den Körper hineinschleusen können. Colvin nimmt allerdings an, dass das von Titandioxid ausgehende Risiko wesentlich geringer ist als das vom Sonnenbaden selbst (Colvin 2003a).

Wissenschaftliche Untersuchungen zu beschichtetem, nanoskaligem Titandioxid kommen bei der Untersuchung der Applikation auf der Haut zu dem Ergebnis, dass der Hauptteil des Titandioxids durch Auftragen von Sonnencreme in den oberen Schichten der Haut (Stratum corneum) lokalisiert wird. Die Konzentration von Titandioxid in den oberen Schichten der Hornhaut nimmt mit der Zeit drastisch ab, da sich die Haut mit der Zeit regeneriert (abschuppt). In den tieferen Schichten der Haut nimmt die Konzentration der Titaniumdioxid Partikel allerdings wesentlich langsamer ab (Rickmeyer 2002).

Pflückner berichtet, dass beschichtetes, nanoskaliges Titandioxid in Haarfollikeln nachgewiesen werden kann, die in tieferen Hautschichten liegen. Allerdings gibt es in seinen Untersuchungen keine Hinweise dafür, dass sie von den Follikeln aus in lebende Zellen vorgedrungen wären (Pflücker et al. 2001). Diese Untersuchung bestätigt die Ergebnisse älterer Untersuchungen (Lademann et al 1999). Rickmeyer berichtet, dass in dem die Follikel umgebenden Gewebe nur ganz minimale Konzentrationen von beschichtetem Titandioxid nachgewiesen werden konnten. Ein Kontakt mit lebenden Zellen kommt ihren Ergebnissen zu Folge nur „in verschwindend geringem Umfang zustande" (Rickmeyer 2002). Bennat/ Müller-Groymann berichten, dass nanoskaliges Titandioxid in fetten Lösungen besser in die Haut eindringen kann als in wässrigen Lösungen und schließen die Möglichkeit eines Eindringens der Partikel in die tieferen Schichten der Haut nicht aus (Bennat/ Müller-Groymann 2000).

Tinkle et al. berichten allerdings, dass Beryllium Partikel bereits in der Größe von einem halben bis einem Mikrometer beim Verreiben auf der Haut bis zur Epidermis und in seltenen Fällen zur tiefer liegenden Dermis vorgestoßen sind und so mit lebenden Zellen in Kontakt gekommen

sind (Tinkle et al. 2003). Dieses Ergebnis sagt zwar nichts über die Wirkungen von Titandioxid auf die Haut aus, unterstreicht aber, dass neben der Partikelgröße auch die Stoffklasse bei der Beurteilung möglicher Effekte einzubeziehen ist.

Die Sicherheit von Titandioxid in Nano-Größe wird allerdings an anderer Stelle in Frage gestellt. Ein Bericht der Royal Society of Engineering weist beispielsweise darauf hin, dass durch die Verkleinerung der Partikelgröße an der Oberfläche von Titandioxid die Anzahl der freien Radikale zunimmt, die möglicherweise die Haut beschädigen können (Royal Academy of Engineering 2003). Gestützt wird diese Ansicht durch eine Untersuchung von Dunford et al. sowie Uchino et al., die berichten, dass nanoskaliges Titandioxid bei Bestrahlung durch Sonnenlicht sowohl in vitro als auch bei menschlichen Zellen durch Photokatalyse die DNA von Zellen beschädigt (Dunford et al. 1997; Uchino et al. 2002; Colvin 2003a). Rickmeyer geht davon aus, dass durch eine Beschichtung diese photokatalytischen Effekte drastisch reduziert werden können, jedoch nicht ganz zu verhindern sind (Rickmeyer 2002). Außerdem ist bekannt, dass nanoskaliges Titandioxid Zelltod in den Embryonen von syrischen Hamstern verursacht (Rahman et al. 2002).

5.6.2.2 Expertenbefragung

Im Rahmen der Expertenbefragung ergaben sich eine ganze Reihe neuer, bislang unbeachteter Aspekte im Zusammenhang mit dem hier betrachteten Fall. Gefragt nach möglichen negativen Effekten von nanoskaligem Titandioxid, gaben die Experten folgende Antworten: Die meisten Experten waren der Meinung, es gebe keine Anzeichen dafür, dass nanoskaliges Titandioxid alle Hautschichten durchdringt. Nur ein Experte betrachtete das Problem grundsätzlich skeptischer, ohne allerdings neue Hinweise zu liefern. Einigkeit bestand bei folgenden Problemen: Es fehlen Untersuchungen zur Applikation an Wunden und bei Personen mit Hautallergien. Es fehlen Untersuchungen zur Applikation von entzündeter und (sonnen-)verbrannter Haut. In beiden Fällen ist der direkte Kontakt von Nano-Titandioxid mit Blut und/oder lebenden Zellen möglich. Studien über eventuellen Verbleib der Partikel im Körper, besonders bei Babys und Kindern, seien nötig. Vorsicht sei immer noch geboten. Ein Experte unterstrich: Mit elektrophilen, öligen Molekülen beschichtet, kann nanoskaliges Titandioxid leicht in die Haut eindringen.

5.6.2.3 Zusammenfassung

Die Fallstudie über die Verwendung von nanoskaligem Titandioxid in Sonnenmilch illustriert die Probleme zukünftiger Anwendungen von Nanotechnologie. Die Sicherheit des Einsatzes wird von manchen Experten bezweifelt. Gleichzeitig fehlt eine Reihe von wichtigen Untersuchungen zur Wirkung von Nano-Titandioxid am menschlichen Körper, auch wenn die Hauptanwendung, das Auftragen auf gesunder Haut nach jetzigem Kenntnisstand unproblematisch erscheint. Ebenfalls problematisch ist, dass es sich um eine offene Anwendung handelt. Es ist bislang nicht geklärt, wie sich die Substanz in der Natur verhält, wenn sie durch den natürlichen Abschuppungsprozess die Haut verlässt. Bei bereits aufgetretenen Problemen durch Rückstände von Sonnencreme an Meeresufern und in Seen ist dieses mögliche Problem nicht zu unterschätzen. Ebenfalls problematisch ist nanoskaliges Titandioxid, weil es bereits in großen Mengen hergestellt wird und keine Aussagen über mögliche Gefahren in den Produktionsstätten vorliegen. Offen ist auch die Frage nach der Wirkung von Beschichtungen. Sollte sie etwa tatsächlich katalytischen Wirkungen vorbeugen, ist noch ungeklärt, wie lange die

Beschichtung stabil ist oder wie sie in einer anderen Umgebung als der menschlichen Haut reagiert.

Problematisch an der EU-Gleichsetzung von Mikro- und Nano-Titandioxid ist, dass sie mögliche nachgelagerte Umwelteffekte nicht berücksichtigt. Gleichzeitig sind letzte Zweifel an der Sicherheit des Stoffes noch nicht ganz ausgeräumt. In diesem Sinne könnte man die nach dem Vorsorgeprinzip sinnvolle Richtlinie, offene Anwendungen zu vermeiden, aufheben, wenn man wie im Fall Nano-Titandioxid bereits über grundlegende Erkenntnisse verfügt.

5.6.3 Lebenszyklusanalyse von Nanomaterialien

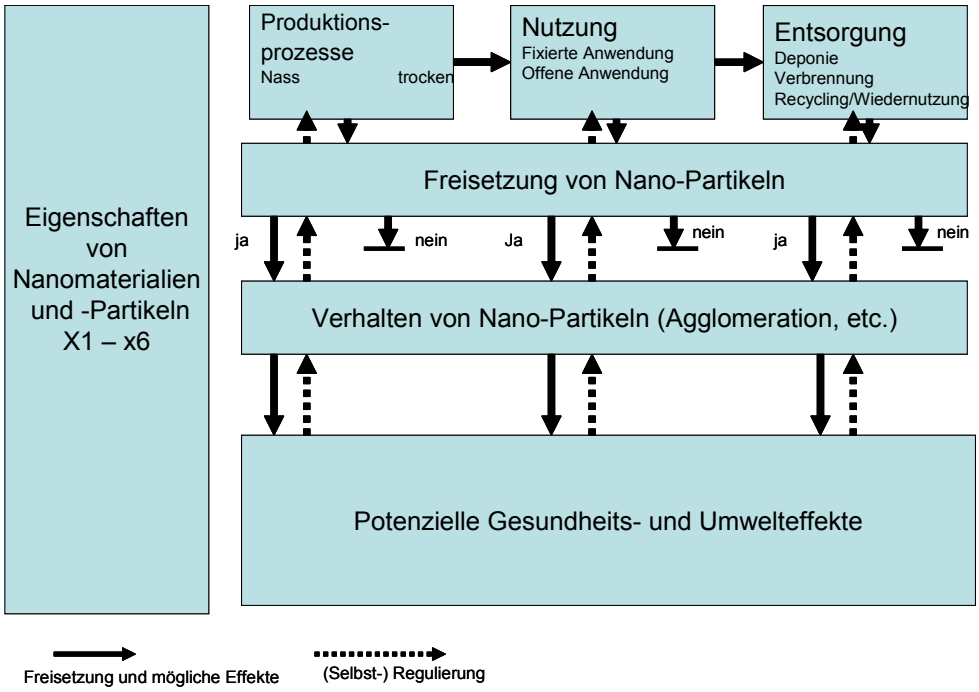
Wie bereits bemerkt, können mögliche Schäden durch Nanopartikel besonders bei offener Verwendung auftreten. Ein Blick auf den Lebensweg von Nanomaterialien zeigt:

1. *Produktionsprozesse* von Nanomaterialien unterscheiden sich deutlich. Industriell gefertigte Nanomaterialien sind meist nicht durch Verbrennungsprozesse erzeugt (außer CVD/DVD und Flame Assisted Deposition), sondern hauptsächlich in flüssigen oder geschlossenen Gasphasen Reaktoren (phase reactors). Direkte Belastung mit Nanomaterialien dürfte deswegen begrenzt sein. Problematisch sind Belastungen am Arbeitsplatz, auch in Forschungslaboren und mögliche Belastungen von Mensch und Umwelt durch Unfälle.

2. Produkte: Die meisten Nanopartikel sind in Produkte eingeschlossen oder fixiert. Beispiele hierfür sind Nanotubes in Bildschirmen oder Partikel in Lacken. Die Möglichkeit der Freisetzung ist vermutlich klein.

3. Das Verhalten während der *Entsorgung und Wiederverwendung* ist bis jetzt nicht gut erforscht, aber die Freisetzung von einzelnen Nanopartikeln dürfte begrenzt sein. Es muss aber beachtet werden, dass nur sehr vorläufiges Wissen hinsichtlich dieses Problems existiert.

Abbildung 53: Mögliche Freisetzungswege von Nanopartikeln



Quelle: IÖW

Im Rahmen der durchgeführten Befragung wiesen die meisten Experten auf mögliche Risiken entlang des Lebensweges hin. Als mögliche Problemquellen wurden Belastungen am Arbeitsplatz, Unfälle bei Herstellung und Transport sowie Umweltbelastungen durch Industrieabfälle genannt. Bei möglichen Verseuchungen durch Unfälle sei noch völlig unklar, wie sich die einzelnen Nanomaterialien auf die betroffenen Öko-Systeme sowie auf den Menschen auswirken. Die Probleme werden sich erhöhen, wenn zukünftig mehr Konsumgüter produziert werden, die weniger aufwendig oder gar nicht auf ihre Wirkungen getestet werden müssen. Eng zusammen mit der Frage nach Auswirkungen von Unfällen und Abfällen sowie der Entsorgung hängt die Frage der Biopersistenz. Sie ist für einige Nano-Anwendungen notwendig, etwa, wenn sie in gezielten Bereichen des Körpers ihre Wirkungen entfalten sollen. Zur Abschätzung von Langzeiteffekten lägen aber noch nicht genügend Erkenntnisse vor.

Ein Experte bemerkte in diesem Zusammenhang, dass ein Großteil der zukünftigen Produktion von Nanomaterialien in Reinraumbedingungen stattfinden würde, was die Belastung von Angestellten in der Produktion verringern würde. Momentan ist aber noch völlig unklar, ob, wie und in welchen Höhen Fabrikarbeiter oder Forscher in Laboren Partikeln ausgesetzt sind. Produktionsunfälle stellen aber nach wie vor eine mögliche Gefahr dar. Ebenfalls bemerkte ein Experte, dass auf Grund der momentan noch geringen produzierten Mengen an Nanopartikeln die Risiken durch Belastungen am Arbeitsplatz in der Summe eher klein seien.

Im Bereich der medizinischen Anwendungen gehen Experten aber davon aus, dass die bestehenden Testverfahren mögliche Risiken aufdecken würden, bevor es zu einer Massenproduktion käme. Für Konsumgüter träfe dies aber nicht zu, was die Gefahr mit sich brächte, dass Tests erst nach dem ersten Auftreten von toxischen Risiken durchgeführt würden. Durch die zukünftige Massenproduktion bestünde zusätzlich zum ersten Mal die Möglichkeit, dass größere Teile der Bevölkerung Nanomaterialien ausgesetzt seien.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass

- die meisten Produktionsverfahren in geschlossenen Systemen stattfinden
- Partikel vielfach fest in die Produkte integriert und Risiken damit begrenzt sind
- die Frage der Entsorgung und Wiederverwendung offen ist
- unbeabsichtigte Freisetzung problematisch ist

Für neue oder veränderte Produktionssysteme müssen diese Aussagen möglicherweise modifiziert werden.

5.6.4 Diskussion

Das Verhalten von Nanopartikeln unterscheidet sich von Materie auf der Makro-Ebene, das gilt auch bei Gleichheit der Stoffe. Einige der oben besprochenen Studien dokumentieren überraschendes Verhalten. Wie bisher gezeigt, gibt es eine Reihe von ernst zu nehmenden Verdachtsmomenten und eindeutigen Hinweisen über toxische Wirkungen von Nanomaterialien und besonders Nanopartikeln auf die Umwelt und menschliche Gesundheit. Besondere Bedeutung kommen Nanotubes und Buckyballs zu.

Alle bisher produzierten wissenschaftlichen Erkenntnisse sind aber vorläufig, teilweise widersprüchlich und beziehen sich nur auf einen Bruchteil von möglichen Effekten. Gleichzeitig

scheint die Übertragbarkeit des bisher gewonnenen Wissens gering. Die Befragung der Experten ergab weiterhin, dass das Wissen momentan zu lückenhaft zur Durchführung von Risikobewertung und –management ist.

Auf die Frage, ob man verallgemeinerbare Aussagen zur Toxizität von Nanopartikeln treffen könne, gaben die Experten in erster Linie negative Aussagen. Es sei momentan zu früh, um Gruppen oder Kategorien von Nanomaterialien zu bilden, über die man gemeinsame Aussagen hinsichtlich negativer Effekte treffen könnte. Eine Klassifikation sei erst dann möglich, wenn man wüsste, welche Eigenschaften der Nanopartikel für toxische Effekte verantwortlich sind. Wiederholt wurde die Aussage, dass kleinere Partikel in der Regel toxischer seien als größere, da ihre Oberfläche im Verhältnis zum Volumen größer sei. Allerdings müsse auch hier immer die chemische Zusammensetzung und die physikalische Struktur beachtet werden. Ein Experte schränkte sogar diese Regel auf Partikel ein, die über eine niedrige Lösbarkeit verfügen. Ein Experte hielt eine Klassifizierung für möglich nach

- Biopersistenz
- biologisch verfügbarer Oberfläche und
- Aggregationsverhalten in verschiedenen Milieus

Diese Art der Kategoriebildung beinhaltet die größten bisher bekannten Gefahrenpotenziale und ist auch als Richtschnur für zukünftige Forschung sinnvoll.

Neben der Unsicherheit über mögliche negative Effekte lässt sich aber auch feststellen, dass das Eintreten von negativen Effekten durch industriell hergestellte Partikel momentan vergleichsweise gering ist. Daraus ergibt sich unmittelbar der Bedarf weiterer Forschung hinsichtlich des Verhaltens und möglicher Effekte von Nanopartikeln im Falle einer Freisetzung. Da generelle Aussagen momentan nicht möglich sind, besteht ein ebenso dringender Bedarf nach Klassifizierung.

Mehrere Experten merkten im Rahmen der Befragung an, dass die Möglichkeiten von nanotechnologischer Entwicklung immens seien. Entwicklungsanstrengungen bereits jetzt auf Grund berechtigten Verdachts möglicher Toxizität einzustellen, stünde aber in keinem Verhältnis zu den erwarteten Gewinnen durch Nanotechnologie. Vielmehr solle darauf geachtet werden, dass schon jetzt die wissenschaftlich gesicherte Grundlage für Risikobewertung und Risikomanagement gelegt wird.

Da die Erforschung von Nanopartikeln noch in den Kinderschuhen steckt, können nur sehr allgemeine Hinweise zum Umgang mit Nanomaterialien gegeben werden:

- Die Unterschiede in Größe, Oberflächenstruktur und chemischer Zusammensetzung verlangen, dass mögliche Effekte auf menschliche Gesundheit und Umwelt für jedes Nanomaterial einzeln untersucht werden.
- Es gibt einen großen Bedarf an Klassifikation.
- Eine offene Anwendung eines bestimmten Nano-Stoffes sollte vermieden werden, bis mögliche Effekte bekannt sind. Dies gälte momentan für die große Mehrzahl der Stoffe.

- Biodegreabilität könnte ein Weg sein, Gefahren für die Umwelt (Ökotoxizität) zu vermeiden.
- Die Freisetzung von Nanopartikeln sollte vermieden werden.
- Das Verhalten bei Freisetzung auch im Rahmen von Entsorgung sollte erforscht werden.

Von Bedeutung in diesem Zusammenhang ist die Entwicklung eines strategischen Forschungskonzepts, dass einerseits die nötigen Mittel bereit stellt, andererseits die Balance zwischen technologischer Entwicklung und Verständnis von Effekten herstellt. Dies würde bedeuten, dass beide Forschungsrichtungen besser verzahnt werden. Ein Experte schlug ein umfassendes Konzept zur Untersuchung und Bewertung von möglichen Gefahren vor:

„Der dringendste Handlungsbedarf hinsichtlich einer Regulierung liegt meines Erachtens in der Entwicklung eines neuen strategischen Konzepts zur toxikologischen Bewertung nicht nur des Aufnahmeortes /-organs sondern auch der sekundären Zielorgane. Dieses Konzept sollte auf modernen genomischen, proteomischen und toxikonomischen Untersuchungen mit High-Throughput Technologie beruhen. Dieses Konzept würde nicht nur eine umfassendere Bewertung und spezifischere Regulierung eines neuen Produktes gewähren, sondern auch dem Hersteller im Kontakt mit den entsprechend ausgestatteten toxikologischen Labors eine zeitnahe Risikoabschätzung liefern.

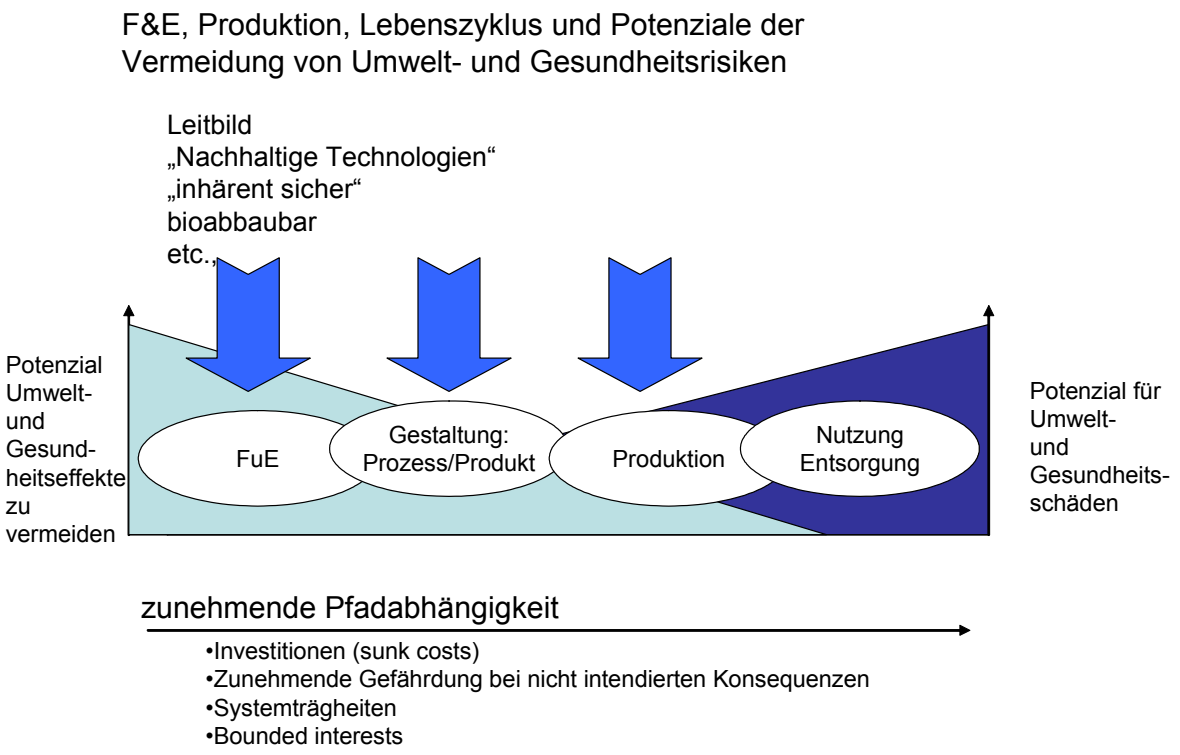
Ein solches strategisches Konzept sollte interaktiv zwischen Forschung, Herstellern und Behörden entwickelt werden, das vorbildlich für die Europäische Union sein könnte. Damit könnte Deutschland auch auf dem Sektor der nachhaltigen Entwicklung neuer Nanoprodukte weiter seine Führungsrolle ausbauen.“

Grundsätzlich scheint es wichtig, einerseits die Grundlagen der Wirkungen von Nanopartikeln zu verstehen, andererseits muss verstärkt dort geforscht werden, wo größere Produktionsmengen absehbar sind. Die Hinweise der Experten auf Verseuchungen durch Unfälle bei Fabrikation und Transport unterstreichen die Dringlichkeit. Eine weitere Fokussierung der Forschung ergibt sich aus der Beantwortung der Frage, ob eine bestimme Nanotechnologie zur offenen Verwendung geplant ist. Wenn ja, so ist sie zuerst oder intensiver zu erforschen.

6 Gestaltende Ansätze für eine nachhaltige Nanotechnologie

Technologieentwickung ist nicht oder doch nur sehr begrenzt durch politische Interventionen steuerbar, vielmehr ergibt sich aus dem Zusammenwirken unterschiedlichster Akteure eine Pfadentwicklung der Technologie die gestaltend begleitet werden kann u.a. durch das Arbeiten mit Leitbildern als Steuerungsinstrumenten. Da sich die Nanotechnologien im Grundsatz noch in einer Frühphase der Entwicklung befinden, existieren mithin zumindest grundsätzlich noch große Freiheitsgrade, um den Suchraum für nanotechnologische Innovationen in eine „nachhaltige“ Richtung zu lenken.

Abbildung 54: Zeitfenster der Gestaltung im Lebenszyklus



Quelle: Haum et al. (2004)

Die Graphik verdeutlicht, dass entlang des gesamten Prozesses von der Grundlagenforschung über die angewandte Forschung, die Gestaltungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase phasentypische Vorsorgeoptionen entwickelt und generiert werden können und müssen, die jeweils auch als Folgenforschung angelegt werden können. In den unterschiedlichen Phasen sind jeweils unterschiedliche Akteure (mit-) verantwortlich. Dies kann bereits in der Phase der Grundlagenforschung beginnen (Wissenschaftsfolgenforschung), deren Ergebnisse in der Folge zu Forschungs- und Entwicklungsbemühungen im Bereich der angewandten Forschung

führen[43]. Nach unserer Auffassung besteht in diesen frühen Phasen die relativ größte Möglichkeit potenzielle Umwelt- und Gesundheitsrisiken zu vermeiden.

Wesentlich ist, dass in diesen Kontexten bereits Wissen um die möglichen Wirkungen erfasst und wiederum in die Forschungsorientierungen mit einbezogen werden kann. Im Bereich der Nanotechnologien sind in dieser Hinsicht die „foresight guidelines“ des Foresight Institutes (2001) zu nennen. Es wäre allerdings wichtig, dass über den Extremfall hinaus, auf den die „foresight guidelines“ abzielen, weitere Aspekte mit einbezogen werden würden, die ähnlich wie die „foresight guidelines“ Konstruktionsorientierungen vorgeben im Sinne von „sustainability guidelines“.[44]

Die Phase der Gestaltung von Produktionsprozessen und Produkten ist bereits in dem Sinne präformiert, als dass sie die FuE zur Grundlage haben. Die Prozess- und Produktgestaltung hat gleichwohl noch relativ viele Freiheitsgrade, die entscheidend für den Aspekt der „Eigensicherheit“ und für die Belastungen in den Folgephasen sind. Die Gestaltungsoptionen sind begrenzter, gleichwohl in großem Umfang noch vorhanden.

Die Gestaltungsoptionen nehmen dann über den Produktionsprozess, die Nutzungsphase bis schließlich zur Entsorgung deutlich ab. Oft können zu diesem Zeitpunkt alleine additive Maßnahmen noch greifen, indem die Prozesse und Produkte bspw. entsprechend der Gefahrstoffklassen in den Sicherheitsdatenblättern gehandhabt oder Vorschriften bzgl. der Entsorgung eingehalten werden.

In den aufeinander folgenden Phasen haben zudem unterschiedliche Akteuren Einfluss auf die Entwicklung. Sie sind mit verschiedenen Einflussmöglichkeiten an der Gestaltung beteiligt, und tragen damit entscheidend zu den potenziellen Wirkungen der Technologien, Prozesse und Produkte bei. Für ein Wertschöpfungsketten übergreifendes Qualitätsmanagement, in das die Sicherheits-, Gesundheits- und Umweltaspekte von Anfang an integriert sind, wäre allerdings eine Wertschöpfungsketten übergreifende Kommunikation nötig. Diese Kommunikationsströme zwischen den unterschiedlichen Akteuren sind allerdings vielfach nicht vorhanden, es sei denn, es handelt sich um Großunternehmen mit übergreifenden Managementsystemen oder Unternehmen zwischen zwei hintereinander liegenden Produktionsstufen. Die Kommunikation zwischen möglichen Betroffenen am Ende des Produktzyklus und denjenigen am Anfang ist vielfach nicht oder nur begrenzt entwickelt.

Im Grundsatz geht es darum, dass der Informationsaustausch entlang der Produktionskette entwickelt wird, dies gilt insbesondere im Hinblick auf neuartige Produkte und Substanzen, über die bislang noch wenig Informationen vorliegen und bei denen, wie im Falle von Nanopartikeln, die gängigen Risikoabschätzungsverfahren noch nicht greifen, die also aus den gängigen Regulierungsrastern herauszufallen drohen.

---

[43] Dies stellt eine typisierende Betrachtung dar, eine klare Trennung zwischen Grundlagenforschung und angewandter Forschung ist nicht möglich, eine Unterscheidung mit Blick auf die jeweils primär verfolgten Ziele allerdings schon.

[44] Da Sustainability zum einen auf Leitplanken zum anderen auf Prozesse zielt, dürften einfache guidelines allerdings nicht ausreichen, vgl. die Diskussion zu dem Leitbild Nanobionik.

Damit geht es insbesondere auch um die Flexibilität und Öffnung vielfach geschlossener sozialer Systeme, die in die Lage versetzt werden müssen, die Herausforderungen anzunehmen und mit Unsicherheiten verantwortungsbewusst umzugehen.

Neben der wissenschaftlichen und technischen Pfadgestaltung ist zudem der Aspekt von Bedeutung, der von den getätigten Investitionen und von dem in bestimmten Technologie-, Prozess- und Produktlinien gebundenem Know-how und Wissen ausgeht, auch hier sind Pfadverfestigungen im Zeitablauf festzustellen (sunk costs).

Damit kommen unterschiedlichste Institutionen und Akteurskreise in den Fokus, die einzeln nur begrenzte Handlungsmöglichkeiten besitzen, die aber durch Kooperation ihre Einflussmöglichkeiten wesentlich verbessern können. Im Grundsatz handelt es sich um ein Governanceproblem, in welchem vielfach der Einfluss unterschiedlicher Akteure im Gestaltungsprozess nicht eindeutig zuzuordnen ist. Die Folgen von Innovationen der Nanotechnologien sind, wie beschrieben, nur begrenzt vorhersehbar. Die Steuerungsmöglichkeiten politischer Akteure werden durch die Eigendynamiken gesellschaftlicher Subsysteme begrenzt. Entscheidend ist es von daher, dass diese Subsysteme reflexiver gestaltet werden, so dass sie sich weniger abschotten und auf Unsicherheiten (auch normativer Art) problemlösend reagieren können.

Aus dieser Perspektive sollen nun konkrete Gestaltungsansätze sowohl **akteursübergreifender** als auch **akteursspezifischer** Natur abgeleitet werden.

6.1 Akteursübergreifende Gestaltungsansätze

Unter akteursübergreifende Ansätzen fassen wir solche Ansätze zusammen, die der Kooperation zwischen unterschiedlichen Akteuren bedürfen. In der Folge gehen wir auf Einflussmöglichkeiten durch Leitbildentwicklung (Leitbilder unterschiedlicher Reichweite), durch technologische road maps und durch neuere Verfahren der Technikfolgenabschätzung ein und skizzieren deren möglichen Beitrag zur Technologiegestaltung. Road maps, wie sie z.B. aus der Informations- und Kommunikationstechnik bekannt sind, werden in vorwettbewerblicher Kooperation von Unternehmen einer Branche erarbeitet. Sie verbessern die Durchschlagskraft, die Voraussetzungen für Standardisierungen und schaffen so etwas mehr Planungssicherheit. Auf der Basis eines weiter gefassten Qualitätsverständnisses ist es inzwischen nichts Ungewöhnliches mehr, wenn in diesen road maps auch Angelegenheiten des Verbraucher-, Gesundheits-, Arbeits- und Umweltschutzes mit aufgenommen werden. In der Regel sind die road maps aber noch stark von den sich durch neue Technologien eröffnenden Möglichkeiten geprägt (technology push Innovationen). Verfahren und Prozesse zur Leitbildentwicklung sind hingegen stärker darauf ausgerichtet, „positive“ Leitbilder zu entwickeln, die geeignet sein können, die Entwicklungsrichtung zu beeinflussen, im Sinne einer „nachhaltigen“ Technologieentwicklung (demand bzw. problem pull Innovationen).

Leitbilder spielen eine wichtige Rolle bei der Herausbildung und Stabilisierung wissenschaftlicher Paradigmen und technischer Entwicklungspfade, das konnte die Wissenschaftsforschung, die Technikgeneseforschung und die Innovationsforschung zeigen (vgl. Kuhn 1975, Dosi 1982, Bijker u. a. 1987, Dierkes u. a. 1992, Dierkes 1997, Mambrey u. a. 1995, Hellige 1996, David 1985, 2000). Gerade in der NanoTechnoScience war und ist zudem der besonders hohe Stellenwert von Leitbildern und Visualisierungen von Anfang an unübersehbar und längst Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen (vgl. Baird 2003, Robinson 2003, 2004 Nordmann 2003, 2004).

Ob und inwiefern Leitbilder tatsächlich ‚gezielt’ und quasi instrumentell eingesetzt werden können, zur Beeinflussung bzw. Gestaltung von Technologien ist noch umstritten (vgl. dazu z. B. Mambrey u. a. 1995, Hellige 1996, Meyer-Krahmer 1997). 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, Blättel-Mink 2001, KPMG 1999). Fragen nach der gezielten Einsetzbarkeit von Leitbildern lassen sich allerdings nur begrenzt allein theoretisch beantworten. Hier käme es auf einen Versuch an, auf einen systematisch angelegten Feldversuch.

Wer mit Hilfe von Leitbildern Einfluss nehmen und gestalten möchte, muss zunächst 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, ihre Leitfunktion sowie der Bezug zu Wünschen und Machbarkeiten gleichermaßen, kurz gesagt ihre Resonanzfähigkeit im Bewusstsein der Akteure. Die Bildhaftigkeit hat einen hohen Stellenwert für die Anschaulichkeit und die damit verbundene Komplexitätsreduktion. Die Leitfunktion wirkt über ihren emotionalen

und Wertegehalt, sie wirkt motivierend und orientierend. Ein Beispiel für ein wirksames technikorientiertes Leitbild auf mittlerer Konkretisierungs- und Operationalisierungsebene ist ohne Zweifel das Konzept der ‚Kreislaufwirtschaft'. Auch Bionik (Vorbild Natur) und im englischsprachigen Raum ‚green chemistry' haben eine starke Wirkung entfaltet[45].

6.1.1 Leitbilder einer nachhaltigen Nanotechnologie mit unterschiedlichen Reichweiten

Mit dem Leitbild einer nachhaltigen Nanotechnologie wird 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. In der derzeitigen Phase, in der die Nanotechnologie vor allem einer technologiegetriebenen Entwicklungsdynamik folgt (technology push Innovationen), dürfte ein derartiger Ansatz durchaus angemessen und Erfolg versprechend sein. Alternative bzw. konkurrierende Herangehensweisen wären die problemorientierte und die bedürfnisfeldorientierte. Bei der problemorientierten Herangehensweise würden z.B. 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 der Probleme zu erwarten wäre. Ähnliches gilt auch für den Bedürfnisfeldansatz, bei dem z.B. unter dem Ziel eines ‚nachhaltigen Bauens und Wohnens' nach einem möglichen Beitrag der Nanotechnologie gefragt würde. Erweiterungen des gewählten technologieorientierten Ansatzes in Richtung Bedürfnisfeld- und Problemorientierung sind aber ohne weiteres durch Fokussierung auf bestimmte Einsatzbereiche möglich, d.h. auf nachhaltige Anwendung bzw. nachhaltigen Einsatz von Nanotechnologie z.B. im Leichtbau von (recyclingfähigen) Fahrzeugen auf der Basis von durch Nanofasern verstärkten Werkstoffen.

An erfolgreiche Leitbilder einer nachhaltigen Nanotechnologie werden die in Kapitel 3.3 schon ausführlicher vorgestellten Anforderungen gestellt: sie sollen bildhaft und anschaulich sein, sie sollen motivieren, indem sie die Werte bzw. Zielebene ‚transportieren' und sie sollten auf den realen Möglichkeiten der Nanotechnologie aufbauen, also einen Bezug zur Machbarkeit haben. Hilfreich für eine etwas systematischere Herangehensweise ist sicher eine Unterscheidung nach den zeitlichen Reichweiten derartiger Leitbilder mit Bezug sowohl zur Zielperspektive als auch zu konkreten technischen Potenzialen und Machbarkeiten. Das könnte mit defensiven und möglicherweise kurzfristig realisierbaren Potenzialen der Risikominimierung bzw. Schadensvermeidung beginnen, über mittelfristige Entwicklungs- und Planungshorizonte, wie sie bspw. in den ‚technological road maps' vorausschauender Unternehmen und Branchen formuliert werden, bis hin zum utopischen (idealen) langfristigen Entwurf führen.

Im kurzfristigen Zeithorizont kann aus der gegenwärtigen Debatte heraus das Leitbild ‚*Ressourceneffiziente Nanotechnologie*' abstrahiert werden. Im mittelfristigen Zeithorizont lässt sich das Leitbild ‚*Konsistente*[46] *und eigensichere Nanotechnologie*' formulieren und im

---

[45] Vgl. Ahrens; von Gleich 2002

[46] Konsistenz soll hier verstanden werden als die qualitative und quantitative Einbettung des gesellschaftlich-technischen Stoffwechsels in den natürlichen (Huber 2001). Dies kann 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

langfristigen das Leitbild ‚*Nanobionik*'. Diese Leitbilder repräsentieren unterschiedliche Reichweiten und Strategien[47]. Sie bauen aufeinander auf, indem die längerfristigen Leitbilder immer auch die Ziele der kurzfristigen mit beinhalten. Die Nanobionik soll demnach auch die Anforderungen der Ressourceneffizienz, der Konsistenz und der Eigensicherheit erfüllen.

Die Formulierung von derartigen Leitbildern, mit denen Erwartungen an die Beeinflussung von Technikentwicklungslinien verbunden sind, kann nur als Mischung aus kreativem Akt einerseits und Abstraktion aus dem schon Vorfindbaren andererseits funktionieren, also in einem empirisch-synthetischen Wechselverhältnis auf der Basis von Dialog und Kommunikation. Das bedeutet, dass einerseits die im Leitbild tragenden Begriffe an laufenden Debatten bzw. schon wirkenden Leitorientierungen anknüpfen müssen. Andererseits können (und müssen ggf.) bei der gezielten Ausarbeitung von Leitbildern auch beträchtliche Differenzen zu aktuell vorfindbaren Orientierungen zu Tage treten. Erfolgreiche Leitbilder enthalten wichtige Momente von Überraschung und Irritation. Und schließlich muss auf die Gefahr hingewiesen werden, dass real existierende Zielkonflikte und auch real existierende Interessenskonflikte auf der Leitbildebene eher verschleiert als geklärt werden.

Beim Leitbild der *‚ressourceneffizienten Nanotechnologie'* steht eine auf den Produktlebenszyklus bezogene Betrachtung im Zentrum. Umwelt- und Ressourcenentlastungspotentiale in der Gebrauchsphase sollen nicht durch extrem aufwendige Herstellung oder durch Probleme bei Recycling oder Entsorgung konterkariert werden. Teil des Leitbildes sind damit auch umweltentlastende Herstellungsverfahren[48]. Auch die Nano-Umwelttechnik, also ihr ‚End-of-the-Pipe-Einsatz' in der Abgas- und Abwasserreinigung und in der Altlastensanierung sind hier zu integrieren[49].

Wesentliche Elemente einer *‚konsistenten und eigensicheren Nanotechnologie'* wären z.B. der Einsatz ‚eigensicherer Stoffe' im Rahmen einer ‚eigensicheren Technik' im Rahmen ‚eigensicherer Anwendungssysteme'. Einer unkontrollierten Ausbreitung von Nanopartikeln könnte 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 (z. B. durch geringe Wasser- oder Fettlöslichkeit), iv) Beschränkung auf ‚geschlossene Anwendungen' (Vermeidung umweltoffener Anwendungen, sehr gutes Containment) und schließlich v) Vermeidung einer möglichen Selbstvermehrung[50].

Stoffen), aber auch durch einen besonders effektiven Abschluss der Technosphäre gegenüber der Ökosphäre. Letzteres ist durch ‚geschlossene' Anwendungen und bestes Containment und durch möglichst weitgehendes und hochwertiges Recycling zu realisieren (vgl. z.B. McDonough & Braungart 2002).

[47] Z.B. in Anlehnung an die Unterscheidungen zwischen nachsorgendem Umweltschutz, integriertem Umweltschutz und nachhaltigem Wirtschaften bzw. zwischen Effizienz- und Konsistenzstrategie.

[48] Im Sinne des prozessintegrierten Umweltschutzes, einer ‚green chemistry' oder einer ‚clean nanotechnology'.

[49] Ein Großteil der 62 Vorträge, die auf dem 227th ACS National Meeting in Anaheim vom 28. 3 - 1.4. 2004 unter dem Oberthema ‚Nanotechnology and the Environment' gehalten wurden, repräsentieren derartige Projekte, in denen auf den Beitrag der Nanotechnologie zum Umweltschutz (sowohl nachsorgend als auch integriert) abgehoben wird, vgl. http://oasys2.confex.com/acs/227nm/techprogram/

[50] Zu allen Punkten gibt es in der Nanotechnologiedebatte schon Vorschläge und Leitlinien. So hat Merkle schon vor der durch Joy ausgelösten Diskussion eine ‚inhärent sichere' Architektur der selbstreplizierenden Nanobots vorgeschlagen (broadcast architecture, vgl. (Merkle 1994)). Interessant sind in diesem Zusammenhang auch die ‚development principles' und 'design guidelines' in den ‚Foresight Guidelines on Molecular Nanotechnology'

Bei den weit reichendsten Visionen, welche die Entwicklung der Nanotechnologie von Anfang an begleitet haben, sind zwei vergleichsweise divergente Linien zu unterscheiden. Dies ist zum einen die viel zitierte Vision einer vollständigen Kontrolle, einer kontrollierten technischen Konstruktion ‚Atom bei Atom'. Es handelt sich dabei um die Verlängerung des Kontroll- und Präzisionsansatzes aus der Makrowelt, über die Mikrowelt (Halbleitertechnik, Mikrosystemtechnik) bis in den Nanobereich hinein. Dieser ‚mechanischen' top-down Herangehensweise steht ein insbesondere von der Biologie und der Systemtheorie inspirierter ‚biologischer' bottom-up-Ansatz gegenüber. In ihm wird auf die Selbstorganisationsfähigkeit der (belebten) Natur gesetzt. Durch Strukturdesign, das auf der Ebene der Atome einsetzt, können durch Nanotechniken die erreichbaren Werkstoffeigenschaften und Anwendungen revolutioniert werden. Dabei können die in der Natur seit Jahrmillionen erprobten biologischen Wirkprinzipien übertragen werden, um auch anorganische Werkstoffe und Bauteile ‚wachsen' zu lassen. Wenn es gelänge, sich mit derartigen objektimmanenten Tendenzen und Fähigkeiten zu verbinden, könnte ein erheblicher Teil des Energie-, Stoff-, Kontroll- und Steuerungsaufwandes vermieden werden, der mit der mechanischen Vision notwendigerweise verbunden ist. Als zentrales Element des Leitbildes *Nanobionik* kann somit die Ausnutzung von bzw. die Kooperation mit Selbstorganisationsprinzipien in der Natur formuliert werden[51]. Letztere sind nicht auf den organischen Bereich beschränkt. Induzierte und gerichtete Kristallisationen oder templatgesteuerte Strukturbildungen gehören zu den faszinierendsten Beispielen im anorganischen Bereich (vgl. z. B. Singh et al 1995, Niesen; Aldinger 2001). Techniken, die auf der Fähigkeit von Molekülen zur gerichteten Reaktion, Ausrichtung, Bewegung, Kombination und auf der Fähigkeit von Zellen, Organismen und Ökosystemen zur Selbstorganisation und Homöostase aufbauen, gehören zu den vielversprechendsten Perspektiven der Nanotechnologie, auch unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten[52]. Selbstorganisationseffekte bilden zusammen mit der Exergiequelle Sonne die Grundprinzipien der Evolution und Ontogenese. Im Leitbild Nanobionik vereinigen sich z. T. geistesgeschichtlich sehr alte Orientierungen von der ‚Mitproduktivität der Natur in einer Allianztechnik'[53] mit der schon seit geraumer Zeit anhaltenden Faszination der Bionik und den neuen nanotechnischen Möglichkeiten.

Das Leitbild Nanobionik entsteht derzeit in der nicht unbeträchtlichen Schnittmenge zwischen Ansätzen der Bionik, die auf der molekularen Ebene ansetzen (z. B. im Bereich Werkstoffbionik, Biomineralisation) und Ansätzen der Nanotechnologie, die sich im Rahmen des eher biologischen ‚bottom-up Paradigmas' auf Prinzipien der Selbstorganisation von Molekülen konzentrieren (vgl. ZTC-VDI/TZ 2003).

(Foresight Institute 2001). Dort wird zur Vermeidung von Proliferation und Missbrauch u. a. aufgeführt: Unfähigkeit zur Replikation in natürlicher Umgebung, Nachweisbarkeit, Abhängigkeit von einem einzigen nicht in der Natur vorkommenden ‚Brennstoff', Abhängigkeit von entfernten Steuerungssignalen (broadcast), programmierte Selbstzerstörung, Vermeidung von Mutation und Evolution.

[51] Auch der gewählte Begriff Nanobionik ist nicht neu. Unter dem Titel NanoBionics wurden in den vergangenen Jahren z. B. zwei Heräus-Seminare abgehalten (vgl. www.nanobionics2.de).

[52] Vgl. insbesondere die Technologieanalyse zur Nanobiotechnologie (VDI-Technologiezentrum 2002, S. 105f). Dort wird der bottum-up Aufbau von Materialstrukturen, im Sinne einer technischen Nutzung von Selbstorganisationsphänomenen, als besonders viel versprechend herausgehoben und ein spezifischer Monitoring-Bericht zur Technologiefrüherkennung erarbeitet (VDI-Technologiezentrum 2003).

[53] (Vgl. z.B. Bloch 1973; Vision 2020 2002, S. 807ff.)

Die Bionik gehört derzeit zu denjenigen Forschungsrichtungen, die nicht nur von ausgesprochen engagierten und von ihrem Fach begeisterten Akteuren vorangetrieben werden, sondern die auch in der breiten Bevölkerung und insbesondere bei jungen Menschen Faszination und Begeisterung auslösen. Diese Begeisterung beruht im Wesentlichen auf ihrem Leitbild, auf der Kombination eines Versprechens von ‚ökologischer Angepasstheit' bzw. von ‚Eingepasstheit von Lösungen in natürliche Zusammenhänge' auf der Basis der Metapher eines ‚Lernen von der Natur' mit den faszinierenden Leistungen von Organismen, der Ausgeklügeltheit und oft auch ‚Eleganz' ihrer ‚technischen' Lösungen (von Gleich 2001). Ökologische Eingepasstheit, Ressourceneffizienz und Risikoarmut sind Anforderungen, die an technische Innovationen auf dem Weg in Richtung Nachhaltiges Wirtschaften gestellt werden. Auch wenn technische Innovationen allein sicher nicht ausreichen, um dem Nachhaltigkeitsziel wirklich näher zu kommen, so dürfte doch klar sein, dass technische Innovationen (und darunter sicher auch ‚Basisinnovationen') im Rahmen von Nachhaltigkeitsstrategien eine wichtige Rolle spielen werden (vgl. Bundesregierung 2002, Huber 2004)

Dabei muss allerdings immer wieder betont werden, dass Leitbilder wie Nanobionik Orientierung geben sollen. Mit ihnen soll bewusst das positive Ziel des Nachhaltigen Wirtschaftens angestrebt, es soll der Ressourcenverbrauch gesenkt und es sollen Risikopotentiale vorsorgend vermindert werden. Wir gehen dabei davon aus, dass zumindest die Wahrscheinlichkeit einer Zielerreichung durch ein bewusstes Anstreben der Ziele verbessert wird. Sicherheit der Zielerreichung sollte man davon allerdings nicht erwarten. Leitbilder sind so gesehen auch nur ein ‚Versprechen', dessen Einlösung bzw. Einlösbarkeit immer wieder überprüft werden muss. Weder die Bionik noch die Nanotechnologie noch die Nanobionik sind schließlich 'per se' nachhaltiger, als andere Technologiefelder (von Gleich 2001). Daher gilt es, das über das Leitbild Nanobionik vermittelte 'Versprechen' hinsichtlich Naturnähe, Angepasstheit (bzw. Einpassbarkeit und Risikoarmut), Ausgeklügeltheit und ggf. Eleganz auf seinen tatsächlichen Gehalt und seine Realisierbarkeit zu überprüfen. Dies sollte sowohl qualitativ über den Ansatz einer 'Prospektiven TA' als auch quantitativ über ein 'Prospektives Life-Cycle-Assessment' geschehen, als auch prozessbegleitend, also nach den methodischen Ansätzen, wie sie in dieser Studie entwickelt und vorgestellt wurden.

Die drei Leitbilder können hier nur angerissen werden. Für einen ersten Überblick sind in Tabelle 41 noch einmal einige zentrale Elemente aufgelistet. Fruchtbarer als weitergehende Definitionen dürfte die nun folgende kurze Illustration durch zwei Beispiele sein, die Spinnenseide und die Biomimetische Materialsynthese. Es ist zudem eher unwahrscheinlich, dass weitergehende Ausformulierungen allein am viel zitierten ‚grünen Tisch' erfolgreich stattfinden können. Das Testen und Sichern der Resonanzfähigkeit solcher Leitbilder kann nur im öffentlichen Diskurs erfolgen. Leitbilder werden nicht einfach ‚geschaffen', sie orientieren sich aber auch nicht schlicht am vorfindbaren kleinsten gemeinsamen Nenner oder am vorfindbaren Bewusstsein. Ein erfolgreiches Leitbild braucht auch Fantasie sowie eine gehörige Portion Irritation und Provokation. Gerade Irritationen und Provokationen lösen bekanntlich besonders deutliche und weit reichende Resonanzen aus.

Tabelle 41: Leitbilder einer nachhaltigen Nanotechnologie

Leitbild	Thema / Motto	Fokus	Beispiele
Ressourcen-effiziente Nanotech-nologie	Umweltentlastung, Umwelttechnik Geringer Ressourceneinsatz mit hohem Nutzen Geringer Verbrauch geringer Schaden	Quantität der Energie- und Stoffströme (lebenszyklusbezogen) im Verhältnis zum gesellschaftlichen Nutzen	Verschleiß- und reibungsarme Oberflächen (Maschinenbau), Hoch-spezifische Membranen (Biotechnologie, Brennstoffzellen)
Konsistente und eigensi-chere Nano-technologie	Gesundheitsverträglichkeit und Eingepasstheit in die Stoffwechselprinzipien und -kapazitäten der Natur Eigensicherheit, geringe Eingriffstiefe, hohe Fehlerfreundlichkeit	Qualität (und Quantität) der Stoff- und Energieströme im Hinblick auf Umwelt, Gesundheit und technische Risiken	Schnelle Abbaubarkeit oder geschlossene Anwendungen Recyclierbare Nanotubes im Leichtbau, Spinnenseide
Nanobionik	Technik nach dem Vorbild der Natur, Leben unterstützend, mit den Selbstorganisations-prinzipien der Natur kooperierend	Qualität der Technik (als Form des Umgangs mit Natur)	(Bio)Katalysatoren, Enzymtechnik in der Stoffumsetzung, Biomimetische Materialsynthese

Elemente dieser Leitbilder dienen schon von Beginn an als Orientierung bei der Entwicklung der mit großen Hoffnungen und Erwartungen verbundenen Nanotechnologie[54]. Sie sind Ausdruck einer wünschenswerten Entwicklung und sind auch in der praktischen Realität begründet. Damit sind zwei Grundvoraussetzungen für erfolgreiche Leitbilder erfüllt. Genau dies macht auch die folgenden beiden Beispiele so interessant: die Spinnenseide als Illustration dafür, wie es die belebte Natur geschafft hat, faszinierende „konsistente und eigensichere Nanotechnologien“ zu entwickeln und die Biomimetische Materialsynthese als ‚nanobionisches’ Beispiel, das möglicherweise gar nicht mehr so weit von seiner technischen Einsatzfähigkeit entfernt ist.

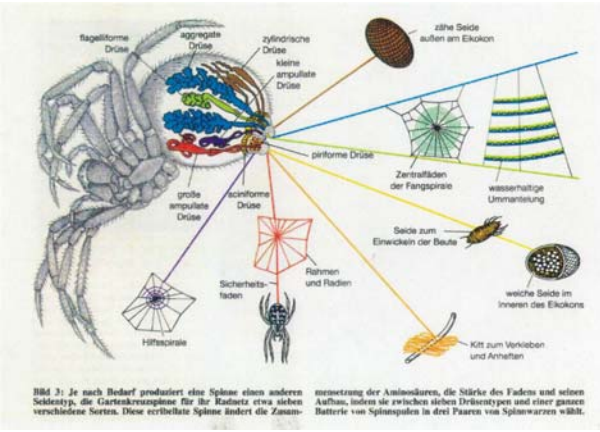
6.1.1.1 Spinnenseide: Konsistente und eigensichere Nanotechnologie

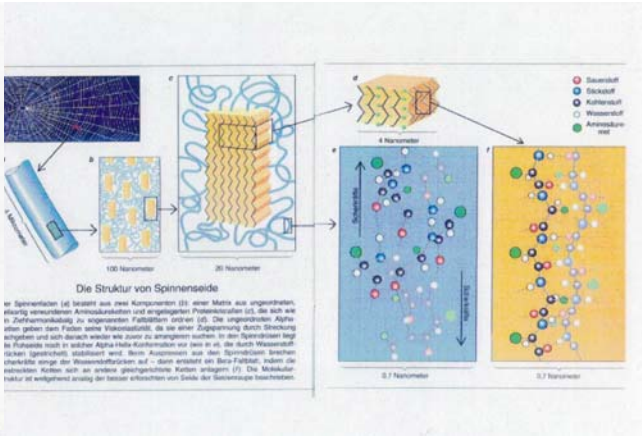
Die Fäden, die von Spinnen produziert werden, bilden in ihrer Vielfalt und in ihren Eigenschaftskombinationen eine phantastische Werkstoffgruppe. Mit bis zu sieben verschiedenen Spinndrüsen sind manche Spinnen in der Lage, Fäden mit den verschiedensten Eigenschaften zu produzieren: zum Fangen (Dehnbarkeit, Klebrigkeit), zum Konservieren der Beute, zum eigenen Schutz (Haltbarkeit), als Fortbewegungshilfe usw. (vgl. Abbildung 55). Ein Blick auf die Molekülstruktur zeigt, wie Spinnen die Aufnahme der erheblichen Dehnkräfte beim Fangen von Insekten ‚nanotechnisch’ realisiert haben[55] (vgl. Abbildung 56).

[54] Vgl. z. B. (Drexler 1986; Smalley 1999)

[55] Vgl. (Vollrath 1992); (Vollrath & Knight 2001) zeigen drüber hinaus, dass sie dabei selbst imstande sind, Flüssigkristallphasen zu nutzen.

Abbildung 55: Spinnenseide Abbildung 56: Molekülstruktur der Spinnenseide





Quelle: (Vollrath 1992)

Interessant ist das sehr begrenzte Reservoir an eingesetzten Stoffen. Nicht zuletzt fasziniert die Entsorgung nicht mehr gebrauchter Fäden. Sie werden als proteinhaltige Nahrung von den Spinnen wieder verspeist. Die Eigenschaften von Spinnenseide lassen alle existierenden technischen Werkstoffe weit hinter sich. Die Seide einiger Seidenspinnen ist doppelt so reißfest wie Stahl und bis zu 50 Mal so dehnbar wie Nylon. 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 schusssichere Westen und bessere Fallschirme erhofft. Zur großtechnischen Produktion von Spinnenseide werden derzeit parallel drei völlig verschiedene Strategien verfolgt. Zum einen werden in den Labors die Versuchsspinnen ‘gemolken’, d. h. es werden ihnen pro Tag bis zu 200 m Spinnenseide abgezogen. Die Tiere werden dazu mit CO_2 betäubt und fixiert. Dies mag eine ethisch (gegenüber den Spinnen) nicht 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 einkloniert wird. Auf beiden Wegen konnten schon geringe Mengen an Spinnenseide hergestellt werden. Die skizzierten drei Wege zeigen im Übrigen sehr anschaulich, dass auf der Basis ‘bionischer’ Anregungen aus der Natur sehr unterschiedliche (und auch sehr unterschiedlich zu bewertende) technische Umsetzungsstrategien verfolgt werden können. Das Lernen von der Natur, der bionische Ausgangspunkt, ist jedoch noch lange kein Garant für eine ‘eigensicherere ökologische Technik’ (vgl. von Gleich 2001).

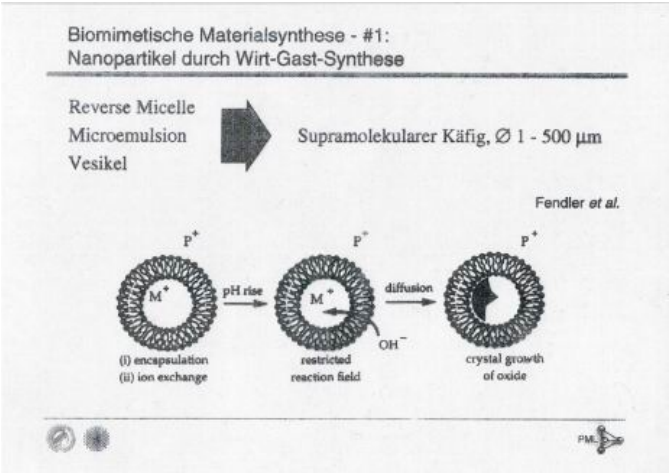
6.1.1.2 Biomimetische Materialsynthese: Nanobionik

Die Erlangung der Fähigkeit zur Selbstorganisation (und Selbstreplikation) war ein wesentlicher Schritt beim evolutionären Übergang von der unbelebten in die belebte Natur[56]. Vorformen der Selbstorganisation, die auch schon in der unbelebten Natur vorhanden waren, bildeten dafür die Grundlage. Dazu gehörte auch die Fähigkeit zur ‚Orientierung von Molekülen’ aufgrund ihrer

[56] Vgl. z. B. Eigens Arbeiten zum ‚Hypercycle’ (Eigen & Winkler 1978) sowie die Arbeiten von Maturana und Varela zur Auotopoiese (Maturana & Varela 1987).

Ladung. Bekannt sind unter anderem ‚polare Moleküle' wie Phospholipide mit einem hydrophilen und einem hydrophoben (meist lipophilen) Pol. Die Phospholipide sind als zentrale Elemente von Zellmembranen von entscheidender evolutionärer Bedeutung. Bringt man solche Moleküle möglichst einschichtig auf eine Wasseroberfläche auf, so orientieren sie sich selbständig und bilden einen orientierten so genannten ‚self assembled monolayer' (SAM)[57]. In Gegenwart von ‚orientierenden Strukturen' (Templaten) können sich Lipide bzw. lipidähnliche Substanzen auch zu dreidimensionalen Hüllen wie sphärischen Micellen und Vesikeln oder zylinderförmigen Tubuli einrollen[58]. In der Abbildung 57 ist das Ergebnis eines solchen dreidimensionalen Selbstorganisationsprozesses dargestellt. Die ‚Micellen' bestehen aus einer kugelförmigen Doppellage polarer Moleküle. Diese ‚Supramolekularen Käfige' kann man nun im nächsten Schritt sozusagen als ‚Förmchen' zur Produktion von wohl definierten Nanopartikeln benutzen, die dann als Ausgangsstoffe für Hochleistungskeramiken eingesetzt werden können. Damit ließe sich der bisher meist mit der Herstellung derartiger Partikel verbundene sehr hohe Energie- und Stoffaufwand radikal senken.

Abbildung 57: Nanopartikel durch Wirt-Gast-Synthese



(Prinzip der Abscheidung einer keramischen Schicht aus der Lösung auf funktionalisierte Self-Assembled Monolayers (SAMs). Quelle: Vortragsfolien Aldinger 1998; vgl. auch (Niesen & Aldinger 2001))

Bei der biomimetischen Materialsynthese handelt es sich eindeutig um die Nutzung der Fähigkeiten zur Selbstorganisation und noch nicht um Selbstreproduktion.

Die derzeit absehbaren Nutzungen von Selbstorganisationsprinzipien der Nanotechnologie (Nanobionik) basieren in der überwiegenden Mehrzahl nicht auf tiefen Eingriffen in zentrale 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 der Fall ist, dürften unbeherrschbare Verselbständigungen (Selbstreproduktion und Selbstvervielfältigungen) eher unwahrscheinlich sein.

---

[57] SAMs lassen sich mit der Langmuir-Blodgett-Technik technisch recht zuverlässig erzeugen.

[58] (Vgl. VDI-Technologiezentrum 2002) sowie insbesondere (Laval et al. 1995; Singh et al. 1995)

6.1.2 Road maps als Informations- und Kommunikationskonzept für den Gestaltungsprozess

Wie bereits dargestellt, hat die Chemische Industrie die Initiative Responsible Care entwickelt. Entsprechende Initiativen wären auch geeignet, die Frage der Nanotechnologien in geeigneter Form aufzuarbeiten. Dies ist in den USA im Rahmen der Initiative Chemical Vision 2020 (Vision 2020 2002) geschehen. Dabei sind die unterschiedlichen Herausforderungen, die sich aus der Entwicklung der Nanotechnologien für die Chemische Industrie ergeben, identifiziert und benannt worden. Im Grundsatz wurde eine Art road map für die Chemische Industrie bis zum Jahr 2020 entwickelt. Unabhängig von den Realismusgehalt der konkreten road map war doch die Bandbreite der einbezogenen Akteure von Wissenschaftlern, Vertretern von Regulierungsbehörden und den verschiedenen Industrievertretern von Bedeutung, da die unterschiedlichen Dimensionen der Nanotechnologien interdisziplinär diskutiert wurden: Sowohl Sicherheits- und Umweltaspekte, aber auch messtechnische Probleme und Forschungsbedarf wurden analysiert. Damit wurde ein Prozess der Analyse der Nanotechnologien initiiert, der gespeist aus unterschiedlichsten Wissensquellen Forschungs- und Handlungsbedarfe auf den unterschiedlichen Ebenen identifizierte. Neben dem Prozess der Erstellung der road map als solchem, ist insbesondere der Aspekt der Dissemination von Bedeutung: Diese road map inklusive der Handlungsbedarfe wurde in der Folge durch Publikationen weit verbreitet, wodurch die Erkenntnisse und Problemdefinitionen aus dem Prozess Zugang zu den unterschiedlichsten Akteursgruppen bekamen. Im Sinne einer Leitbildentwicklung würden sich solche Prozesse anbieten.

6.1.3 Constructive Technology Assessment bzw. real-time Technology Assessment als Informations- und Kommunikationskonzepte für Gestaltungsprozesse

Constructive Technology Assessment (CTA) (Rip et al. 1995) wie auch real-time TA (Guston & Sarewitz 2001) sind hochanspruchsvolle Konzepte, deren Ziel es ist, Technologieentwicklungen zu gestalten, u.a. um potenzielle adverse Effekte der Technologien zu identifizieren und durch geeignete Maßnahmen zu vermeiden. Gekennzeichnet sind die Konzepte dadurch, dass i) die relevanten Akteure identifiziert und einbezogen werden, ii) es in diesen Prozessen möglich ist, relevante Rückspiegelungen zu ermöglichen, iii) Gestaltungspotenziale identifiziert werden und iv) diese Gestaltungspotenziale auch erschlossen werden.

Bei der Vielfalt der Arenen der Nanotechnologieentwicklung und der Dynamik des Innovationsgeschehens, sowohl national als auch international, ist bereits dies eine höchst anspruchsvolle Aufgabe. Aus unserer Sicht ist es wichtig, dass diese Formen der Begleitung und der Generierung von Wissen (auch über nicht-intendierte Nebenfolgen) entwickelt werden. Diese sollten, wie es bei CTA und real-time TA oder auch den ITA-Ansätzen der Fall ist, prozessbegleitend ausgestaltet sein.

Diese Prozessgestaltung sollte zudem kettenübergreifend orientiert sein und zudem den zeitlichen Aspekt mit berücksichtigen. Damit wird die Verbindung zwischen der Forschungsseite bis zur Entsorgungsphase (inkl. der jeweiligen Emissionen) hergestellt und Veränderungen von Innovationsrichtungen im zeitlichen Kontext erfasst. Neuere umweltpolitische Ansätze, wie bspw. die Integrierte Produktpolitik (IPP) gehen eben von dieser Lebenszyklusbetrachtung aus

und versuchen die Umweltbelastungen entlang der Kette zu reduzieren bspw. durch die Förderung der Kooperation der Akteure entlang des Produktlebenszyklusses.

Die Prozessgestaltung sollte zudem den vielfach angeführten Leitbildaspekt berücksichtigen. Bspw. ist es im Rahmen des CTA zumindest im Grundsatz möglich, diese Leitbildebene – bzw. die implizite Orientierungsebene, die ja in jedem Fall vorhanden ist – mit zu explizieren und auf ihre „Nachhaltigkeitswirkungen“ zu befragen. Insofern bieten sich entsprechende Verfahren an, um in iterativen Prozessen den Suchprozessen größere Richtungssicherheit zu geben.

Einen zentralen Punkt bilden die Arenen, die an entsprechende Prozesse ankoppeln können. Wir gehen davon aus, dass der Gestaltungsprozess einerseits von einer Vielzahl von Akteuren mit durchaus unterschiedlichen Einflussmöglichkeiten bewirkt wird und andererseits in unterschiedlichen Arenen stattfindet. Zugleich sind diese Arenen zum einen national orientiert und zum anderen eng mit der internationalen Ebene verbunden, sodass die Steuerung in einem komplexen Mehrebenensystem stattfindet. Doch dies bedeutet nicht, dass damit keine Steuerungsmöglichkeiten existieren; vielmehr bietet eben diese Verknüpfung auch Handlungsansätze. In unterschiedlichen Studien konnte verdeutlich werden, dass es vielfach regionale oder auch nationale aber auch sektorale Akteure sind, die Themen auf die Agenda setzen und damit wesentliche Steuerungsimpulse bewirken können[59]. Eine Analyse dieser Dynamiken aus umweltpolitischer Sicht wurde im Rahmen eines umfangreichen Forschungsvorhabens durchgeführt[60]. Diese Steuerungsimpulse sind dabei nicht zwangsläufig mit materiellem Input verbunden als vielmehr mit Ideen und Leitvorstellungen, die erst in der Folge ihre Wirkung zeigen. Das in diesem Kontext benannte längerfristige Leitbild der Nanobionik inkludiert eine Reihe von Vorstellungen, die in den hier vorgeschlagenen kurzfristigeren Leitbildern entwickelt wurden.

Die Rolle der Bilder hatte für die Entwicklung des Projektes eine überragende Bedeutung. Die Sichtbarkeit der Nanowelt hat Entwicklungsphantasien unterstützt, die eng mit grundsätzlich positiven Bildern verbunden wurden wie bspw. „dem Ende der Umweltbelastungen“, „dem Überfluss an Ressourcen“ etc. Dass die Realitäten vielfach anders aussehen, ist im Bereich der Technologieentwicklung aber kein neues Phänomen. Entscheidend wäre es aber, dass die zumeist untrennbar miteinander verbundenen Chancen und Risken bereits frühzeitig verdeutlicht werden und im Grundsatz den positiven Leitbildern die Bedingungen zur Erreichung dieser Ziele zuzuordnen wären.

Die verfolgte Debatte um Chancen und Risiken der Nanotechnologie hat deutlich gemacht, dass der Umgang mit den potenziellen Risiken (abgesehen von den für möglich gehaltenen Langfristentwicklungen „foresight guidelines“) erst spät einen Einfluss auf die Debatte hatte. Dies bedeutet aber zugleich, dass die Forschungsbemühungen diese potenziellen Risiken vermutlich auch nur begrenzt im Blick hatten. Daraus ergibt sich das Problem, dass die negativen Begleiterscheinungen der Technologieentwicklung generell und der Nanotechnologie im speziellen in der Regel erst spät bemerkbar werden und forschungsseitig ein erheblicher

[59] Dies kann einerseits darin bestehen, dass problematische Umweltwirkungen z.B. durch Studien zu einem Thema werden oder dass die wissenschaftliche Community Probleme erkennt, die nicht auf der Agenda sind etc. Die Beispiele der Entwicklungsdynamiken im Umweltbereich sind vielfältig. Gleichwohl erweist sich die Durchsetzung positiv orientierter Leitbilder als deutlich schwieriger.

[60] Dieses Forschungsvorhaben konnte die Entstehung und Diffusion von umweltentlastenden Technologien u.a. auf Grund von Umweltregulierungen und deren Diffusion aufzeigen; vgl. Beise, M. et al. (2004)

„time lag“ entsteht. Bspw. kann Eva Oberdörster, die sich mit Untersuchungen zu Umweltbelastungen von Nanotechnologien befasst, damit zitiert werden, dass Ergebnisse ihrer Forschung erst in etwa zehn Jahren vorliegen würden.

Das relativ frühzeitige Aufgreifen der Möglichkeiten von Risiken in den USA durch die Finanzierung entsprechender Forschungen im Rice Institut zeigt, dass damit auch ein erheblicher Einfluss ausgeübt werden kann. Eine mehr oder weniger systematische Forschung zu Umwelteffekten wird realisiert und diese bringt Themen auf die Agenda, die ansonsten möglicherweise vernachlässigt würden. D.h. die Schaffung einer „Institution“ ist damit bereits ein wesentlicher Aspekt einer integrierten Herangehensweise.

Die Aktivitäten einer internationalen NGO (etc group) verdeutlicht zudem die Bedeutung der Kommunikation und von privaten Akteuren, Themen auf die Agenda zu setzen. Jenseits der Beurteilung der Aktivitäten dieser NGO verweist dies doch darauf, dass die potenziellen „dark sides“ einer Technologie nicht hinreichend bearbeitet wurden und insbesondere die Kommunikation (jenseits der positiven Seiten) mit der Öffentlichkeit nicht gesucht wurde. Die zumindest mediale Durchsetzungsfähigkeit dieser NGO verweist auf Lücken in der Forschung als auch in der Kommunikation. Die Literaturstudie von Howard im Auftrag der etc group verweist auf das Ausblenden potenzieller Risiken. Die Studie hatte insofern eine erhebliche Bedeutung, als damit die Befürchtungen der etc group von einem „anerkannten“ Fachmann wissenschaftlich belegt wurde.

Die Prozessgestaltung ist demnach ein weiterer wichtiger Aspekt im Umgang mit neuen Technologien (insbesondere wenn es sich um eine Technologie handelt, die letztlich ubiquitär eingesetzt werden wird). Betrachtet man das englische Beispiel, die Einsetzung einer Task Force bei der Royal Society, so scheinen zwei Aspekte von Bedeutung zu sein. Auf der einen Seite wurde ein relativ breiter Partizipationsprozess eingeleitet, in dem sowohl Wissenschaft als auch die breitere Öffentlichkeit einbezogen sind. Auf der anderen Seite konnten durch diesen Prozess unterschiedliche Wissensbestände durch die Einbeziehung von Wissenschaftlern aus unterschiedlichen Bereichen erschlossen werden, wodurch die vielfach eindimensionale Betrachtung von technologischen Entwicklungen überwunden werden konnte und frühzeitig potenzielle adverse Effekte thematisiert wurden.

Dieser offene Prozess, der ein Forum unterschiedlicher Meinungen und Weltsichten darstellt, kann es ermöglichen, dass die Exklusion nachhaltigkeitsorientierter Fragestellungen vermindert wird.

6.2 Akteursspezifische Gestaltungsansätze

In der typisierenden Abgrenzung von akteursübergreifenden und akteursspezifischen Ansätzen fokussieren letztere auf die Handlungsmöglichkeiten der Akteure Unternehmen und Staat. Staatlicherseits stellt sich in diesem Kontext die Frage nach möglichen Regulierungsformen von Seiten der Unternehmen, wobei es vor allem um die Frage der Risikovermeidung geht.

6.2.1 Akteur Unternehmen: Integration von Sicherheits-, Gesundheits- und Umweltschutzaspekten in das Wertschöpfungsketten übergreifende Qualitätsmanagement

Ein weiterer Gestaltungsansatz zielt auf die wirtschaftlichen Akteure, die Unternehmen, selbst ab. Auch die Unternehmen besitzen neben den staatlichen Institutionen eine hohe Verantwortung für die Risikominderung und das Risikomanagement von nanotechnologischen Produkten.

Einerseits sind die damit verbundenen Sicherheits-, Gesundheits- und Umweltschutzaspekte in die Managementstrategien und in die internen Abläufe des Unternehmens zu integrieren. Im Rahmen der sich immer stärker durchsetzenden integrierten Managementsysteme muss es das Ziel sein, ein Höchstmaß an Sicherheit, Umweltverträglichkeit und Ökoeffizienz zu erreichen. Weitere Strategien zur Risikominimierung in Unternehmen sind z.B. die Substitution des gefährlichen Stoffes durch ungefährlichere Alternativen, der Einsatz von geschlossenen, dichten Produktionsanlagen oder andere technische Maßnahmen zur Verminderung der Emissionen aus Produkten und Prozessen.

Andererseits erfordert die stärkere Verantwortungsübernahme der Marktakteure – etwa im zukünftigen Rahmen von REACh – die Entwicklung neuer Kommunikations- und Kooperationsformen entlang der Wertschöpfungskette. Die industriellen Anwender z.B. chemischer Stoffe werden in viel stärkerem Maße als bisher in die Pflicht genommen , aktiv nach risikoarmen Lösungen beim Stoffeinsatz (Substitution) zu suchen. Das heißt, dass die Ermittlung von Risiken durch nanoskalige Stoffe im eigenen Betrieb, bei den Kunden (Verarbeitung und Nutzung) und auch bei der jeweiligen Entsorgung des Produktes zu den Grundpflichten jedes Unternehmens gehören wird (Sorgfaltspflicht). Diese Verantwortung wird nur in enger Kommunikation zwischen den Akteuren (Stoffhersteller, Zubereitungshersteller und/oder Anwender) in der Wertschöpfungskette zu tragen sein, weil die Risiken sowohl von den Eigenschaften des jeweiligen Stoffes als auch von den jeweiligen Anwendungskontexten abhängig sind.

Die verantwortliche Verständigung in den Ketten quer über den europäischen Markt erfordert wiederum einen gemeinsamen Standard zur Ermittlung, Bewertung, Dokumentation und Kommunikation von Stoff-Risiken. Eine wesentliche Gestaltungsoption besteht darin, die Kommunikation entlang der Wertschöpfungskette (up- and downstream) als Chance für mehr kundenorientierte Innovation zu begreifen.

6.2.2 Akteur Unternehmen: Nachhaltiges Nanodesign in Forschung und Entwicklung

In dem DIN-Fachbericht ISO/TR 14062 Umweltmanagement – Integration von Umweltaspekten in Produktdesign und –entwicklung (Deutsches Institut für Normung (DIN) 2003) sind die Elemente nachhaltigen Gestaltens aufgeführt. Da diese Gestaltungsprinzipien in der Regel kontextualisiert sein müssen, ist es entscheidend, diese Prinzipien für Nanotechnologien zu konkretisieren. Diese Gestaltungsmöglichkeiten sind zwar abhängig von den Ergebnissen der Forschung, gleichwohl bestehen in der Regel in diesen Phasen große Freiheitsgrade.

Die FuE-Abteilungen in Unternehmen haben eben diesen gestaltenden Einfluss, sie besitzen das Wissen um die kontextualisierten Einsatzbedingungen der jeweilige Prozesse und Verfahren und können auf der Basis des vorhandenen Wissens über positive/negative Effekte von Nanotechnologien (bspw. Partikel) entscheidenden Einfluss auf die potenziellen Probleme in den Folgestufen nehmen.

Beim ökologischen Produktdesign wird der gesamte Produktlebenszyklus zum Objekt des Designprozesses. Die Auswirkungen von Alternativen in den Stufen Rohstoffgewinnung, Herstellung, Gebrauch und Entsorgung von Produkten werden gegeneinander abgewogen und mit den anderen Anforderungen des Designs in Beziehung gesetzt. Ökologisches Produktdesign impliziert eine Ausweitung der Verantwortung des Designers oder Konstrukteurs über bisher typische Tätigkeiten. Im Designprozess werden von Anfang an Aspekte zu den Material- und Energie-Inputs, zu Emissionen (Luft, Wasser, Abfall), zur Schadstoff- und Risikovermeidung sowie zur Produktlebensdauer /-nutzung für den gesamten Produktlebensweg berücksichtigt. Ziele wie Lebensdauerverlängerung, Erhöhung der Material- und Energieeffizienz, Risikominimierung oder Recyclingfähigkeit sind dadurch neben den klassischen Anforderungen ebenfalls im Fokus der Produktentwicklung.

Ansatzpunkte für eine nanospezifische Konkretisierung von Produktdesignkriterien bieten bspw. die VDI Richtlinie 2243 Recyclingorientierte Produktentwicklung (VDI 2002), Handbüchern und Leitfäden zum Ökodesign (Geißler et al. 1993; Quella 1998; Umweltbundesamt (UBA) 2000).

Außerdem sollten auch Leitfäden Berücksichtigung finden, die Themen der Risikoanalyse und Risikominimierung von Einsatzstoffen in den Mittelpunkt stellen. Der vom Umweltbundesamt herausgegebene Leitfaden zur Anwendung umweltverträglicher Stoffe (Ahrens et al. 2003) gibt bspw. Hilfestellung bei der Risikoanalyse. Anhand der Bewertung von relevanten Risikofaktoren ist eine Stoffbewertung möglich, die die Grundlage für Risikovermeidungs- bzw. Risikominderungsstrategien darstellt. Relevante zu bewertende Kriterien sind einerseits Stoffeigenschaften wie Persistenz, Bioakkumulation, aquatische Giftigkeit, chronische Giftigkeit Wirbeltiere und Eigen-Mobilität sowie andererseits das Anwendungsmuster, welches durch Kriterien wie Einsatzmenge, mobilisierende Einsatzbedingungen und indirekte Freisetzungen charakterisiert werden kann.

Ziel ist dabei nicht, Nanotechnologien per se als problematisch zu qualifizieren, als vielmehr eine Hilfestellung bei Bewertungsfragen unter großer Unsicherheit zu geben. Die Unsicherheit wird, da entsprechende Forschungsarbeiten kurzfristig keine fundierten Aussagen ermöglichen können, nicht behoben werden, aber die Sensibilisierung für das Unsicherheitsproblem und die Information über mögliche mehr oder weniger grobe Handlungsleitlinien (wie bspw. der

Vermeidung der Partikelemission, der Empfehlung bzgl. des Gesundheitsschutzes ggf. wasserlösliche Stoffe zu verwenden) kann zumindest eine gewisse Orientierung geben.

6.2.3 Akteur Staat: Staatliche Regulierungsansätze

Der Fokus der Betrachtung der rechtlichen Rahmenbedingungen und der möglichen Anpassungserfordernisse liegt im Wesentlichen auf Nanopartikeln.

Die Diskussionen um die Regulierungen von Nanotechnologien befinden sich teilweise auf einer Metaebene. Es wird die Frage diskutiert, ob eine umfassende Regulierung erforderlich ist. Das Spannungsverhältnis liegt dabei zwischen der Forderung nach einem Moratorium als Begrenzung von Forschung und Anwendung der Nanotechnologien (etc group 2002) und der Argumentation, dass entsprechende Maßnahmen eher kontraproduktiv seien (Reynolds 2002). Schließlich existiert auch die Diskussion um Konstruktionsprinzipien, damit potenzielle Folgeprobleme vermieden werden können (foresight guidelines). Letzterem Ansatz, wenn auch nicht auf visionäre Orientierungen bezogen (replizierende Nanoroboter), ist auch diese Studie verpflichtet. Sie geht davon aus, dass auch unabhängig von wissenschaftlich gesichertem Wissen bzgl. der Effekte auf die Targets durch die Charakterisierung der Technologie weitgehende Aussagen generiert werden können, die letztlich dem Vorsorgeprinzip[61] entsprechen.

Die Begründungen für mögliche rechtliche Regulierungen ergeben sich im Wesentlichen aus den Informationen, die im Rahmen der Untersuchung der potenziellen adversen Effekte der Nanotechnologie identifiziert wurden, die auf mögliche Umwelt- und Gesundheitswirkungen hinweisen.

Eine Grundsatzfrage besteht darin, ob für eine Regulierung der Nanotechnologien ein neuer gesetzlicher Rahmen erforderlich ist (bspw. ein Nanotechnologiegesetz) oder ob das bestehende Regulierungssystem auch für die Problemlagen, die durch Nanotechnologien entstehen könnten, hinreichend ist.[62]

Potenzielle Probleme sehen wir kurzfristig bzgl. der (Öko-) Toxizität von Nanopartikel. Grundsätzlich gehen wir davon aus, dass Regulierungsinstrumente vorhanden sind, um mit potenziellen Problemen der Nanotechnologien umgehen zu können, d.h. insbesondere die Chemikalienregulierung und der Gentechnikregulierung, sodass es auf der formalen Ebene keiner neuen Regulierungen bedürfe.[63] Von politischer Seite existieren ebenfalls unterschiedliche Auffassungen zu der Äußerung, dass es einfacher sei, ein Nanogesetz

---

[61] Das Vorsorgeprinzip ist zwangsläufig auch vielfältigen Interpretationen unterworfen. Im Grundsatz geht die Auseinandersetzung darum, inwieweit auch jenseits der wissenschaftlichen Risikoanalyse staatliche Maßnahmen gerechtfertig sind. Da es sich damit zentral um Bewertungsprobleme handelt, erweist sich die Interpretation des Vorsorgeprinzips als umstritten. Die Auslegung des Vorsorgeprinzips erfolgt in der Regel in den jeweiligen Kontexten und muss von daher an die spezifischen Anforderungen angepasst werden. (PrecauPri und deren Vorgehensweise). Es geht dabei u.a. um die Frage, wen die Beweislast trifft, denjenigen, der neue Stoffe in den Markt bringen will oder denjenigen, der potenziell davon betroffen ist (bspw. die Regulierungsbehörde). Die existierenden Differenzierungen der Chemikalienregulierung basieren auch auf diesen Unterschieden.

[62] Es ergeben sich dann Anforderungen an die unterschiedlichsten Regulierungen. (vgl. Paschen et al. 2003))

[63] Diese Auffassung wird von einer Reihe von Experten geteilt. Insbesondere die Anhörungen der Royal Society machen deutlich, dass gegenwärtig die überwiegende Mehrzahl der Akteure keinen neuen speziell auf Nanotechnologien bezogenen Rechtsrahmen für erforderlich hält.

„durchzubringen“ als die unterschiedlichen vorhandenen Regulierungen nanokompatibel zu machen.[64]

Nanotechnologien als Querschnittstechnologien werden künftig umfassend eingesetzt und von daher die unterschiedlichsten Regulierungsbereiche von der Arbeitsschutz- und Arzneimittel- und Kosmetikregulierung bis zum Regelwerk des Immissionsschutzes etc. betreffen. Damit besteht ggf. ein weitgehender Bedarf bzgl. der Anpassung dieser Regulierungen. Vorrangig ist nach Meinung der befragten Experten vor allem der Bereich des Arbeitsschutzes.

Die Problematik von Regulierungsansätzen bezieht sich im Wesentlichen auf die Eigenschaften der Nanopartikel. Ein wesentlicher Aspekt besteht darin, dass einerseits bekannte Stoffe als Nanopartikel völlig neue Eigenschaften haben können und andererseits, dass neue Stoffklassen hergestellt werden (bspw. Nanotubes). Zugleich hat unsere Literaturstudie und die Expertenbefragung deutlich gemacht, dass, wie in der Toxizitätsforschung generell bekannt, generelle Aussagen über Stoffe oder Stoffklassen noch nicht möglich sind. Neben den bekannten Problemen von Stoffbewertungen eröffnet sich eine neue Dimension potenzieller Risiken. Zum einen sind die unterschiedlichen Stoffe neu zu bewerten und zum anderen die Stoffgemische. Dies hat weit reichende Konsequenzen, da die bisherigen Verfahren der Risikobewertung von Stoffen erweitert und überhaupt erst geeignete Messverfahren und Testverfahren entwickelt werden müssen, die der Spezifika der Nanotechnologien angemessen sind.

Die gegenwärtige Praxis ist noch weit davon entfernt, mit den potenziellen Problemen der Nanotechnologien bzw. konkret der Nanopartikel umgehen zu können, da selbst die Klassifikationssysteme zur Erfassung dieser Stoffe entweder nicht existieren oder nicht verlässlich sind. Eine Studie aus den USA hat aufgezeigt (Wardak 2003), dass neue Materialien wie Nanotubes den bestehenden Klassifikationsschemata nicht hinreichend zugeordnet werden können. Wenn überhaupt, werden diese Stoffe unterschiedlichen Kategorien zugeordnet. Eine systematische Zuweisung in den Anmeldeverfahren geschieht offenbar bislang nicht.[65]

Die Situation in Deutschland (oder generell in Europa) stellt sich keineswegs anders dar. Zwar existieren aus den Chemieregulierungen heraus Zuordnungssysteme, die z. T. auch bedingen, dass bei wesentlichen Veränderungen der Stoffeigenschaften eine Neuanmeldung erforderlich ist. In der Praxis wird dies nicht so gehandhabt. Ein Gespräch mit den zuständigen Zulassungsbehörden verdeutlichte, dass in Deutschland bislang kein Stoff als Nanomaterial angemeldet wurde und von daher entsprechende Vorgaben an die Anmeldung der Stoffe nicht gestellt wurden.

Dies deutet auf ein zweites Problem hin: die Zulassungsvoraussetzungen bzw. die Anmeldepflichten sind vorrangig auf solche Stoffe orientiert, die in großem Umfang produziert werden. Das geplante REACh-System hat zwar auf der einen Seite neue Formen der Risikobewertung, die bspw., wie an anderer Stelle ausgeführt, bereits bestimmte Eigenschaften der Stoffe als Grund zur Besorgnis ansehen. Auf der anderen Seite ist allerdings festzustellen, dass die Verfahren der Stoffzulassungen zumindest für solche Stoffe, die in kleineren Mengen produziert werden, deutlich reduziert werden. Hinsichtlich der Nanomaterialien, oder konkreter

[64] Vgl. dazu Anhörung der Grünen zu Nanotechnologien vom 1. März 2004, Berlin.

der Nanopartikel bedeutet dies, dass deren Bewertung in der gegenwärtigen Ausgestaltung von REACh keineswegs in den Fokus kommen, es sein denn sie würden per se in die Klasse der vpvb-Stoffe eingeordnet.

Aber auch jenseits der Chemikalienregulierung ergeben sich im Umgang mit Nanopartikelemissionen offenbar erhebliche Probleme, wie der Rechtsstreit um die Genehmigung einer Anlage zur Partikelproduktion deutlich machte. Die zentrale Frage ist, um die es in diesem Kontext ging und geht (der Fall ist nunmehr vom Bundesverwaltungsgericht entschieden), ob mit Nanopartikeln eine besondere Gefährdung verbunden ist, die mit den herkömmlichen Problemen, als im Wesentlichen den ultrafeinen Partikeln (UFP) vergleichbar ist oder ob die Nanopartikel nicht völlig andere Eigenschaften im Hinblick auf Umwelt- und Gesundheitsgefährdungen haben. Vor dem Hintergrund der Partikelbelastungen, die insbesondere durch Verbrennungsprozesse (insbesondere im Verkehr) verursacht werden, ist es entscheidend, ob eine Gleichsetzung von Partikeln aus Verbrennungsprozessen und solchen aus der gezielten Partikelproduktion gerechtfertigt ist oder ob die industriell produzierten „maßgeschneiderten“ Partikel einen Anlass zur besonderen Besorgnis geben. Indem die genehmigten Emissionen eine entsprechende Sicherheitsmarge vorsahen aber grundsätzlich von einer Gleichsetzung von UFP und Nanopartikeln ausgingen, ist im Genehmigungsverfahren versucht worden, dieser Besorgnis gerecht zu werden. Bei der existierenden „Hintergrundbelastung“ durch Verbrennungsprozesse erweisen sich die Nanopartikel in der Tat in der Regel als vernachlässigenswert.[66]

Diskussionen, die auf Regulierungsaspekte abheben, sind hingegen bislang nicht wesentlich entwickelt. Erste Analysen, die sich auf die Erfassung von Nanomaterialien richten, verweisen auf Erfassungs- und Systematisierungsprobleme der Nanomaterialien (insbes. Nanopartikel) in dem Sinne, dass die Zuordnung der Stoffe im Bezug auf die Chemikalienregulierung entweder gar nicht oder unsystematisch erfolgt. Im Rahmen von Interviews u.a. mit Regulierungsbehörden wurde darauf verwiesen, dass erste Gespräche zu der Problematik in diesem Jahr durchgeführt wurden.

Gegenwärtig ist die Frage der Regulierung von Nanotechnologien noch wenig konzeptionalisiert. Wesentliche Ansätze für eine Regulierung der Nanotechnologien sind im Grundsatz vorhanden (Chemikalienregulierung, Gentechnikgesetz). Gleichwohl sind diese gesetzlichen Rahmenwerke gegenwärtig nicht oder nur begrenzt geeignet, mit den potenziellen Problemen von Nanotechnologien umzugehen. Ein zentraler Aspekt der in diesem Kontext benannt werden muss, ist das gegenwärtig nicht vorhandene oder zumindest nicht auf Nanotechnologien orientierte Klassifizierungssystem. Dieses ermöglicht es in der gegenwärtigen Handhabung nicht, auf die Spezifika insbesondere der Nanopartikel einzugehen. Des Weiteren sind die Risikopotenziale gegenwärtig nur begrenzt einschätzbar, da zwar

---

[65] Auch unsere schriftliche Expertenbefragung verweist auf die Notwendigkeit der Entwicklung von geeigneten Klassifikationssystemen.

[66] Gleichwohl macht die allgemeine umweltpolitische Diskussion auch deutlich, dass es durch umweltpolitische Maßnahmen zunehmend gelingt, die Luftbelastung durch Staub und andere „Großpartikel“ zu reduzieren. Gleichzeitig ist aber auch festzustellen, dass die Belastung durch UFP zunimmt, nicht zuletzt aufgrund des begrenzteren Agglomerationspotenzials an größere Partikel. Dies bedeutet, dass zumindest in der umweltpolitischen Diskussion die Partikelfrage (auch unabhängig von industriell produzierten Partikeln) eine zunehmende Rolle spielen wird.

Laborstudien durchgeführt worden sind, deren Übertragbarkeit zumindest in Frage gestellt wird. Gleichwohl mahnen diese Studien zur Vorsicht.

Grundsätzlich wäre es aber erforderlich, überhaupt die Bedingungen zu schaffen, damit Nanostoffe zugeordnet werden können, dass geeignete Test- und Messverfahren entwickelt werden und die Bedingungen für eine Risikoabschätzung geschaffen werden. Vor diesem Hintergrund erscheint es notwendig, auf Metaregeln wie bspw. dem Vorsorgeprinzip zurückzugreifen. Wesentliche Orientierungen können dabei aus der Herangehensweise der EU Chemikalienregulierung abgeleitet werden.

7 Fazit, Ausblick und Handlungsbedarfe

Um der Komplexität der Aufgabenstellung des Projektes gerecht zu werden, basierte die Herangehensweise der Studie auf dem dreistufiger Ansatz zur prospektiven Technologiebewertung und -gestaltung von Nanotechnologien.

1. Ansatz – prospektiv
Bewertung der Nanotechnologie und ihrer Wirkungen durch eine Charakterisierung der Technologie

2. Ansatz – prozessbegleitend
Bewertung von Nachhaltigkeitseffekten in Anlehnung an ökobilanziellen Methoden an konkreten Anwendungsbeispielen im Vergleich zu bestehenden Produkten und Verfahren

3. Ansatz – gestaltend
Leitbilder als Steuerungs‘instrumente‘ in der Technikgestaltung, Begleitprozesse, akteursspezifische Konzepte

Ergebnisse der Ökoprofilbetrachtungen von ausgewählten nanotechnologischen Anwendungskontexten

Im Rahmen des genannten Forschungsvorhabens wurde an konkreten Produkten und Verfahren analysiert, inwieweit zum einen die Anwendung von Nanotechnologien Beiträge zur Umweltentlastung leisten können, zum anderen, inwieweit diese Möglichkeiten auch erschlossen werden können. Dies hebt auf die Chancendimension der Nanotechnologien ab. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass durch Nanotechnologien in der Mehrzahl der untersuchten Anwendungsbereiche absehbar hohe Ökoeffizienzpotenziale erschlossen werden können. Beispielsweise zeichnen sich die anvisierten nanotechnologischen Anwendungen im Displaybereich (OLED, CNT-FED) durch hohe Energieeffizienz in der Gebrauchsphase aus (teilweise um Faktor 2 geringere Energieverbräuche) gegenüber den bisherigen Lösungen. Als noch weitgehender erwiesen sich die Effizienzpotenziale nanotechnologischer Anwendungen im gewählten Beispiel aus dem Bereich Lacke und Beschichtungen sowie dem Bereich der katalytischen Anwendungen. Im Lichtbereich dagegen werden erst weiterentwickelte nanotechnologiebasierte Produkte mit anderen energiesparenden Lichtquellen unter Ressourcen- bzw. Energieverbrauchsgesichtspunkten in Konkurrenz treten können.

Zugleich muss darauf verwiesen werden, dass kein Automatismus besteht, dass Verfahren, die nach dem ökobilanziellen Vergleich gut abgeschnitten haben, sich auch auf dem Markt durchsetzen können. Diesbezüglich bestehen z. T. Abschätzungsprobleme, weil die Verfahren sich noch in einem eher frühen Stadium der Entwicklung befinden, zum anderen liegt das aber auch schlicht daran, dass diese Innovation sich - wie alle Innovationen - gegenüber Trägheitskräften durchsetzen müssen, z.B. dass die „sunk costs“ bestehender Anlagen die Markteinführung neuer nanotechnologiebasierter Verfahren behindern. Derartig Trägheitsmomente verhindern die Marktdurchdringung entsprechender Innovationen und stellen somit wesentliche Innovationshemmnisse dar. Auch hier hängt also viel von der praktischen Umsetzbarkeit der umweltentlastenden Potenziale der Nanotechnologien in Verfahren und Produkte ab.

Die positiven Ergebnisse der Produktökobilanzen könnten allerdings durch Rückspiegelung der Ergebnisse in die Entwicklungsprozesse dazu beitragen, die entsprechende Gestaltung der Prozesse und Produkte weiter zu optimieren. Untersuchungen dazu liegen nicht vor und waren im Rahmen dieser Studie auch nicht möglich.

- Die begleitende und prospektive Ökobilanzierung stellt somit ein wichtiges Instrument dar, um wesentliche Bestandteile „nachhaltiger" Technologieentwicklung zu identifizieren. Das Bereitstellen von Ökobilanztools und Daten für die relevanten Herstellungsverfahren würde Ökoprofilbetrachtungen wesentlich erleichtern.
- Die ökologische Vorteilhaftigkeit ist nicht zwangsläufig ökonomisch durchsetzbar. Eine nachhaltigkeitsorientierte Gestaltung muss Markteintrittshemmnisse im Auge haben.

Charakterisierung der Technologie und Analyse der Kontexte

Innovationen, auch Innovationen mit nachhaltiger Absicht, sind immer auch mit Risiken verbunden. Der Untersuchungsschritt „Charakterisierung der Technologie" basiert auf der Annahme, dass Technologien umweltbezogen nicht „neutral" sind, sondern das bestimmte Charakteristika Hinweise auf potenzielle Risken geben können.

Eine Grundaussage dieser Analyse war, dass umweltoffene Verfahren zumindest solange vermieden werden sollten, bis mehr über das Verhalten der jeweiligen Stoffe und deren Interaktion mit den „Targets" bekannt ist. Diese Orientierung entspricht bspw. der Behandlung einiger Stoffe im Rahmen der Chemikalienregulierung.

- Offene Anwendungen von Nanopartikeln sollten vermieden werden.
- Kritische Aspekte sind bspw. Mobilität von nanostrukturierten Materialien in Zeit und Raum, Durchgängigkeit durch Zellmembranen, Löslichkeit in Wasser und Fett, Biopersistenz, Akkumulierbarkeit.

Sehr viel schwieriger ist der *nächste Schritt* des gewählten Ansatzes, die Betrachtung der Anwendungskontexte und die Analyse und Charakterisierung der Systeme, in die eingegriffen wird. Technikwirkungen entfalten sich nicht nur aus dem ‚Charakter einer Technologie', sondern ebenso sehr aus dem jeweiligen Anwendungskontext (und zwar in Qualität und Quantität). 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 spezifischen Anwendungskontexte betrachten.

Am Beispiel der potenziellen Umwelt- und Gesundheitsprobleme soll dies dargestellt werden. Die Risiken von Nanotechnologien lassen sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt kaum abschätzen. In der gegenwärtigen Debatte bestimmen vor allem langfristige Visionen die Debatte bzgl. Risiken und Chancen. Die gegenwärtigen nanotechnologischen Möglichkeiten, soweit sie produktionsseitig von Bedeutung sind, bestehen im Wesentlichen in der Nutzung der Potenziale der Nanopartikel und vor allem deren besondere Eigenschaften. Bestimmte Eigenschaften von Nanopartikeln bzw. Nanostrukturen, die einerseits technisch-wirtschaftlich und umweltseitig für Verfahren und Anwendungen erschlossen werden sollen, werden andererseits aber auch potenzielle Risiken in sich bergen. Diese Gefahrenpotenziale sind allerdings gegenwärtig im

Rahmen einer vollständigen Risikoabschätzung kaum quantifizierbar. Gleichwohl liegen im Sinne einer Gefährdungsanalyse von toxikologischer und epidemiologischer Seite aus Forschungsergebnisse zu feinen und ultrafeinen Partikeln vor, die allerdings in vielen Fällen nicht - und das ist hier zu betonen - auf industriell gefertigte Nanopartikel abheben, sondern auf Partikel aus Verbrennungsprozessen. Die Untersuchungen zu dem Verhalten von Nanopartikeln im Körper verweisen darauf, dass luftgängige Nanopartikel durch die Lunge und den Bulbus olfactorius in den Körper eindringen und sich in der Folge in unterschiedlichen Organen ausbreiten können. Über mögliche Wirkungen ist allerdings wenig bekannt. Des Weiteren verweisen die toxikologischen Untersuchungen darauf, dass in Laborversuchen adverse Effekte beobachtet werden können. Allerdings sind die Ergebnisse dieser Versuche gegenwärtig teilweise noch widersprüchlich.

Im Hinblick auf die Umweltwirkungen von Nanotechnologien ist der Kenntnisstand noch weniger entwickelt. Des Weiteren ist insbesondere das Verhalten der Partikel bspw. in den unterschiedlichen Umweltmedien wenig untersucht. Zentrale Fragen ergeben sich insbesondere gerade auch im Hinblick auf das Verhalten von Nanopartikeln in der Luft, also z.B. die Frage, inwieweit und in welchem Zeitraum Agglomeration stattfindet und welche Stabilität diese Agglomerationen besitzen? Bei schneller und stabiler Agglomeration würden sich ggf. potenzielle Probleme „entschärfen“.

Die Analyse verschiedener Produktionsverfahren verdeutlicht, dass wesentliche Produktionsverfahren in Hinblick auf die Emissionsproblematik in die Luft als unproblematisch anzusehen sind. Über den Lebenszyklus von nanotechnologischen Produkten lassen sich ebenfalls, zumindest aus heutiger Sicht, nur begrenzte Probleme erkennen. Zumindest dort, wo Nanopartikel in eine feste Matrix inkorporiert sind, ist es nicht zu erwarten, dass es zu Emissionen von Partikeln kommt. Insgesamt gesehen existiert aber noch viel zu wenig gesichertes Wissen zu all diesen Fragen, es besteht enormer weiterer Forschungsbedarf.

Im Gros der untersuchten Anwendungen dürften, nach den bislang vorliegenden Ergebnissen, die Partikelemission, bei sachgerechter Handhabung entlang des Lebensweges, keine grundsätzlich unlösbaren Probleme darstellen. Bei der Herstellung der Partikel dürften die Probleme zumindest im Grundsatz handhabbar sein. In der Gebrauchsphase sind die Partikel im Wesentlichen fixiert und auch am Ende des Lebenszyklus ist, allerdings in Abhängigkeit von der Art der Verwertung, nicht mit Emissionen zu rechnen. Allerdings sind weitere Untersuchungen erforderlich. Im Grundsatz entspricht dies den Orientierungen, die im Rahmen des Analyserasters vorgegeben wurden (Vermeidung umweltoffener Anwendungen).

In der Bewertung der Nanotechnologien im Hinblick auf Chancen und Risiken wurde in der schriftlichen Expertenbefragung deutlich, dass in den Antworten die Chancen die Risiken bei weitem übersteigen. Allerdings wird auch angemahnt, dass entsprechende Begleituntersuchungen und Risikoabschätzungen erforderlich sind.

Forschungsbedarf besteht bzgl.

- toxikologischer und ökotoxikologischer Untersuchungen im Rahmen integrierter Untersuchungsprogramme
- des Verhaltens der Nanopartikel in der Umwelt und deren Systematisierung

Trotz der Problematik des Vergleichs unterschiedlicher Risikostrukturen lässt sich mit Hilfe des hier verwandten Instrumentariums der Technikcharakterisierung und nach derzeitigem Wissen mit Blick auf die absehbaren nanospezifischen Effekte (einschließlich der Selbstorganisationseffekte) bisher keine ‚besonders große Besorgnis' begründen. Die erwartbaren Risiken scheinen am ehesten vergleichbar zu sein mit den Risiken der (synthetischen) Chemie. Die Risiken der Nanotechnologie sind demnach also keineswegs vernachlässigbar, da sich die Risiken der Chemie historisch als durchaus ‚beträchtlich' erwiesen haben. Frühzeitige Technikbewertung und –gestaltung, frühzeitige Regulierung und Vorsorgemaßnahmen zur Vermeidung möglichst 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 erwartbaren Effekte und Einsatzbereiche der Nanotechnologie die adäquaten Schritte der Risikoanalyse vorsehen. Zusätzlich kann auch beim Risikomanagement viel von der Chemischen Industrie bzw. vom Umgang mit Chemikalien gelernt werden. Allerdings sollte man mit der Analogiebildung nicht gleich auch die Schwachstellen des derzeitigen Risikomanagements mittransportieren. Denn das Risikomanagement mit Blick auf Chemikalien weist noch große Lücken auf, z.B. bei der Operationalisierung des Vorsorgeprinzips (Stichwort ‚eigensichere Stoffe', Techniken und Anwendungssysteme, Stichwort Substitutionsprinzip).

Über die im Projekt untersuchten Fälle hinaus, die sich sehr stark auf anorganische Anwendungskontexte fokussierten, besteht insbesondere weiterer Forschungsbedarf

- im Bereich der Anwendungsfelder von Selbstorganisation sowohl im anorganischen als auch im organischen Bereich im Hinblick auf noch zu erschließende ggf. sehr viel weiter reichende Ökoeffizienzpotenziale

- im Bereich der weitergehenden und erst langfristig zu erwartenden Anwendungsfelder von Selbstorganisation, insbesondere bei einem möglichen Zusammenwachsen von Nanotechnologie und Bio- bzw. Gentechnologie mit Blick auf die Frage eines schleichenden Übergangs von Selbstorganisation zur Selbstreproduktion

Auf der Grundlage dieser grundsätzlichen Bewertung der Nanotechnologien lassen sich ebenfalls offene Fragen der Nanotechnologien ausmachen. Dies betrifft zum einen die Frage der Klassifikation der Stoffe, diese erfolgt gegenwärtig entweder gar nicht oder unsystematisch. Hier besteht, wie auch die Expertenbefragung ergab, Handlungsbedarf. Des Weiteren ist zu überprüfen, wie einerseits die besonderen Eigenschaften der Nanopartikel durch die Anpassungen des bestehenden Regulierungssystems erfasst (auch allein in Bezug auf die Messverfahren etc.) und wie andererseits mit ihnen angemessen umgangen werden kann. Auch hier bietet die Chemikalienpolitik wesentliche Hinweise, obgleich sie in ihrer gegenwärtigen Ausgestaltung die Spezifika der Nanopartikel nicht erfasst.

- Die bestehenden Regulierungen sind zwar im Grundsatz auf die Nanotechnologien anwendbar, die gegenwärtige Ausgestaltung der Regulierungen erfasst aber Nanopartikel nicht. Ein Klassifizierungssystem für nanotechnologische Produkte ist zu schaffen. Geeignete Messverfahren sind zu entwickeln.

- Eine Anpassung von REACh ist möglich, gleichwohl müssen eine Reihe weiterer Anpassungen im Bereich Umwelt- und Gesundheitsrecht erfolgen. Als vorrangiges Problem stellt sich die Frage des Arbeitsschutzes.

Prozess- und leitbildorientierte Gestaltung

Technologieentwicklung ist nicht oder doch nur sehr begrenzt durch politische Interventionen steuerbar, vielmehr ergibt sich aus dem Zusammenwirken unterschiedlichster Akteure eine Pfadentwicklung der Technologie, die gestaltend begleitet werden kann u.a. durch das Arbeiten mit Leitbildern als Steuerungsinstrumenten. Da sich die Nanotechnologien im Grundsatz noch in einer Frühphase der Entwicklung befinden, existieren zumindest grundsätzlich noch große Freiheitsgrade, um den Suchraum für nanotechnologische Innovationen in eine „nachhaltige" Richtung zu lenken.

Leitbildorientierte Gestaltung ist zwar einerseits nicht vorgebbar, aber andererseits in starkem Maße ein Kommunikationsprozess zwischen unterschiedlichsten Akteuren. Als Grundlage können die drei im Projekt entwickelten Vorschläge zu Leitbildern einer nachhaltigen Nanotechnologie mit unterschiedlichen Reichweiten dienen: „Ressourceneffiziente Nanotechnologie", „Konsistente und eigensichere Nanotechnologie" sowie das langfristig orientierte Leitbild „Nanobionik". Die Initiierung von Prozessen der Leitbildentwicklung und –gestaltung durch entsprechende Verfahrensschritte ist sinnvoll. Dies kann im Rahmen unterschiedlicher Verfahren ermöglicht werden, wie bspw. der CTA.

Außerdem sind Prozesse, wie sie gegenwärtig in England von der Royal Society durchgeführt werden, im Sinne zweiseitiger Kommunikation (einerseits Wissen zusammenzuführen und andererseits Informations- und Kommunikationsarbeit leisten) auch für die deutsche Situation vorbildlich.

Des Weiteren sollten die beteiligten wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Akteure, ähnlich wie bspw. im Rahmen von Projekte zu einer „Chemical Vision" in der EU und in den USA über die Entwicklung von „road maps" der Nanotechnologieentwicklung integrierte Konzepte entwickeln, die durchaus auch in breiter Beteiligung technologische Probleme identifizieren, zugleich aber auch die potenziellen Umwelt- und Gesundheitsrisiken thematisieren sollten.

Wenn sich die Erwartungen an die Nanotechnologie (bzw. an Innovationen auf ihrer Basis) hinsichtlich eines wesentlichen Beitrags zum Ziel eines Nachhaltigen Wirtschaftens erfüllen sollen, wenn also die Intention zu einer entsprechenden Gestaltung dieser Prozesse wirklich ernst genommen wird, dann ist eine weitere Begleitung der Technologie-, Prozess- und Produktentwicklung unerlässlich, zum einen mit Blick auf ein vorsorgeorientiertes Risikomanagement, zum anderen mit Blick auf die gezielte Ausschöpfung der Nachhaltigkeitspotenziale, die mit dieser Technologielinie ohne Zweifel verbunden sind.

Auf der instrumentellen Ebene erscheinen neben der Arbeit an und mit Leitbildern die bekannten Bewertungs-, Informations- und Kommunikationsinstrumente im Grundsatz geeignet zu sein, um Handlungsorientierungen gerade auch für kleine und mittlere Unternehmen zu generieren (Leitfäden, Gestaltungsorientierungen etc.).

- Die frühe Phase der Technologieentwicklung bietet im Grundsatz große Gestaltungspotenziale in Richtung Nachhaltigkeit – diese müssen erschlossen werden. Leitbildentwicklung in gestaltender Absicht bietet sich an.

- Begleitende und gestaltungsorientierte Prozesse müssen vorangebracht werden (bspw. via CTA oder real-time TA). Offene Kommunikationsprozesse sind empfehlenswert, in

die Wissenschaft, Unternehmen und zivilgesellschaftliche Organisationen einbezogen sind. Nanotechnologische road maps können ein geeignetes Integrations- und Orientierungsinstrument sein. Begleitende Ökobilanzierungen müssen als Orientierungshilfe hinzukommen und ihre Ergebnisse in die Prozesse zurück gespiegelt werden.

- Unternehmen haben als Akteure in diesen Prozessen eine wesentliche Verantwortung, die insbesondere auch in jüngeren Ansätzen der Umweltpolitik wie REACh oder der Integrierten Produktpolitik (IPP) immer wieder betont werden. Die genannten Ansätze gehen zumindest von einer geteilten Verantwortung aus und nehmen insofern die Unternehmen stärker in die Pflicht. Konkret sollten Wertschöpfungsketten übergreifende integrierte Management- und Kommunikationskonzepte entwickelt werden, in denen die Aspekte Gesundheit, Sicherheit und Umwelt (HSE) als Element der Qualitätssicherung begriffen werden. Zur Unterstützung gerade auch der kleinen und mittleren Unternehmen wären Leitfäden für ein nachhaltigkeitsorientiertes Design von Produkten und Prozessen auf Basis der Nanotechnologie hilfreich.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lack- und Chromatierungsmengen (g/m² lackierter Aluminium Automobilfläche) 6

Abbildung 2: Zeitfenster der Gestaltung im Lebenszyklus 9

Abbildung 3: Blickwende in der Technikbewertung: Charakterisierung des Agens 21

Abbildung 4: Schritte zur Erstellung einer Ökobilanz 23

Abbildung 5: Prinzip des PVD-Verfahrens 39

Abbildung 6: Prinzip des CVD- Verfahrens 40

Abbildung 7: Darstellung eines Reaktors für die Herstellung von Carbon Black®. 41

Abbildung 8: Anwendungsbeispiele für Produkte des Sol-Gel-Verfahrens 41

Abbildung 9: Prinzip des Molekularen Prägens 43

Abbildung 10: Schematische Darstellung des Lithographieprozesses mit anschließendem Ätzprozess 43

Abbildung 11: Herstellung von selbstorganisierenden einlagigen Schichten 46

Abbildung 12: Visionen der Konvergenz und einer technologischen Architektur des 21. Jahrhundert 52

Abbildung 13: Systemgrenze für die vergleichende Ökobilanz 60

Abbildung 14: Lack- und Chromatierungsmengen (g/m² lackierter Aluminium-Automobilfläche) 74

Abbildung 15: Primärenergieverbrauch (g/m² lackierter Aluminium-Automobilfläche) 74

Abbildung 16: VOC-Emissionen (g/m² lackierter Aluminium-Automobilfläche) 75

Abbildung 17: Abfallanfall (g/m² lackierter Aluminium-Automobilfläche) 75

Abbildung 18: Treibhauspotenzial (kg/m² lackierter Aluminium-Automobilfläche) 78

Abbildung 19: Versauerungspotenzial (g/m² lackierter Aluminium-Automobilfläche) 79

Abbildung 20: Eutrophierungspotenzial (g /m² lackierter Aluminium-Automobilfläche) 79

Abbildung 21: Anwendungsbereiche von Katalysatoren 82

Abbildung 22: Styrol-Verbrauch (in %) aufgegliedert nach Produktgruppen 84

Abbildung 23: Verfahrensablauf der Herstellung von Styrol und Weiterverarbeitung zu Polystyrol 86

Abbildung 24: Prozessschema für die Adiabatische Dehydrierung von Ethylbenzol (EB) 88

Abbildung 25: Prozessschema für die Isotherme Dehydrierung von Ethylbenzol 89

Abbildung 26: Der Styrolprozess 90

Abbildung 27: Prozessschema für die oxidative Dehydrierung von Ethylbenzol (EB) 92

Abbildung 28: Energiebedarfe zur Produktion von 1 kg Styrol bzw. der Vorprodukte 95

Abbildung 29: Vergleich der Energiebedarfe der betrachteten Styrolsynthesen 96

Abbildung 30: Vergleich der Schwermetallemissionen in Wasser der betrachteten Styrolsynthesen 97

Abbildung 31: Schematische Darstellung eines CRT Bildschirmes 100

Abbildung 32: Schematischer Aufbau eines LC-Display 101

Abbildung 33: Schematischer Aufbau eines OLED 103

Abbildung 34: Schematischer Aufbau sowie vergrößerte Aufnahme eines CNT-FED 105

Abbildung 35: Produktlebensweg eines CRT-Monitors 108

Abbildung 36: Produktlebensweg eines LCD-Monitors 110

Abbildung 37: Produktlebensweg eines Plasmadisplay 112

Abbildung 38: Vergleich von LCD und OLED (1) 113

Abbildung 39: Vergleich von LCD und OLED (2) 114

Abbildung 40: Produktlebensweg eines OLED-Display 115

Abbildung 41: Produktlebensweg eines CNT-FED 117

Abbildung 42: Energieverbrauch der betrachteten Display-Technologien in den einzelnen Lebenswegstufen 122

Abbildung 43: Überblick über die wichtigsten Lampenarten 126

Abbildung 44: Aufbau einer Entladungslampe 127

Abbildung 45: Aufbau einer LED 129

Abbildung 46: Phasen der Glühlampenproduktion 132

Abbildung 47: Phasen der Produktion der Kompaktleuchtstofflampe 133

Abbildung 48: Phasen der Produktion der LED 133

Abbildung 49: Schematische Darstellung der Struktur des Chips einer AlInGaP – Leuchtdiode 134

Abbildung 50: Primärenergiebedarf für die Herstellung inklusive der Rohstoffgewinnung sowie der Gebrauchsphase bezogen auf BLM 140

Abbildung 51: Ausgewählte Emissionsmengen der betrachteten Varianten bezogen auf BLM141

Abbildung 52: Ausgewählte Emissionsmengen der betrachteten Varianten bezogen auf BLM143

Abbildung 53: Mögliche Freisetzungswege von Nanopartikeln 161

Abbildung 54: Zeitfenster der Gestaltung im Lebenszyklus 165

Abbildung 55: Spinnenseide Abbildung 56: Molekülstruktur der Spinnenseide 174

Abbildung 57: Nanopartikel durch Wirt-Gast-Synthese 175

Abbildung 58: Nebenreaktionen der Styrolsynthese 206

Abbildung 59: Herstellprozesse der Glühlampe 215

Abbildung 60: Herstellprozesse der Energiesparlampe 216

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nanoqualitäten und dadurch erwartbare positive ökologische Effekte und Potenziale.. bzw. problematische Wirkungen 2

Tabelle 2: Übersicht der untersuchten Fallstudien 5

Tabelle 3: Historischer Verlauf der Debatte zu Asbest 17

Tabelle 4: Historischer Verlauf der Debatte zu FCKW 18

Tabelle 5: Wirkungskategorien und dazu beitragende Substanzen 24

Tabelle 6: Nanoqualitäten und dadurch erwartbare positive Effekte und Potenziale bzw. ..... problematische Wirkungen 36

Tabelle 7: Bewertung von nanotechnologischen Verfahren 47

Tabelle 8: Übersicht der untersuchten Fallstudien 56

Tabelle 9: Übersicht der betrachteten Varianten 62

Tabelle 10: Eingesetzte Bindemittel und Härter bei den betrachteten Varianten 64

Tabelle 11: Typische Zusammensetzungen von unterschiedlichen Chrombädern: 67

Tabelle 12: Vergleich der Verfahren anhand der Bäderanzahl 68

Tabelle 13: Ökologische Vor- und Nachteile der Verfahren 69

Tabelle 14: Verfahrenstechnischer Ablauf der Klarlackbeschichtung 70

Tabelle 15: Veränderliche Größen und deren durchschnittliche Ausprägung für die..... verschiedenen Lacksysteme 71

Tabelle 16: Einsatzmengen für die Chromatierung und die Lackierung (g/m² lackierter..... Aluminium-Automobilfläche) 72

Tabelle 17: Primärenergieverbrauch (MJ/m² lackierter Aluminium-Automobilfläche) 72

Tabelle 18: Outputströme bezogen auf 1 m² lackierter Aluminium-Automobilfläche 73

Tabelle 19: Verwendete Wirkungsfaktoren 77

Tabelle 20: Produktionsdaten und Kapazitäten in Westeuropa 83

Tabelle 21: Styrol-Weltproduktion 84

Tabelle 22: Styrol-Preise 84

Tabelle 23: Vorteile der neuen Styrolsynthese mit Katalysator aus Kohlenstoff-Nanotubes 92

Tabelle 24: Bruttoenergiebedarf zur Produktion von 1 kg Styrol 94

Tabelle 25: Bruttobedarf an Roh- und Treibstoffen in MJ zur Produktion von 1 kg Styrol 94

Tabelle 26: Energiebedarfe in MJ zur Produktion von 1 kg Styrol bzw. der Vorprodukte 95

Tabelle 27: Energiebedarf der alternativen Styrolsynthese 96

Tabelle 28: Abschätzung von Verbrauchsmengen typischer OLED-Materialien 114

Tabelle 29: Vorteile der neuen nanotechnologiebasierten Displaytechnologien 118

Tabelle 30: Energieleistungsaufnahmen von Displaytechnologien 119

Tabelle 31: Massebilanzen von CRT und LCD 120

Tabelle 32: Quantitativer Vergleich der Umweltkategorien von CRT und LCD 121

Tabelle 33: Energieverbrauch der betrachteten Display-Technologien in den einzelnen ..... Lebenswegstufen 122

Tabelle 34: Eigenschaften und Einsatzbereiche von Leuchtdioden 130

Tabelle 35: Verwendete technische Daten der betrachteten Varianten 132

Tabelle 36: Energieverbräuche der einzelnen Varianten 137

Tabelle 37: Material- und Energiebedarfe zur Herstellung des Lampenbedarfs für BLM 138

Tabelle 38: Energiebedarfe für die Gebrauchsphase zur Erzeugung von BLM 139

Tabelle 39: Ausgewählte Emissionsmengen der betrachteten Varianten 141

Tabelle 40: (Potenzielle) Quecksilberemissionen der betrachteten Varianten 142

Tabelle 41: Leitbilder einer nachhaltigen Nanotechnologie 173

Tabelle 42: Übersicht ausgewählter nanotechnologiebasierter Produkte mit Anwendungsstatus 197

Tabelle 43: Weltförderung von Chromerz 203

Tabelle 44: Basisdaten für jeweils 1 kg applikationsfähigem Lack 204

Tabelle 45: Daten zur Applikation 205

Tabelle 46: Bruttobedarf an Roh- und Treibstoffen in mg zur Produktion von 1 kg Styrol 207

Tabelle 47: Bruttobedarf an Ausgangsstoffen in mg zur Produktion von 1 kg Styrol 207

Tabelle 48: Bruttowasserbedarf in mg zur Produktion von 1 kg Styrol 207

Tabelle 49: Bruttoemissionen bei der Produktion von 1 kg Styrol 208

Tabelle 50: Bruttoaufkommen an festem Abfall bei der Produktion von 1 kg Styrol 208

Tabelle 51: Bruttoaufkommen von wasserbelastenden Schadstoffen in mg bei der Produktion ... von 1 kg Styrol 209

Tabelle 52: Road Map of Display Technology 210

Tabelle 53: Massebilanz der Hauptbestandteile eines 17" CRT Monitors 211

Tabelle 54: Massebilanz für Hauptbestandteile eines 15" LCD-Monitors 212

Tabelle 55: CRT Inventar über die verschiedenen Lebenswegphasen pro funktioneller Einheit.... 213

Tabelle 56: LCD Inventar über die verschiedenen Lebenswegphasen pro funktioneller Einheit.... 214

Tabelle 57: Emissionsfaktoren für die Erzeugung von 1 kWh Elektroenergie (Energiemix ..... Deutschland) 217

Tabelle 58: Stoffströme pro BLM 218

Tabelle 59: Luftemissionen für pro BLM 221

10 Anhang

Tabelle 42: Übersicht ausgewählter nanotechnologiebasierter Produkte mit Anwendungsstatus

	Nanotechnologiebasiertes Produkt		nanobasierter Stoff bzw. nanoskalige Struktur	Herstellungsverfahren	Branche
OBERFLÄCHENFUNKTIONALISIERUNG UND –VEREDELUNG	***Mechanische Eigenschaften***				
	tribologische Schichten	Hartstoffschichten	ultradünne Schichten aus Oxiden oder Hartstoffen	Gasphasenabscheidung	Maschinenbau, Fahrzeugbau
		Hartstoff-Nano-kompositschichten	Nanokristallite und Nanopartikel in amorpher Matrix	Gasphasenabscheidung	
		Superharte C-Schichten	ultradünne Schichten; Nanokristallite in amorpher Matrix	PECVD; Vakuumbogen (Arc)	
	Festplatten-C-Topschichten	Korrosionsschutz und Tribologie	ultradünne Schichten; Nanokristallite in amorpher Matrix	PECVD; Vakuumbogen (Arc)	I&K
	Kratzschutzbeschichtung auf Soft-Materials	Oxidschichten auf Papier, Polymeren, Holz, Textilien	ultradünne Schichten, Nanoporen	Sol-Gel-Verfahren	Verpackung, Bau-technik, Papier...
	Kratzschutzbeschichtung	z.B. auf Glas und Metall	anorganisch-organische Hybridpolymere	Sol-Gel-Verfahren	Fahrzeugbau, Textil
	antiadhäsive Schichten	Gleitschichten, Anti-Graffiti-Schichten	ultradünne Schichten aus Polymeren	Selbstorganisation	Konsumgüter, Bautechnik, Schiffbau
	schlaggeschützte Fensterscheiben	Verbundschicht zwischen Glasscheiben	ultradünne Schicht aus Polymeren		Fahrzeugtechnik, Bautechnik
	Poliermittel	für chem.-mech. Polieren von Si-Wafern	nanokristalline Oxide (z.B. TiO_2)	Flammenhydrolyse	I&K
	thermische und chemische Schutzschichten				
	thermomechanische Schutzschichten	Turbinen, Motoren	Nanodispersion/-komposite; ultradünne Schichten	Gasphasenabscheidung; Sol-Gel-Verfahren	Luft- & Raumfahrt, Fahrzeugbau
	Diffusionsschutzschichten für Computerchips	Verhindern von Cu-Eindiffusion in Si	ultradünne Schichten aus Ti-Nitrid		I&K
	Schutzschichten gegen Gasdurchtritt	PET-Getränkeflaschen, Lebensmittelverpackungen	ultradünne Schichten aus Oxiden; anorganisch-organische Hybridpolymere	Gasphasenabscheidung; Sol-Gel-Verfahren	Lebensmittel
		Lebensmittelverpackungen, Tennisbälle	Nanopartikel (Silikate); Nanokomposite (SiO_2 in Polymer)	Mineralienabbau; Flammenhydrolyse	Lebensmittel, Konsumgüter

OBERFLÄCHENFUNKTIONALISIERUNG UND -VEREDELUNG	***Benetzungsverhalten***				
	superhydrophobe Schutzschichten	Diamor®, SICON®, gleichzeitig verschleißfest	ultradünne Schichten, Nanokristallite in amorpher Matrix	Vakuumbogen (Arc), Gasphasenabscheidung	div.
	selbstreinigende Textilien	hydrophob und oleophob	ultradünne Schichten aus Hybridpolymer	Sol-Gel-Verfahren	Textil
	Tintenstrahldruckerpapier	hydrophil	amorphe Nanopartikel (Oxide)	Flammenhydrolyse	I&K
	biozide Beschichtungen				
	antibakterielle/biozide Schutzschichten	antibakteriell	ultradünne Schichten	Soft Lithography	Lebensmittel; Bautechnik, Medizin, Schiffbau
		kontrollierte Freisetzung von Bioziden	Nanoporen aus Oxiden	Sol-Gel-Verfahren	
		photokatalytische Erzeugung von Hydroyl-Radikalen	Nanopartikel, ultradünne Schichten aus Oxiden	Sol-Gel-Verfahren, evtl. CVD	
	antibakterielle Textilien	keimtötende Beschichtung	Nanoschichten aus Polymeren	z.B. Soft Lithography	Textil, Medizin
		kontrollierte Freisetzung von Bioziden	Nanoporen aus Oxiden	Sol-Gel-Verfahren	
	optische Eigenschaften				
	Antireflexschichten für Gläser	Solarzellen, Fassaden u.a.	z.B. nanoporöse SiO_2-Schichten	Sol-Gel-Verfahren	Bautechnik, Energietechnik
	schaltbar transparente Beschichtungen	Fensterscheiben	ultradünne Schicht aus Nanokristallen	div.	Bautechnik, Fahrzeugtechnik
	Papier-Weißmacher		Nanopartikel (Oxide) als Schicht	Flammenhydrolyse	Konsumgüter
	Textilien	Färbung, ggf. Farbeffekte	Ruß-Nanopartikel	Flammrußverfahren	Textil
	Lacke, Kleber				
	Lacke	Farbbrillanz, Farbton, Farbeffekte u.a.	Nanopartikel und ultradünne Schichten aus Oxiden oder Kohlenstoff	Flammrußverfahren, nasschem. Abscheidung, Kolloidchemie	Fahrzeugtechnik, Konsumgüter
	Holzschutzanstriche	UV-Schutz	TiO_2-Nanokristalle	Flammenhydrolyse	Bautechnik
	Kleber	optimal eingestellte Fließeigenschaften	amorphe Nanopartikel (Oxide)	Flammenhydrolyse	Fahrzeugtechnik, Konsumgüter
		Silber-Leitkleber	Metall-Nanopartikel	div.	Fahrzeugtechnik, I&K

KATALYSE, CHEMIE, WERKSTOFFSYNTHESE	**Katalysatoren**	Nanopartikel-Katalysatoren	nanokristalline Metalle bzw. Halbleiter; Cluster	Fällung, Sol-Gel-Verfahren...	Chemie, Fahrzeug-technik, Umwelttechnik
		Nanopartikel-Photokatalysatoren	Nanokristalle, Cluster (Oxide oder Metalle)	Fällung, Sol-Gel-Verfahren...	Umwelttechnik, Chemie
		Zeolithe als Katalysatoren	nanoporöse Kieselsäuren (Zeolithe)	Selbstorganisation	Chemie, Umwelttechnik
		Molecularly Imprinted Polymers (MIPs)	nanoporöse Polymere und Oxide	Molecular Imprinting	Chemie, Medizin/ Pharma, Umwelttechnik
		nanoporöse Träger	nanoporöse Zeolithe, Aerogele u.a.	Schlickerguss, Sol-Gel-Verf., Strangpressen...	Chemie, Fahrzeug-technik, Umwelttechnik
		Nanoreaktoren	arganische Moleküle, Polymere, Oxide	Selbstorganisation...	Chemie
		Biokatalysatoren	nanopor. Oxide, ultradünne Schichten	Sol-Gel-Verfahren	Biotech, Umwelttechnik
	Molekularsiebe	Wasseraufbereitung u.a.	gesinterte Nanopartikel	Selbstorganisation, Kolloidchemie	Chemie, Umwelttechnik, Lebensmittelindustrie
	Ultrafiltrationsmembranen	Wasseraufbereitung u.a.	Nanoporöse Polymere	Selbstorganisation	
	Chromatographie-materialien	Säulenmaterial	nanoporöse Oxide	Sol-Gel-Verfahren	Umwelttechnik, Chemie Medizin/Pharma
		MIPs	nanoporöse Polymere	Molecular Imprinting	
	Ionenaustauscher		nanoporöse Zeolithe	Selbstorganisation	
	Entschäumer		nanokristalline Oxide (z.B. TiO_2)	Flammenhydrolyse	Pharma, Chemie
ENERGIEWANDLUNG UND -NUTZUNG	**Brennstoffzellen**	Nanokeramik-Feststoff-elektrolyt-Membranen für verbesserte Ionenleitfähigkeit	Keramik aus gesinterten Nanopartikeln	div.	Energietechnik, Fahrzeugtechnik
	Super-Kondensatoren	nanoporöse Elektroden	Nanoröhren, nanoporöse Carbonaerogele		Energietechnik
	Supraleiter	CeO2-Nanoschichten in YBCO-Kabeln	ultradünne Schichten aus Oxiden	z.B. Gasphasenabscheidung	Energietechnik, Medizin
	keramische Heizungszünder		Nanokeramik (SiC)	div. + Spritzguss + druckloses Sintern	Energietechnik
	Glühkerzen	Dieselmotor	Si-Nanopartikel in amorpher Keramik	Polymerpyrolyse	Fahrzeugtechnik
	Nanospitzen für Feldemissionsschalter	Zündanlagen	Piezokeramiken (Spitzen mit Nanodurchmesser)		Fahrzeugtechnik
	Schmierstoffe	MoS_2-"Fullerene"	anorganische Fullerene	Selbstorganisation	Fahrzeugtechnik
		Additive in Ölen	oxidische Nanopartikel (CeO_2)	div.	Fahzeugtechnik

KONSTRUKTION	**Baustoffe**	nanoskalige Beton-Zuschlagstoffe	Nanopartikel (SiO_2)	aus Filterstäuben, Flammenpyrolyse	Bautechnik
		Polymer-Zuschläge für Zement	Nanopartikel	n.bek.	Bautechnik
	Verkleidungen, Armaturen, Gehäuse	nanopartikel-verstärkte Thermoplaste	Nanopartikel	z.B. Furnacerußverfahren	Fahzrzeugtechnik, I&K, Konsumgüter
	Fahrzeugreifen (Partikel)	Ruß, Silikate	Nanokristalle und -partikel (Ruß, SiO_2)	Flammenverfahren	Fahrzeugtechnik
	Bauteile für medizinische Geräte	partikelverstärkte Elastomere	amorphe Nanopartikel (Oxide)	Flammenhydrolyse	Medizin
	Bauteile für Raketen-Triebwerke	hochtemperaturfeste, partikelverstärkte Elastomere	Edelmetall- und Oxid-Nanopartikel	Red. Von AgCl / Hydrolyse von Si-Alkoxid in Nylon-6	Luft- und Raumfahrt
	zusätzliche Funktionalisierung von Konstruktionswerkstoffen				
	antistatische Textilien	Bezugstoffe, Bekleidungsstoffe	gesinterte Kohlenstoff-Nanopartikel	Flammenverfahren	Fahrzeugtechnik, Textil
	farbiges Glas		Metall-Nanopartikel	Sol-Gel, Ionenimpl.	Bautechnik, Konsumgüter
INFORMATIONSVERARBEITUNG UND - ÜBERMITTLUNG	**nanoelektronische Bauelemente**	(C)MOS, Bipolartransistor	ultradünne laterale Nanostruktur aus Halbleiter	PVD, CVD, Lithographie	I&K
		High Electron Mobility Transistor	ultradünne laterale Nanostruktur aus Verbindungshalbleiter	PVD, CVD, Lithographie	
		Diffusionstrennschicht zw. Cu und Si	ultradünne Schicht aus nanokristallinen Nitriden	(Ammono-)Oxidation, Sputtern	
		metallische Nanoleiterbahnen	metallische Nanodrähte auf Oberflächen	Lithographie und elektrochemische Abscheidung	
	Displays	organische Leuchtdioden / OLED	ultradünne Schichten aus organischen Verbindungen	PVd, Spin-Coating, Tauchen	I&K, Fahrzeugbau
	Halbleiter-Laser	Quantenfilmlaser	ultradünne Schichten aus Halbleitern	CVD, PVD	I&K
	Spulenkerne für Mobil-kommunikation und GPS-Empfänger	partiell kristallisierte metallische Gläser	Nanokomposit aus Metall-Nanokristalliten in amorpher Metall-Matrix	partielle Nanokristallisation	I&K
	Farbfotokopierer, Farblaserdrucker	Trommel	Nanokomposit aus Farbstoff-Nanopartikeln in leitfähigem Polymer		I&K

NANOSENSOREN UND AKTUATOREN	**Sensoren**	GMR-Magnetfeld-Sensoren	ultradünne Schichten aus Metallen	CVD/PVD/MBE	Fahrzeugtechnik, Maschinenbau
	AFM-, STM-Spitzen	für Analytik und Nanostrukturierung	nanoskalige Spitzen aus Kohlenstoff-Nanoröhren	Gasphasenabscheidung + molekulare Manipulation, Ätzen	Nanotechnologie, Forschung
	Magnetfeldsensoren	GMR-Sensoren	ultradünne Schichten aus Metallen	CVD/PVD/MBE	I&K
		spinpolarisiertes Rastertunnelmikroskop	ultradünne Schichten und ultrafeine Spitzen aus Metallen oder Halbleitern	PVD, Ätzen	Analytik
		Magnetkraftmikroskop	ultradünne Schichten und ultrafeine Spitzen aus Metallen oder Halbleitern	PVD, Ätzen	Analytik
		optisches Nahfeldmikroskop	ultradünne Schichten und ultrafeine Spitzen aus Metallen oder Glas	PVD, Ätzen	Analytik
	Infrarot-Sensoren	Quantentrog-IR-Photodetektor	ultradünne Schichten	CVD, PVD, Selbstorganisation	I&K, Rüstung
	Temperatursensoren	Rasterwärmemikroskop	ultrafeine Spitze aus Metall		I&K, Analytik
	chemisch sensitive Rastersonden	chemisch funktionalisierte STM- und AFM-Spitzen	ultradünne Schichten, ultrafeine Spitzen und Moleküle	PVD, Ätzen; molekulare Manipulation	Analytik
	elektrochemische Rastersonden	Rastertunnelmikroskop	ultrafeine Spitzen aus Metall	Ätzverfahren	Analytik
		Rasterkraftmikroskop	ultradünne Schichten; ultrafeine Spitzen	Ätzverfahren	Analytik
	Lab-on-a-Chip-Systeme, Bio-(Gen)-Chips	SAMs zuz Zell-Immobilisierung	Moleküle, ultradünne Schichten	Selbstorganistion ,Soft Lithographie	Pharma, Medizin, Rüstung
		Halbleiterquantenpunkte als (Fluoreszenz-)Marker	Nanokristalle, ultradünne Schichten (Metalle, Halbleiter, Polymere)	div.	
	Stoßdämpfer, Vibrationsdämpfer	Ferrofluide	Nanokristalle aus Oxiden und Metallen	div.	Fahrzeugtechnik, Luft- und Raumfahrt, Rüstung

LEBENSWISSENSCHAFTEN	**Entschäumer**		nanokristalline Oxide (TiO_2, SiO_2)	Flammenhydrolyse	Pharma, Chemie
	Nanopartikel-Marker	Quantenpunkte	metallische Nanokristalle	div.	Pharma, Medizin
	Wirkstoffträger	Liposomen	organische Moleküle (Lipide)	Selbstorganisation	Pharma, Medizin
		poröse Oxidpartikel	nanoporöse Oxide (Al2O3)	Eloxalverfahren	Pharma, Medizin
	Gentransfersysteme für die Gentechnologie	Genpistole	DNA-beschichtete Nanopartikel aus Metall	div.	Medizin/Pharma, Biotechnologie
	biologische Dekontaminationsmittel	reaktive Nanopartikel	Oxide (zB. MgO) beladen mit Halogenen (z.B. Cl2Br2)	n.bek.	Pharma, Medizin, Rüstung
	Kosmetikartikel	Effektpigmente	ultradünne Schichten aus Nanopartikeln (TiO2, Fe2O3, SiO2...)	nasschemische Abscheidung	Kosmetik
		Hautgefühl	Nanopartikel (SiO_2)	Kolloidchemie	
		Faltenaufheller	amorphe Nanopartikel (Oxide)	nasschemische Abscheidung	
	Sonnenschutzcreme	TiO2-Nanokristalle	nanokristallines TiO_2	Flammenhydrolyse	Kosmetik

Quelle : (Paschen et al. 2003)

Tabelle 43: Weltförderung von Chromerz

Chromerz: Weltförderung von 1986 bis 1996 in 1000 t/a											
Jahr	**1986**	**1987**	**1988**	**1989**	**1990**	**1991**	**1992**	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**
Europa	5822,1	5648,9	5704,2	6394,7	5966,2	5527,9	5438,4	4201,3	4528,1	4887,5	3691
Afrika	4555,3	4552,2	4987,5	5772,1	5326,6	5820,6	4056,8	3246,5	4274,6	5941,9	5779,2
Amerika	273	243,4	282,1	320,8	307,4	433	499	357,6	458,6	462,4	458,5
Asien	968	926,8	1065,8	1385,7	1243,5	1376,5	1392,4	1357,8	1611,8	2333,4	2032,5
Ozeanien	72,2	61,8	70,3	60,3	6,2		8,2				
Welt insges.	**11690,6**	**11433,1**	**12109,9**	**13933,6**	**12849,9**	**13158,0**	**11394,8**	**9163,2**	**10873,1**	**13625,2**	**11961,2**

Quelle: (Eggert et al. 2000)

Tabelle 44: Basisdaten für jeweils 1 kg applikationsfähigem Lack

	1K CC	2 K CC	Wasser CC	Pulver CC	Nanolack
Primäenergieeinsatz [MJ]	87,00	97,70	62,90	124,00	146,55
Energetische Ressourcen [MJ]					
Erdöl	48,75	49,05	31,08	63,46	73,58
Erdgas	29,93	38,44	24,52	38,53	57,66
Uranerz	3,82	4,20	3,05	9,12	6,30
Steinkohle	2,95	4,00	2,82	8,57	6,00
Braunkohle	1,25	1,65	1,12	3,41	2,48
Wasserkraft	0,16	0,19	0,13	0,38	0,28
sonst. Brennstoffe	0,19	0,20	0,18	0,37	0,29
Stoffliche Ressourcen [kg]					
Steinsalz	0,217	0,045	0,124	0,379	0,067
Kalkstein	0,014	0,005	0,062	0,192	0,008
Emissionen in Luft					
CO2 [kg]	3,164	3,828	2,685	4,953	5,742
NM VOC [g]	11,960	15,400	8,831	12,810	23,100
Methan [g]	7,221	7,753	5,440	11,410	11,630
Nox [g]	6,492	8,145	5,048	8,395	12,218
SO2 [g]	4,325	6,785	3,841	8,163	10,178
CO [mg]	636	1036	595	990	1554
Staub [mg]	458	1646	399	812	2469
HCl [mg]	41	41	47	144	62
HF [mg]	10	8	11	33	11
Emissionen in Wasser					
Abwasser [l]	99,690	81,160	81,790	160,200	121,740
CSB [g]	6,738	10,560	6,608	8,144	15,840
TOC [g]	4,122	6,047	3,781	5,187	9,071
BSB [g]	1,649	1,244	1,281	1,421	1,866
Feststoffe [g]	0,876	6,620	0,661	1,971	9,930
HC [mg]	103,500	99,850	62,020	140,100	149,775
NaCl [g]	271,900	91,850	71,290	172,500	137,775
Eisen [mg]	12,760	12,330	8,247	18,290	18,495
Nickel [mg]	1,232	1,155	1,193	3,353	1,733
Chrom [mg]	0,236	0,225	0,150	0,326	0,338
Blei [mg]	0,209	0,616	0,168	0,491	0,924
Kupfer [mg]	0,125	0,117	0,097	0,229	0,176
Cadmium [mg]	0,036	0,035	0,028	0,066	0,052
Abfälle					
Industriemüll [g]	45,17	42,71	37,59	165,90	64,07
Hausmüll [g]	16,29	13,59	13,17	17,54	20,39
Sondermüll [g]	33,60	29,90	55,17	87,77	44,85
Radioaktive Abfälle [g]	1,12	1,27	0,83	2,30	1,90

Quelle: Harsch und Schuckert 1996 und eigene Darstellung

Tabelle 45: Daten zur Applikation

[MJ/Kar.]	1 K CC	2 K CC	Wasser CC	Pulver CC	Nanolack
Spritzkabine	206,20	207,70	164,50	160,80	164,50
ZW-Trockner	117,50	117,50	187,60	117,50	117,50
Trockner	428,40	428,40	545,80	428,40	428,40
Peripherie	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76
Lackbehandlung	51,80	51,80	51,80	41,46	51,80
Abwasser	18,53	18,53	48,57	-	18,53
Abluft	50,87	50,87	-	-	-

	1 K CC	2 K CC	Wasser CC	Pulver CC	Nanolack
Ressourcenverbrauch [MJ/Kar.]					
Erdöl	16,88	16,91	17,50	8,17	14,83
Erdgas	320,00	320,10	298,60	293,10	280,78
Uranerz	212,00	212,80	226,10	167,30	186,66
Steinkohle	123,10	123,50	131,30	97,13	108,33
Braunkohle	83,13	83,42	88,65	65,60	73,17
Wasserkraft	7,46	7,50	7,96	5,89	6,58
sonstiges					
Ressourcenverbauch [kg/Kar.]					
Steinsalz	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Kalkstein	0,433	0,434	0,461	0,342	0,381
Emissionen in Luft [kg/Kar.]					
CO2	42,10	41,60	40,00	33,00	36,49
NM VOC	0,029	0,022	0,02	0,015	0,019
Methan	0,0844	0,0846	0,0867	0,0692	0,074
Nox	0,0694	0,0653	0,0515	0,0392	0,057
SO2	0,0288	0,0289	0,0299	0,023	0,025
CO	0,0117	0,0112	0,0098	0,0074	0,010
Staub	0,01022	0,00996	0,00953	0,00689	0,009
HCl	0,00146	0,00146	0,00156	0,00115	0,001
HF	0,000525	0,000527	0,00056	0,000414	0,000
Emissionen in Wasser [g/Kar.]					
Abwasser [l/Kar.]	3709	3718	3809	3047	3261
CSB	3,774	3,78	3,875	1,2	3,316
TOC	8,527	8,531	8,109	6,887	7,483
BSB	0,5609	0,5618	0,5774	1,953	0,493
Feststoffe	7,563	7,589	8,063	5,971	6,657
HC	0,02228	0,02229	0,02252	0,002837	0,020
Chloride + NaCl	33,92	3,396	3,444	1,483	2,979
Eisen	0,07883	0,07909	0,08394	0,6074	0,069
Nickel	0,001333	0,001337	0,001415	0,0009721	0,001
Chrom	0,000871	0,0007321	0,0007762	0,0005519	0,001
Blei	0,00607	0,006091	0,006473	0,00479	0,005
Kupfer	0,0005642	0,0004243	0,00045	0,0003218	0,00037
Cadmium	0,00006807	0,00006829	0,00007229	0,00005013	0,00006
Abfälle [g/Kar.]					
Industriemüll	43,23	43,38	45,23	34,47	38,05
Hausmüll	3,64	3,64	3,70	0,70	3,19
Sondermüll	1,25	1,26	1,34	0,99	1,10
Radioaktive Abfälle [mg]	1,67	1,68	1,78	1,32	1,47

Quelle: Harsch und Schuckert 1996 und eigene Darstellung

Abbildung 58: Nebenreaktionen der Styrolsynthese

Die Dehydrierung von Ethylbenzol zu Styrol ist eine reversible, endotherme Gleichgewichtsreaktion:

- $C_6H_5C_2H_5 \leftrightarrow C_6H_5C_2H_3 + H_2$ $\Delta H^{600°C}$ = 124.9 kJ/mol (1)

Neben dieser Hauptreaktion finden noch mindestens folgende wichtige Nebenreaktionen statt (Lieb & Hildebrand 1982; Schoen 2002):

- Die Dealkylierung von Ethylbenzol zu Benzol (1%):

  $C_6H_5C_2H_5 \rightarrow C_6H_6 + C_2H_4$ $\Delta H^{600°C}$ = 101,8 kJ/mol (2)

- Die Bildung von Toluol (2%):

  $C_6H_5C_2H_5 + H_2 \rightarrow C_6H_5CH_3 + CH_4$ $\Delta H^{600°C}$ = -64,5 kJ/mol (3)

- Entstehung von Kohlenstoff durch Cracking:

  $C_6H_5C_2H_5 \rightarrow 8\ C + 5\ H_2$ $\Delta H^{600°C}$ = 1,72 kJ/mol (4)

Da die Reaktion in Gegenwart von Wasser abläuft gilt weiter:

- Die Wasserdampf-Moleküle reagieren mit Ethylen und Methan unter Bildung von Kohlenmonoxid und Wasserstoff:

  $2\ H_2O + C_2H_4 \rightarrow 2\ CO + 4\ H_2$ $\Delta H^{600°C}$ = 232,1 kJ/mol (5)

  $H_2O + CH_4 \rightarrow CO + 3\ H_2$ $\Delta H^{600°C}$ = 224,6 kJ/mol (6)

- Die Kohlenmonoxid-Konvertierung:

  $H_2O + CO \rightarrow CO_2 + H_2$ $\Delta H^{600°C}$ = -36,0 kJ/mol (7)

Der Wasserdampf erfüllt die wichtige Aufgabe den durch Gleichung (4) auf dem Katalysator entstandenen Kohlenstoff zu vergasen, um die Verblockung der aktiven Zentren des Katalysators und somit seine allmähliche Deaktivierung zu verhindern:

- $C + 2\ H_2O \leftrightarrow CO_2 + 2\ H_2$ $\Delta H^{600°C}$ = 99,6 kJ/mol (8)

Tabelle 46: Bruttobedarf an Roh- und Treibstoffen in mg zur Produktion von 1 kg Styrol

Fuel type	Input in mg
Crude oil	660,000
Gas/condensate	1,100,000
Coal	57,000
Metallurgical coal	350
Lignite	5,800
Peat	3
Wood	1
Biomass	720

Tabelle 47: Bruttobedarf an Ausgangsstoffen in mg zur Produktion von 1 kg Styrol

Raw material	Input in mg
air	73,000
barytes	<1
bauxite	790
bentonite	230
calcium sulphate	23
chalk	<1
chromium	<1
clay	16
dolomite	11
feldspar	<1
ferromanganese	1
fluorspar	7
granite	<1
gravel	3
iron	940
lead	1
limestone	2,100
nickel	<1
nitrogen	28,000
olivine	8
oxygen	27
phosphate as P2O5	<1
potassium chloride	1
rutile	<1
sand	110
shale	64
sodium chloride	1,800
sulphur (bonded)	30
sulphur (elemental)	87
zinc	<1

Tabelle 48: Bruttowasserbedarf in mg zur Produktion von 1 kg Styrol

Source	Use for processing (mg)	Use for cooling (mg)	Totals (mg)
Public supply	3,600,000	-	3,600,000
River canal	3,400	59,000	62,000
Sea	440,000	125,000,000	126,000,000
Unspecified	140,000	28,000,000	28,000,000
Well	16	840	850
Totals	4,100,000	154,000,000	158,000,000

Quelle: I Boustead: Ecoprofiles of plastics and related intermediates Published by APME, Brussels, 1999

Tabelle 49: Bruttoemissionen bei der Produktion von 1 kg Styrol

Emission	From fuel production (mg)	From fuel use (mg)	From transport operations (mg)	From process operations (mg)	From biomass use (mg)	Totals (mg)
Dust	690	380	6	32	-	1,100
CO	160	1,300	66	25	-	1,600
CO2	340,000	2,000,000	19,000	4,300	-670	2,400,000
SOX	1,900	4,600	260	60	-	6,800
NOX	3,300	5,700	140	89	-	9,200
N2O	<1	<1	-	-	-	<1
Hydrocarbons	490	310	41	1,500	-	2,400
Methane	5,800	1,700	-	360	-	7,900
H2S	-	-	-	<1	-	<1
HCl	16	<1	-	<1	-	16
Cl2	-	-	-	<1	-	<1
HF	1	<1	-	<1	-	1
Lead(Pb)	-	<1	-	<1	-	<1
Metals	1	2	-	<1	-	3
F2	-	-	-	<1	-	<1
Mercaptans	-	<1	-	<1	-	<1
Organo-Cl	-	-	-	<1	-	<1
Aromatic-HC	-	-	-	140	-	140
Polycyclic-HC	-	-	-	<1	-	<1
Other organics	-	-	-	3	-	3
CFC/HCFC	-	-	-	1	-	1
Aldehydes (CHO)	-	-	-	<1	-	<1
HCN	-	-	-	<1	-	<1
H2SO4	-	-	-	<1	-	<1
Hydrogen (H2)	-	-	-	46	-	46
Mercury (Hg)	-	-	-	<1	-	<1
Ammonia (NH3)	-	-	-	<1	-	<1
CS2	-	-	-	<1	-	<1
DCE	-	-	-	<1	-	<1
VCM	-	-	-	<1	-	<1

Tabelle 50: Bruttoaufkommen an festem Abfall bei der Produktion von 1 kg Styrol

Type	From fuel production (mg)	From fuel use (mg)	From process operations (mg)	Totals (mg)
Mineral	11,000	-	3,500	15,000
Mixed industrial	330	-	780	1,100
Slags/ash	1,400	60	530	1,900
Inert chemical	<1	-	1,100	1,100
Regulated chemical	16	-	440	460
Unspecified	<1	-	13	13
Construction	-	-	18	18
Metals	-	-	6	6
To incinerator	-	-	750	750
To recycling	-	-	92	92
Paper & board	-	-	<1	<1
Plastics	-	-	2	2
Wood waste	-	-	<1	<1

Quelle: I Boustead: Ecoprofiles of plastics and related intermediates Published by APME, Brussels, 1999

Tabelle 51: Bruttoaufkommen von wasserbelastenden Schadstoffen in mg bei der Produktion von 1 kg Styrol

Emission	From fuel production (mg)	From fuel use (mg)	From transport operations (mg)	From process operations (mg)	Totals (mg)
COD	4	-	-	300	310
BOD	3	-	-	18	21
Acid (H+)	<1	-	-	39	39
Dissolved solids	47	-	-	42	89
Hydrocarbons	30	<1	-	46	76
NH4	<1	-	-	7	8
Suspended solids	16	-	-	300	320
Phenol	3	-	-	<1	3
Al+++	-	-	-	100	100
Ca++	-	-	-	1	1
Cu+/Cu++	-	-	-	<1	<1
Fe++/Fe+++	-	-	-	<1	<1
Hg	-	-	-	<1	<1
Pb	-	-	-	<1	<1
Mg++	-	-	-	<1	<1
Na+	-	-	-	700	700
K+	-	-	-	<1	<1
Ni++	-	-	-	<1	<1
Zn++	-	-	-	<1	<1
Metals - unspecified	<1	-	-	450	450
NO3-	-	-	-	3	3
Other nitrogen	<1	-	-	7	7
CrO3	-	-	-	<1	<1
Cl-	-	-	-	3,500	3,500
CN-	-	-	-	<1	<1
F-	-	-	-	<1	<1
SO4--	-	-	-	270	270
CO3--	-	-	-	200	200
Phosphate as P2O5	-	-	-	<1	<1
Arsenic	-	-	-	<1	<1
DCE	-	-	-	<1	<1
VCM	-	-	-	<1	<1
Detergent/oil	-	-	-	53	53
Dissolved Cl2	-	-	-	<1	<1
Organo-chlorine	-	-	-	<1	<1
Dissolved organics	-	-	-	30	30
Other organics	-	-	-	1	1
Sulphur/sulphide	-	-	-	1	1

Quelle: I Boustead: Ecoprofiles of plastics and related intermediates Published by APME, Brussels, 1999

Tabelle 52: Road Map of Display Technology

Road Map of Display Technology (1)

	R&D Theme	2000	2005	2010
①Enlargement	Size	32	50	50
②Energy Saving	Power Consumption	1	1／3	1／5
③High Resolution	Deg. of Minuteness	15～40ppi	40～50ppi	50～100ppi
Luminescence Efficiency	LCD	2lm/W	3lm/W	4lm/W
	PDP	1.2lm/W	5lm/W	10lm/W
	CNT-FED	NA	7lm/W	14lm/W
	Organic EL	1～2 lm/W	7 lm/W	10lm/W
	CRT	2lm/W	2lm/W	2lm/W
Power Consumption	LCD	140W	120W	100W
	PDP	300W	200W	100W
	CNT-FED	70W	70W	40W
	Organic EL	NA	60W	30W
	CRT	200W	230W(HVTV)	200W(HVTV)
Stability of Pixels	LCD	2%	2%	2%
	PDP	2%	2%	1%
	CNT-FED	15%	2%	1%
	Organic EL	2%	2%	1%
	CRT	1%	1%	1%

:Advantage Point :Disadvantage Point * The characteristics are evaluated on 32V-type display.

Road Map of Display Technology (2)

	R&D Theme	2000	2005	2010
①Enlargement	Size	32	50	50
②Energy Saving	Power Consumption	1	1／3	1／5
③High Resolution	Deg. of Minuteness	15～40ppi	40～50ppi	50～100ppi
Lifetime	LCD	60,000h	60,000h	60,000h
	PDP	8,000h	10,000h	10,000h
	CNT-FED	10,000h	10,000h	10,000h
	Organic EL	100h	6,000h	10,000h
	CRT	10,000h	10,000h	10,000h
Speed of Response	LCD	15msec	13msec	10msec
	PDP	10msec	10msec	10msec
	CNT-FED	2～3msec	2～3msec	2～3msec
	Organic EL	1μsec	1μsec	1μsec
	CRT	2～3msec	2～3msec	2～3msec
Resolution	LCD	40ppi	50ppi	70ppi
	PDP	30ppi	40ppi	50ppi
	CNT-FED	30ppi	50ppi	60ppi
	Organic EL	75ppi	130ppi	200ppi
	CRT	30ppi	60ppi	60ppi

:Advantage Point :Disadvantage Point * The characteristics are evaluated on 32V-type display.

Tabelle 53: Massebilanz der Hauptbestandteile eines 17" CRT Monitors

Material/Component	Sub-component	Mass (kg)	
Lead oxide glass		9,76	
	Lead		0,45
Steel		5,16	
Plastics		3,04	
	Polycarbonate (PC)		0,92
	Styrene-butadiene co-polymer		0,83
	Polyethylene ether (PEE)		0,74
	Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)		0,32
	High-impact polystyrene (HIPS)		0,15
	Triphenyl phosphate		0,05
	Tricresyl phosphate		0,02
	Phosphate ester		0,01
Printed wiring boards (PWB) and components		0,85	
Cables/wires		0,45	
Aluminum (heat sink)		0,27	
Nickel alloy (invar)		0,27	
CRT shield assembly		0,24	
Ferrite		0,17	
Deflection yoke assembly		0,15	
Demagnetic coil		0,13	
Video cable assembly		0,11	
Power cord assembly		0,11	
Electron gun		0,1	
CRT magnet assembly		0,08	
Audio cable assembly		0,07	
Frit		0,07	
Solder		0,03	
Phosphors		0,02	
Aquadag		0,02	
Other (misc.)		0,06	
TOTAL		**21,16**	

Quelle: Socolof et al. (2001)

Tabelle 54: Massebilanz für Hauptbestandteile eines 15" LCD-Monitors

Material/Component	Subcomponent	Mass (kg)	
Steel		2,53	
Plastics		1,78	
	Polycarbonate (PC)		0,52
	Poly(methyl methacrylate) (PMMA)		0,45
	Styrene-butadiene copolymer		0,36
	Polyethylene ether (PEE)		0,3
	Triphenyl phosphate		0,09
	Polyethylene terephthalate (PET)		0,06
Glass		0,59	
Printed wiring boards (PWB) and components		0,37	
Cables/wires		0,23	
Aluminum (heat sink, transistor)		0,13	
Solder (60% tin, 40% lead)		0,04	
Color filter pigment		0,04	
Polyvinyl alcohol (PVA) (for polarizer)		0,01	
Liquid crystals, for 15 LCD unspecified [2]		0,0023	
Backlight lamp (cold cathode fluorescent lamp, CCFL)		0,0019	
	Mercury		3,99E-06
Transistor metals, other (e.g., Mo, Ti, MoW)		0,0019	
Indium tin oxide (ITO) (electrode)		0,0005	
Polyimide alignment layer		0,0005	
Other (e.g., adhesives, spacers, misc.)		0,0031	
TOTAL		**5,73**	

Quelle: Socolof et al. (2001)

Tabelle 55: CRT Inventar über die verschiedenen Lebenswegphasen pro funktioneller Einheit

Inventory type	Upstream Vorproduktion	Mfg Herstellung	Use Gebrauch	EOL Entsorgung	Total	Per Unit
Inputs						
Primary materials	15,80	421,00	219,00	-3,32	653,00	kg
Ancillary materials	2,11	3,54	3,47	10,70	19,80	kg
Water	554,00	11400,00	1140,00	-27,30	13100,00	kg (or L)
Fuels	8,00	428,00	0,00	-2,95	433,00	kg
Electricity	73,20	129,00	2290,00	0,23	2490,00	MJ
Total energy	366,00	18300,00	2290,00	-128,00	20800,00	MJ
Outputs						
Air pollutants	30,00	183,00	449,00	2,47	664,00	kg
Wastewater	17,00	1510,00	0,00	-3,65	1520,00	kg (or L)
Water pollutants	0,81	20,10	0,07	-0,06	20,90	kg
Hazardous waste	489,00	113,00	0,00	8,28	9,46	kg
Solid waste	9,55	81,20	83,30	-1,66	172,00	kg
Radioactive waste	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	kg
Radioactivity	38000000,00	3780000,00	48000000,00	4800,00	89800000,00	Bq

Quelle: Socolof et al. (2001)

Tabelle 56: LCD Inventar über die verschiedenen Lebenswegphasen pro funktioneller Einheit

Inventory type	Upstream Vorproduktion	Mfg Herstellung	Use Gebrauch	EOL Entsorgung	Total	Per Unit
Inputs						
Primary materials	235,00	49,20	80,10	-2,19	362,00	kg
Ancillary materials	1,06	204,00	1,29	2,11	208,00	kg
Water	263,00	2150,00	425,00	-18,00	2820,00	kg (or L)
Fuels	14,70	25,80	0,00	-1,95	38,60	kg
Electricity	34,60	316,00	853,00	0,16	1200,00	MJ
Total energy	633,00	1440,00	853,00	-84,40	2840,00	MJ
Outputs						
Air pollutants	112,00	64,80	168,00	1,30	346,00	kg
Wastewater	8,57	3120,00	0,00	-2,41	3130,00	kg (or L)
Water pollutants	0,46	1,23	0,03	-0,04	1,68	kg
Hazardous waste	0,01	4,64	0,00	1,64	6,29	kg
Solid waste	13,10	12,60	31,10	-4,42	52,30	kg
Radioactive waste	22,10	3140,00	31,10	-5,23	3190,00	kg
Radioactivity	12000000,00	10200000,00	17900000,00	3400,00	40100000,00	Bq

Quelle: Socolof et al. (2001)

Abbildung 59: Herstellprozesse der Glühlampe

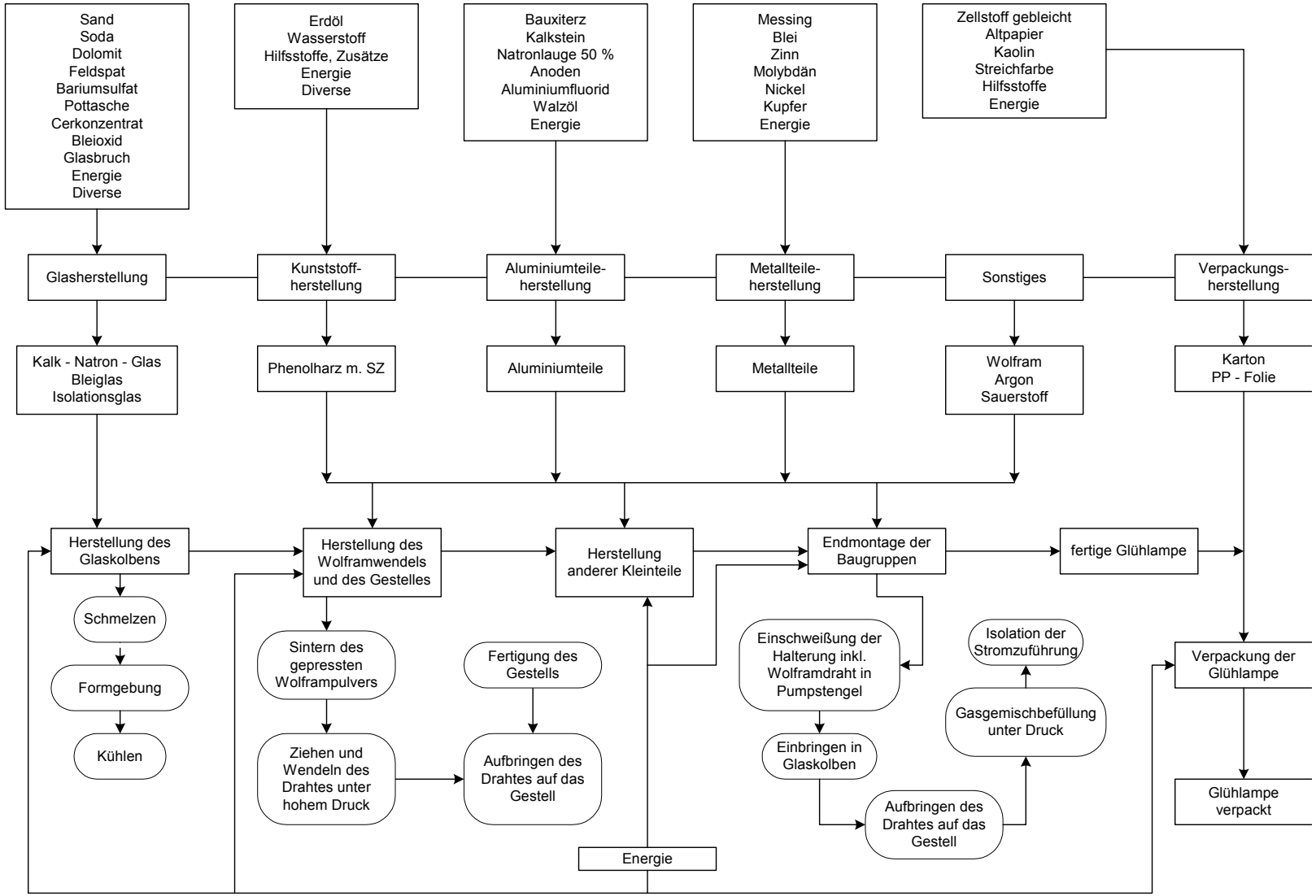


Abbildung 60: Herstellprozesse der Energiesparlampe

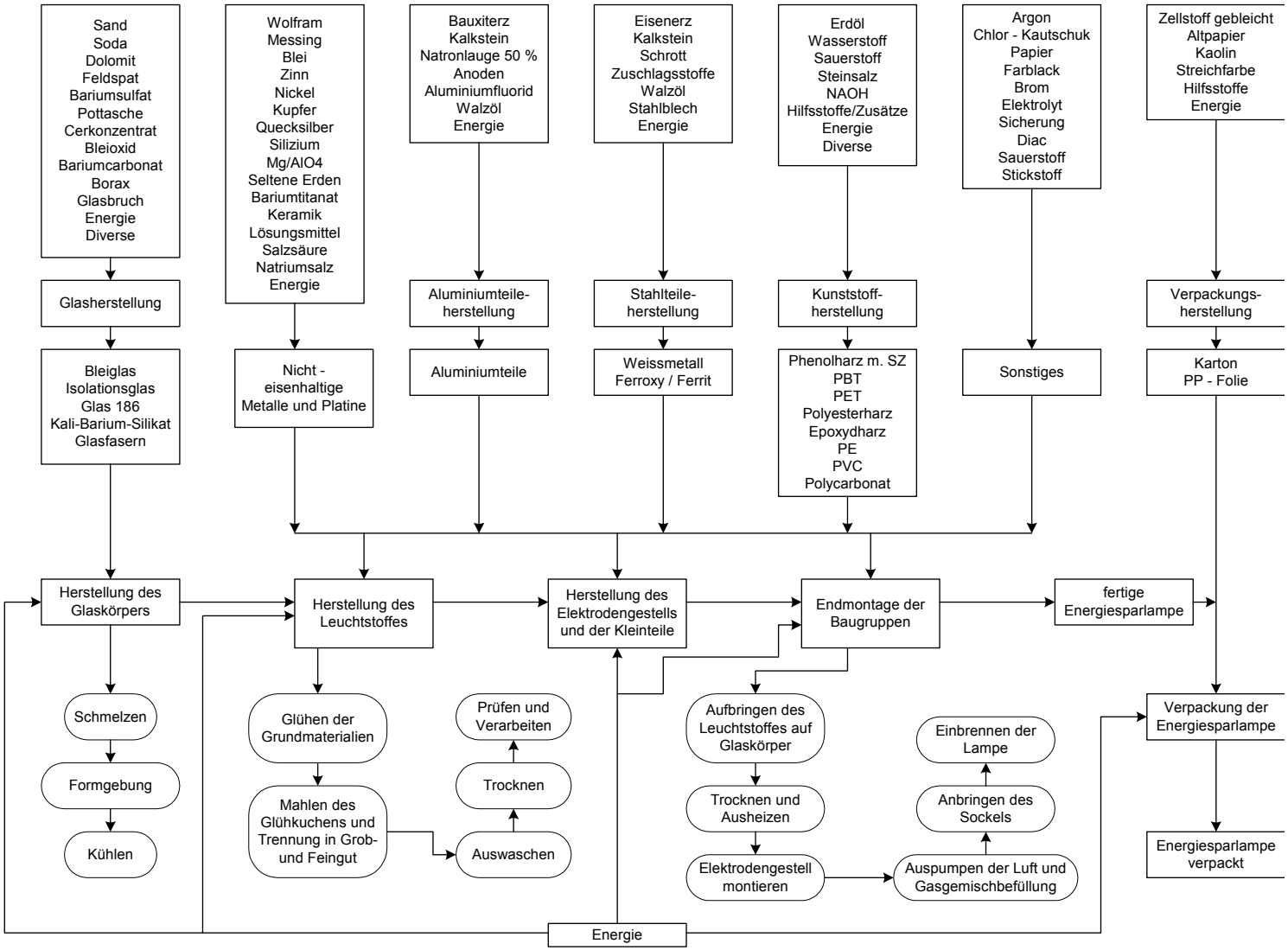


Tabelle 57: Emissionsfaktoren für die Erzeugung von 1 kWh Elektroenergie (Energiemix Deutschland)

Emissionen	Menge	
Kohlendioxid	638,948	g
Methan	1,587	g
Schwefeldioxid	686,148	mg
Stickoxid	583,023	mg
Kohlenmonoxid	222,744	mg
Staub / Partikel	76,660	mg
NMVOC	39,016	mg
Distickstoffmonoxid	24,316	mg
Chlorwasserstoff	19,836	mg
Fluorwasserstoff	1,237	mg
Nickel	0,038	mg
Blei	0,036	mg
Quecksilber	0,012	mg
Arsen	0,011	mg
Cadmium	0,003	mg

Quelle: GEMIS 4.1 (2003)

Tabelle 58: Stoffströme pro BLM

Stoff	GL	EL	EL Longlife	LED Heute	LED Zukunft
Sand [g]	178,96	40,70	22,79		
Soda [g]	71,02	8,73	4,89		
Erdöl [g]	45,79	190,56	106,71		
Quarzsand [g]				9,25	2,55
Dolomit [g]	35,22	1,03	0,58	0,001	0,00
Feldspat [g]	28,28	4,70	2,63		
Schwerspat [mg]				22,27	6,13
Taubes Gestein [g]				593,97	163,61
Steinsalz [g]		0,16	0,09	4,352	1,20
Pottasche [g]	3,47	9,04	5,06		
Glasbruch [g]	87,49	15,68	8,78		
Papier [g]		0,41	0,23		
Zellstoff gebleicht [g]	12,52	6,35	3,56		
Altpapier [g]	90,57	46,77	26,19		
Schrott [g]		2,36	1,32	0,338	0,09
Sauerstoff [g]		22,17	12,41		
Sauerstoff [dm³]	21,990	22,75	12,74		
Stickstoff [mg]			0,00	0,003	0,00
Stickstoff [dm³]		14,95	8,37		
Wasserstoff [g]	0,08	1,03	0,58		
Wasser [kg]				54,43	14,99
Luft [kg]				2,03	0,56
Boden [mg]				37,24	10,26
Calciumcarbonat [g]		1,23	0,69	0,670	0,18
Bariumsulfat [g]	3,80	0,11	0,06		
Cerkonzentrat [g]	0,21	0,33	0,18		
Magnesiumcarbonat [g]				1,00	0,28
Ammoniumnitrat [mg]				0,14	0,04
Bariumcarbonat [g]		4,25	2,38		
Bariumtitanat [g]		0,20	0,11		
Bauxiterz [g]	57,00	11,00	6,16		
Edelmetallerz [g]			0,00	1851,84	510,09
Eisenerz [g]		11,96	6,70	2,979	0,82

Nickelerz [g]				207,08	57,04
Blei - Zinkerz [mg]				53,52	14,74
Kupfererz [mg]				0,33	0,09
Zink - Kupfererz [mg]				26,12	7,19
Zink - Blei - Kupfererz [mg]				5,67	1,56
Zink - Bleierz [mg]				0,11	0,03
Yttrium [g]		2,29	1,28		
Europium [g]		0,12	0,07		
Cer [g]		0,09	0,05		
Terbium [g]		0,06	0,03		
Antimon [g]		0,05	0,03		
Bleioxid [g]	5,43	0,27	0,15		
Borax [g]		2,07	1,16		
Aluminiumfluorid [g]	0,21	0,04	0,02		
Mg/AlO4 [g]		0,63	0,35		
NAOH [g]		0,02	0,01		
Natronlauge [g]	5,10	0,99	0,55		
Schwefel [mg]				1,08E-03	0,00
Eisen [mg]				1,73E-05	0,00
Bentonit [mg]				6,90	1,90
Wolfram [g]	0,13	0,02	0,01		
Messing [g]	1,28	4,61	2,58		
Blei [g]	1,81	0,34	0,19		
Zinn [g]	0,39	0,52	0,29		
Molybdän [g]	0,03				
Nickel [g]	0,55	0,34	0,19		
Kupfer [g]	0,55	11,20	6,27		
Quecksilber [g]		0,01	0,01		
Silizium [g]		0,33	0,18		
Lösungsmittel [g]		0,18	0,10		
Salzsäure [g]		1,21	0,68		
Natriumsalz [g]		0,06	0,03		
Energie UCPTE 88	1,51	20,65	11,56		
Keramik [g]		0,52	0,29		

Argon [g]	0,001				
Chlor - Kautschuk [g]		0,20	0,11		
Kaolin [g]	0,72	0,37	0,21		
Streichfarbe [g]	6,37	3,23	1,81		
Walzöl [g]	0,12	0,10	0,06		
Anoden [g]	5,11	0,99	0,55		
Farblack [g]		0,14	0,08		
Brom [g]		0,39	0,22		
Elektrolyt [g]		1,02	0,57		
Sicherung [g]		0,15	0,09		
Diac [g]		0,10	0,06		
Hilfsstoffe, Zusätze [g]	3,81	2,02	1,13		
Zuschlagsstoffe [g]		1,11	0,62		
Diverse [g]	0,357	0,86	0,48		

Quelle: Mani (1994), Gabi 4 Datenbank (2001) und eigene Berechnungen

Tabelle 59: Luftemissionen für pro BLM

	GL	EL	EL Longlife	LED Heute	LED Zukunft
Kohlendioxid [g]	352.148,444	78.241,795	70.523,432	233.673,144	64.659,664
Staub / Partikel [g]	45,938	10,481	9,074	28,555	7,901
Kohlenmonoxid [g]	123,061	28,656	25,358	81,831	22,643
Kohlenwasserstoff (u.a. polyzykl. arom.) [g]	4,537	8,222	4,604	0,000	0,000
Stickoxid [g]	322,878	74,238	65,944	214,590	59,377
Distickstoffmonoxid [g]	13,618	3,268	2,847	8,894	2,461
Schwefeldioxid [g]	382,636	91,968	80,183	256,384	70,937
Aldehyde [mg]	1,200	6,400	3,584	0,001	0,000
sonst. org. Verb. (u.a. VOC, NVOC, halogenhaltig) [g]	21,462	5,381	4,644	15,182	4,200
Sonstige anorganische Emissionen [g]	0,000	0,000	0,000	764,323	210,534
Ammoniak [mg]	0,300	2,000	1,120	2,085	0,574
Chlorwasserstoff [mg]	10.923,190	2.385,596	2.165,070	7.280,712	2.014,611
Fluorwasserstoff [mg]	683,356	149,041	135,170	483,039	133,623
Blei [mg]	23,184	8,886	6,493	13,367	3,699
Cl2 [mg]	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000
Quecksilber [mg]	6,651	1,711	1,464	4,441	1,229
Fluor / Fluoride [mg]	2,900	0,600	0,336	0,026	0,007
Teer [g]	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Chlor / Chloride [mg]	2,400	0,500	0,280	0,000	0,000
Mercaptane [mg]	0,400	0,200	0,112	0,000	0,000
Cadmium [mg]	2,243	2,882	1,743	1,132	0,313
Zink [mg]	2,720	9,590	5,370	0,607	0,167
Selen [mg]	1,700	13,020	7,291	0,104	0,029
Arsen [mg]	8,229	13,060	7,791	4,301	1,190
Nickel [mg]	23,050	20,874	13,279	13,947	3,859
Kupfer [mg]	5,270	40,350	22,596	0,025	0,007
Eisen [mg]	6,350	48,650	27,244	0,336	0,092
Molybdän [mg]	0,003	0,000	0,000	0,001	0,000
Sonstige Schwermetalle [mg]	0,000	0,000	0,000	1,324	0,365
Sonstige Emissionen [g]	0,000	0,000	0,000	1.708,521	470,615
Methan [g]	873,070	190,488	173,027	579,401	160,327

Quelle: Mani (1994), Gabi 4 Datenbank (2001) und eigene Berechnungen

Anhang zur Fallstudie 5: Expertenbefragung

Um eine aktuelle Einschätzung möglicher Gefahren und Risiken zu erlangen, wurden sechs führende Wissenschaftler in Deutschland, England und den USA schriftlich befragt. Ziel der Befragung war, den aktuellen wissenschaftlichen Diskussionsstand zum Thema zu erlangen und die bisher zusammen getragenen Kenntnisse zu möglichen negativen Effekten zu validieren und zu erweitern. Ähnlich wie die Gliederung des Kapitels, unterteilte sich die Befragung in generelle Einschätzungen über Gefahren und die Wirkung auf Mensch und Umwelt sowie in spezielle Fragen zu Nanopartikeln. Der Fragebogen enthielt elf offene Fragen, die von den Experten schriftlich, zum Teil sehr ausführlich, beantwortet wurden. Im Folgenden ist die ausführliche Darstellung der Antworten zu den einzelnen Fragen aufgeführt.

Teil 1 Risiken von Nanotechnologie

Alle Experten betonten, dass die Datenlage zu einer eingehenden Evaluierung von Risiken momentan viel zu schlecht sei. Die bis jetzt gemachten Untersuchungen gäben ernst zu nehmende Hinweise auf mögliche Risiken, die nicht außer Acht gelassen und besser erforscht werden sollten. Bestätigt wurde von den meisten Experten dass momentan Nanopartikel die Hauptquelle für mögliche Gefährdungen seien.

Auswertung der Fragen

Der erste Teil des Fragebogens fragte allgemein nach Anzeichen/ Quellen für Risiken oder Gefahren im gesamten Feld der nanotechnologischen Entwicklungen und wie ernst oder absehbar die einzelnen Risiken eingeschätzt wurden. Zusätzlich wurde nach möglichen Problemen im Bereich der Selbst-Replikation und Selbst-Organisation sowie bei der Verschmelzung von Nano- und Biotechnologie gefragt.

1. *Nanoscience und -technology ist ein sehr breites Feld. In welchen Entwicklungsbereichen und Anwendungsfeldern sehen Sie Anhaltspunkt für mögliche Gefahren und Risiken?*

   Sehen Sie mögliche Problem in den Bereichen Selbstorganisation oder Selbstreplikation (selbstreplizierenden Nanobots sind an dieser Stelle nicht gemeint)?

   Könnten Gefahren von der Verschmelzung bislang getrennter Technologiebereichen ausgehen wie beispielsweise die Verschmelzung von Bio- und Nanotechnologie?

<u>Folgende Entwicklungen sind nach Auffassung der Experten zumindest Besorgnis erregend:</u>

- die Entwicklung von Nanopartikeln
- der Einsatz von Nanopartikeln in medizinischen Anwendungen
- Verseuchung des Grundwassers bei Überschwemmungen von Produktionsstätten von Nano-Materialien
- Verseuchung von Menschen, des Bodens und der Luft bei Transportunfällen mit Nano-Materialien

- Belastung mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz
- Einlass von Fabrikabwässern ins Grundwasser
- Konsumgüter
- Alle Entwicklungen Im Feld der Nanotechnologie gleich zu setzen und gleich zu behandeln
- Visionen von Nanobots sind unrealistisch, lenken aber von den wirklichen Problemen ab
- Selbst replizierende Systeme könnten problematische Konsequenzen haben
- Verschmelzung von Bio- und Nanotechnologie unproblematisch
- Biopersistenz

Hinsichtlich der Nanopartikel betonte ein Experte, dass allein die Entwicklung, Produktion und Verarbeitung einer neuen Klasse von sehr kleinen und sich nach neue chemischen Regeln als bisher gewohnt verhaltenden Partikeln sei bereits Anlass zu Besorgnis. Das gleiche gelte für die Verwendung von Nanopartikeln bei neuen medizinischen Verfahren, bei denen Nanopartikel direkt in den menschlichen Körper eingeführt werden. Bei möglichen Verseuchungen durch Unfälle ist außerdem noch völlig unklar, wie sich die einzelnen Nano-Materialien auf die betroffenen Öko-Systeme sowie auf den Menschen auswirken. Im Verlauf der weiteren Entwicklung werden auch Probleme bei Konsumgütern erwartet.

Ob Probleme vom Feld der Selbstreplikation und Selbstorganisation ausgehen könnten, wurde unterschiedlich bewertet. Die meisten Experten sahen momentan kein sich abzeichnendes Problem. Ein Experte wie in diesem Zusammenhang auf mögliche Probleme von der medizinischen Anwendung von „neuen, dendrimeren Nanopartikeln“ hin.

Ebenfalls unterschiedlich wurden mögliche Probleme bei der Verschmelzung von Nano- und Biotechnologie beurteilt. Die meisten Experten wiesen darauf hin, dass die Verschmelzung schon relativ weit fortgeschritten sei und keine negativen Effekte zu erwarten seien, so lange die nötigen Schritte um diese zu vermeiden eingehalten werden. Ein Experte wies auf mögliche Gefahren in der medizinischen Anwendung hin, ebenfalls am Beispiel der „neuen, dendrimeren Nanopartikeln“ hin.

Ein Experte gab zu bedenken, dass Nanotechnologie eine enabling technology in vielen Bereichen sei. Sie undifferenziert zu behandeln sei nicht sonderlich nützlich. Auch mache Nanotechnologie bestimmte Entwicklungen in bestimmten Industrien möglich. Wenn es in einer bestimmten Industrie Besorgnis erregende Entwicklungen gäbe, müsse die betreffende Industrie und nicht die nanotechnologische Entwicklung reguliert werden.

Ein Experte vertrat die Auffassung, dass die Verschmelzung von Bio- und Nanotechnologie unproblematisch sei, da deren Entwickler mögliche Gefahren erkennen könnten. Die anderen Experten äußerten zu diesem nur, dass die Verschmelzung bereits im Gange sei.

Ein Experte wies darauf hin, dass die Biopersistenz von Nanomaterialien problematisch werden könnte. Sie ist für einige Nano-Anwendungen notwendig, etwa, wenn sie in gezielten Bereichen des Körpers ihre Wirkungen entfalten sollen.

2. *Welche Arten von Risiken / Gefahren halten Sie für wahrscheinlich? Gehen die Gefahren dabei eher von der Forschung an sich oder durch Anwendung aus) Handelt es sich dabei eher um technologiespezifische Gefahren oder eher um anwendungsspezifische Risiken?*

Nach der Art der Risiken befragt, gaben die Experten folgende Antworten

- Bei Inkorporation von Nanopartikeln im Körper durch medizinische Anwendungen in den Blutkreislauf bestehen Risiken für das Herz-Kreislauf-System, Gefäßwanddrusen (atheromatous plagues), die Leber, die Milz und andere Organe
- Technologiespezifische Risiken auf Grund der chemischen, biologischen und physikalischen Eigenschaften von Nanopartikeln
- Workplace exposure
- Bei Einatmung von Nanopartikeln: Entzündungen, Fibrosen, Krebs und im Falle von Nanotubes Mesotheliome in der Lunge.
- In der Nase abgelagerte Nanopartikel können mit bislang unbekannten Risiken ins Gehirn wandern
- Dermale Anwendung von Nanopartikeln
- Nanopartikel durch Verbrennung
- Negative Langzeiteffekte am Herz-Kreislauf-System durch die Akkumulation von Nano-Materialen durch öftere, unfreiwillige Belastung
- Mögliches Lungenkrebsrisiko durch Nanotubes
- Massenproduktion von Partikeln
- Langfristige Akkumulation von Partikeln in der Umwelt

Ein Teil der Experten geht grundsätzlich davon aus, dass mit einer neuen Technologie auch neue Risiken auftauchen. Ein Experte betonte, dass einige Stoffe irgendwann tonnenweise hergestellt werden würden und so das Risiko ungewollter Belastungen stiege. Auch sei es nur eine Frage der Zeit, bis Nanotechnologien Bestandteil aller Produkte (IuK, Kleidung, Nahrungsmittel, Plastik, etc.) seien.

Allerdings betonen die Experten, dass genannte Risiken momentan nur angedeutet aber aufgrund fehlender Daten, vor allem im toxikologischen Bereich, nicht seriös beschrieben und beziffert werden. Die Notwendigkeit von Gefahrenabschätzung wurde deswegen betont.

Im Zusammenhang mit möglichen Problemen durch Emissionen am Arbeitsplatz wurde darauf hingewiesen, dass ein Großteil der zukünftigen Produktion von Nano-Materialien in Reinraumbedingungen stattfinden würde, was die Belastung von Angestellten in der Produktion verringern würde. Ebenfalls bemerkte ein Experte, dass auf Grund der momentan noch geringen produzierten Menge an Nanopartikeln die Risiken durch Belastungen am Arbeitsplatz in der Summe eher klein seien.

Durch die zukünftige Massenproduktion, so ein Experte, bestünde zum ersten Mal die Möglichkeit, dass größere Teile der Bevölkerung mit Nano-Materialien ausgesetzt seien.

Es wurde auch mehrfach darauf hingewiesen, dass sich Risken aus dem gesamten Lebenszyklus eines Produkts ergäben. Über negative Langezeiteffekte lägen momentan nicht genügend Untersuchungen für seriöse Aussagen vor.

Ein Experte wies explizit auf die Risiken von Nanotubes hin. Aus der Mineralfaser Toxikologie wisse man, dass die Inkorporation (insbesondere die Inhalation) von biopersistenten Fasern mit einer Länge von 20 µm und mehr ein deutlich erhöhtes Krebsrisiko zur Folge hat. Wegen ihrer Länge von mehr als 50 µm und ihrer außerordentlichen Stabilität sei nicht auszuschließen, dass Nanotubes erstens biopersistent sind (sie können immerhin in konzentrierten Säuren nicht gelöst oder zerkleinert werden) und zweitens nach Inkorporation ebenfalls ein erhöhtes Krebsrisiko in sich bergen. Im Gegensatz zu den teilweise hysterischen Reaktionen im Zusammenhang mit Asbestfasern könnte man Verfahrensstrategien entwickeln, so der Experte, die trotzdem die kontrollierte Anwendung von Nanotubes erlauben, deren Materialeigenschaften äußerst viel versprechend seien.

Im Bereich der medizinischen Anwendungen gehen Experten aber davon aus, dass die bestehenden Testverfahren mögliche Risiken aufdecken würden bevor es zu einer Massenproduktion käme. Für Konsumgüter träfe dies aber nicht zu, was die Gefahr mit sich brächte, dass Tests erst nach dem ersten Auftreten von toxischen Risiken durchgeführt würden.

Auch wurde mehrmals darauf hingewiesen, dass Nanopartikel aus Verbrennungsprozessen, obwohl sie nicht in das Forschungsdesign dieser Studie passen, eine weitere, nicht zu unterschätzende Quelle für Risiken ist. Für Nanopartikel aus Verbrennungsprozessen gilt aber ebenso, dass ihre toxikologischen Wirkungen unzureichend erforscht sind.

Der Zweite Teil des Fragebogens stellte gezielte Fragen zum Thema Nanopartikel. Gefragt wurde in diesem Teil, ob sich bereits generelle Aussagen über mögliche Gefahren durch Nanopartikeln machen lassen und wo der größte Handlungsbedarf läge, um diese abzuwenden. Außerdem wurde nach spezifischen Ursachen für Gefahren, nach dem Verhalten von Nanopartikeln und nach spezifischen Wirkungen auf Umwelt und Gesundheit gefragt. Eine spezielle Frage galt dem Fall von nanoskaligem Titanoxid in der Sonnenmilch.

Teil 2 Partikel

3. *Im Zentrum der aktuellen Diskussion um mögliche Gefahren stehen vor allem Nanopartikel. Lassen sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt generelle Aussagen hinsichtlich ihrer Umwelt- und Gesundheitsrisiken machen?*

   Wie gesichert sind die Erkenntnisse hinsichtlich möglicher Gefahren?

   Wo liegt Ihrer Ansicht Handlungsbedarf und wie dringend ist er?

   Bitte nennen Sie uns die Ihnen bekannten, wichtigsten Forschungsgruppen und Publikationen zum Thema

Gefragt, ob sich momentan generalisierbare Aussagen hinsichtlich der Umwelt- und Gesundheitsrisiken machen ließen, gaben die Experten folgende Antworten

- Nachhaltige Effekte bei Entwicklung von Nanotechnoloie bisher im Hintergrund
- Partikeltoxikologie kann Beitrag zu den Effekten von Nanotechnologie leisten, ersetzt aber nicht weitere Untersuchungen sowie neue Methoden
- Untersuchungen müssen sowohl den Atemtrakt als auch Herz-Kreislauf-System, Immunsystem und Nervensystem einbeziehen
- Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen Ultrafeinen und Nanopartikeln
- Nanopartikel aus Verbrennungsprozessen verursachen Entzündungen der Lunge stärker als größere Partikel, haben Auswirkungen auf das Herz-Kreislauf-System und die Klümpchenbildung im Blut
- Ein Großteil der Masse eines Nanopartikels ist harmlos und negative Effekte gehen von einer Komponente des Partikels aus
- Nicht alle Nano-Materialien haben die gleichen Effekte
- Chronische, niedrig-dosierte Belastungen mit Nanopartikeln könnte negative Folgen für Mensch und Umwelt haben
- Es gibt im Falle der Inhalation von Nanopartikel unterschiedliche Effekte wenn Partikel zusammenklumpen oder einzeln bleiben
- Unterschiede zwischen freien und eingebetteten Partikeln ist hinsichtlich der Wirkungen ebenfalls zu beachten
- Sind Partikel klein genug, können sie in den Körper eindringen und sich in ihm bewegen
- Je kleiner die Größe, desto höher die Toxizität

Nach Angaben der Experten gibt es eine große Datenbasis über die toxikologische Wirkung von Nanopartikeln im Zusammenhang mit Luftverschmutzung. Nach Ansicht der Experten sind die in ihnen Beschriebenen Wirkungen auf Lunge, Herz-Kreislauf-System und Klümpchenbildung im Blut gut belegt. Noch ausstehend sind aber epidemiologische Untersuchungen weil nur wenige Studien die Partikel gemessen haben. Die Aussagen zu inhalierten, in der Luft gelösten Partikel lassen sich aber nicht eins zu eins auf künstlich hergestellte Nanopartikel übertragen. Ein Beispiel für mögliche Parallelen zwischen beiden Arten ist die Eigenheit von ultrafeinen Partikeln körpereigenen Abwehrmechanismen zu entgehen, in Zellen einzudringen, durch den Körper zu wandern und oxidativen Stress auszulösen.

Ein Experte zog daraus den Schluss, dass einerseits die aus der Partikeltoxikologie gewonnen Erkenntnisse nicht außer Acht gelassen werden dürfen, andererseits aber neue, auf industriell hergestellten Nanopartikel zugeschnittene Methoden entwickelt werden müssten. Er votiert für ein „neues strategisches Konzept der toxikologischen Bewertung entwickelt wird, dass nicht auf den etablierten und meines Erachtens irreführenden Untersuchungsschemata beruht, sondern die moderne, in erheblichem Maße auf Nanobiotechnologie beruhende genomische und proteomische, toxikonomische Technologie integriert“ .

Ein Experte berichtete von seiner jüngsten in vivo Untersuchung zur Wirkung von Fullerenen auf Forellenbarsche und Wasserflöhe. Während die Fullerene auf die Wasserflöhe toxisch wirkten, starben die Fische nicht und zeigten auch keine Anzeichen von Krankheiten. Allerdings wurden Hinweise auf Gehirnschädigungen und mögliche Entzündungen gefunden, außerdem reagierte der Fisch insgesamt sehr stark auf die Fullerene. Die in der Untersuchung verabreichten Dosierungen an Fullerenen (1 ppm), so der Experte, würden allerdings bei der Anwendung von Fullerenen mir der Ausnahme von Unfällen selten auftreten. Hohe Konzentrationen von Nanopartikeln mit bedenklichen Folgen könnten aber erreicht werden, wenn sie etwa in Sonnenmilch oder Kosmetika verwendet würden und im Wasser ausgewaschen würden und über die Zeit anreicherten. Gleichzeitig sei das Verhalten von Nanopartikel zu berücksichtigen. Einzelne Nanopartikel hätten vermutlich sowohl bei Inhalation als auch in wässriger Form andere Eigenschaften als verklumpte Nanopartikel.

Zusätzlich berichtete der Experte, das nicht alle künstlich hergestellten Nano-Materialien gleich wirken. Zum Beispiel ergaben seine Untersuchungen, dass Fullerene toxisch auf E. Coli Bakterien wirken. Beschichtete Singel-Walled-Nanotubes wirken allerdings nicht toxisch auf E. Coli. Auch gibt es nach Ansicht eines Experten möglicher weise Unterschiede hinsichtlich der Effekte bei einzelnen, freien Nanopartikeln und eingebundenen, etwa in einen Verbundstoff.

Der Zusammenhang zwischen steigender Toxizität bei abnehmender Größe ist nach Ansicht eines Experten fast erwiesen. Er gelte ebenso wie die Möglichkeit zur Migration von Partikeln im Körper für die Mehrheit der Partikel.

Nach ihrer Einschätzung der Verlässlichkeit des momentanen Kenntnisstandes gefragt, gaben die Experten folgende Antworten

- Toxikologische Erkenntnisse seien stark, fehlend seien epidemiologische Untersuchungen

Die meisten Experten gaben keine Antwort auf die Frage.
Handlungsbedarf sahen die Experten in folgenden Bereichen

- Erforschung der Partikelwirkung auf Atemtrakt, Herz-Kreislauf-System, Immunsystem und Nervensystem unter Berücksichtigung der bisherigen toxikologischen Forschung

Die anderen Experten ließen die Frage aber aus.

4. *In der Diskussion hinsichtlich der Risiken von Nanopartikeln wird darauf hingewiesen, dass mögliche Sicherheits-, Umwelt-_ und Gesundheitsrisiken weniger von der Substanz, sondern mehr von der Größe und Form der Partikel abhängen. Wie beurteilen Sie die die folgenden Aussagen*:
    - Problematische Wirkungen der Nanopartikel sind unabhängig von der jeweiligen Substanz (ja/nein/ z.T.)
    - Die problematischen Wirkungen sind entscheidend von den Charakteristika der Oberflächen abhängig (ja/ nein/ z.T.)

- Die problematischen Wirkungen sind entscheidend abhängig von den Stoffen und den Oberflächeneigenschaften

Auf die Frage, ob negative Effekte von Nanopartikeln eher von der Größe, eher von der Substanz oder eher von der Beschaffenheit der Oberfläche ausgingen, gaben die Experten folgende Antworten:

- Negative Effekte gehen sowohl von Größe, chemischer Zusammensetzung und Oberflächenstruktur aus
- Ebenfalls Einfluss auf die Wirkung haben Dosis, Beschichtung, Form, Verteilung im Gewebe, Spannung, Grad der Agglomeration
- Effekte werden auch vom Zustand des aufnehmenden Körpers bedingt: Zustand des Immunsystems, Aufnahmeweg (Haut, Atmung, direkte Injektion etc.), Gesundheitszustand

Grundsätzlich gingen alle Experten davon aus, dass sowohl Größe als auch Substanz und Oberflächenstruktur Einfluss auf mögliche negative Effekte haben. Eine Gewichtung der Aspekte wurde nicht vorgenommen. Die Experten unterstrichen viel mehr, dass die drei Faktoren eng miteinander zusammen hingen. So seien insbesondere die Atom/Molekülclustern an sehr großen Oberflächen ein entscheidendes Kriterium für Nanopartikel, die die besonderen Reaktionsmuster bedingen und Nanopartikeln von grobdispersen Partikeln unterscheiden. Aus diesem Grund spielten sowohl die chemische Zusammensetzung als auch die physikalische Struktur dieser Atom/Molekülcluster sowie die notwendige Größe der Oberfläche die entscheidende Rolle. Ein Experte wies darauf hin, dass je kleinere die Partikel und je größer im die Oberfläche im Verhältnis zur Masse werde, je mehr Entzündungen sie in der Lunge hervorriefen. Das gleiche gelte für die Reaktivität der Oberfläche. Die Fähigkeit eines Partikels Entzündungen in der Lunge hervor zu rufen ergäbe sich demnach aus der Oberflächengröße mal der chemischen Reaktivität.

Ein Experte wies darauf hin, dass die chemische Reaktivität der Oberfläche sowie andere stark von der Art der jeweiligen Beschichtung sowie ihrer Beständigkeit abhängen. Die Oberflächenbeschaffenheit und damit verbundene chemische Reaktionen werden wahrscheinlich am stärksten die Interaktion eines Nanopartikels mit einer Zelle bestimmen.

5. *Die Toxizitätsforschung hat deutlich gemacht, dass Generalisierungen zur Toxizität von Stoffen problematisch sind. Dies würde bedeuten, dass mehr oder weniger alle Nano-Stoffe in Partikelform hinsichtlich toxischer Wirkungen mit dem entsprechenden Aufwand evaluiert werden müssten. Gibt es zum jetzigen Zeitpunkt generalisierende Aussagen, die auf alle oder zumindest mehrere Partikelformen zutreffen (Bspw. Systematisierung nach Stoffklassen, Oberflächeneigenschaften etc.)?*

   Welche Kriterien würden Sie für eine Klassifizierung empfehlen?

   Bitte nennen Sie uns die Ihnen bekannten, wichtigsten Forschungsgruppen und Publikationen zum Thema

Auf die Frage, ob man verallgemeinerbare aussagen zur Toxizität von Nanopartikeln treffen könne, gaben die Experten folgende Aussagen:

- Verantwortlich für Entzündungen ist die Größe der Oberfläche im Verhältnis zum Gesamtvolumen. Da die Oberfläche bei kleineren Partikeln im Verhältnis immer größer wird, sind sie toxischer als größere Partikel. (Ein Experte schränkte diese Regel auf Partikel ein, die über eine niedrige Lösbarkeit verfügen). Trotzdem muss bei einer toxikologischen Beurteilung immer die chemische Zusammensetzung und die physikalische Struktur beachtet werden.
- Es ist momentan zu früh, um Gruppen oder Kategorien von Nano-Materialien zu bilden, über die man gemeinsame Aussagen hinsichtlich negativer Effekte treffen könnte.
- Klassifikation ist erst dann möglich, welche Eigenschaften der Nanopartikel für toxische Effekte verantwortlich sind.
- Forschung zur Systematisierung fängt gerade erste an
- Verallgemeinerbar sind lediglich die Faktoren, die unter Frage 4 genannt wurden
- Klassifizierung nach Biopersistenz, biologisch verfügbarer Oberfläche und Aggregationsverhalten in Milieus möglich.

Lediglich ein Experte war der Auffassung, Klassifizierungen könnten bereits gebildet werden. Er schlug ohne Begründung eine Klassifizierung nach Biopersistenz, biologisch verfügbarer Oberfläche und Aggregationsverhalten in Milieus vor.

6. *Mögliche negative Effekte von Nanopartikeln hängen stark von ihrem Verhalten bei Freisetzung ab. Zum Beispiel davon, ob sie sich schnell zu Aggregaten verbinden, die ihre Nano-Eigenschaften verlieren, oder nicht.*

   Können generalisierbare Aussagen zu dem Verhalten von Nanopartikeln getroffen werden (Agglomeration etc. Adsorption etc.)? Oder existieren gegenwärtig allein Aussagen bzgl. einzelner Nanopartikel?

   Bitte nennen Sie uns die Ihnen bekannten, wichtigsten Forschungsgruppen und Publikationen zum Thema

Gefragt, ob sich bereits generalisierbare Aussagen hinsichtlich des Verhaltens von Nanopartikeln bei Freisetzung treffen lassen, gaben die Experten folgende Antworten:

- Mit Sicherheit können sich Nanopartikel in gasförmigen und flüssigen Medien zu Aggregaten verbinden. Allerdings ändert sich ihre Gesamtoberfläche und damit auch die Reaktivität erst, wenn sich weitere Atome oder Moleküle in das Nanopartikelagglomerat setzen.
- Die Dispersion von Aggregaten ist gegenüber einzelnen Nanopartikeln reduziert
- Das Agglomerationsverhalten hängt von der Oberflächenbeschichtung, der chemischen Reaktivität und der Spannung ab. Generelle Regeln wie „Alle Fullerene Klumpen“ gibt es nicht.
- Aggregierte Partikel können sich im menschlichen Körper eventuell wieder von einander lösen.
- Partikel von 20 bis 50 Nanometer Größe scheinen ins Gehirn zu wandern. Partikel von 1 bis 20 Nanometer Größe scheinen ins Blut und von dort in die Leber, die Milz und das Gehirn zu wandern (Hypothese, noch nicht vollständig getestet sowie Rolle von Beschichtungen noch unklar).
- In der Luft befindliche Partikel agglomerieren in hoher Konzentration (10 hoch 7 bis 10 hoch 8 Partikel pro Kubikzentimeter) homogen innerhalb von zehn Sekunden. Niedrigere Konzentrationen brauchen erheblich länger.
- Je größer die Oberfläche desto Größer die Möglichkeit, dass sich Stoffe anlagern. Die Anlagerung wird gleichzeitig von der Oberflächenreaktivität bestimmt.
- Partikel könnten weniger toxisch wirken wenn sie „altern“

7. *Welche Wirkungen können freigesetzte Nanopartikel auf die Umwelt haben (bspw. Verhalten im Wasser, im Boden, Aufnahme in die Nahrungskette etc.)?*

   Bitte nennen Sie uns die Ihnen bekannten, wichtigsten Forschungsgruppen und Publikationen zum Thema

Auf die Frage nach möglichen negativen Effekten von Nanopartikeln auf die Umwelt gaben die Experte folgende Antworten.

- Fullerene verursachen oxidativen Stress bei Forellenbarschen und wirken leicht toxisch auf Wasserflöhe (siehe Frage 3).
- Fullerene wirken möglicherweise toxisch auf Erdwürmer
- Freigesetzte Nanopartikel könnten sowohl über die Luft als auch über Wasser und Boden in die Nahrungskette gelangen. Untersuchungen liegen allerdings nicht vor.
- Es wurde verstärkt auf Forschungsbedarf hingewiesen

Ein Experte verwies darauf, dass Untersuchungen die eine leichte Toxizität von Fullerenen auf Erdwürmer haben. Er weist aber darauf hin, dass es Wissenschaftlern nicht gelungen ist, die Ergebnisse zu wiederholen. Eine Reihe von Experten verwiesen darauf, dass ihnen keine bekannt seien.

8. *Welche Informationen über schädliche Wirkungen auf die menschliche Gesundheit gibt es (z. B. über TiO2 ungecoatet und gecoatet, kurzfristiges und langfristiges Verhalten)?*

   Bitte nennen Sie uns die Ihnen bekannten, wichtigsten Forschungsgruppen und Publikationen zum Thema

Auf die Frage nach möglichen negativen Effekten von Nanopartikeln auf den Menschen gaben die Experte folgende Antworten:

- Krebsrisiko durch Nanotubes
- Entzündliche Wirkungen von Titandioxid in der Lunge
- Entzündliche Wirkung von Nanopartikeln im Gehirn
- Toxische Wirkung stark von Beschichtung abhängig

Ein Experte wies auf die Risiken von Nanotubes hin. Aus der Mineralfaser Toxikologie wisse man, dass die Inkorporation (insbesondere die Inhalation) von biopersistenten Fasern mit einer Länge von 20 µm und mehr ein deutlich erhöhtes Krebsrisiko zur Folge habe. Wegen ihrer Länge von mehr als 50 µm und ihrer außerordentlichen Stabilität sei nicht auszuschließen, dass Nanotubes erstens biopersistent sind (sie können in konzentrierten Säuren nicht gelöst oder zerkleinert werden) und zweitens nach Inkorporation ebenfalls ein erhöhtes Krebsrisiko in sich bergen. Allerdings könne man mm Gegensatz zu den teilweise hysterischen Reaktionen auf Asbestfasern Verfahrensstrategien entwickeln, die trotzdem die kontrollierte Anwendung von Nanotubes erlauben, deren Materialeigenschaften in der Tat äußerst viel versprechend seien.

Titandixoid in Nano-Größe verursacht in vitro Entzündungen und Lungenkrebs bei Ratten. Allerdings sind bei beiden Testgebieten hohe Dosen verabreicht worden, und es ist unklar, ob

Menschen solch hohen Dosierungen ausgesetzt werden. So war der Lungenkrebs bei Ratten das Resultat eine zweijährigen Zwangsinhalation von nanoskaligem Titandioxid in hoher Konzentration (Zehn Milligramm pro Kubikmeter). Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Menschen ist deswegen fragwürdig. Gleichzeitig hat sich in Untersuchungen aber auch gezeigt, dass verschiedene Nanopartikel (30 nm Virus, 50 nm Kolloid-Gold, 35 nm Kohlenstoff, 30 nm Mn-Oxid) in geringerer Dosis und kürzeren Zeitspannen bei Deposition in der Nase bei Ratten und Affen von den Geruchsnerven aufgenommen wurden und ins Gehirn wanderten. Mn-Oxid verursachte dabei bei Ratten in einer Konzentration von 450 µg/m³ und zwölf Tagen Belastung Reaktionen, die auf Entzündungen hinwiesen.

9. *Momentan gibt es unterschiedliche Auffassungen über die Schädlichkeit von Nanopartikeln, die als Bestandteil von Sonnemilch verwendet werden (Titandioxid). Hersteller behaupten (auf der Basis von entsprechenden Untersuchungen), dass die Partikel nicht durch die Haut in den Körper eindringen können. Dies wird allerdings vielfach bezweifelt. Wie schätzen Sie die Wirkung von Titandioxid in Nanogröße in Sonnenmilch ein?*

   Ebenfalls wir momentan kontrovers diskutiert, ob das „coaten“ von Titandioxid Partikeln wesentliche Probleme vermeiden kann. Was ist Ihre Einschätzung?

   Bitte nennen Sie uns die Ihnen bekannten, wichtigsten Forschungsgruppen und Publikationen zum Thema

Gefragt nach möglichen negativen Effekten von nanoskaligem Titandioxid, gaben die Experten folgende Antworten.

- Es gebe keine Anzeichen, dass nanoskaliges Titandioxid alle Hautschichten durchdringt
- Es fehlen Untersuchungen zur Applikation an Wunden und bei Personen mit Hautallergien
- Es fehlen Untersuchungen zur Applikation von entzündeter und (sonnen)verbrannter Haut
- Mit elektrophilen, öligen Molekülen beschichtet kann nanoskaliges Titandioxid leicht in die Haut eindringen
- Studien über eventuellen Verbleib der Partikel im Körper, besonders bei Babys und Kindern, seien nötig
- Vorsicht sei immer noch geboten

Im Gegensatz zu den meisten Experten, die die Anwendung von nanoskaligem Titandioxid in Sonnenmilch zumindest nicht problematisch sahen, warne ein Experte vor weiterer Verwendung. Er verwies auch darauf, dass die Frage der Mutagenität nicht geklärt sei

Teil 3 Regulierung

Der letzte Teil des Fragebogens bezieht sich auf Aspekte der Regulierung von Nanotechnologie und konkretem Handlungsbedarf.

10. *Gesellschaft und die Umwelt haben Anspruch auf Schutz vor möglichen negativen Wirkungen von Nanotechnologie bevor Kausalbeziehungen wissenschaftlich bestätigt*

sind. Gemäß dem Vorsorgeprinzip müssen die Regulierungsbehörden bei begründeter Besorgnis Maßnahmen zur Verhinderung oder Begrenzung von Schäden einleiten. In welchen Bereichen besteht nach Ihrer Ansicht am ehesten Handlungsbedarf hinsichtlich einer Regulierung?
In welchen Bereichen müssten schnell verstärkte Forschungsanstrengungen unternommen werden, um eine existierende Besorgnis entweder zu widerlegen oder zu bestätigen?

Nach eventuellem Handlungsbedarf für Regulierung von Nanotechnologie befragt, gaben die Experten folgende Antworten

- Entwicklung eines strategischen Konzepts zur Bewertung von primären und sekundären Zielorganen/ Orten
- Aktuelle technologische Entwicklungen und Forschung im Bereich der Nanotechnologie sollten auf Grund ihrer der Vielzahl zukünftiger Benefits nicht auf Grund des Vorsorgeprinzips eingeschränkt werde.
- Umfangreiche Forschung zur Toxizität und möglichen Gefahren der neuen Materialien sollte in die Wege geleitet werden.
- Es sollte eine Balance zwischen technologischer Entwicklung und Verständnis von Toxizität geben
- Regierung und Industrie sollten die Mittel zur Ermöglichung der genannten Forschung bereit stellen
- Regierung und Industrie sollten die Mittel zur Risikobewertung und –management bereit stellen
- Die Protokolle von ECETOC (European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals) und OPPTS (Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substances) sollten überarbeitet werden um neue Risiken durch Nanopartikel aufzunehmen

Mehrere Experten merkten an, dass die Möglichkeiten von nanotechnologischer Entwicklung unermesslich seien. Entwicklungsanstrengungen jetzt bereits auf Grund berechtigten Verdachts möglicher Toxizität einzustellen, stünde aber in keinem Verhältnis zu den erwarteten Gewinnen durch Nanotechnologie. Vielmehr solle darauf geachtet werden, schon jetzt die wissenschaftlich gesicherte Grundlage für Risikobewertung und Risikomanagement gelegt werden. Die dafür notwendigen Mittel seien ebenso wichtig wir Investitionen in die lukrativere Industrie.

Ein Experte schlug gar ein vollständiges Konzept zur Untersuch und Bewertung von möglichen Gefahren vor:

> „Der dringendste Handlungsbedarf hinsichtlich einer Regulierung liegt meines Erachtens in der Entwicklung eines neuen strategischen Konzepts zur toxikologischen Bewertung nicht nur des Aufnahmeortes /-organs sondern auch der sekundären Zielorgane. Dieses Konzept sollte auf modernen genomischen, proteomischen und toxikonomischen Untersuchungen mit High-Throughput Technologie beruhen. Dieses Konzept würde nicht nur eine umfassendere Bewertung und spezifischere Regulierung eines neuen

Produktes gewähren, sondern auch dem Hersteller im Kontakt mit den entsprechend ausgestatteten toxikologischen Labors eine zeitnahe Risikoabschätzung liefern.

Ein solches strategisches Konzept sollte interaktiv zwischen Forschung, Herstellern und Behörden entwickelt werden, das vorbildlich für die Europäische Union sein könnte. Damit könnte Deutschland auch auf dem Sektor der nachhaltigen Entwicklung neuer Nanoprodukte weiter seine Führungsrolle ausbauen."

Besonderer Wert wurde auf die Erforschung von Nanotubes, da sie im Verdacht stehen asbestähnliche Wirkungen zu haben, und dem Verhalten von Nanopartikeln in der Lunge gelegt. Ebenso wichtig sei die Erforschung der Effekte bei Akkumulation von Partikeln im Gehirn und die Wirkung von Partikeln auf Föten sowie das Schicksal von Nanopartikeln bei Freisetzung.

11. *Behördliche Maßnahmen in Form von Vorschriften oder Verordnungen sind nur eine Möglichkeit, um dem Vorsorgeprinzip Rechnung zu tragen. Staatliche Stellen haben aber oft das Problem, dass sie aufkommende Probleme oft nicht identifizieren und auch bei Identifikation nicht regulieren könne.*
    Sehen Sie Möglichkeiten durch selbst auferlegten Maßnahmen bei wissenschaftlich-technischen und ökonomischen Akteuren mögliche negative Wirkungen zu verhindern? Selbst auferlegte Maßnahmen könnten Selbstverpflichtungen, codes of conduct, good labarotory practise, kettenübergreifendes Qualitätsmanagement oder leitbildorientierte Entwicklung und Gestaltung sein.

Nach ihrer Einschätzung von der Wirksamkeit nicht-staatlicher Steuerungsmechanismen gaben die Experten folgende Antworten:

- Staatliche Regulierungen sind aufgrund der mangelnden Datenlage zur Toxizität von Stoffen verfrüht.
- Behörden und Wissenschaft sollten aber gemeinsam versuchen, industriell gefertigte Nanopartikel als eigene, neue chemische Einheiten begreifen.
- Internationale, interdisziplinäre Workshops mit Vertretern aus der Industrie, der Wissenschaft und von Behören sollten Klassifizierungssysteme entwickeln und sich auf international verbindliche Testmethoden einigen.
- Selbstverpflichtungen seitens der Industrie seien keine geeigneten Maßnahmen um vor möglichen Gefahren zu schützen.
- Allgemeine Regulierung sind zu unflexibel und könnten zu Überregulierung führen
- Firmen sollten in „tief greifende" und „nicht tief greifende" unterteilt und verschieden reguliert werden.

Gleich zwei Experten wiesen darauf hin, dass staatliche Regulierungen verfrüht sind. Sie könnten momentan unnötig Angst erzeugen und wichtige Entwicklungen verhindern.

Ein Experte wies darauf hin, dass Selbstverpflichtungen seitens der Industrie keine geeigneten Maßnahmen seien, um vor möglichen Gefahren zu schützen. Nanopartikel seien erfassbare

Gefahren für die man mit den richtigen Protokollen und der passenden Toxikologie zur Risikobewertung sichere Umgangsformen entwickeln könne.

Ein weiterer Experte unterstrich, dass ein Begreifen der Nanopartikel als neue Stoffe von außerordentlicher Bedeutung wäre. Nur durch die Klassifizierung als neue Stoffe und sie auch als solche im Chemical Abstract Service verzeichnen zu lassen wäre eine Grundlage für Tests, Informationen in den Material Safety Data Shees sowie Risikobewertung und –management gelegt. Da ein solches Verfahren aber auch nicht für alle Nanopartikel geeignet wäre, etwa wenn sie Teil einer Matrix sind, muss jede neue Politik intensiv und international diskutiert werden.

Ein Experte schlug vor, Firmen in zwei Kategorien zu unterteilen. Eine Kategorie sollte Firmen umfassen, die tief greifende Nanotechnologien herstellen. Damit sind Anwendungen gemeint, die Indikatoren von Lebensqualität wie Luftreinheit, Wasserqualität und Nahrungsmittel beeinflussen können. Diese sollen stark reguliert werden. Firmen mit weniger tief greifenden Produkten sollten schwach reguliert werden. Dies könnte Firmen dazu veranlassen, weniger tief greifende Produkte zu entwickeln und so die Risiken für Mensch und Umwelt reduzieren.

12. *Welche Aspekte, die möglicherweise nicht erwähnt wurden, halten Sie ebenfalls für wichtig?*

Auf die Frage, welche Aspekte im Zusammenhang mit dem Thema noch wichtig seien, gaben die Experten folgende Antworten

- Die Datenlage sei für Risikobewertung und –management momentan zu schlecht.
- Mehr in vivo Studien müssen durchgeführt werden
- Die Öffentlichkeit sollte ausführlich und ständig über Entwicklungen im Bereich Nanotechnologie informiert und aufgeklärt werden, um öffentliche Ablehnung wie bei genetisch modifizierten Lebensmitteln zu vermeiden.
- Ethische Aspekt der nanotechnologischen Entwicklung müssen berücksichtigt werden.
- Es liegen konkrete Hinweise auf mögliche Gefahren vor, die ernst genommen werden müssen und denen nachgegangen werden muss

11 Literatur

Abrams, B.L.; Thomes, W.J.; Bang, J.S. et al. (2003): Degradation of nanoparticulate-coated and uncoated sulfide-based cathodoluminescent phosphors. *Rev. Adv. Mat. Sci.* 5, S. 139 - 164.

Ahrens, A.; Böhm, E.; Heitmann, K. et al. (2003): Leitfaden zur Anwendung umweltverträglicher Stoffe.

Ahrens, A. & Gleich, A. von (2002): *Von der Kreislaufwirtschaft zur Nachhaltigen Chemie - Leitbilder in der Chemikalienentwicklung und Stoffpolitik*. www.subchem.de/startgerman.html., Zugriffsdatum: 19.03.2004.

Aixtron AG (1999): *Navigator, Ausgabe 1, Mai 1999*. Aachen.

Ali, T. A.; Ghosh, A. P. & Howard, W. E. (1999): *Digest 1999*. San Jose, CA, SID Int. Symp. (Society for Information Display).

Amaratunga, Gehan (2003): *Watching the Nanotube: Tiny tubes of carbon could oust plasma in large flat-panel displays*: Spectrum online. http://www.spectrum.ieee.org/WEBONLY/publicfeature/sep03/nano.html, Zugriffsdatum: 01.10.2003.

Anders, G. (1965): *Die Antiquiertheit des Menschen. Über die Seele im Zeitalter der zweiten industriellen Revolution*. München: Beck.

Anger, G. (1982): Chrom-Verbindungen. In: (Hrsg., 1982): *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie*. Weinheim: Wiley-VCH.

Ankele, K. & Steinfeldt, M. (2002): Ökobilanzen. *Der Umweltschutzberater. Loseblattsammlung. Deutscher Wirtschaftsdienst.*

APME (1999): *Eco-Profiles: Styrene*: The Association of Plastic Manufacturers in Europe. http://www.apme.org/dashboard/business_layer/template.asp?url=http://www.apme.org/media/public_documents/20011224_092817/alphabetical.htm&title=Alphabetical+list, Zugriffsdatum: 01.09.2003.

Bachmann, G. (1998): *Innovationsschub aus dem Nanokosmos, Technologieanalyse*. Düsseldorf: VDI-Technologiezentrum, Zukünftige Technologien, Nr. 28.

Baird, Davis; Otavio Bueno; Steve Lynn; Richard Ray, and Chris Robinson (2003): "Visual Images in NanoScience/Technology", USC NanoCenter Symposium V, Columbia, SC, November 21, 2003

Baughman, Ray H.; Zakhidov, Anvar A. & de Heer, Walt A. (2002): Carbon Nanotubes - the Route Toward Applications. *Science.* 297, S. 787 - 792.

Bea, F.X. & Haas, J. (2001): *Strategisches Management. Grundwissen der Ökonomik*. Stuttgart: Lucius und Lucius.

Beise, M.; Blazecjzak, J.; Edler, D.; Haum, R.; Jacob, K.; Jänicke, M.; Loew, T.; Rennings, K.; Petschow, U. (2004): *Lead Markets for Environmental Innovations.* Springer Verlag. (i.E.)

Bermudez, Edilberto; Mangum, James B.; Wong, Brian A. et al. (2004): Pulmonary Responses of Mice, Rats, and Hamsters to Subchronic Inhalation of Ultrafine Titanium Dioxide Particles. *Toxicological Sciences.* 77, S. 347-357.

Bertram, D. & Weller, H. (2002): Zwischen Molekül und Festkörper. *Physik Journal.* (2 / 2002), S. 47-52.

Bijker, W.; Hughes, T.P.; Pinch, T. (eds.) (1987): *The Social Construction of Technological Systems.* New Directions in the Sociology and History of Technology, MIT Press, Cambridge, MA

Blankenbach, Karlheinz (1999): Multimedia-Displays - von der Physik zur Technik. *Physikalische Blätter.* 55 (5), S. 33-38.

Blättel-Mink, B. & Renn, O. (Hrsg.) (1997): *Zwischen Akteur und System. Die Organisation von Innovation*. Opladen: Westdeutscher Verlag.

Blättel-Mink, B. (2001): *Wirtschaft und Umweltschutz - Grenzen der Integration von Ökonomie und Ökologie.* Habil.-Schr. (Campus) Frankfurt M.

Bloch, E. (1973): *Das Prinzip Hoffnung*. Frankfurt/Main.

Blochwitz, J. (2001): *Organic light-emitting diodes with doped charge transport layers*. TU Dresden.

BLU (2002): *Umweltrelevante Inhaltsstoffe in Elektro- und Elektronik-Altgeräten*: Bayrisches Landesamt für Umweltschutz. http://www.bayern.de/lfu/abfall/index.html, Zugriffsdatum: 02.12.2003.

Borm, P. J. A. (2002): Particle Toxicology: From Coal Mining to Nanotechnology. *Inhalation Toxicology.* 14, S. 311-324.

Böschen, S. (2000): *Risikogenese - Prozesse gesellschaftlicher Gefahrenwahrnehmung: FCKW, DDT, Dioxin und Ökologische Chemie*. Opladen: Leske + Budrich.

Böschen, S. (2002): Risikogenese: Metamorphosen von Wissen und Nicht-Wissen. *Soziale Welt.* 53, S. 67-86.

Brock, T. ; Groteklaes, M. & Mischke, P. (1998): *Lehrbuch der Lacktechnologie*. Hannover: Vincentz- Verlag.

Brumfiel, Geoff (2003): Nanotechnology: A little knowledge... *Nature.* 424 (6946), S. 246-248.

Burden, Adrian, P. (2001): Materials for Field Emission Displays. *International Material Reviews.* 46, S. 213-231.

CEFIC (2003): *Capacity and production data for petrochemicals in W. Europe, 1998-2002*. http://www.petrochemistry.net/facts/2003capacity01.html, Zugriffsdatum: 22.03.2004.

Cerrina, F. & Marrian, M. (1996): *A Path to Nanolithography*. http://www.nsec.harvard.edu/AP298/Chen/path_to_nanolith.pdf, Zugriffsdatum: 08.03.04.

Chalamala, Babu R. (Hrsg.) (2000): *Flat panel displays and sensors: principles, materials and processes. Symposium held April 4 - 9, 1999. Materials Research Society symposium proceedings 558*. San Francisco.

Childre, Suzanne (2003): *Recently released CMAI's 2003 World Styrene Analysis indicates an industry up-cycle is on the horizon*: Chemical Market Associates (CMAI). http://www.cmaiglobal.com/news/files/2003WSA.pdf.

CJ-Light GmbH (2003): *Technische Grundlagen*: CJ-Light GmbH. http://www.cj-light.de/cjlight.htm, Zugriffsdatum: 05.12.2003.

Colvin, V. (2003a): *Submission to NTP Nominations Faculty /National Toxicology Programm (NIEHS). 19. May 2003*: Center for Biological and Enviromental Nanotechnology.

Colvin, V. L. (2003b): *Testimony before the US House of Representatives, Committee on science in regard to "Nanotechnology Research and Development Act of 2003" April 9, 2003*.

Crystec Technology Trading GmbH (2003): *Die Herstellung von Flachbildschirmen*. http://www.crystec.com/crylcdd.htm, Zugriffsdatum: 09.09.03.

Dadgar, A. (2003): *Metallorganische Gasphasenepitaxie (MOCVD)*: Otto von Guericke - Universität Magdeburg. http://www.uni-magdeburg.de/ahe/lab/mocvd.html, Zugriffsdatum: 28.11.2003.

David, P. D. (1985): *Clio and the economics of QWERTY*. In: American Economic Review. Papers and Proceedings 75/1985, S. 332-337

David, P. D. (2000): Path dependence, its critics and the quest for historical economics. Working Paper, All Souls College, Oxford & Stanford University 2000. http://www-econ.stanford.edu/faculty/workp/swp00011.pdf, Zugriffsdatum: 18.09.2004.

Denis, James H. & Castor, William M. (1994): Styrene. In: (Hrsg., 1994): *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley-VCH. A 25.

Deschamps, Jacques (2000): *Plasma Disply favored for large size TV screens. Paper B151*: Microtec 2000, 25. - 27. September 2000. http://www.thomson.net/gb/02/pladis/pdf/Deschamps_2000_1.pdf, Zugriffsdatum: 28.09.03.

Deutsches Institut für Normung (DIN) (Hrsg.) (2003): *Environmental Management - Integrating Environmental Aspects into Product Design and Development. DIN-Fachbericht ISO/TR 14062*. Berlin: Beuth Verlag.

Diabaté, S.; Völkel, K. & Wottrich, R. (2002): Krank durch Nanopartikel. *Nachrichten Biomedizin - Forschungszentrum Karlsruhe.* 34 (1/2002), S. 75-83.

Die Bundesregierung (2002): *Perspektiven für Deutschland*. Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung, Berlin 2002

Dierkes, M.; Hoffmann, U.; Marz, L. (1992): *Leitbild und Technik.* Zur Entstehung und Steuerung technischer Innovationen, edition sigma, Berlin 1992

Dierkes, M. (Hrsg.) (1997): *Technikgenese. Befunde aus einem Forschungsprogramm*. Berlin: edition sigma.

DIN EN ISO 14040 (1997): *Umweltmanagement - Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen*. Berlin.

Dionysiou, Dionysios D. Environmental Applications and Implications of Nanotechnology and Nanomaterials *J. Envir. Engrg., Volume 130, Issue 7*, pp. 723-724 (July 2004)

Dockery, D.W.; Pope, C.A.; Xu, X. et al. (1993): An Association between air pollution and mortality in six US cities. *N. Engl. J. Med.* 329, S. 1753-1759.

Dosi, G. (1982): Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of determinants and directions of technical change. *Research Policy.* 11 (3), S. 147-162.

Dosi, G. (1988): The Nature of the Innovative Process. In: Dosi, G.; Freeman, C.; Nelson, R. et al. (Hrsg., 1988): *Technical Change and Economic Theory*. London, New York: Pinter Publishers.

Drexler, K. E.: *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*. Foreword by Marvin Minsky. New York (u.a.): Anchor Pr., Doubleday, 1986

Drexler, K E..; Chris Petersen, Gayle Pergamit: *Unbounding the Future: The Nanotechnology Revolution*, New York: Morrow, 1991.

Drexler, K. E.: *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computing*, New York: Wiley, 1992.

Eggert, Peter; Haid, Alfred & Wettig, Eberhard (2000): *Auswirkungen der weltweiten Konzentration in der Bergbauproduktion auf die Rohstoffversorgung der deutschen Wirtschaft*. Berlin: Duncker & Humblot.

Eickenbusch, Heinz; Hoffknecht, Andreas; Holtmannspötter, Dirk et al. (2003): *Ansätze zur technischen Nutzung der Selbstorganisation. Monitoring-Bericht*. Düsseldorf: VDI-Technologiezentrum.

Eigen, M. & Winkler, R. (1978): *Das Spiel*. München: Piper.

Eikmann, T. & Seitz, H. (2002): Klein, aber oho! Von der zunehmenden Bedeutung der Feinstäube. *Umweltmedizin in Forschung und Praxis.* 7 (2), S. 63-65.

Engquist, Isak (1996): *Self-Assembled Monolayers*: Linköping University. http://www.ifm.liu.se/Applphys/ftir/sams.html, Zugriffsdatum: 15.03.04.

Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages Schutz des Menschen und der Umwelt (Hrsg.) (1997): *Zwischenbericht - Konzept Nachhaltigkeit*. Bonn.

Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages Schutz des Menschen und der Umwelt (Hrsg.) (1998): *Konzept Nachhaltigkeit - Vom Leitbild zur Umsetzung (Abschlussbericht)*. Bonn.

etc group (2002): *Communiqué: No Small Matter! Nanotech Particles Penetrate Living Cells and Accumulate in Animal Organs*. http://www.etcgroup.org/article.asp?newsid=356, Zugriffsdatum: 19.03.2004.

Euroforum (2003): *Display 2003: 8. Jahrestagung für Hersteller, Zulieferer und Anwender*. http://www.euroforum.de/DATA/pdf/P15773.pdf, Zugriffsdatum: 11.09.2003.

Europäische Kommission (Hrsg.) (2001): *Weißbuch - Strategie für eine zukünftige Chemikalienpolitik, KOM (2001) 88 endgültig*. Brüssel.

Europäische Kommission (2003): *Proposal for a new EU regulatory framework for chemicals. REACh (Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals)*. http://europa.eu.int/comm/enterprise/chemicals/chempol/whitepaper/REACh.htm.

Europäische Kommission (2004): *Opinion concerning Titanium Dioxide, Colipa n° S75 adopted by the SCCNFP during the 14th plenary meeting of 24 October 2000*. http://europa.eu.int/comm/health/ph_risk/committees/sccp/docshtml/sccp_out135_en.htm, Zugriffsdatum: 31.03.2004.

Evident Technologies (2003): *Nano Materials*. http://www.evidenttech.com/, Zugriffsdatum: 12.01.2004.

Farman, Joe (2001): Halocarbons, the ozon layer and the precautionary principle. In: (EEA), European Environment Agancy (Hrsg.) (2001): *Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896-2000*. Copenhagen: EEA. 22.

FFU; DIW; IÖW et al. (Hrsg.) (2004): *Vom Pilotmarkt zum Lead-Markt. Politikmuster der Entwicklung internationaler Märkte für Innovationen nachhaltigen Wirtschaftens*. Berlin.

FGL (2003): *Lichtforum 40: LED - die neue Lichtquelle; Lichtforum 31: Licht und Lampen*. Frankfurt/Main: Fördergemeinschaft Gutes Licht.

Food and Drug Administration (1999): *Sunscreen Drug Products For Over-The-Counter Human Use. Final Monograph. 21 CFR Parts 310, 352, 700, and 740 [Docket No. 78N-0038] RIN 0910-AA01. Federal Register / Vol. 64, No. 98 / Friday, May 21, 1999 / Rules and Regulations*.

Foresight Institute (2001): *Foresight Guidelines on Molecular Nanotechnology*. www.foresight.org/guidelines/current.html, Zugriffsdatum: 19.03.2004.

Forrest, D. (1999): *Regulating Nanotechnology Development (rev. 1.1)*. www.foresight.com/NanRev/Forrest1989.html, Zugriffsdatum: 03.07.2003.

Fraunhofer IPA/IST & BAM (2004a): *CVD. Beschichtungsverfahren - Klassen*. http://www.schichttechnik.net/html/verfinfoklassen.cfm?SearchBy=Einzeln&Phrase=9, Zugriffsdatum: 05.03.04.

Fraunhofer IPA/IST & BAM (2004b): *PVD. Beschichtungsverfahren - Klassen*. http://www.schichttechnik.net/html/verfinfoklassen.cfm?SearchBy=Einzeln&Phrase=6, Zugriffsdatum: 05.03.04.

Freeman, C. (1995): The "National System of Innovation" in historical perspective. *Cambridge Journal of Economics.* 19, S. 5-24.

Funk, S. (2003): *Entwicklung eines Anodisierverfahrens mittels Spritz/Sprühtechnik als ökologisch/ökonomisch effiziente Alternative zur Chromatierung von Aluminiumoberflächen*: BWPlus. http://www.bwplus.fzk.de/berichte/ZBer/2003/ZBerbwd21002.pdf, Zugriffsdatum: 19.03.2004.

Gabi 4 Datenbank (1999a): *Ökobilanz-Datensatz für die Ethylbenzolherstellung (Niederlande)*.

Gabi 4 Datenbank (1999b): *Ökobilanz-Datensatz für die Styrolherstellung (Deutschland)*.

Gabi 4 Datenbank (2001): *Ökobilanz-Datensatz zur Herstellung von LED - Chips (Durchschnitt)*.

Gee, David & Greenberg, Morris (2001): Asbestos: from magic to malevolent mineral. In: (EEA), European Environmental Agancy (Hrsg.) (2001): *Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896-2000*. Copenhagen: European Environmental Agancy (EEA). 22.

Geißler, Susanne; Harant, Christian; Hrauda, Gabriele et al. (1993): *Ecodesign: Ökologische Produktgestaltung. Fibel für Anwender*. Wien: Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie.

GEMIS 4.1 (2003): *Gesamt-Emissionsmodell integrierter Systeme. Ein Programm zur Analyse der Umweltaspekte von Energie- Stoff- und Transportprozessen*.

Gersing, S. *Chemische und physikalische Oberflächenbehandlung von Aluminium*. http://www.sgersing.de/pdf/SFT041.pdf, Zugriffsdatum: 19.03.2004.

Gleich, A. von (1989): *Der wissenschaftliche Umgang mit der Natur - Über die Vielfalt harter und sanfter Naturwissenschaften*. Frankfurt/Main, New York.: Campus Forschung Bd. 601.

Gleich, A. von (1998/1999): Ökologische Kriterien der Technik- und Stoffbewertung: Integration des Vorsorgeprinzips. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung Jg. 10, Heft 6, 1998, Jg. 11 Hefte 1 und 2 1999.*

Gleich, A. von & Rubik, Frieder (1996): *Umwelteinflüsse Neuer Werkstoffe*. Düsseldorf: VDI Verlag.

Gleich, A. von (2001): *Was können und was sollen wir von der Natur lernen?* In: Gleich, A. von (Hrsg.): Bionik - Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur? (B. G. Teubner Verlag) erweiterte 2. Auflage, Stuttgart u. a.

Gleich, A. v. (2003): Potential ecological and health effects of nanaotechnology. Approaches to prospective technology assessment and design. In: Steinfeldt, M. (Hrsg.) (2003): *Nanotechnology and Sustainability. Prospective Assessment of a future key technology.* Berlin: IÖW.

Gleich, A. v. (2004): Leitbildorientierte Technikgestaltung - Nanotechnologie zwischen Vision und Wirklichkeit. In: Böschen, S.; Schneider, M. & Lerf, A. (Hrsg.) (2004): *Handeln trotz Nichtwissen, Vom Umgang mit Chaos und Risiko in Politik, Industrie und Wissenschaft*. Frankfurt a.M.

Grahn, H. (2003): *Das blaue Wunder - Blaue Laser aus Halbleitern*: Paul - Drude - Institut für Festkörperelektronik, TU Berlin. http://www.pdi-berlin.de/semisp/dasblauewunder2.pdf, Zugriffsdatum: 02.10.2003.

Grezcmiel, M. (2001): Entladungslampen und Umwelt. In: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg., 2001): *Dokumentation der Fachtagung: Umweltrelevante Inhaltsstoffe elektrischer und elektronischer Altgeräte (EAG) bzw. Bauteile und Hinweise zu deren fachgerechten Entsorgung*. Augsburg.

Guston, D. H. & Sarewitz, D. (2001): Real-Time Technology Assessment. *Technology in Society.* 23 (4), S. 98-118.

Haase, M. & Kömpe, K. (2003): *Über Nanokristalle (Halbleiter etc.)*: Universität Hamburg, Fachbereich Chemie. http://www.chemie.uni-hamburg.de/pc/schuelerwoche/, Zugriffsdatum: 12.01.2004.

Hagen, Jens (1999): *Industrial catalysis: a practical approach*. Weinheim: Wiley-VCH.

Haller, H. (2003): *LED - Info (Grundlagen, Einsatz, Zulieferer)*. www.led-info.de, Zugriffsdatum: 03.11.2003.

Harsch, M. & Schuckert, M. (1996): *Ganzheitliche Bilanzierung der Pulverlackiertechnik im Vergleich zu anderen Lackiertechnologien. Sachbilanzebene*. Stuttgart: Institut für Kunststoffprüfung.

Haum, R.; Petschow, U.; Steinfeldt, M.; Gleich, A. v. (2004): *Nanotechnology and Regulation within the Framework of the Precautionary Principle.* Schriftenreihe des IÖW 173/04, Eigenverlag, Berlin.

Heijungs, R. et al. (1992): *Environmental life cycle assessment of products, backgrounds & guide*. Leiden: Centre of Environmental Science.

Hellige, H. D. (1996): Technikleitbilder als Analyse-, Bewertungs- und Steuerungsinstrumente: Eine Bestandsaufnahme aus informatik- und computerhistorischer Sicht. In: Hellige, H. D. (Hrsg., 1996): *Technikleitbilder auf dem Prüfstand. Leitbild-Assessment aus Sicht der Informatik- und Computergeschichte*. Berlin: Sigma.

Hemmelskamp, J. (Hrsg.) (2001): *Forschungsinitiative zu Nachhaltigkeit und Innovation*. München: ökom Verlag.

Herrmann, Wolfgang A. (2000): Zukunftstechnologie Katalyse. In: Felcht, Utz Hellmuth (Hrsg., 2000): *Chemie. Eine reife Industrie oder weiterhin Innovationsmotor?* Frankfurt am Main: Verlag Blazek und Bergmann.

Hett, Anabell (2004): *Nanotechnologie. Kleine Teile-Große Zukunft*. Zürich, Swiss Reinsurance Company.

Hoet, M. et al. (2004): Health impact of Nanomaterials. Letter to the Editor. *Nature Biotechnology.* 22 (1), S. 19.

Höhr, D. & Steinfartz, Y. (2001): Hydrophobic coating of ultrafine titanium dioxide reduces the acute inflammatory response after instillation in the rat. *Int. J. Hyg. Environ. Health.*

Holling, C. S. (1994): New Science and New Investments for a Sustainable Biosphere. In: Jansson, A.; Hammer, M. & Costanza, R (Hrsg., 1994): *Investing in Natural Capital - The Ecological Economics Approach to Sustainability*. Washington: Island Press.

Howard, Vyvyan (2004a): *Präsentation vor dem Europäischen Parlament*. Brussels.

Howard, Vyvyan C. (2004b): *Nano-particles and toxicity. Unpublished Paper*.

Huber, J. (2001): Ökologische Konsistenz. Zur Erläuterung und kommunikativen Verbreitung eines umweltinnovativen Ansatzes. In: Umweltbundesamt (Hrsg., 2001): *Perspektiven für die Verankerung des Nachhaltigkeitsleitbildes in der Umweltkommunikation, UBA-Berichte 4/01*. Berlin: Erich Schmidt Verlag, S. 80-100.

Huber, J. (2004): New Technologies and Environmental Innovation. – Cheltenham : Edward Elgar.

Hübner, H. (2002): *Integratives Innovationsmanagement - Nachhaltigkeit als Herausforderung für ganzheitliche Erneuerungsprozesse*. Berlin: Erich Schmidt Verlag.

Hunt, Charles E. (Hrsg.) (2001): *Proceedings of the 14th International Vacuum Microelectronics Conference*: Davis.

IGVT (2003): *Nanopartikel für die Molekulare Erkennung*: Institut für Grenzflächenverfahrenstechnik, Universität Stuttgart. http://www.uni-stuttgart.de/igvt/forschung/molekularErkenn-deu.htm, Zugriffsdatum: 08.03.04.

IMST (2002): *Dünne Funktionsschichten aus dem Sol-Gel Verfahren*: Institute for Materials & Surface Technology, FH Kiel. http://www.wpr.fh-kiel.de/research/solgel/solgel.htm, Zugriffsdatum: 08.03.04.

Information Society Technologies (2003): *Carbon nanotubes for large area displays (Canadis Project, IST-1999-20590)*. http://canadis.crm-paris.com/Pagecanadis.html, Zugriffsdatum: 20.09.2003.

IPMS (2003): *OLED*: Fraunhofer Institut Photonische Mikrosysteme. http://www.ipms.fhg.de/products/index_09.html, Zugriffsdatum: 30.03.2004.

ISIF (2001): *Information on the Styrene Industry Worldwide*: International Styrene Industry Forum (ISIF). http://www.styreneforum.org/industry_index.html, Zugriffsdatum: 22.03.2004.

Jefferson, D.A. & Tilley, E.E.M. (1999): The structural and physical chemistry of nanoparticles. In: Maynard, R.L. & Howard, C.V. (Hrsg., 1999): *Particulate matter: Properties and effects upon health*. Trowbridge: Cromwell Press.

Jelinek, T.W. (1997): *Oberflächenbehandlung von Aluminium*. Saulgau/Württ: Leuze Verlag.

Jelinski, Lynn (1999): *Biologically Related Aspects of Nanoparticles, Nanostructured Materials, and Nanodevices*: National Science and Technology Council. http://www.wtec.org/loyola/nano/07_02.htm, Zugriffsdatum: 08.03.04.

Jensen, Kevin L. (Hrsg.) (2001): *Electron emissive materials, vacuum microelectronics and flat panel displays. symposium held April 25 - 27, 2000. Materials Research Society symposium proceedings 621*. San Francisco.

Jonas, H. (1985): Warum die moderne Technik ein Gegenstand für die Ethik ist. In: Jonas, Hans (Hrsg., 1985): *Technik, Medizin, Ethik. Zur Praxis des Prinzips Verantwortung*. Frankfurt/Main: Insel-Verlag.

Joy, B. (2000): *Why the future doesn't need us*: Wired Magazine. http://www.wired.com/wired/archive/8.04/joy_pr.html, Zugriffsdatum: 19.03.2004.

Jüstel, Thomas; Feldmann, Claus & Ronda, Cornelis R. (2000): Leuchtstoffe für aktive Displays. *Physikalische Blätter.* 56 (9), S. 55-58.

Ketteler, Guido (2002): *Präparation und Charakterisierung von epitaktischen Oxidfilmen für modellkatalytische Untersuchungen*: Dissertation, FU Berlin. http://www.diss.fu-berlin.de/2003/12/, Zugriffsdatum: 22.03.2004.

KEVAG (2003): *Die Energiesparlampe*: Koblenzer Elektrizitätswerk und Verkehrs - Aktiengesellschaft. http://www.kevag.de/strom/get_ag/energiesparlampe.php, Zugriffsdatum: 18.11.2003.

Köhler, Michael (2001): *Nanotechnologie. Eine Einführung in die Nanostrukturtechnik*. Weinheim: Wiley-VCH.

Kowalsky, Wolfgang; Benstem, Torsten; Böhler, Achim et al. (1999): Organic Electroluminescent Devices Advances. *Solid State Physic.* 39, S. 91-100.

Kowol, U. (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 und Nürnberg.

Krämer, Michael (2002): Feinste Partikel aus dem Laserverdampfungsreaktor. *Elements Degussa ScienceNewsletter.* (01/2002), S. 9-11.

Kreyling, Wolfgang G.; Semmler, Manuela & Möller, Winfried (2004): Dosimetry and toxicology of ultrafine particles. *forthcoming.*

Krost, A. & Dadgar, A. (2002): Optoelektronik auf Silizium - eine Herausforderung für die Halbleiterphysik. *Magdeburger Wissenschaftsjournal.* (1/2002).

Kuhn, T. (1975): Neue Überlegungen zum Begriff des Paradigma. In: Kuhn, T. (Hrsg., 1975): *Die Entstehung des Neuen. Studien zur Struktur der Wissenschaftsgeschichte*. Frankfurt/Main: Suhrkamp Wissenschaft.

Kühner, G. (1999): *What is Carbon Black®?* Frankfurt/Main, Firmenschrift Degussa AG.

Kunzli, N; Kaiser, R & Medina, S (2000): Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. *Lancet.* 356, S. 795-801.

Laval, J. M.; Chopineau, J & Thomas, D. (1995): Nanotechnology: R&D challenges and opportunities for application in biotechnology. *Tibtech.* 13, S. 474-481.

Lecoanet, Helene; Wiesner, Mark R. (2004): *Assessment of the mobility of nanomaterials in groundwater acquifers.* Conference: Nanotechnology and the Environment. Anaheim, March28-April1 2004, http://oasys2.confex.com/acs/227nm/techprogram/S13728.HTM, Zugriffsdatum: 18.09.2004.

Lieb, M. & Hildebrand, B. (1982): Styrol. In: (Hrsg., 1982): *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie*. Weinheim: Wiley-VCH.

Lohmann, Axel (1997): Bildschirme und Displays. In: (Hrsg., 1997): *Fachbericht Neue Rechnertechnologien*: Fachhochschule Augsburg, Fachbereich Informatik, S. 66-85.

Lueder, Ernst (2001): *Liquid Crystal Displays: Addressing Schemes and Electro-Optical Effects*. New York: John Wiley & Sons.

Luther, Wolfgang (2004): *Industrial applikation of nanomaterial - chances and risks*. Düsseldorf: VDI Technologiezentrum GmbH.

Maichin, Roland (2002): *Statuserhebung der Nanotechnologieforschung an akademischen Einrichtungen in der Steiermark*: Diplomarbeit Technische Universität Graz. http://www.tvtut.tugraz.at/tvtut/nanotechnologie/Nanotechnologieforschung.pdf, Zugriffsdatum: 05.03.04.

Mambrey, P; Paetau, M. & Tepper, A. (1995): *Technikentwicklung durch Leitbilder. Neue Steuerungs- und Bewertungsinstrumente*. Frankfurt/Main: Campus.

Mani, J. (1994): *Eine Ökobilanz von Glühlampe und Energiesparlampe*. Bern: Büro ´84, Unternehmen für angewandte Ökologie.

Marz, L., / Dierkes, M. (1994): *Leitbildprägung und Leitbildgestaltung. Zum Beitrag der Technikgenese-Forschung für eine prospektive Technikfolgen-Regulierung.* In: G. Bechmann & T. Petermann (Hrsg.): Interdisziplinäre Technikforschung. Genese, Folgen, Diskurs (pp. 35-71) (Campus) Frankfurt am Main

Matje, A. (1996): *Unternehmensleitbilder als Führungsinstrument. Komponenten einer erfolgreichen Unternehmensidentität*. Wiesbaden: Gabler Verlag.

Maturana, H. R. & Varela, F. J. (1987): *Der Baum der Erkenntnis*. Bern.

Maximova, Nadejda (2002): *Partialdehydrierung von Ethylbenzol zu Styrol an Kohlenstoffmaterialien*, TU Berlin.

McDonough, W. & Braungart, M. (2002): *Cradle to Cradle - Remaking the Way We Make Things*. New York: North point Press.

Merck KGaA (2000): *Stellungnahme des Umweltbundesamtes über die Ökotoxikologie von Flüssigkristallen in Flüssigkristallanzeigen*. http://www.merck.de/servlet/PB/menu/1104220/index.html, Zugriffsdatum: 31.03.2004.

Merkle, R. C. (1994): Self-replicating systems and low cost manufacturing. In: Welland, M. E. & Gimzewski, J. K. (Hrsg., 1994): *The Ultimate Limits of Fabrication and Measurement*. Dordrecht: Kluwer, S. 25-32.

Mestl, G. (2004): *Persönliche Mitteilung von G. Mestl, Nanoscape AG.*

Meyer-Krahmer, F. (1997): Umweltverträgliches Wirtschaften. Neue industrielle Leitbilder, Grenzen und Konflikte. In: Blättel-Mink, B. & Renn, O (Hrsg., 1997): *Zwischen Akteur und System. Die Organisation von Innovation*. Opladen: Westdeutscher Verlag.

Mink, E. & Rzepka, M. (1995): Maßnahmen zur Emissionsminderung bei nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen. In: UTECH (Hrsg., 1995): *Anwendung umweltfreundlicher Lacksysteme*. Berlin.

Mounier, E. (2002): *Micro & Nanotechnologies for displays and data storage in portable systems: a quick overview*: Yole Developpement. http://colossalstorage.net/eloy_3c.ppt, Zugriffsdatum: 28.09.2003.

MPG (2002): *Nanozwiebeln bringen Styrol-Synthese auf Trab*: Max-Planck-Gesellschaft. http://www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/dokumentation/pressemitteilungen/2002/pri0299.htm.

National Science and Technology Council (1999): *Nanotechnology. Shaping the World Atom by Atom*. Washington D. C.

NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization. http://www.nedo.go.jp/nanoshitsu/project/loadmap_eng.pdf.

Nelson, R. R. (Hrsg.) (1993): *National Systems of Innovation. A comparative analysis*. Oxford: Oxford University Press.

New Energy and Industrial Technology Development Organization (2000): *Road Map of Technology*. http://www.nedo.go.jp/nanoshitsu/project/loadmap_eng.pdf, Zugriffsdatum: 23.09.03.

New Scientist (2003): *Carbon Nanotubes show drug delivery promise*. http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99994485, Zugriffsdatum: 31.03.2004.

Niesen, T. P. & Aldinger, F. (2001): Biomineralisation & Biomimetische Materialherstellung. In: Gleich, A. von (Hrsg., 2001): *Bionik - Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur?* Stuttgart: Teubner.

NNI (2000): *National Nanotechnology Initiative. The Initiative and its Implementation Plan*. Washington D.C.

Nocula, Christoph & Olbrich, Stephan (2003): *Zur Diskrepanz der Auflösung verschiedener Präsentationsmedien: Aktuelle Entwicklungen der Bildschirmtechnologien*: Universität Hannover. http://www.rtb-nord.unihannover.de/onlinedokumente/abschlussbericht/p5_1a.pdf, Zugriffsdatum: 29.03.2004.

Nordmann, A. (2003): *"'Shaping the World Atom by Atom': Eine nanowissenschaftliche WeltBildanalyse"*. In: Armin Grunwald (ed.): Technikgestaltung zwischen Wunsch und Wirklichkeit, Berlin: Springer.

Nordmann, A. (2003): *Molecular Disjunctions. DP Discovering the Nanoscale*.

Nordmann, A. (2004): *"New Space for Old Cosmologies: Imaging the World for Nanoscience"*, Conference on Imaging and Imagining NanoScience and Engineering, Columbia SC, March 3-7, 2004.

Oberdörster, G; Sharp, Z; Atudorei, V et al. (2002): Extrapulmonary translocation of ultrafine carbon particles following whole-body inhalation exposure of rats. *Toxicology and Environmental Health A.* 65 (20), S. 1531-43.

Oberdörster, G. et al. (2004): Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhalation Toxicology.* in press.

Paschen, Herbert; Coenen, Christopher; Fleischer, Torsten et al. (2003): *TA-Projekt Nanotechnologie. Arbeitsbericht Nr. 92*. Berlin, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB).

Pescovitz, D.: *NANO, BIO CONVERGE TO PROVIDE KEY NANOTECH LINK*. Small Times 6. 8. 2004 http://www.smalltimes.com/document_display.cfm?section_id=76&document_id=8188, Zugriffsdatum: 18.09.2004

Pflücker, F.; Wendel, V.; Hohenberg, H. et al. (2001): The Human Stratum corneum Layer: An effective Barrier against dermal Uptake of Different Forms of topically applied micronised Titanium Dioxide. *Skin Pharmacology and Applied Skin Physiology.* 14 (1), S. 92-97.

Pope, C. A. & Dockery, D. W. (1999). In: Holgate, S (Hrsg., 1999): *Air Pollution and Health*. San Diego: Academic Press, S. 673-705.

Popular Mechanics (2002): *Flourescent Tube*. http://www.popularmechanics.com/popmech/homei/9110HIWAM.html, Zugriffsdatum: 10.12.2003.

Quella, F. (Hrsg.) (1998): *Umweltverträgliche Produktgestaltung. Siemens Fachpublikation*. Weinheim: Wiley-VCH.

Rahman, Qamar; Lohani, Mohtashim; Dopp, Elke et al. (2002): Evidence That Ultrafine Titanium Dioxide Induces Micronuclei and Apoptosis in Syrian Hamster Embryo Fibroblasts. *Environmental Health Perspectives.* 110 (8).

Reynolds, A. (2002): Forward to the future: Nanotechnology and Regulatory Policy.

Reynolds, G.H. (2001): *Environmental Regulation of Nanotechnology: Some Preliminary Observations*: Environmental Law Institute. www.foresight.org/impact/31.10681.pdf, Zugriffsdatum: 19.03.2004.

Rickmeyer, Christiane (2002): *Penetrationseigenschaften von beschichtetem mikrofeinem Titandioxid*. *Medizinische Fakultät Charité*. Berlin, Humbold Universität.

Riebeek, H. (2003): *Bright Quantum Light - Huge jumps in efficiency could make quantum dot LEDs the future of flat - panel displays*: IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers, Web - Only - News. http://www.spectrum.ieee.org/WEBONLY/wonews/feb03/quantum.html, Zugriffsdatum: 11.01.2004.

Rip, A.; Misa, T.J. & Schot, J.W. (Hrsg.) (1995): *Managing Technology in Society. The Approach of Constructive Technology Assessment*. London.

Robinson, C. (2003): *"Visualizing Nanotechnology"*, Conference on Discovering the Nanoscale II, Darmstadt, Germany, October 9-12, 2003.

Robinson, C. (2004): *"What does it mean to see?"*. Conference on Imaging and Imagining NanoScience and Engineering, Columbia SC, March 3-7, 2004.

Rocco, M. C. (2002): *The Future of National Nanotechnology Initiative. Präsentation vom 5/11/02*: National Science and Technology Council. http://www.nsf.gov/home/crssprgm/nano/roco_aiche_48slides.pdf, Zugriffsdatum: 19.03.2004.

Rocco, M. and Bainbridge, W. (eds.)(2002): *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology, and Cognitive Science*. The National Science Foundation, Arlington, Virginia.

Rohden, Debby (2001): *CMAI publishes results of 2001 World Styrene Analysis and 2001 World Polystyrene/EPS Analysis*: Chemical Market Associates Inc. (CMAI). http://www.cmaiglobal.com/news/files/WSA-WPS_EPS2001.pdf, Zugriffsdatum: 22.03.2004.

Rossi, Mark (2000): *Atomlithographie. Hauptseminar SS2000 Ultrakalte Atome und Atomoptik*: Universität Stuttgart. http://www.physik.uni-stuttgart.de/institute/pi/5/lehre/hauptseminar2000/atomlithographie/atomlithographie_druck.html, Zugriffsdatum: 12.03.04.

Rössler, Albert; Skillas, Georgius & Pratsinis, Sortiris E. (2001): Nanopartikel - Materialien der Zukunft. *Chemie in unserer Zeit.* 35 (1), S. 32-41.

Royal Academy of Engineering (2003): *Nanotechnology: views of Scientists and Engineers*. http://www.nanotec.org.uk/SEworkshopReport1.pdf, Zugriffsdatum: 29.03.2004.

Rubahn, Horst-Günther (2002): *Nanophysik und Nanotechnologie*. Stuttgart: Teubner.

Samsung (2003): *persönliche Auskunft von Chun Gyoo Lee, Principal Researcher Corporate R&D Center Samsung SDI*.

Sauer, D. & Lang, C. (Hrsg.) (1999): *Paradoxien der Innovation. Perspektiven sozialwissenschaftlicher Innovationsforschung*. Frankfurt/Main, New York: Campus.

Schoen, Markus (2002): *Katalytische Untersuchungen zur Styrolsynthese an Eisenoxidkatalysatoren*, Ruhr Universität Bochum.

Schummer, J (o.J.): *Projektentwurf „Philosophische Analysen der Nanoforschung“ http://www.cla.sc.edu/cpecs/nirt/grants/Heisenberg_proposal.pdf,* Zugrifsdatum: 18.09.2004.

Schwarzer, Hans-Christoph (2001): *Erzeugung von Nanopartikeln durch Fällung*: TU München. http://www.lfg.mw.tum.de/persons/hschwarzer/schwarzer.html, Zugriffsdatum: 08.03.04.

Scott, Campbell L.; Malliaras, George G.; Bozano, Luisa et al. (2000): The Physics of organic light emitting devices. In: Materials Research Society (Hrsg., 2000): *Flat panel displays and sensors: principles, materials and processes. Symposium held April 4 - 9, 1999. Symposium proceedings Vol. 558*. San Francisco, S. 499 - 505.

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin (2003): *Elektroschrott - Daten, Fakten, Hintergründe zur Abfallwirtschaft*. http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/abfallwirtschaft/de/elektroschrott/index.shtml, Zugriffsdatum: 24.11.2003.

Siemens AG (2003): *News Desk: Leuchtdioden mit Heizung auf der Rollbahn (26.11.2003), Leuchtdioden entlasten Umwelt (05.11.2003), Leuchtdioden als Autoscheinwerfer (05.09.2003), Leuchtdioden bald allgegenwärtig (05.07.2003), Kombinatorik erleichtert Suche nach neuem LED - Material (06.05.2003)*. http://w4.siemens.de/de2/html/press/newsdesk_archive/index.html, Zugriffsdatum: 04.12.2003.

Singh, A.; Markowitz, M. & M., Chow; G. (1995): Materials Fabrication via Polymerizable Self-Organized Membranes: An Overview. *NanoStructured Materials.* 5 (2), S. 141-153.

Small Times (2002): *12/9/02*. http://www.smalltimes.com.

Smalley, R. E. (1999): Prepared Written Statement and Supplemental Material. In: Roco, M.C.; Williams, S. & Alivisatos, P. (Hrsg., 1999): *Vision for Nanotechnology Research and Development in the Next Decade - Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report*.

SNL (2003): *Sandia researchers use quantum dots as a new approach to solid - state lightning*: Sandia National Laboratories. http://www.sandia.gov/news-center/news-releases/2003/elect-semi-sensors/quantum.html, Zugriffsdatum: 14.01.2004.

Socolof, Maria L.; Overly, Jonathan G.; Kincaid, Lori E. et al. (2001): *Desktop Computer Displays: A Life-Cycle Assessment. Endbericht für United States Environmental Protection Agency*, University of Tennessee Center for Clean Products an Clean Technologies.

Steinfeldt, M.; Petschow, U. & Hirschl, B. (2003): *Anwendungspotenziale nanotechnologiebasierter Materialien. Teilgebiet 2: Analyse ökologischer, sozialer und rechtlicher Aspekte*. Schriftenreihe des IÖW 169/03, Eigenverlag, Berlin.

Steinfeldt, M. (2003): *Nanotechnologie: Bewertungskriterien und Gestaltungsansatz. Die Nachhaltigkeit der kleinsten Dinge.* In: Ökologisches Wirtschaften 6/03. S. 20-21.

Steuber, Frank (2000): *Untersuchungen zur Effizienz, Farbabstimmung und Degradation von organischen Elektrolumineszenz-Anzeigen. Berichte aus der Halbleitertechnik*. Aachen: Shaker.

Tang, C. W. & Van Slyke, S. A. (1987): Organic electroluminescent diodes. *Applied Physics Letters.* 51 (12), S. 913-915.

Tang, Y. S.; Sotornayor-Torres, C. M. & Wilkinson, C. D. W. (2003): *Si - SiGe Quantum Dot - based Light Emitting Diodes*: Nanoelectronic Research Center, Glasgow University. http://www.elec.gla.ac.uk/groups/nanospec/SiGe.html, Zugriffsdatum: 13.01.2004.

Tannas, Lawrence E. (1985): *Flat panel displays and CRTs*. New York: VanNostrand.

The Royal Society; Royal Academy of Engineers (2004): *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties.* Final Report July 2004 http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm, Zugriffsdatum: 18.09.2004.

Theis, Dietmar (2000): Displays - Schlüsselkomponenten der Informationsgesellschaft. *Physikalische Blätter.* 56 (9), S. 59-63.

Thimm, U. (1999): Umweltfreundliche Halbleiterproduktion - Aus Forschern werden Unternehmer. *Marburger Uni - Journal.* (1/1999), S. 26-29.

Tinkle, Sally S.; Antonini, James M.; Rich, Brenda A. et al. (2003): Skin as a Route of Exposure and Sensitization in Chronic Beryllium Disease. *Environmental Health Perspectives.* 111 (9).

Tomson, Mason; Colvin, V. L.; Cheng, Xuekun et al. (2003): *Adsorption/Desorption of Pollutants to Nanoparticles. Center for Biological and Environmental Nanotechnology Civil and Environmental Engineering and Chemistry Departments Rice University. September 15, 2003*. Interagency Workshop: Nanotechnology and the Environment: Applications and Implications.

Uchino, T; Tokunaga, H; Ando, M et al. (2002): Quantitative determination of OH radical generation and its cytotoxicity induced by TiO2-UVA treatment. *Toxicology in Vitro.* 16, S. 629-635.

Umweltbundesamt (UBA) (1999): *Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen. Texte-Reihe des UBA Nr. 33/99*. Berlin.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2000): *Was ist EcoDesign? Ein Handbuch für ökologische und ökonomische Gestaltung*. Berlin.

Van Ooij, W.J.; Zhu, D.; Palanivel, V. et al. (2002): *Potential of Silanes for chromate replacement in metal finishing industries*: University Of Cincinnati. http://www.eng.uc.edu/~wvanooij/SILANE/pot_Chromate_repl.pdf, Zugriffsdatum: 19.03.2004.

VCI (2003): *Chemiewirtschaft in Zahlen*. Frankfurt/Main, Verband der Chemischen Industrie.

VDI (Hrsg.) (2002): *VDI: Richtlinie 2243: Recyclingorientierte Produktentwicklung*.

VDI-Nachrichten (2003): *VDI-Nachrichten.* 33 (August (2003-10-08)).

VDI-Technologiezentrum (Hrsg.) (2002): *Technologiefrüherkennung Technologieanalyse Nanobiotechnologie I: Grundlagen und Anwendungen molekularer, funktionaler Biosysteme*. Düsseldorf: Zukünftige Technologien Nr. 38.

VDI Technologiezentrum Zukünftige Technologien Consulting (Hrsg.) (2003): *Ansätze zur technischen Nutzung der Selbstorganisation.* Monitoring Bericht. Düsseldorf.

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.*

VKE (2004): *Wirtschaftsdaten und Grafiken zu Kunststoffen*. Frankfurt/Main, Verband Kunststofferzeugende Industrie.

Vollrath, F. (1992): Die Seiden und Netze von Spinnen. *Spektrum der Wissenschaft.* (Mai 1992), S. 82-89.

Vollrath, F. & Knight, D.P. (2001): Liquid crystalline spinning of spider silk. *Nature.* 410, S. 541-548.

Vossloh Schwabe Deutschland GmbH (2003): *Elektromagnetische Verträglichkeit von Leuchten und Leuchtenzubehör; Topmagnetic Today - Neueste Erkenntnisse aus Technik und Normen; Energiesparende Leuchtstofflampen*. http://www.vossloh-schwabe.com/ger/news/index.php, Zugriffsdatum: 09.12.2003.

Wagner, G. et al. (o.J.): *Organic-Inorganic Sol-Gel Coatings as Corrosion Protection for Metals*: Nano Tech Coatings GmbH, Tholey. http://www.ebs.eurasia.de/download/, Zugriffsdatum: 01.09.2003.

Wagner, Georg *Nanotechnologie in modernen Beschichtungsmaterialien aus lackchemischer Sicht*. http://www.phaenomen-farbe.de/pf_812_forschung_nano-2.htm, Zugriffsdatum: 19.03.2004.

Wardak, Ahson (2003): *Nanotechnology & Regulation. A Case Study using the Toxic Substance Control Act (TSCA) Foresight and Governance Project*: Woodrow Wilson School.

Warheit, D. B.; Laurence, B. R.; Reed, K. L. et al. (2004): Comparative Pulmonary Toxicity Assessment of Single-wall Carbon Nanotubes in Rats. *Toxicological Sciences.* 77, S. 117-125.

Wehling, P. (2001): Jenseits des Wissens? Wissenschaftliches Nichtwissen aus soziologischer Perspektive. *Zeitschrift für Soziologie.* 30, S. 465-484.

Wehling, P. (2002): Rationalität und Nichtwissen. (Um-)Brüche gesellschaftlicher Rationalisierung. In: Karafyllis, N. & Schmidt, J (Hrsg., 2002): *Zugänge zur Rationalität der Zukunft*. Stuttgart: Metzler.

Wiedemann, P.; Karger, C. & Clauberg, M. (2002): *Risikofrüherkennung im Bereich Umwelt und Gesundheit, Aktionsprogramm, Umwelt und Gesundheit, Teilvorhaben 9, Umweltforschungsplan F+E-Vorhaben 200 61 218/09*. Jülich.

WKO (2003): *Energiewirtschaft und Energietechnik: Energiesparende Beleuchtung*: Wirtschaftskammer Oberösterreich. http://www.wko.at/ooe/energie/Branchen/Licht/licht.htm, Zugriffsdatum: 24.11.2003.

Wuelfert, S. (2000): *Lichtquellen*: Website von Stefan Wuelfert. http://surf.agri.ch/wuelfert/LECTURE/PHYSICS/COLOR/light_sources/color_light_sources.html, Zugriffsdatum: 26.09.2003.

Würdinger et al. (2000): *Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen: Vergleichende Ökobilanz für Loose-fill-Packmittel aus Stärke bzw. Polystyrol. Endbericht*: Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU). http://www.ifeu.de/englisch/agri/seiten/a_ref3.htm, Zugriffsdatum: 22.03.2004.

ZVEI (2003): *Verschiedenste Informationen der Internetseite z.B. LED in der Allgemeinbeleuchtung (März 2002)*: Zentralverband Elektrotechnik und Elektrotechnikindustrie e.V. http://www.zvei.org/, Zugriffsdatum: 26.09.2003.

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