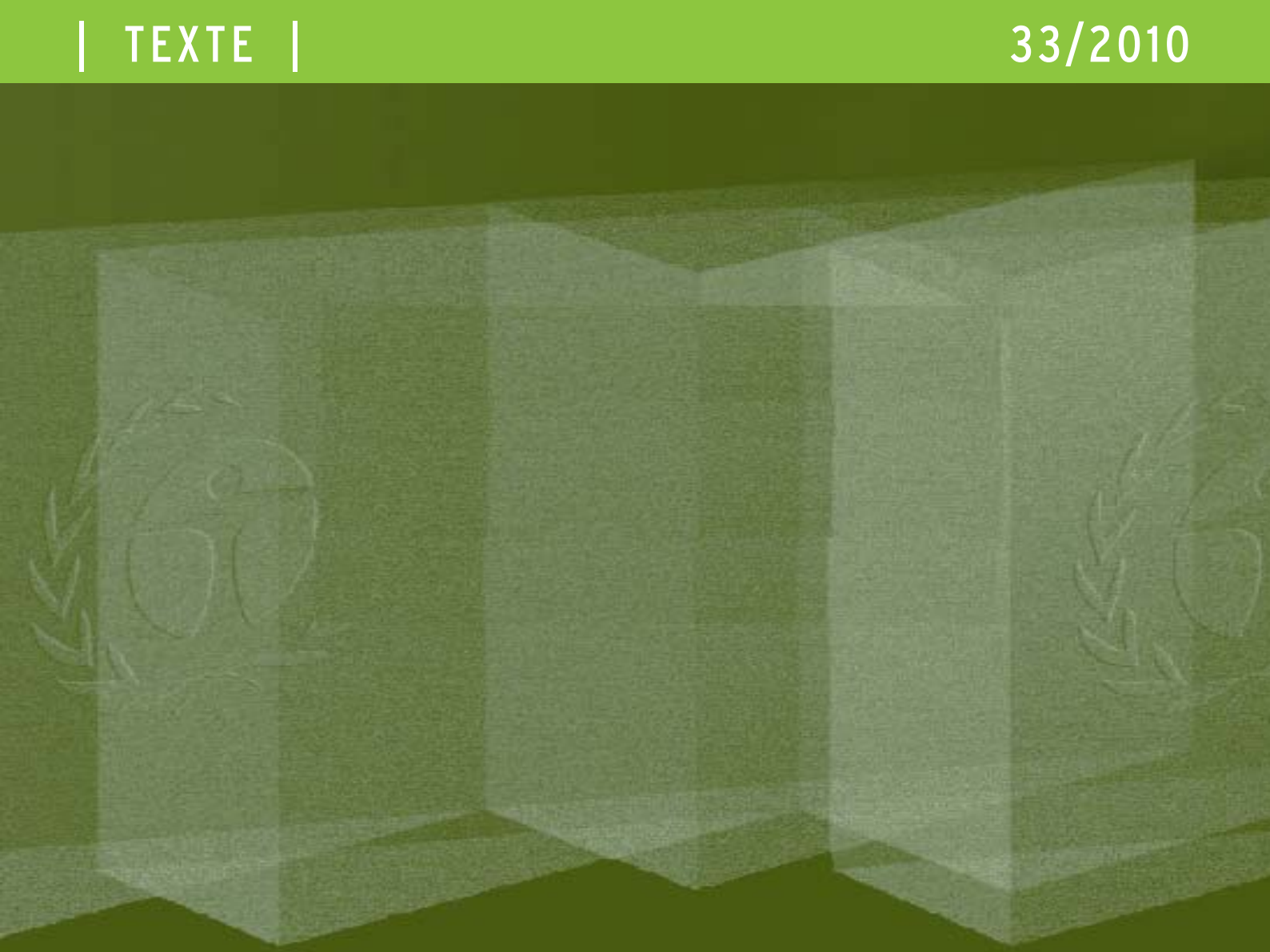




Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Förderkennzeichen 206 61 203/02
UBA-FB 001317

Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte

von

Michael Steinfeldt

Prof. Dr. Arnim von Gleich

Universität Bremen FG Technikgestaltung und
Technologieentwicklung FB Produktionstechnik

Ulrich Petschow

Christian Pade

Prof. Dr. Rolf-Ulrich Sprenger

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung gGmbH
FB Umweltökonomie und -politik

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3777
verfügbar. Hier finden Sie auch eine deutsche und eine englische Kurzfassung.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
Email: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet III 2.3K Chemische Industrie, Energieerzeugung
Dr. Wolfgang Dubbert

Dessau-Roßlau, Juni 2010

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB 001317	2.	3.
4. Titel des Berichts Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Steinfeldt, Michael; von Gleich, Arnim Petschow, Ulrich; Pade, Christian; Sprenger, Rolf-Ulrich	8. Abschlussdatum 21.11.2008	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Universität Bremen FG 10 Technikgestaltung und Technologieentwicklung FB 4 Produktionstechnik Postfach 330440, 28334 Bremen	9. Veröffentlichungsdatum Juni 2010	
	10. UFOPLAN-Nr. 206 61 203/02	
	11. Seitenzahl 248	
	12. Literaturangaben 176	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Postfach 14 06, 06813 Dessau-Roßlau	13. Tabellen und Diagramme 33	
	14. Abbildungen 67	
	15. Zusätzliche Angaben Kooperationspartner: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung gGmbH, Berlin FB Umweltökonomie und -politik Potsdamer Straße 105, D-10785 Berlin	
16. Zusammenfassung Das Forschungsvorhaben hatte vorrangig zum Ziel, die umweltbezogenen Chancen und Risiken dieser sich entwickelnden Techniklinie anhand ausgewählter Beispiele zu spezifizieren und soweit wie möglich zu quantifizieren. Das zugrundegelegte Verständnis von Umweltentlastungspotenzialen umfasst dabei nicht nur die Umwelttechnik im engeren Sinne (End-of-Pipe-Technologien), sondern insbesondere auch den prozess-, produktions- und produktintegrierten Umweltschutz. Neben einer Analyse von bereits auf dem Markt befindlichen oder in Zukunft erwartbaren Produkten und Prozessen und ihrer Anwendungen wurden in vier vertiefenden Fallstudien ökobilanzielle Untersuchungen zu folgenden ausgewählten Verfahren oder Produkten durchgeführt: - Herstellung lötfähiger Endoberflächen auf Leiterplatten durch Nanotechnik, - Mehrwandige Kohlenstoffnanoröhren-Anwendung für Folien in der Halbleiterindustrie, - Lithium-Ionen-Batterie zur Energiespeicherung im ÖPNV, - Ultradur® High Speed-Kunststoff. Außerdem erfolgten eine Untersuchung zu Beschäftigungseffekten durch Nanotechniken und die Formulierung von Handlungsempfehlungen.		
17. Schlagwörter Nanotechnologie, Nanotechnik, Ökobilanz, Umweltentlastung, Umweltschutz, Ressourceneffizienz, Kohlenstoffnanoröhren, organisches Metall, Li-Ionen-Batterie, Besorgnisanalyse, Beschäftigungseffekte		
18. Preis	19.	20.

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB 001317	2.	3.
4. Report Title Environmental Relief Effects through Nanotechnological Processes and Products		
5. Autor(s), Family Name(s), First Name(s) Steinfeldt, Michael; von Gleich, Arnim Petschow, Ulrich; Pade, Christian; Sprenger, Rolf-Ulrich		8. Report Date 21.11.2008
6. Performing Organisation (Name, Address) Universität Bremen FG Technological Design and Development FB Produktion Engineering P.O. Box 330440, D-28334 Bremen		9. Publication Date June 2010
		10. UFOPLAN-Ref. No. 206 61 203/02
		11. No. of Pages 248
		12. No. of Reference 176
7. Funding Agency (Name, Address) Umweltbundesamt (Federal Environmental Agency) Postfach 14 06, 06813 Dessau-Roßlau		13. No. of Tables, Diagrams 33
		14. No. of Figures 67
15. Supplementary Notes Co-operation partner: Institute for Ecological Economy Research, Berlin RF Ecological Economics / Environmental Policy Potsdamer Straße 105, D-10785 Berlin		
16. Abstract The top priority of the research project "Environmental Relief Effects through Nanotechnological Processes and Products" was to identify and quantify, to the extent possible and by means of selected examples, the environmental and sustainability opportunities and risks associated with this rapidly developing line of technology. Environmental relief potentials are understood here to include not only environmental engineering in the narrower sense (end-of-pipe technologies), but also and specifically process, production, and product-integrated environmental protection. The project consisted of four stages: 1. Analysis of products and processes already on the market or soon to be made available and application 2. Examination and initial qualitative assessment of each of the products and processes with respect to its potential for environmental relief (or burden, as the case may be) 3. In-depth life cycle analysis and assessment of four selected processes or products as compared to conventional processes or products (Manufacture of solderable surface finishes on printed circuit boards, MW carbon nanotube application for foils in the semiconductor industry, Lithium batteries for energy, storage, Ultradur® High Speed plastic) 4. An appraisal of nanotechnology employment effects.		
17. Keywords Nanotechnology, Life Cycle Assessment, Environmental relief, Environmental protection, Resources efficiency, Carbon nanotubes, Organic metals, Surface finishing, Li-Ion-Batteries, Preliminary assessment, Employment effect		
18. Price	19.	20.

Inhaltsverzeichnis

1	Abkürzungsverzeichnis.....	4
2	Projektziele und Aufbau des Projektes.....	5
3	Analyse von nanotechnischen Produkten, Verfahren und ihren Anwendungen.....	7
3.1	Analyse des wissenschaftlichen und öffentlichen Diskurses zum Schwerpunkt Nanotechnologie und Umweltschutz / Umweltentlastung..	7
3.1.1	Analyse von Tagungen / Workshops sowie ausgewählter Publikationen zum Schwerpunkt Nanotechnologie und Umweltentlastung	8
3.1.2	Analyse der Veröffentlichungen zum Thema Nanotechnologie und Ökobilanzen.....	13
3.2	Analyse von Unternehmen	17
3.3	Strukturierung, Zuordnung und Versuch der Ableitung von spezifischen Nanoeigenschaften.....	17
3.3.1	Neue / veränderte physikalische Funktionalitäten	18
3.3.2	Neue / veränderte chemische Funktionalitäten	21
3.3.3	Nanobiotechnologie und Selbstorganisation	25
3.4	Typisierung der Umweltinnovationen	28
3.5	Zuordnung der Anwendungen zu den einzelnen Innovationstypen.....	30
3.5.1	End-of-pipe Nanoinnovationen	32
3.5.2	Integrierte Nanoinnovationen	33
3.5.3	Nanoinnovationen im Energiebereich.....	37
4	Bewertung von Entlastungseffekten für die Umwelt an konkreten Anwendungskontexten	42
4.1	Ökologische Profilbetrachtungen als Bewertungsansatz von konkreten Anwendungsbeispielen.....	42
4.2	Besorgnisanalyse – ein Ansatz zur vorläufigen Bewertung von Nanomaterialien	47
4.3	Auswahl der Fallbeispiele für vertiefende Untersuchungen	50
4.4	Fallstudie 1: Vergleich der Herstellung lötfähiger Endoberflächen auf Leiterplatten durch Nanotechnik und durch konventionelle Verfahren..	51
4.4.1	Untersuchungsgegenstand und Untersuchungsrahmen für die ökobilanzielle Betrachtung.....	51
4.4.2	Konventionelle Surface Finishing-Verfahren	53
4.4.3	Organic Metal Nanofinish (OM Nanofinish)	55
4.4.4	Datengrundlagen und -verfügbarkeit	58

4.4.5	Betrachtete Varianten.....	60
4.4.6	Darstellung ausgewählter Verfahrensparameter und Sachbilanzdaten	60
4.4.7	Wirkungsabschätzung und ausgewählte Auswertungen der Ökobilanzierungen.....	63
4.4.8	Besorgnisanalyse für OM Nanofinish	71
4.4.9	Fazit.....	76
4.5	Fallstudie 2: Anwendung von mehrwandigen Kohlenstoffnanoröhren für leitfähige Folien in der Halbleiterindustrie.....	77
4.5.1	Untersuchungsgegenstand und Untersuchungsrahmen für die ökobilanziellen Betrachtungen.....	77
4.5.2	Modellierung des Herstellungsprozesses von MWCNT	79
4.5.3	MWCNT-Variantenbetrachtungen	86
4.5.4	Wirkungsabschätzung und ausgewählte Auswertungen der Ökobilanzierungen.....	88
4.5.5	Besorgnisanalyse für MWCNT	92
4.5.6	Fazit.....	94
4.6	Fallstudie 3: Entlastungseffekte für die Umwelt durch Anwendung von Lithium-Ionen-Batterien als Energiespeicher im Bereich von Hybridantriebssystemen im ÖPNV	97
4.6.1	Klassifikation der Hybridantriebe und Beschreibung von für Europa relevanten Bussystemen	97
4.6.2	Untersuchungsgegenstand und -rahmen	102
4.6.3	Betrachtete Varianten und Annahmen	103
4.6.4	Wirkungsabschätzung und ausgewählte Auswertungen der Ökobilanzierungen.....	105
4.6.5	Fazit.....	110
4.7	Fallstudie 4: Nanotechnikbasierter Ultradur® High Speed-Kunststoff.	111
4.7.1	Untersuchungsgegenstand und -rahmen	111
4.7.2	Bilanzauswertungen	116
4.7.3	Fazit.....	120
5	Beschäftigungseffekte durch Nanotechniken	121
5.1	Untersuchungen zu den Beschäftigten in Nano-Unternehmen	121
5.2	Vergleich der methodischen Ansätze und Datenquellen.....	122
5.3	Vergleich ausgewählter Untersuchungsergebnisse	128
5.3.1	Die vermutete Grundgesamtheit von Unternehmen im Bereich Nanotechnologie.....	128

5.3.2	Beschäftigte in Nanotechnologie-Unternehmen	133
5.3.3	Nano-Anteile der Beschäftigten in Unternehmen mit Nano-Aktivitäten	138
5.3.4	Hochrechnung der Nanobeschäftigten für die vermutete Grundgesamtheit von Nano-Unternehmen.....	140
5.3.5	Schätzung des Beschäftigungspotenzials der Nanotechnologie	141
5.3.6	Erwartete Beschäftigungsentwicklung in den Nano-Unternehmen	143
5.4	Fazit.....	147
6	Handlungsempfehlungen.....	148
6.1	Generell	148
6.2	Treiber: Gesetzliche Regulation	149
6.3	Treiber: Ökonomisches Kalkül; win-win-Situation	149
6.4	Treiber: Öffentliche Debatte, gesellschaftliche Akzeptanz	152
7	Zusammenfassung	154
8	Summary	166
9	Abbildungsverzeichnis.....	178
10	Tabellenverzeichnis.....	181
11	Anhang	183
11.1	Anhang 1: Ausgewertete Tagungen und Workshops	183
11.2	Anhang 2: Beschreibung der Vorschläge für vertiefende Untersuchungen	189
11.3	Anhang 3: Nanotechnologieunternehmen in Deutschland (Auswahl) .	196
11.4	Anhang 4: Auswahl an Bilanzierungsflussbildern in Umberto und Ökobilanzdaten.....	218
11.5	Anhang 5: Fragebogen für Nano-Unternehmen	230
12	Literatur	234

1 Abkürzungsverzeichnis

Äq.	Äquivalent
CFC ₁₁	Trichlorfluormethan
CNT	Kohlenstoffnanoröhren
cm	Zentimeter
cm ³	Kubikzentimeter
EU	Europäische Union
EPA	Environmental Protection Agency (US-Umweltbehörde)
FE	Funktionale Einheit
GJ	Gigajoule
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
km	Kilometer
kWh	Kilowattstunde
lm	Lumen
LP	Leiterplatte
MJ	Megajoule
MWCNT	Mehrwandige Kohlenstoffnanoröhren
NIW	Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung
nm	Nanometer
PBT	Polybutylenterephthalat
S	Siemens
t	Tonne
W	Watt
m ²	Quadratmeter
µm	Mikrometer
€	Euro
%	Prozent
°C	Grad Celsius
eV	Elektronenvolt

2 Projektziele und Aufbau des Projektes

Nanotechnologie ist national und international ein wichtiger Förderschwerpunkt der Forschungs- und Technologiepolitik. Es ist zu erwarten, dass zahlreiche innovative Entwicklungen in den verschiedensten technologischen Bereichen, gesellschaftlichen Anwendungsfeldern und ökonomischen Branchen von ihnen ausgehen. Experten schreiben ihnen also Potenziale zu weit reichenden Veränderungen zu, die letztlich fast alle gesellschaftlichen Bereiche erfassen können. Insbesondere verweisen Sie auf erhebliche wirtschaftliche Potenziale und Arbeitsplatzeffekte (vgl. VDI TZ 2004). Es lassen sich durchaus gute Gründe auch zu hohen Erwartungen hinsichtlich bedeutender Umweltentlastungspotenziale durch Nanotechniken formulieren. Beim Einsatz einer so potenten Technik ist aber nicht nur mit den intendierten Erfolgen, sondern auch mit nicht intendierten Neben- und Folgewirkungen zu rechnen. Es kommt also darauf an, die Entwicklung der Nanotechniken und ihrer Einsatzbereiche so zu gestalten, dass die angestrebten Ziele möglichst erreicht und gleichzeitig die nicht intendierten Nebenwirkungen und Risiken minimiert werden.

Das Forschungsvorhaben "Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte" hatte vorrangig zum Ziel, die umwelt- und nachhaltigkeitsbezogenen Chancen und Risiken dieser sich entwickelnden Techniken zu spezifizieren und soweit wie möglich zu quantifizieren. Das zugrundegelegte Verständnis von Umweltentlastungspotenzialen umfasst dabei nicht nur die Umwelttechnik im engeren Sinne (End-of-Pipe-Technologien), sondern auch den prozess-, produktions- und produktintegrierten Umweltschutz und damit nicht zuletzt auch die ‚Input-Seite‘ auf dem Weg zu einem nachhaltigen Wirtschaften, also die Verringerung und Veränderung der Quantitäten (Ressourceneffizienz) und Qualitäten (Konsistenz) der Stoff- und Energieströme, die in die Technosphäre eintreten.

Das Vorhaben gliederte sich in vier Schritte auf und hatte sich dabei jeweils spezifischer Untersuchungsmethoden bedient:

1. Analyse von bereits auf dem Markt befindlichen oder kurz vor der Vermarktung stehenden Produkten und Prozessen und ihren Anwendungen (Screening und Vorauswahl näher zu betrachtender Anwendungsfelder)

2. Untersuchung und zunächst qualitative Bewertung der jeweiligen Produkte und Verfahren hinsichtlich ihres umweltentlastenden (und ggf. umweltbelastenden) Wirkungspotenzials (Technikcharakterisierung, Charakterisierung des Anwendungsbereichs, Abschätzung der intendierten und nicht intendierten Wirkpotenziale)
3. Vertiefende lebenszyklusorientierte Untersuchung und Bewertung von vier ausgewählten Verfahren oder Produkten im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren oder Produkten (extrapolierende Ökopprofile in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik)
4. Ergänzung der umweltbezogenen Bewertung der ausgewählten Verfahren oder Produkte um eine Abschätzung von Beschäftigungspotenzialen.

3 Analyse von nanotechnischen Produkten, Verfahren und ihren Anwendungen

Der erste Projektbaustein besteht aus einem umfangreichen Screening zum Schwerpunkt Nanotechniken mit Bezug auf Umweltschutz/Umweltentlastung. Hierbei wurden insbesondere entsprechende Tagungen/Workshops, wissenschaftliche Veröffentlichungen sowie aktuelle Pressemitteilungen und Internetportale durchsucht.

Parallel dazu galt es, gezielt Unternehmen hinsichtlich ihrer nanotechnisch beeinflussten Produkte und Verfahren zu erfassen. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf solche Produkte/Verfahren gelegt, die nicht allein auf die inkrementelle Weiterentwicklung und bloße Umbenennung herkömmlicher Verfahren zielen, sondern für künftige nanotechnische Verfahren und Produkte stehen und dabei Bezüge zu weit reichenden umweltentlastenden Wirkungspotenzialen aufweisen.

Ein weiterer Schritt entwickelte ein Raster zur Typisierung von nanotechnischen Umweltinnovationen, das spezifische Nanoqualitäten (bzw. Funktionalitäten) in Bezug zu spezifischen Umweltentlastungspotenzialen setzen kann. Unterschieden wurde dabei auch hinsichtlich der zeitlichen Perspektiven. Die Analyse betraf sowohl die schon existierenden als auch die erwartbaren Anwendungsbereiche, die besonders für den Umweltschutz und für entsprechende Umweltentlastungspotenziale interessant sind oder sein werden.

3.1 Analyse des wissenschaftlichen und öffentlichen Diskurses zum Schwerpunkt Nanotechnologie und Umweltschutz / Umweltentlastung

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die aktuellen technischen Entwicklungen von Nanotechniken sowie die damit erwartbar verknüpften gesellschaftlichen Wirkungen (Risiken, Umweltpotenziale etc.) im Medium Internet sehr präsent sind. Aus den dort vorliegenden Informationen lässt sich eine sehr gute Ausgangsbasis für weitergehende Literaturrecherchen erarbeiten.

Insbesondere über die diversen Nanotechnology-News-Portale präsentieren sich vielfältige Informationen zu neuen technischen Entwicklungen (sofern sie denn überhaupt publik gemacht werden sollen) und zu den relevanten

Tagungen/Workshops. Aufgrund der sehr einfachen weltweiten Verbreitung sind diese Informationen innerhalb von einigen Tagen in mehreren News-Portalen zu lesen. Die Qualität der entsprechenden Informationen ist allerdings oft nur schwer abschätzbar.

Auf jeden Fall ist davon auszugehen, dass die Internetrecherche in deutsch/englischsprachigen Nanotechnology-News-Portalen die für die (Fach)Öffentlichkeit bestimmten Informationen weitgehend abdeckt.

3.1.1 Analyse von Tagungen / Workshops sowie ausgewählter Publikationen zum Schwerpunkt Nanotechnologie und Umweltentlastung

Eine Analyse von wissenschaftlichen Tagungen / Workshops sowie von wissenschaftlichen Veröffentlichungen sichert diese Erstinformationen vertieft und qualitativ ab. Diese Bereiche ziehen Bezüge zu gesellschaftlich relevanten Wirkungen nicht so häufig und auch nicht so schnell, wie dies bei der Öffentlichkeits- und Pressearbeit sowie im Internet der Fall ist. Der Fokus lag deshalb zunächst auf denjenigen Tagungen und Workshops, die sich explizit mit dem Thema Nanotechnik und Umwelt/Umweltentlastung befassten. Von besonderem Interesse war dabei, welche nanotechnischen Anwendungen und Forschungen einen besonderen Bezug zum Umweltthema zeigten, und welcher Typ von Umweltinnovationen mit welcher Innovationshöhe dabei im Fokus stand. Von besonderem Interesse war dabei, ob und inwieweit diese Umweltentlastungspotenziale nur qualitativ oder auch quantitativ belegt werden.

Ausgewertete Tagungen und Workshops (Kurzanalysen siehe Anhang 1):

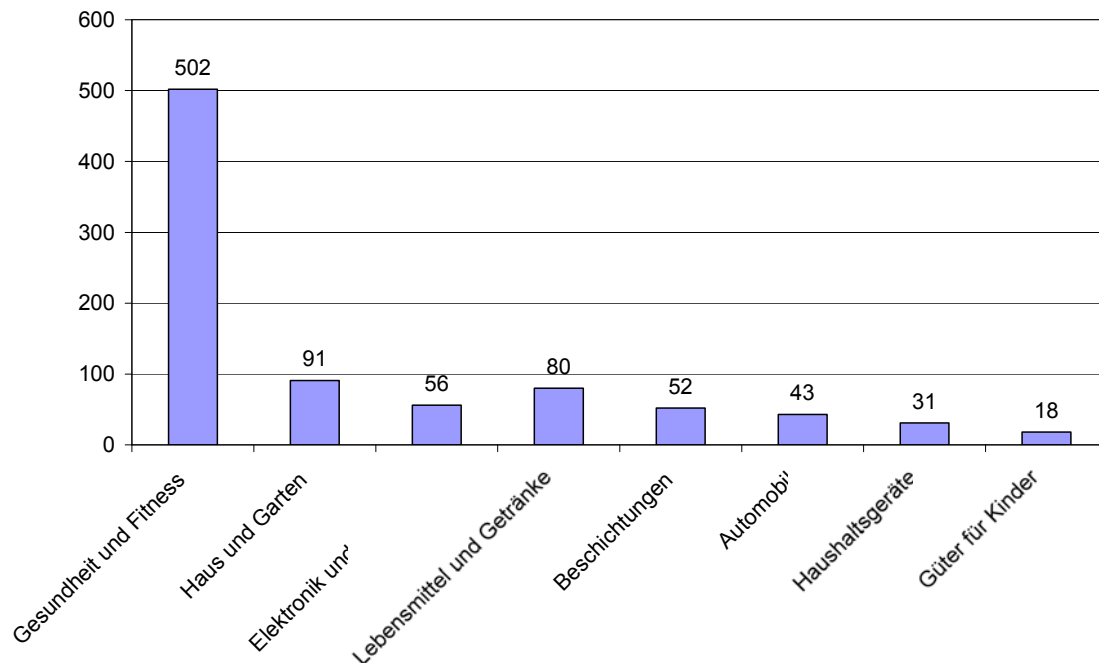
- Nanofrontiers, February 9-10, 2006, Washington (Schmidt K 2007)
- Safer Nano 2006, March 6-7, 2006, Portland (vgl. Hutchison 2006, Renfroe 2006, Murdock 2006)
- Safer Nano 2007, March 12 – 13, 2007, Eugene (Hutchison 2007)
- ACS Green Nanotechnology and the Environment, March 26-29, 2006, Atlanta (Schmidt K 2007)
- Nanoforum-Workshop "Nano & the Environment", 30 and 31 March 2006, Brüssel (Nanoforum 2006)

- EuroNanoForum 2007. Nanotechnology in Industrial Applications, 19-21 June 2007, Düsseldorf (EuroNanoForum 2007)
- Nanotechnology and Life Cycle Assessment, 2-3 October 2006, Washington DC (WWIC (ed) 2007)
- Forum Zukunft - Nano – Chancen für nachhaltiges Wachstum, 25. Oktober 2006, Berlin (VCI (Hrsg.) 2006)
- Nanotechnology – Products and Processes for Environmental Benefit, 16.-17. Mai 2007, London (Institute of Nanotechnology 2007)
- Nanomanufacturing for Energy Efficiency, June 5-6, 2007 Baltimore, Maryland (DOE-EERE 2007)
- Interagency Workshop on the Environmental Implications of Nanotechnology, September 5-7, 2007, Washington DC (EPA 2007)
- Pollution Prevention through Nanotechnology Conference, September 25-26, 2007, Arlington

Für den Bereich kommerziell erhältlicher **Konsumprodukte** ist es gegenwärtig schwierig, einen umfassenden Überblick zu gewinnen. Nanotechnology in Consumer Products (Gleiche et al. 2006) liefert einen guten Überblick über Produktkategorien und nanospezifische Effekte und stellt auch etliche kommerziell erhältliche Produkte dar.

Des Weiteren unterhält das Woodrow Wilson International Center für Scholars im Rahmen ihres „Project of Emerging Nanotechnologies“ eine weltweite, offene Datenbank zu Konsumprodukten, in der aber amerikanische Produkte überwiegen (vgl. WWIC 2008). Der Inhalt dürfte trotzdem repräsentativ für kommerziell erhältliche Konsumprodukte sein. In der Datenbank waren mit Stand vom 21.08.2008 803 Produkte enthalten. Die folgende Abbildung stellt die dort vorfindbare Produktverteilung nach bestimmten Produktkategorien dar.

Abbildung 1: Anzahl der Produkte, geordnet nach Produktkategorien¹



Die größte Kategorie Gesundheit und Fitness beinhaltet dabei Kosmetika (126 Produkte), Bekleidung (115), Körperpflege (153), Sportwaren (82), Sonnenschutzmittel (33) und Filtration (40).

In dem im Auftrag des Umweltbundesamt erarbeiteten Rechtsgutachten Nanotechnologien (Führ et al 2007) findet sich ebenfalls eine Übersicht zu auf dem deutschen Markt und in der Entwicklung befindlichen Nanoprodukten.

Das Thema **CO₂-Minderungspotenziale** durch Nanotechniken und deren Quantifizierung untersuchten zwei Studien von Cientifica Ltd und Oakdene Hollins Ltd (Cientifica Ltd 2007, Walsh 2007) für Großbritannien. Cientifica untersuchte dabei die CO₂-Minderungspotenziale in den Bereichen Transport, Wärmedämmung sowie Dünnschichtsolarzellen, wobei die derzeitigen und kurzfristig (bis 2010) realisierbaren Minderungspotenziale als sehr gering eingeschätzt werden (2010: 2.600 t CO₂ im Bereich Transport; 1.250 t CO₂ durch Wärmedämmung; 2010 Dünnschichtsolarzellen

¹ Quelle: WWIC 2008

noch keine Relevanz). Erst mittel- und langfristig wird die Realisierung signifikanter CO₂-Minderungen erwartet. Die Studie von Oakdene Hollins untersuchte die CO₂-Minderungspotenziale breiter. Genauere Untersuchungen beinhalteten 15 Bereiche genauer untersucht und für fünf relevante Bereiche (Kraftstoffeffizienz, Wärmedämmung, Photovoltaik, Energiespeicherung und Wasserstoffwirtschaft) wurden die CO₂-Einsparungspotenziale quantifiziert. In der Größenordnung kommt diese Studie zu deutlich höheren Einsparpotenzialen als Cientifica. Die größten CO₂-Minderungspotenziale sind dabei langfristig (20-40 Jahre) in den Bereichen Energiespeicherung (Batterien für Hybridfahrzeuge) sowie Wasserstoffwirtschaft zu sehen.

Erwartbare nanotechnische Anwendungen

Die Methode des Roadmappings setzt sich immer mehr zur Ermittlung und Beschreibung möglicher, erwartbarer, wünschbarer und geplanter zukünftiger Entwicklungen und deren Erreichung in einzelnen Technikfeldern durch (vgl. Möhrle / Isenmann 2008). Da bisher für das bearbeitete Themengebiet keine Roadmap existiert, haben wir vorhandene Nanotechnologieroadmaps und ähnliche strategisch angelegte Publikationen mit überlappenden Schnittmengen gezielt auf Anwendungspotenziale im Umwelt- und Energiebereich hin analysiert und ausgewertet:

- Productive Nanosystems. A Technology Roadmap (Battelle Memorial Institute and Foresight Nanotech Institute 2007)
- A European roadmap for photonics and nanotechnologies (MONA 2007)
- Roadmaps for Science: nanoscience + nanotechnologies (Ministry of Research, Science and Technology 2006)
- Nanotechnology Program Content (Nasa 2005)
- Roadmap for Nanomaterials (Chemical Industry Vision2020 Technology Partnership 2003)
- Roadmaps at 2015 on Nanotechnology – Application in the Sectors of Materials, Health & Medical Systems, Energy (AIRI/Nanotec IT 2006, Willems & van den Wildenberg 2005, VDI/VDE 2005, The Institute of Nanotechnology 2006)
- Nanomaterial Roadmap 2015 (Steinbeiss-Europa-Zentrum 2005, Steinbeiss-Europa-Zentrum and Forschungszentrum Karlsruhe 2006, Steinbeiss-Europa-

Zentrum and FFG 2005 und 2006, Steinbeiss-Europa-Zentrum and Comité Richelieu 2005 und 2006)

- Nano-Initiative – Aktionsplan 2010 (BMBF 2006)
- Nanotechnologien für den Umweltschutz (Bachmann et al 2007).

Dabei ist festzustellen, dass die größten analysierten Schnittmengen im Energiebereich liegen. So besitzen die beiden von der EU geförderten Studien „Roadmaps at 2015 on Nanotechnology – Application in the Sectors of Materials, Health & Medical Systems, Energy“ und „Nanomaterial Roadmap 2015“ in diesem Bereich einen expliziten Schwerpunkt. Besonders interessante zukünftige Entwicklungen werden demnach von den Experten in folgenden Bereichen gesehen:

- Stromerzeugung: verschiedene Arten von Solarzellen (Organische Solarzelle, Farbstoffsolarzelle, Quantenpunktsolarzelle), Thermophotovoltaik, Thermoelektrika
- Energiespeicherung: Hocheffiziente Wasserstoffspeicher, Hochleistungsbatterien, Superkondensatoren
- Energieeffizienz: OLED-Beleuchtung, Nanoschaum als Isolationsmaterial

In ähnlicher Weise werden in der Roadmap der amerikanischen chemischen Industrie (vgl. Chemical Industry Vision2020 Technology Partnership 2003) folgende Anwendungsfelder im Energiebereich aufgeführt: Hochleistungsbatterien, Superkondensatoren, effiziente und preiswerte Solarzellen, effiziente und preiswerte Brennstoffzellen /-materialien.

Darüber hinaus werden in dieser Roadmap weitere relevante nanotechnologische Entwicklungen dargestellt, die auch den klassischen Umweltbereich betreffen: Nanosensoren, Photokatalysatoren, hoch selektive Katalysatoren, ultrastabile Leichtbaukonstruktionswerkstoffe. In der Roadmap zu produktiven Nanosystemen (vgl. Battelle Memorial Institute and Foresight Nanotech Institute 2007) werden in etwa die gleichen Anwendungsfelder im Umwelt- und Energiebereich dargestellt. Darüber hinaus werden hier außerdem Chancen bei selektiven permeablen Membranen und „smarten“ Materialien hervorgehoben.

In der europäischen Roadmap zu Photonik und Nanotechnologien (vgl. MONA 2007) werden zukünftige Anwendungen mit nanophotonischen Effekten untersucht. Die größten Schnittmengen zum Umwelt- und Energiebereich liegen dabei in den von den

Experten erwarteten Anwendungen in der Photovoltaik, bei Licht- und Displayanwendungen sowie Sensoren.

Speziell mit den klassischen Umweltbereichen und deren zukünftige Entwicklungspfade befasst sich umfassend bisher nur die Studie des VDI „Nanotechnologien für den Umweltschutz“ (vgl. Bachmann et al 2007). Neben der Weiterentwicklung hin zu kostengünstigeren Membranen bei der Abwasserreinigung werden neue Anwendungspotenziale bei der mobilen Trinkwasserreinigung durch Nanonetze (nano-mesh) sowie durch neuartige Filtermembrane für die Meerwasserentsalzung gesehen, die mit Kohlenstoffnanoröhren bestückt sind. Die Nanonetze basieren ebenfalls auf gebündelten Kohlenstoffnanoröhren, die auf einem flexiblen, porösen Trägermaterial aufgebracht sind. Außerdem werden weitere Potenziale in der photokatalytischen Luft- und Wasserreinigung erwartet. Im Bereich der Mess- und Regeltechnik werden zukünftig neben der Weiterentwicklung hin zu kostengünstigeren selektiven Nanosensoren neue Anwendungspotenziale durch die Entwicklung von Nanosensor-Netzwerken zur Überwachung verschiedener Parameter gesehen.

Eine Zuordnung der in den Roadmaps analysierten erwartbaren nanotechnischen Anwendungen und Konzepte im Umwelt- und Energiebereich zu Innovationstypen und zeitlichen Realisierungshorizonten erfolgt im Kap. 3.5. (vgl. Abb. 4).

Zwischenfazit: Bisherige Arbeiten, die die Umweltrelevanz nanotechnischer Produkte und Prozesse im Fokus haben, erfassen diese bisher vornehmlich qualitativ. Zudem stehen meist im engeren Sinne umwelttechnische Innovationen (End-of-pipe-Ansätze) im Fokus (vgl. Paschen et al 2003, Luther und Malanowski 2004, HA 2005). Ein Projekt am Forschungszentrum Karlsruhe (ITAS) untersuchte vertieft – im Sinne des integrierten Umweltschutzes – das Potenzial für Gefahrstoffsubstitutionen auf der Basis nanotechnologischer Lösungen (vgl. Fiedeler 2006).

3.1.2 Analyse der Veröffentlichungen zum Thema Nanotechnologie und Ökobilanzen

Quantifizierende Untersuchungen zu erwartbaren Umweltauswirkungen einzelner nanotechnischer Produkte und Prozesse sowie Umweltinnovationen im Sinne des produkt- und produktionsintegrierten Umweltschutzes bilden bisher die Ausnahme.

Einen Überblick über bisher durchgeführte quantifizierende Analysen in Anlehnung an die Ökobilanzmethode vermittelt Tabelle 1.

Tabelle 1: Überblick über quantifizierende Studien zu nanotechnischen Innovationen²

Untersuchungs-gegenstand	Methode	Technischer Nutzen	Umweltnutzen	Quelle
End-of-pipe Innovationen				
Nanoskalige Platingruppen-Metalle (PGM) in Autoabgas-katalysatoren	Ökologisch-ökonomische Lebenszyklus-beurteilung (EIO-LCA ³)	Reduzierung der PGM-Einsatz-menge um 95%	Überall reduzierte Umweltaus-wirkungen	Lloyd et al 2005
Nanoskalige Platingruppen-Metalle (PGM) in Autoabgas-katalysatoren	Ökopprofil in Anlehnung an die Ökobilanz-methodik	Reduzierung der PGM-Einsatz-menge um 50%	Überall reduzierte Umweltaus-wirkungen (10-40%)	Steinfeldt et al 2003
Produkt- und prozessintegrierte Innovationen				
Styrolsynthese auf Basis eines Kohlen-stoffnanoröhren-Katalysators im Vergleich zum Katalysator auf Eisenoxidbasis	Ökopprofil in Anlehnung an die Ökobilanz-methodik	Veränderung des Reaktionstyps, Reduzierung der Reaktions-temperatur, Veränderung des Reaktionsmediums	Knapp 50% geringerer Energiebedarf für die Styrolsynthese	Steinfeldt et al 2004
Antireflexglas für Solarzellen im Vergleich zu traditionellem Glas	Messung der erwartbaren Effizienz-steigerung	Erhöhte solare Transmission	Bis zu 6% höhere Energieeffizienz	BINE 2002
Polypropylen-Nano-komposit in Automobil-anwendungen im Vergleich zu Stahl und Aluminium	Ökologisch-ökonomische Lebenszyklus-beurteilung (EIO-LCA)	Gewichtsreduktion abhängig vom Anteil an Nanokomposit	Überall reduzierte Umweltauswir-kungen; große Energie- und Res-sourceneinsparung	Lloyd and Lave 2003
Nanolack im Vergleich zu konventionellen Lacken	Ökopprofil in Anlehnung an die Ökobilanz-methodik	Notwendige Schichtdicke geringer bei gleicher Funktionalität	5 - 8 erhöhte Ressourcen-effizienz, 65% geringere VOC ⁴ -Emissionen	Steinfeldt et al 2004

² Quelle: basiert auf Lekas (2005a), Steinfeldt et al (2007) und eigenen Recherchen

³ EIO-LCA: engl. Economic Input-Output Life Cycle Assessment

⁴ VOC: Flüchtige organische Verbindungen (engl. Volatile Organic Compound)

Untersuchungs-gegenstand	Methode	Technischer Nutzen	Umweltnutzen	Quelle
Vergleich von konventionellen und nanotechnikbasierten Displays (OLED ⁵ and CNT-FED ⁶)	Ökoprofil in Anlehnung an die Ökobilanz-methodik	Erhöhte Energieeffizienz, höhere Bildschirm-auflösung, geringere Displaydicke	Erhöhte Energie- und Material-effizienz; geringerer Materialinput für OLEDs, doppelt so hohe Energie-effizienz in der Nutzungsphase	Steinfeldt et al 2004
Weißes LED ⁷ im Vergleich zu Glühlampe und Kompaktleuchtstofflampe	Ökoprofil in Anlehnung an die Ökobilanz-methodik	Höhere Lebensdauer	Gegenüber Glühlampe energie-effizienter, gegenüber der Leuchtstofflampe erst bei Lichtausbeuten größer 65 lm/W	Steinfeldt et al 2004
Nanotechnikbasierte Photovoltaik im Vergleich zu Modulen auf Basis von multikristallinem Silizium	Ökoprofil in Anlehnung an die Ökobilanz-methodik		Verkürzte energetische Amortisationszeiten, Farbstoffsolar-zelle aber mit geringerem Wirkungsgrad	Steinfeldt et al 2003
Ferritklebstoff im Vergleich zu konventionellen Klebstoffen	Ökoprofil in Anlehnung an die Ökobilanz-methodik	Energieeffizientere Klebstoffaus-härtung durch Nutzung magnetischer Eigenschaften	12% (-40%) höhere Energieeffizienz, abhängig von Fügeteilgrößen	Wigger 2007
Ökobilanzdaten				
Untersuchungsgegenstand	Methode	Quelle		
Kohlenstoffnanofasern (CNF) in Kunststoffen	Ecobilan TEAM Software	Volz and Olson 2004		
Kohlenstoffnanoröhren	Stoffflussanalyse	Lekas 2005b		

⁵ OLED: Organische Licht Emittierende Diode (engl. Organic Light Emitter Display)

⁶ CNT-FED: Feldemitterdisplay auf Basis von Kohlenstoffnanoröhren (engl. Carbon Nanotube-Field Emitter Display)

⁷ LED: Licht Emittierende Diode (engl. Light Emitter Display)

Energieverbrauch der Nanopartikelproduktion (TiO ₂ , ZrO ₂)	Energiebilanzierung	Osterwalder et al 2006
Energieverbrauch von Kohlenstoffnanopartikel-Anwendungen	Energiebilanzierung	Sanden, Kushnir 2007 Sanden, Kushnir 2008
Energieverbrauch der Nanofaserproduktion	Lebenszyklusenergieanalyse	Bakshi et al 2007 Khanna et al 2008
Materialverbräuche verschiedener Nanomaterial-Syntheseverfahren	E-Faktor Analyse (Verhältnis aus Produktoutput und Materialinput, ähnlich MIPS-Methode)	Eckelman et al 2008
Umweltvergleich von drei Herstellungsverfahren von einwandigen CNT	Ökobilanzierung mit SimaPro Software	Meagan et al 2008

Der Fokus der Veröffentlichungen liegt bisher auf den USA und Deutschland. In den USA wurden bzw. werden von der Environmental Protection Agency vier Projekte zu diesem Themenschwerpunkt mit knapp 800.000 \$ gefördert.

Tabelle 2: Überblick über Projekte zum Thema Nanotechnologie und LCA der U.S. EPA⁸

Projekttitel	Hauptauftragnehmer	Institution	Zuwendung	Projektzeitraum
Comparative Life Cycle Analysis of Nano – and Bulkmaterials in Photo-voltaic Energy Generation	Fthenakis, Vasilis	Columbia University	\$200,000	Juni 2007 - Mai 2009
Evaluating the Impacts of Nanomanufacturing via Thermodynamic and Life Cycle Analysis	Bakshi, Bhavik R.; Lee, L. James	Ohio State University	\$375,000	Januar 2006 - Dezember 2008
A Life Cycle Analysis Approach for Evaluating Future Nanotechnology Applications	Lave, Lester; Lloyd, Shannon	Carnegie Mellon University	\$100,000	Mai 2003 - April 2005
Implications of Nanomaterials Manufacture and Use: Development of a Methodology for Screening Sustainability	Beaver, Earl R.; Beloff, Beth; Tanzil, Dickson; Wiesner, Mark	BRIDGES to Sustainability, Rice University	\$99,740	Mai 2003 - April 2005

⁸ Quelle: EPA (o.J.)

3.2 Analyse von Unternehmen

Gegenstand der Analyse waren Unternehmen mit ihren nanotechnologisch beeinflussten Produkten und Verfahren in Deutschland. Besonderer Wert lag dabei auf der Identifikation solcher Produkte/Verfahren, die nicht allein auf die inkrementelle Weiterentwicklung oder Umbenennung herkömmlicher Verfahren zielen, sondern richtungsweisend für künftige nanotechnische Verfahren und Produkte stehen und Bezüge zu umweltentlastenden Wirkungspotenzialen aufweisen. Ausgangspunkt für die Erfassung der Unternehmen war die nano-map.de-Datenbank, in der deutschlandweit Unternehmen geordnet nach Anwendungsbereichen etc. aufgeführt sind. Weitere nanotechnologiespezifische Internetportale erweitern die Informationsbasis. Im Anhang 3 sind über 200 Anwendungen aufgelistet, die derzeit in Deutschland auf dem Markt sind. Von diesen verfügt eine große Anzahl Potenziale für Umweltentlastungen.

3.3 Strukturierung, Zuordnung und Versuch der Ableitung von spezifischen Nanoeigenschaften

Da es sich bei der Nanotechnologie um ein breites, höchst heterogenes Technologiefeld handelt, existiert bis heute keine allgemein anerkannte Definition. Die vorliegende Studie orientiert sich diesbezüglich an Paschen et al. (2003) und verwendet folgende Definition:

Die Nanotechnologie befasst sich mit Strukturen, die in mindestens einer Dimension kleiner als 100 nm sind. Die Nanotechnologie macht sich charakteristische Effekte und Phänomene zunutze, die im Übergangsbereich zwischen atomarer und mesoskopischer Ebene auftreten. Die Nanotechnologie bezeichnet die gezielte Herstellung und/oder Manipulation einzelner Nanostrukturen.

Eine Beschränkung in der Definition auf den Bereich kleiner als 100 nm stellt sich in einigen Fällen als problematisch heraus. Im Zentrum dieser Definition steht aber ohnehin die Nutzung von Funktionen, die nur (oder besonders stark) in diesem Größenordnungsbereich auftreten. Daran anknüpfend stellt sich die Frage, welche besonderen Nanofunktionalitäten in Bezug auf Umweltanwendungen von besonderer Bedeutung sind, und ob es gelingen kann, daraus schon relevante neue Eigenschaften und Effekte abzuleiten und Anwendungsbereiche zu benennen, die besonders für den

Umweltschutz oder für Umweltentlastungen interessant erscheinen. Immerhin ist der Versuch einer Abschätzung und sogar Quantifizierung von Umweltentlastungspotenzialen einer erst sich entwickelnden Technologielinie alles andere als ein triviales Unterfangen. In der Regel sind in einem so frühen Stadium der Technologieentwicklung weder die genaue Ausgestaltung der Produkte und Prozesse noch die konkreten Anwendungskontexte und der Einsatzerfolg der Innovationen bekannt. Insofern empfiehlt sich zunächst die Konzentration auf dasjenige, was zu diesem frühen Zeitpunkt schon bekannt sein kann: 1. die (neuen oder verbesserten) Nanoeigenschaften bzw. Nanofunktionalitäten, 2. das aktuell auf dem Markt befindliche Produkt oder Verfahren, das durch die Nano-Innovation abgelöst werden soll.

Es folgt deshalb zunächst eine Aufstellung der grundlegenden Nanofunktionalitäten, von denen Beiträge zur Umweltentlastung zu erwarten sind.

3.3.1 Neue / veränderte physikalische Funktionalitäten

Mechanische Funktionalitäten: Wichtige Verbesserungen in den mechanischen Funktionalitäten nanostrukturierter Materialien beziehen sich auf höhere Härte, höhere Bruchfestigkeit und -zähigkeit bei niedrigen Temperaturen sowie Superplastizität bei hohen Temperaturen. Die Zugabe von nanoskaligen Additiven (z.B. bei Lacken) kann zu einer erhöhten Kratz- und Abriebfestigkeit von Beschichtungen führen.

Dies birgt ein hohes Potenzial für vielfältige Effizienzsteigerungen in industriellen Anwendungen, die auch durchaus umweltrelevant sind insbesondere im Sinne der Ressourcenschonung. Interessante Anwendungsgebiete sind z. B. Hartstoffschichten, die zu längeren Standzeiten von Produktionswerkzeugen führen. Außerdem lassen sich so ggf. schmierstoffarme oder -freie Anwendungssysteme realisieren.

Elektrische und Quanteneffekte: Die Verkleinerung von Partikelgrößen und Schichtdicken bis hin zum unteren nm-Bereich ermöglicht die Ausbildung und Nutzung von Quantenpunkten und Quantentrogzuständen⁹. Solche Partikel verhalten sich nicht

⁹ Als Quantenpunkte (Quantendots) bezeichnet man Nanokristalle, die aus einigen hundert Atomen bestehen und wenige Nanometer Ausdehnung aufweisen. Quantenpunkte können freie Partikel oder in Halbleiter eingebettete Inseln sein, die sich wie künstliche Atome verhalten. Quantenpunkte wirken für Elektronen als Käfig, so dass sich die Ladungsträger nicht mehr frei bewegen und nur noch ganz bestimmte diskrete Energieniveaus besetzen können, während sie im Festkörper viele verschiedene

wie Festkörper, sondern wie atomare oder molekulare Zustände. Diese Effekte können gezielt zur Verbesserung von Halbleitereigenschaften genutzt werden. Außerdem zielen viele Forschungen auf die Weiterentwicklung von Quantenpunktlasern, in Richtung Spintronik¹⁰ sowie die Realisierung eines Quantencomputers¹¹ (vgl. BSI 2007).

Die gezielte und verbesserte Nutzung von Quanteneffekten durch neue nanotechnische Materialien im Halbleitermaterialienbereich birgt ein sehr großes Potenzial für vielfältige Effizienzsteigerungen insbesondere bei energetischen Anwendungen bspw. zur Erhöhung der Effizienz von Silizium-Solarzellen (vgl. Beard et al 2007). Weitere wichtige Ansätze zielen auf eine höhere spezifische Speicherkapazität von Nanomaterialien und eine bessere elektrische Leitfähigkeit. Lösungen im Bereich der Speicherung von Energie (insbesondere von Strom oder chemischer Energie in Kondensatoren oder Akkus) gehören neben der Verbesserung der Leitfähigkeit von elektrischen Leitern sicher zu denjenigen Bereichen, die mittelfristig mit die größten Umweltentlastungspotenziale eröffnen.

Interessant ist auch die gezielte Nutzung photokatalytischer und selbstreinigender („catalytic to clean“) Eigenschaften. Die Absorption von Licht (UV-Licht $\lambda < 390\text{nm}$)

Energiewerte annehmen. Die Energieniveaus in den Quantenpunkten können über deren Größe, Form und Material beeinflusst werden.

Unter einem Quantentrog (engl. quantum well) versteht man einen Potenzialverlauf, der die Bewegungsfreiheit eines Teilchens in einer Raumdimension einschränkt. Die Breite des Quantentrog bestimmt maßgeblich die quantenmechanischen Zustände des Teilchens und führt dazu, dass das Teilchen nur diskrete Energiewerte annehmen kann. In der Halbleitertechnologie werden Quantentröge hergestellt, indem eine Schicht eines Halbleiters geringerer Bandlücke zwischen zwei Schichten eines Halbleiters größerer Bandlücke eingebettet werden.

¹⁰ Spintronik oder auch Spinelektronik ist eine Weiterentwicklung der Magnetoelektronik. Sie nutzt für die Entwicklung einer neuen Generation von Halbleiterbauelementen einen grundlegenden quantenmechanischen Aspekt des Elektrons, seinen Eigendrehimpuls (Spin) und beruht auf der Wechselwirkung des Spins der Ladungsträger mit den magnetischen Eigenschaften des Festkörpers. Hierbei werden Informationen auf einem Chip nicht mehr mit elektrischer Ladung gespeichert und verarbeitet, sondern mittels Veränderung der Magnetisierungsrichtung.

¹¹ Der Quantencomputer ist eine 1985 erstmals von David Deutsch beschriebene Vision eines Computers, der nach den Gesetzen der Quantenphysik arbeitet. Für die Implementierung eines Quantencomputers ist es notwendig, ein physikalisches System zu präparieren, das es erlaubt, Quantenzustände verlässlich zu speichern sowie mit Quantenoperationen gezielt und präzise manipulieren zu können.

überführt Photohalbleiter wie zum Beispiel Titandioxid (insbesondere Anatas¹² $\lambda=388\text{nm}$, 3,2 eV) in einen angeregten Zustand. Dabei werden Elektronen in Zustände mit höherer Energie angeregt, bei einem Halbleiter wie Titandioxid von Zuständen des Valenzbands in Zustände des Leitungsbandes. In Verbindung mit Wasser und Sauerstoff bilden sich oxidative Radikale, die organische Verbindungen an der Oberfläche zerstören können und so die Oberfläche reinigen. Hierbei gehört zur Beurteilung des Umweltentlastungspotenzials natürlich auch eine Untersuchung der möglicherweise auftretenden Metaboliten.

Besonders interessante Anwendungsgebiete mit teilweise hoher Umweltrelevanz sind:

- Energieerzeugung: Photovoltaik durch verbesserte nanostrukturierte Halbleitermaterialien (Reduktion des Herstellungsaufwands)
- Effizientere Energienutzung: Displays, OLEDs, Sensoren, Nanoelektronik
- Effizientere Energiespeicherung (höhere Speicherkapazitäten): Lithiumbatterie, Superkondensatoren, Wasserstoffspeicherung
- Effizientere Stromverteilung (Verringerung des elektrischen Widerstands und der Leitungsverluste)
- Elektrisch leitende Kunststoffe
- Luftreinigung/Oberflächenreinigung: Farben, Fassaden, Baumaterialien mit photokatalytischen/ „catalytic to clean“ Eigenschaften.

Magnetische Effekte: Da auch die magnetischen Eigenschaften von Materialien auf Elektronenzuständen beruhen, lassen sie sich ebenfalls auf der nanopartikulären Ebene beeinflussen. Magnetwiderstandseffekte (z. B. der GMR-Effekt¹³) werden längst

¹² Anatas ist neben Rutil und Brookit eines von drei möglichen Modifikationen von Titandioxid. Alle drei Modifikationen kristallisieren in unterschiedlichen Kristallgittern, wobei Anatas im hexagonalen Kristallsystem kristallisiert und meist dipyramidale und tafelige Kristalle entwickelt.

¹³ GMR: Riesenmagnetowiderstand (engl. giant magnetoresistance effect); Der GMR-Effekt beruht darauf, dass der Elektronenstrom, der durch ein dünnes Schichtsystem fließt, je nach der Ausrichtung von den magnetischen Schichten (parallel oder antiparallel) einen unterschiedlich großen elektrischen Widerstand erfährt. Ursache ist die bei paralleler bzw. antiparalleler Ausrichtung der Magnetisierung unterschiedliche Streuung der im Strom vertretenen beiden Spinsorten. Bei antiparalleler Magnetisierungsausrichtung ist der Widerstand größer als bei paralleler Ausrichtung.

in Computerfestplatten genutzt. Die gezielte Nutzung der magnetischen Eigenschaften von nanoskaligen Partikeln oder in Kompositmaterialien bzw. in Flüssigkeiten (Ferrofluide) eröffnet darüber hinaus interessante neue - zumeist aber sehr spezielle - Anwendungsmöglichkeiten, angefangen von Ferrofluide für magnetische Lager und Dichtungen bis hin zum Einsatz von magnetischen Partikeln bei der Krebstherapie.

Interessante Anwendungsgebiete mit Umweltrelevanz dürften außerdem in den Bereichen Grundwasser-/Altlastensanierung sowie Verbesserung der Ressourceneffizienz liegen. Dabei kann es sich auch um technische Anwendungen handeln, in denen die gezielte Nutzung der magnetischen Eigenschaften von Nanopartikeln die Verarbeitungseigenschaften verbessert. Ein interessantes Anwendungsgebiet mit Umweltrelevanz stellen bspw. die neuartigen Ferritklebstoffe¹⁴ dar.

Optische Effekte: Da Nanopartikel deutlich kleiner sind als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts, tritt keine Reflexion auf und Dispersionen erscheinen transparent. Ein Anwendungsbeispiel für die Farblosigkeit/Transparenz sind nanoskalige TiO₂-Partikel in Sonnencremes.

Als interessantes Anwendungsgebiet mit besonderer Umweltentlastungsrelevanz sind im Bereich der optischen Effekte bisher nur Antireflexglasbeschichtungen für Solarmodule analysiert worden.

3.3.2 Neue / veränderte chemische Funktionalitäten

Nanoporöse und nanopartikuläre Materialien sind durch ein extrem großes Oberflächen/Volumen-Verhältnis geprägt. Oberflächen- und Grenzflächenprozesse dominieren daher häufig ihr Verhalten. Die große spezifische Oberfläche von Nanopartikeln führt zu teilweise verändertem Verhalten hinsichtlich Löslichkeit, Reaktivität, Selektivität, katalytischer Aktivität sowie der Temperaturabhängigkeit von Phasenübergängen. Anwendungen versuchen diese Veränderungen gezielt für verbesserte Werkstoffeigenschaften zu nutzen. Anwendungsziele sind höhere

¹⁴ Ferritklebstoffe sind neuartige Strukturklebstoffen, die durch den Einsatz von Nanoferriten (nanostrukturiertes Eisenoxid) in Klebstoffen durch Nutzung der magnetischen Eigenschaften ein punktgenaueres und beschleunigtes Kleben und Aushärten ermöglichen.

chemische Stabilitäten von Systemen durch Zugabe von nanoskaligen Partikeln oder die gezielte Veränderung der rheologischen Eigenschaften durch nanoskalige Funktionsadditive z. B. in Lacken.

Ein besonders umweltrelevantes Anwendungsfeld ist ohne Zweifel die Nutzung verbesserter katalytischer Eigenschaften. Vielfältige chemische Industrieprozesse und Umwelttechniken sind geprägt durch den Einsatz von Katalysatoren. Die Nutzung der großen spezifischen Oberfläche von Nanopartikeln sowie nanoporöser Strukturen ist naheliegender Weise ein sehr wichtiges Anwendungsfeld, um katalytische Prozesse effizienter zu gestalten. Dies führt zu verringerten spezifischen Materialeinsätzen und zu verbesserten Prozessumsatzraten bestehender Systeme sowie zu völlig neuen katalytischen Einsatzfeldern bspw. im Schadstoffabbau.

Ein weiteres interessantes Anwendungsfeld nanotechnischer Produkte liegt im Bereich der Oberflächenfunktionalisierungen und Beschichtungen. Die Nanostruktur von Beschichtungen lässt sich in ihrer Porosität und Oberflächenreliefs insbesondere mit Hilfe von Sol-Gel-Verfahren gezielt einstellen. Diese Verfahren sind durch eine große Flexibilität gekennzeichnet, da sich viele der besonderen Eigenschaften von Sol-Gel-Materialien dadurch ergeben, dass die Film bildenden chemischen Reaktionen erst während der Beschichtungsverfahren ablaufen. Die auf dem Markt befindlichen Produkte, gerade auch im Konsumbereich, werden hierbei mit den unterschiedlichsten Effekten und Eigenschaften beworben:

- Antibeschlag / Antifinger / Antifog-Effekt
- Verbesserte hydrophile (wasseranziehende) Eigenschaften
- Verbesserte oleophile Eigenschaften
- Antihaft / "Easy to clean" / "Self-clean" / Lotus-Effekt
- Verbesserte (super)hydrophobe (wasserabweisende) Eigenschaften
- Verbesserte oleophobe Eigenschaften
- Antibakterielle Eigenschaften
- Verbesserter UV-Schutz
- Verbesserter Korrosionsschutz

- Herabsetzung der Aktivierungsenergie, verbesserte Spezifität und verbesserter Ertrag von chemischen Umsetzungen mit Hilfe von Katalysatoren
- Energieeinsparung durch gezielte Beeinflussung von Phasenübergängen (Siedetemperaturen)

Im Folgenden sollen diese Effekte und Eigenschaften kurz erläutert werden. Die sechs erst genannten Eigenschaften basieren letztlich darauf, die entsprechende Funktionalität der Materialoberflächen durch Beschichtungen mit spezifischen Oberflächenenergien zu erzeugen.

Antibeschlag-/Antifinger-/Antifog-Effekt, hydrophile (wasseranziehende), oleophile (ölanziehende) Eigenschaften (hohe Oberflächenenergie)

Bei diesen Beschichtungen geht es darum, die Benetzungseigenschaften der Materialoberflächen zu verbessern und die Wassertropfenbildung zu verhindern. Die Tröpfchenbildung auf der Materialoberfläche kann einerseits durch die Aufnahme von Feuchtigkeit durch Kapillarkräfte in ein poröses Schichtsystem verhindert werden, andererseits erreicht man bei nicht porösen Schichten den gleichen Effekt, in dem man eine Beschichtung mit einer hohen Oberflächenenergie aufbringt. Diese hohe Oberflächenenergie spreitet die Wassertropfen zu einem homogenen Film. Die Oberflächenspannung beträgt bspw. bei Wasser bei 20°C 72,75 mN/m. Außerdem gibt es die Möglichkeit, dass die Beschichtung die Oberflächenspannung des Wassers durch Freisetzung von Tensiden reduziert. Als ein Anwendungsbeispiel seien die im Sprühbeschichtungsverfahren von der Fa. Genthe – X – Coatings GmbH hergestellten Antibeschlagbeschichtungen auf PKW-Scheinwerfern genannt (Schmidt 2006).

Interessante Anwendungsgebiete mit besonderer Umweltrelevanz wurden nicht analysiert. Auf jeden Fall müssen bei solchen tendenziell ‚offenen‘ Anwendungen auch mögliche Umweltrisiken abgeschätzt werden.

Antihaft-/“Easy to clean“/“Self-clean“/Lotus-Effekt, (super)hydrophobe (wasserabweisende), oleophobe (ölabweisende) Eigenschaften (niedrige Oberflächenenergie)

Bei diesen Beschichtungen geht es darum, die Benetzungseigenschaften der Materialoberflächen zu verschlechtern und die Wassertropfenbildung zu verbessern, damit diese dann leicht von der Materialoberfläche abperlen können und dabei Schmutzpartikel gleich mit wegspülen. Oberflächen mit einem Kontaktwinkel von mehr

als 90° gegenüber Wassertropfen sind hydrophob. Die Blüten der Lotuspflanze erreichen sogar einen Kontaktwinkel von über 160°. Derartige Oberflächen erreicht man entweder durch nanostrukturierte raue Oberflächen oder durch eine Beschichtung mit niedriger Oberflächenenergie. Anwendungsbeispiele für derartige Beschichtungen sind die auf dem Markt schon in einer Vielzahl existierenden Beschichtungslösungen für Autowindschutzscheiben, Keramik, Fliesen, Fassaden, Dachziegeln etc. Darüber hinaus existieren auch diverse Textil-, Papier- und Lederimprägnierungen.

Diese Oberflächenbeschichtungen besitzen ein gewisses Potenzial zur Umweltentlastung, da mit ihnen bspw. im Haushalt Reinigungsmittel einzusparen sind. Quantitative Aussagen zu Einsparpotenzialen von einzelnen Anwendungen wurden nicht analysiert. Andererseits ist auch hier auf mögliche Umweltrisiken infolge einer Freisetzung entsprechender Beschichtungsfragmente zu achten.

Antibakterielle Eigenschaften

Nanotechnische Produkte mit antibakteriellen Eigenschaften basieren vor allem auf photokatalytischen Effekten oder auf dem Einsatz von nanoskaligem Silber. Genutzt wird dabei die Eigenschaft von Silber, effektiv antimikrobiell zu wirken. Durch die große spezifische Oberfläche des nanoskaligen Silbers wird es möglich, mit kleinsten Mengen an Silber große Mengen an Basismaterial (z.B. Kunststoff, Textilien etc.) antibakteriell auszurüsten. Nanotechnische Produkte mit antibakteriellen Eigenschaften sind schon in einer Vielzahl von Anwendungen auf dem Markt und reichen von antibakteriell ausgerüsteten Socken bis hin zur antibakteriell ausgerüsteten PC-Tastatur.

Gegebenenfalls zu beachten sind auch hier mögliche Effekte einer umweltoffenen Anwendung, da Silber in ionischer und kolloidaler Form freigesetzt wird, wie Forscher der Arizona State University bei Untersuchungen zur Abgabe von Silber aus Socken beim Waschen festgestellt haben (vgl. Petkewich 2008). Das Verhältnis von Umweltentlastungs- zu Umweltbelastungspotenzialen ist hier noch völlig unklar. Interessante Anwendungsgebiete erscheinen eher in spezifischen medizinischen Anwendungen zu liegen.

UV-Schutz

In Sonnencremes etc. können zwei Arten von UV-Filtern eingesetzt werden. Einerseits eignen sich dafür organische Moleküle, die das schädliche UV-Licht ablenken oder "quenchen", d. h. in Wärme umwandeln. Andererseits können als Alternative anorganische Partikel aus Zink- oder Titandioxid verwendet werden. Der Einsatz von nanoskaligen Zink- oder Titandioxidpartikeln in Sonnencreme bewirkt außerdem, dass diese auf Grund der Kleinheit der Partikel nicht wie bisher weiß, sondern transparent auf die Haut aufgetragen beziehungsweise in Textilien eingearbeitet werden können. Auch hier handelt es sich um eine umweltoffene Anwendung, bei der das Verhältnis zwischen Umweltentlastungs- und Umweltbelastungspotenzialen bisher nicht geklärt ist.

Korrosionsschutz (Oberflächenschutz durch Sperrschicht)

Ein interessantes Anwendungsfeld nanotechnischer Beschichtungen mit Umweltrelevanz liegt im Korrosionsschutz, wobei sich diese Lösungen sowohl durch eine sehr hohe Materialeffizienz als auch durch hohe Potenziale in der Gefahrstoffsubstitution auszeichnen (vgl. z.B. Steinfeldt und Wagner 2005). Anwendungsspezifische Lösungen sind derzeit schon bei einer Reihe von Unternehmen im Angebot.

3.3.3 Nanobiotechnologie und Selbstorganisation¹⁵

Die bisher genannten Effekte und darauf basierenden Beispiele für Umweltentlastungspotenziale gründen sich fast ausschließlich auf den Möglichkeiten der „ersten Generation“¹⁶ von Nanotechniken, also im Wesentlichen auf den

¹⁵ Selbstorganisation ist 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.

¹⁶ Generationen der Nanotechniken: Michail Roco, den man mit Fug und Recht als den zentralen Akteur der US-Amerikanischen Nanoinitiative bezeichnen kann, hat 2002 eine erste Skizze der erwartbaren technologischen Entwicklung vorgelegt. Er hat dabei verschiedene Generationen von Nanotechniken unterschieden, die in unterschiedlichen Zeithorizonten immer weiter greifenden technische Möglichkeiten eröffnen.

Möglichkeiten von nanostrukturierten Partikeln, Oberflächen und Materialien. Selbstverständlich ist es wesentlich schwieriger, einen Blick in die mittelfristige Zukunft zu werfen, um auch die Umweltentlastungsmöglichkeiten abzuschätzen, die mit der zweiten Generation bzw. mit weiteren Generationen von Nanotechniken verbunden sind. Die zweite Generation wird von Roco mit ‚active nanosystems‘ bezeichnet und wäre in seiner Zeitskala eigentlich auch schon aktuell (vgl. Roco 2002).

Dies gilt auch für die sogenannten ‚Bottom-up-Nanotechniken‘. Es wäre sträflich, deren Möglichkeiten bei der Betrachtung von Umweltentlastungspotenzialen außer Acht zu lassen. Neben den ‚Top-down-Nanotechniken‘, die ausgehend von der Makrowelt die Möglichkeiten zur Strukturierung und Gestaltung über den mesoskaligen (z. B. Mikrosystemtechnik) bis in den nanoskaligen Bereich ausgedehnt haben, sind die Bottom-up-Nanotechniken gerade im Hinblick auf ihr Umweltentlastungspotenzial besonders vielversprechend. Basierend auf technischen Durchbrüchen in der Kolloidchemie und der Molekularbiologie geht es hier darum, im Wesentlichen über die Beeinflussung der jeweiligen Kontextbedingungen (Kontextsteuerung), Strukturen selbstorganisiert ‚wachsen zu lassen‘. Bekannte Beispiele reichen von den SAMs (self assembling monolayers) über die gezielte Bildung von Mizellen bis hin zur templatgesteuerten Kristallisation¹⁷ für die Herstellung hierarchisch strukturierter Materialien wie z. B. Knochen, Zähne, Perlmutter oder Spinnenseide. Hierarchisch strukturierte Materialien sind weit über den medizinischen Bereich hinaus interessant (auch wenn sie in diesem kostentoleranteren Bereich wohl ihre ersten technischen und ökonomischen Erfolge verbuchen werden). Nur über hierarchisch strukturierte

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 (vgl. Roco 2002)

¹⁷ Templatsteuerung bedeutet, dass der Kristallisationsprozess von einer Matrice oder Schablone (Templat) beeinflusst wird, die durch ihre chemische Struktur und/oder Morphologie die Form eines neu zu bildenden Moleküls vorgibt. Vor allem bei der Biosynthese von Polymeren, z.B. von Proteinen ist das Templat weit verbreitet. Als grundlegende Mechanismen der templatgesteuerten Mineralisierung und Kristallisation wurden bei natürlichen Systemen u.a. molekulare Erkennung, Einstellung lokaler Übersättigungen, Komplexbildung und der Aufbau von Überstrukturen zur Größen- und Gestaltskontrolle identifiziert.

Materialien nach dem Vorbild von biologischen Materialien (Stichwort Materialbionik) lassen sich Eigenschaftskombinationen erzielen, die mit bisherigen Materialien nicht zu erzielen sind (z. B. die Verbindung von extremer Bruchfestigkeit und zugleich Bruchzähigkeit im Perlmutter, in Zähnen und Knochen oder die Verbindung von extremer Reißfestigkeit und Elastizität in der Spinnenseide).

Unter Umweltgesichtspunkten interessant sind solche Materialien nicht nur wegen ihrer Leistungsfähigkeit, sondern auch wegen ihrer stofflichen Zusammensetzung, sowohl mit Blick auf die überall verfügbaren Ausgangsstoffe (stofflicher Opportunismus, basierend im Wesentlichen auf C, H, N, P, O, S, Ca, usw.), sondern auch mit Blick auf ihre biologische Abbaubarkeit.

Doch die Annäherung der stofflichen Basis unseres Wirtschaftens an die ohnehin in der Biosphäre im großen Umfang kreisenden Stoffe, ist nur eine von vielen Perspektiven, die sich hier eröffnen. Mittelfristig deuten sich Möglichkeiten zu einer Veränderung des herrschenden Produktionsparadigmas an. Die bisherigen Produktionsparadigmen basierten im Wesentlichen auf dem top-down-Prinzip. Aus einem Werkstoffblock wurde die gewünschte Form herausgearbeitet. Auch wenn ein solches Energie und Stoffe verschwendendes ‚aus dem Vollen schneiden‘ heute seltener geworden ist, es kommt selbst in Hightechbereichen wie in der Flugzeugindustrie noch vor (Herstellung von Turbinenschaufeln). Das zweite top-down-Prinzip basiert auf der Homogenisierung von Werkstoffen, denen dann ‚von außen‘ eine Form aufgeprägt wird, die also gegossen und ggf. noch geschmiedet werden (wichtige Beispiele sind Beton, Kunststoffe und Metalle). Der Stoff- und Energieaufwand zur Reinigung und Homogenisierung, d. h. die Umweltbelastungen durch die Metall erzeugende, Kunststoff erzeugende oder die Betonindustrie sind bekannt. Auch wenn nur ein kleiner Teil dieser Bereiche durch biologische oder biokompatible Materialien ersetzt werden können, und wenn nur ein kleiner Teil der Werkstücke und Produkte über Kontextsteuerung und Selbstorganisation ‚wachsen‘ würde, das Umweltentlastungspotenzial, die Einsparung an Energie, Stoffen und Steuerungsleistung wären ohne Zweifel immens.

Es ist also sicher lohnenswert, zumindest die folgenden Entwicklungen hinsichtlich des damit erwartbaren Umweltentlastungspotenzials (und selbstverständlich auch eines etwaigen neuen Umweltbelastungspotenzials) im Auge zu behalten:

- Intelligente (smarte insbesondere adaptive und selbstheilende¹⁸) Oberflächen, Beschichtungen, Materialien und Strukturen (bspw. Projekte zur Entwicklung adaptiver Flügel für Flugzeuge und Windkraftanlagen)
- Weiterentwicklungen im Bereich des Rapid Prototypings¹⁹ (derzeit schon am Übergang zwischen ‚aus dem Vollen schneiden‘ und ‚wachsen lassen‘)
- Kolloidchemie, molekulare Selbstorganisation (SAMs²⁰, Mizellen). Zumindest die Sol-Gel-Technik²¹ verwirklicht schon ansatzweise einige der sich hier eröffnenden Möglichkeiten
- Templatgesteuerte Kristallisation und Selbstorganisation, Biomineralisation, biogene Hochleistungswerkstoffe. Auch hier könnte die Sol-Gel-Technik einen Einstieg eröffnen.

3.4 Typisierung der Umweltinnovationen

Die im vorigen Abschnitt dargestellten neuen Funktionalitäten und neuen technischen Möglichkeiten, die durch Nanotechnologien erschlossen werden können, werden heute schon in vielfältigsten Anwendungen genutzt. Sie könnten und sollten natürlich auch zielgerichtet für nanotechnologiebasierte Umweltinnovationen eingesetzt werden. Dazu ist es ohne Zweifel förderlich, wenn diese Möglichkeiten, so wie im Rahmen dieses Projekts vorgesehen, herausgearbeitet und in ihren erwartbaren Wirkungen abgeschätzt werden.

¹⁸ "Selbstheilend" bedeutet die Fähigkeit, nach einer schweren Beschädigung schnell eine im wesentlichen glatte, geschlossene Oberfläche wiederherzustellen, z.B. durch Einbettung von Nanokapseln unmittelbar in die Oberflächen, deren Inhalt bei Beschädigung freigesetzt wird.

¹⁹ Unter Rapid Prototyping (deutsch schneller Prototypenbau) versteht man Verfahren zur schnellen Herstellung von Musterbauteilen ausgehend von Konstruktionsdaten.

²⁰ SAM: selbstorganisierte Monoschicht (engl. Self-Assembled Monolayers). SAM ist ein Spezialfall der Selbstorganisation, bei dem sich Moleküle zu klaren monolagigen Strukturen anordnen.

²¹ Das Sol-Gel-Verfahren stellt ein nasschemisches Verfahren zur Herstellung verschiedenster nanotechnologischer Produkte wie Pulver, dünne Schichten, Aerogele oder Fasern dar. 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.

Umweltinnovationen lassen sich zunächst einmal grob in zwei unterschiedliche Entwicklungsrichtungen unterteilen, einerseits sind es die klassischen Umweltschutztechniken mit End-of-pipe-Charakter und andererseits die integrierten Techniklösungen (vgl. dazu z. B. Kemp 1997, Huber 2004). Diese Typisierung lässt sich wie folgt noch verfeinern:

End-of-pipe-Innovationen

- End-of-pipe Techniken, Luftreinhaltung
- Entsorgung und Recycling
- Abfall- und Abwasserbehandlung
- Grundwasser- / Altlastensanierung

Integrierte Innovationen

- Produktintegrierte Innovationen
- Prozessintegrierte Innovationen
- Energiebereich.

Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik („measurement and monitoring“) ist darüber hinaus ein Gebiet, das für beide Innovationstypen hohe Bedeutung besitzt.

Nicht zu vernachlässigen sind natürlich auch organisationale, nichttechnische Umweltinnovationen wie betriebliche Umweltmanagementsysteme. Sie stehen in diesem technologieorientierten Projekt aber nicht im Fokus.

Eine solche Typisierung von Umweltinnovationen nach end-of-pipe und integriert ist wichtig, weil mit den beiden Richtungen sehr unterschiedliche und je spezifische Möglichkeiten aber auch Probleme verbunden sind. Bei ‚End-of-pipe-Techniken‘ ergibt sich meist das Problem, dass die Produkte und Prozesse im Wesentlichen gleich bleiben und dass Problem- und Gefahrstoffe nicht vermieden, sondern nur (konzentriert und) zurückgehalten werden. Klärschlämme und Filterstäube müssen so dann noch aufwändig entsorgt werden. Integrierte Umweltinnovationen erschließen einerseits oft ein höheres Entlastungspotenzial, andererseits sind sie allzu oft mit dem Problem konfrontiert, dass Gefahrstoffsubstitutionen oft zu Risiko- bzw. Problemverschiebungen führen (z. B. zwischen Umweltbelastung und

Ressourcenschonung), und dass viele Effizienzgewinne durch den ‚rebound effect‘ negativ überkompensiert werden.

3.5 Zuordnung der Anwendungen zu den einzelnen Innovationstypen

In den folgenden Abbildungen erfolgt eine Zuordnung der analysierten Anwendungen zu den verschiedenen Innovationstypen. Aufgrund der Vielzahl von Möglichkeiten werden, soweit möglich, nanotechnische Verfahren und Produkte zu Anwendungsbereichen zusammenfasst. Außerdem erfolgt eine zeitliche Unterteilung in schon am Markt vorhandene und in zukünftig erwartbare Anwendungen.

Neben den leicht verständlichen Anwendungspotenzialen im Bereich von End-of-pipe-Technologien wie Membranen (die Katalyse reicht jenseits der Abgasreinigung in vielen Bereichen ja schon weit in den integrierten Bereich hinein) zeigt die Aufstellung, dass die überwiegenden und besonders weit reichenden Potenziale für Nano-Umweltinnovationen bei den integrierten Innovationen sowie bei den Innovationen im Energiebereich liegen. In vielen Bereichen eröffnen sich vielfältige Potenziale, um Umweltentlastungseffekte zu realisieren. Für die in den folgenden Abbildungen hervorgehobenen Anwendungen existieren bereits einzelne Fallstudien, in denen schon quantifizierte Angaben für Umweltentlastungspotenziale ermittelt wurden (vgl. Tab.1; hellgrau) oder wurden für vertiefende Untersuchungen in der vorliegenden Studie (dunkelgrau) ausgewählt.

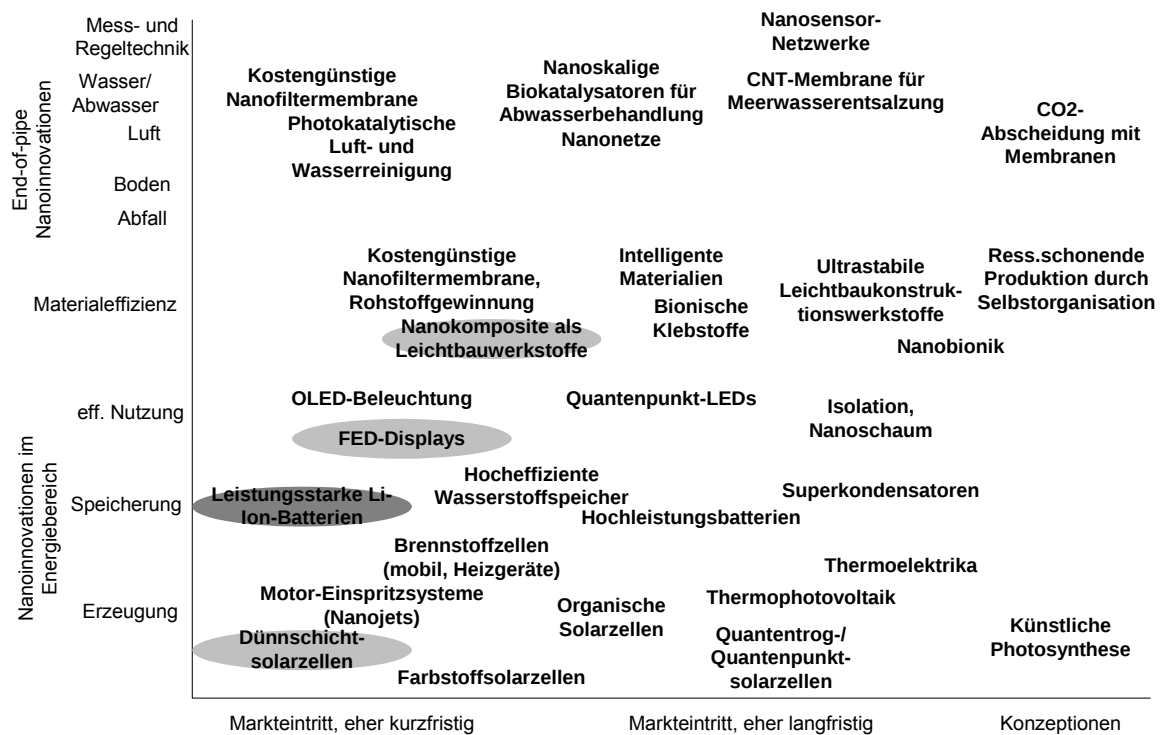
Abbildung 2: Nanotechnikbasierte Produkte / Anwendungen am Markt I²²

End-of-pipe Nanoinnovationen	Mess- und Regeltechnik	Nanosensoren			
	End-of-pipe, Luftreinhaltung	Katalysatoren, z.B. Abgaskatalysatoren	nanostrukturierte Filtersysteme	nanoporöse Membrane	Photokatalysatoren
	Abwasserbehandlung	nanostrukturierte Filtersysteme	nanoporöse Membrane	nanobeschichtete keramische Filter	Nanofasern
	Entsorgung und Recycling				
	Grundwasser-Altlastensanierung	katalytisch aktive nanostrukturierte Partikel und Metalloxide		magnetische Nanopartikel	

Abbildung 3: Nanotechnikbasierte Produkte / Anwendungen am Markt II²³

integrierte Nanoinnovationen prozess- und produktintegriert		Leitfähige Polymerschichten (organische Metalle)	UV-Schutz-Beschichtungen	Antimikrobielle Ausstattungen	Katalysatoreinsatz in Syntheseprozessen	
		Abriebfestigkeit Hartschichten	Antihafschichten	Kunststoff mit besseren Fließeigenschaften	Spezialzement	Nanoelektronik
		Easy-to-clean-Beschichtungen	Verschleißschutz-schichten	Flamm-/Brandschutz-ausrüstung	Abriebfestere Fahrzeugreifen	Wasser- / Nährstoff-speicher
		Korrosionsschutz-schichten	Kratzfeste Beschichtungen	Verschleißschutz-schmiermittel	Leitfähige Folien	
		Antireflexschichten	Catalytic-clean-Beschichtungen	Ferritklebstoffe	Kraftstoffadditive	
Nanoinnovationen im Energiebereich	eff. Nutzung	OLED-Display	Licht-LED	Isolation, Aerogel		
	Speicherung	Keramikseparatoren für Li-Ion-Batterie				
	Erzeugung	Dünnschichtsolarzellen				

²² Quelle: eigene Darstellung²³ Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 4: Erwartbare nanotechnikbasierte Anwendungen²⁴

3.5.1 End-of-pipe Nanoinnovationen

In diesem Bereich der klassischen Umweltschutztechnologien sind insbesondere Abgaskatalysatoren, photokatalytische Oberflächen sowie nanostrukturierte Membran- und Filtersysteme leicht nachvollziehbare Anwendungsbereiche mit hoher Umweltrelevanz. Die technische Entwicklung der Abgaskatalysatoren hin zu immer kleineren nanostrukturierten Partikeleinsätzen erhöht die Katalysatoreffizienz und senkt die spezifische Einsatzmenge an Edelmetallen (vgl. Steinfeldt et al. 2003). Unternehmen wie bspw. ItN Nanovation GmbH, inopor GmbH, Hollingsworth & Vose GmbH oder atech innovations GmbH bieten Keramikmembranen und Filtermaterialien mit Nanofasern im Bereich der Abwasserbehandlung aber auch für industrielle Anwendungen an. So werden Membrane zum Beispiel zur Filtration von Reinigungschemikalien (Oberflächenbehandlung), zur Aufbereitung von Walzenemulsionen, zur Zellseparation nach biologischen Prozessen oder zur

²⁴ Quelle: eigene Darstellung

Entfärbung von Textilabwässern eingesetzt. Eine weitere Forschungsrichtung mit schon einzelnen vorhandenen Produkten ist der Einsatz von nanostrukturierten Materialien zur Bodensanierung. Der Einsatz von Fe_3O_4 -Partikeln zur Arsenbeseitigung bei der Trinkwasseraufbereitung ist ein vielzitiertes Beispiel (vgl. Colvin 2006). Nanoskalige Eisenpartikel können auch im Bereich der Bodensanierung durch direkte Injektion zum Abbau chlorierter organischer Verbindungen genutzt werden. Über zehn verschiedene Produkte mit derartigen Partikeln sind schon auf dem Markt erhältlich (vgl. Bachmann et al 2007). Bornheim in Nordrhein-Westfalen ist europaweit der erste Altlastenstandort, bei dem nanoskalige Eisenpartikel zum Einsatz kommen. Sie werden dort zur Beseitigung von Perchlorethylen eingesetzt (vgl. Friedl 2007). Bei dem vom Umweltforschungszentrum Leipzig entwickelten Carbo-Iron wird Aktivkohle mit Eisen-Nanopartikeln belegt, so dass sich die Adsorptionseigenschaften von Aktivkohle und die reduzierende Wirkung von nullwertigem Eisen verbinden lassen (Mackenzie et al 2008).

3.5.2 Integrierte Nanoinnovationen

Viele nanotechnische Innovationen in den Bereichen Beschichtungen und Materialien verfügen neben einer besseren Funktionserfüllung auch über Potenziale zur Umweltentlastung. Zielrichtung ist dabei oft eine verbesserte Ressourcen- und/oder Energieeffizienz.

In den Bereichen der prozessintegrierten Nanoinnovationen fallen die Entwicklungen zu neuartigen Katalysatoren für vielfältige chemische Industrieprozesse mit hoher Umweltrelevanz. Die Nutzung der großen spezifischen Oberfläche von Nanopartikeln kombiniert mit neuen Nanomaterialien eröffnet ein weites Feld, um die katalytischen Prozesse effizienter zu gestalten. Dies führt zu verringerten spezifischen Materialeinsätzen und zu verbesserten Prozessumsatzraten. Bspw. gelang der Fa. Headwaters mit Hilfe eines nanoskaligen Palladium-Platin-Katalysators die Direktsynthese von Wasserstoffperoxid, wohingegen die bisherige Synthese mehrere Prozessschritte umfasste (vgl. Zhou 2007). Evonik realisiert diese Direktsynthese 2008 in einer ersten industriellen Großanlage (vgl. Evonik 2008).

Als ein weiterer interessanter Anwendungsbereich mit zunehmender Umweltrelevanz dürfte sich der Einsatz von nanostrukturierten Membranen zur Rohstoffgewinnung (nicht zuletzt auch aus Abfall-, Abwasser- und Abgasströmen) entwickeln. So

ermöglichen chemisch beständige, keramische inopor® – Nanofiltrationsmembrane die energetisch und stoffwirtschaftlich günstige Gewinnung von modifiziertem Inulin²⁵ aus einer Lösung, die organische Lösungsmittel enthält (vgl. inopor o.J.). Die gezielte Gewinnung von hochspezifischen biologisch aktiven Stoffen (bspw. Arzneimitteln) aus Abfällen und Abwässern könnte mit Umweltentlastungspotenziale verbunden sein.

Ein interessantes Anwendungsfeld mit Umweltentlastungspotenzial liegt in neuartigen Strukturklebstoffen, die durch Einsatz von Nanoferriten (nanostrukturiertes Eisenoxid) ein punktgenaueres und beschleunigtes Kleben und Aushärten ermöglichen. Entsprechende Entwicklungen laufen bei der Sustech GmbH, der Degussa AG und beim Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) in Bremen (vgl. Pridöhl et al 2005). Erste ökobilanzielle Abschätzungen kommen zum Ergebnis, dass sich die Energieeffizienz in Abhängigkeit der zu verklebenden Fügeteilgröße zwischen 10 – 40 % verbessert (vgl. Wigger 2007). Weitergehend mit mittelfristiger Perspektive sind Entwicklungen zu bionischen Klebstoffen auf der Basis von Biopolymeren zu sehen, die ebenfalls am IFAM in Bremen erforscht werden (vgl. Wigger 2007).

Die Zuordnung von nanotechnischen Anwendungen, die eine Substitution von gefährlichen chemischen Stoffen ermöglichen, ist nicht eindeutig und hängt oft vom jeweiligen spezifischen Anwendungskontext ab. Hierunter fällt der Einsatz einer neuartigen Werkstoffgruppe - wie z. B. der organischen Metalle -, mit der u.a. die Substitution von Blei in der Leiterplattenherstellung durch die mittlerweile gesetzlich vorgeschriebenen bleifreien Lötmetalle zu realisieren ist. Außerdem bestechen diese leitfähigen Polymere in diesem Anwendungsfall durch eine Materialeffizienzsteigerung um den Faktor 10-20 (vgl. Ormecon o.J. und Kap. 4.4).

Dem Bereich der produktintegrierten Innovationen können eine Vielzahl von nanotechnologischen Anwendungen aus den Bereichen Materialien und Oberflächen zugeordnet werden, die sich teilweise durch eine hohe Ressourcen- und/oder Energieeffizienz auszeichnen. Bspw. könnten durch Kohlenstoffnanoröhren (CNT) stabilisierte Leichtbauwerkstoffe zu Energieeinsparungen bei der Herstellung (durch

²⁵ Inulin ist ein Polysaccharid, das in vielen Pflanzen als Reservestoff eingelagert ist (Chicoree, Artischocken etc.)

Materialeinsparungen), beim Transport (geringeres Gewicht) oder beim Einsatz (bspw. in Rotorblättern von Windkraftanlagen) solcher Werkstoffe beitragen. Insbesondere die Nutzung der besonderen Materialeigenschaften von CNT (Festigkeit und Leichtigkeit) könnte hier mittel- und langfristig weitreichende Anwendungsmöglichkeiten mit hohen Umweltentlastungspotenzialen erschließen. Forscher des High Performance Materials Institute der Florida State University forschen beispielsweise an „buckypaper“, einem Vlies aus Kohlenstoff-Nanoröhren, dass ähnlich wie Papier hergestellt wird, um so die Materialeigenschaften von CNT besser in technische Anwendungen umsetzen zu können. Bis Ende 2009 wollen die Forscher ein buckypaper entwickelt haben, welches genauso stabil wie der Verbundwerkstoff IM7 aber um 35% leichter sein soll (vgl. Kaczor 2008). Es müssen allerdings auch die bisher ungeklärten Fragen möglicher Expositionen gegenüber CNT am Anfang und Ende des Produktlebenszyklus sowie generell des Recyclings derartiger Verbundwerkstoffe in Rechnung gestellt werden.

Spezifisch funktionalisierte Oberflächen besitzen je nach Typus unterschiedliche Umweltrelevanz. Anti-Reflex-Beschichtungen steigern den Energieertrag von Solarzellen bis zu 6% (vgl. BINE 2002). Selbstreinigende Oberflächen auf Keramiken, Fliesen, Glasscheiben, Textilien etc. verringern den Material- und Energieeinsatz für sonst anfallende Reinigungsvorgänge.

Eine erhöhte Kratz- und Abriebfestigkeit durch Beschichtungen, Antihaftbeschichtungen und Hartstoffsichten bieten Potenzial für Effizienzsteigerungen in industriellen Anwendungen wie Kraftwerken, Druckereien, Gießereien, Bäckereien, Lackierereien etc. Dadurch ist es möglich, den Werkzeugverschleiß zu minimieren, Standzeiten von Produktionswerkzeugen zu erhöhen, Trennvorgänge zu erleichtern sowie schmierstoffarme/-freie Anwendungssysteme zu realisieren. Z. B. führte die auf Basis der Produktplattform *nanoremove*[®] der Fa. Nanogate AG realisierte Oberflächenveredelung bei der Entformung von Epoxidharzkomponenten zu einer 6-fachen Verlängerung der Werkzeugstandzeit sowie zur Reduktion des Trennmitelesinsatzes um über 80% der Werkzeuge deutlich verlängert (Standzeit) und der Einsatz von Trennmitteln reduziert werden (Nanogate o.J. b). (vgl. auch im Anhang 2 die detailliertere Darstellung der erarbeiteten Fallbeispielvorschläge).

Verschleißschutzschmiermittel (bspw. Nano-Max®Motor-Optimizer der Fa. Costec Technologies oder M2 der Fa. Rewitec) basierend auf nanopartikulärem Siliziumdioxid werden als Additiv ins Motorenöl gegeben. Auf den Reibungsoberflächen des Motors bildet sich eine flexibel, elastische und permanent haftende Verschleißschutzschicht und bewirkt offenbar Kraftstoffeinsparungen von bis zu 14% (vgl. Löffken 2008, Kempkens 2008). Die mögliche Freisetzung dieser Partikel und damit verbundene mögliche Risiken sind bisher aber noch offene Punkte.

Ein weiteres interessantes Anwendungsfeld mit Umweltrelevanz für nanotechnische Beschichtungen liegt im Korrosionsschutz, wobei sich diese Lösungen sowohl durch eine sehr hohe Materialeffizienz als auch durch Potenziale zur Gefahrstoffsubstitution auszeichnen. Die von der Fa. Nano Tech Coatings GmbH entwickelten Beschichtungsstoffe insbesondere für Leichtmetalle auf Basis von anorganisch-organischen Hybridpolymeren gewährleisten die gleiche Korrosionsschutzfunktion mit einer um den Faktor 7 – 10 geringeren Beschichtungsdicke. Dies führt zu einer 5 – 8-fach erhöhten Ressourceneffizienz. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die bei anderen Verfahren zumeist notwendige Chromatierung als Vorbehandlung überflüssig wird und so die entsprechenden Mengen an Gefahrstoffen substituiert werden. (vgl. Steinfeldt und Wagner 2005; Steinfeldt et al 2004)

Im Bereich der Nanoelektronik sind nanometergroße Komponenten und Strukturen sowie dünnste Schichten mittlerweile in vielen elektrischen Geräten mit integrierten Schaltkreisen Standard. Die Miniaturisierung der Grundstrukturen schreitet weiter voran und neuere „grünere“ Methoden zur Herstellung von Mikrochips sind Gegenstand intensiver Forschung (vgl. Schmidt 2007).

Ein weiteres umfangreiches potenzielles Anwendungsgebiet befasst sich mit Mess-/ Steuer- und Regelungstechniken, wobei hier der Schwerpunkt noch auf der Entwicklung von Nanosensoren liegt. Nanosensoren könnten einerseits zum Umweltmonitoring eingesetzt werden und auf physikalisch-chemischer Detektion beruhen oder eine biologische Erkennung nutzen. Entsprechende Forschungsarbeiten wurden z.B. auf dem Nanoforum-Workshop "Nano & the Environment" 2006 in Brüssel präsentiert (vgl. Rickerby 2006, Skouloudis 2006; Proll und Gauglitz 2006). Andererseits sollen Nanosensoren eine effizientere und exaktere Steuerung von Prozessen bspw. im Energiebereich (Erzeugung, Speicherung, Verteilung etc.)

ermöglichen, die den Wirkungsgrad dieser Prozesse steigern und damit zu einem rationelleren Einsatz von Energie führen kann.

3.5.3 Nanoinnovationen im Energiebereich

Der Energiebereich stellt auch und insbesondere aus nanotechnologischer Perspektive einen wichtigen Bereich dar, dessen Bedeutung auch in Zukunft weiter wachsen wird. Dies hängt zum einen mit der Vielfalt und Vielzahl der möglichen nanotechnischen Produkte und Verfahren im Energiebereich zusammen, wie die Abb. 3 und 4 zeigen. Für alle drei Hauptkategorien – Energiegewinnung/-wandlung, Energie-speicherung und Energieeffizienz – befinden sich nanotechnische Produkte/Verfahren in der Forschung und Entwicklung (bspw. Wasserstoffspeicher) und stehen teilweise kurz vor der Markteinführung (bspw. Grätzel/Farbstoff-Solarzelle) („technology push“). Zum anderen ist die Versorgung mit Energie in immer weiter steigenden Quantitäten essentiell für das Funktionieren heutiger (Industrie-) Gesellschaften („demand pull“) und gleichzeitig verantwortlich für einige der derzeit größten und dringlichsten Nachhaltigkeitsprobleme (Ressourcenverfügbarkeit im Input- und Tragekapazität (insbesondere Treibhauseffekt) im Output-Bereich). Zwar werden insbesondere auch in Deutschland große Anstrengungen unternommen, Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch zu entkoppeln. Jedoch ist davon auszugehen, dass dieser Entkoppelungsprozess eher mittel- bis langfristig nennenswerte Erfolge vorweisen wird, sodass zumindest kurz- und mittelfristig alternative Energietechnologien zur Befriedigung in etwa gleich bleibender oder sogar steigender Energiebedarfe benötigt werden. Im Folgenden werden die aktuell am intensivsten diskutierten Technologien vorgestellt und kurz erläutert. Aufgrund der Bandbreite der Innovationen und Anwendungen erfolgt die Darstellung an dieser Stelle lediglich überblicksartig und skizzenhaft.

Energiegewinnung/-wandlung

Photovoltaik

Im Bereich der Photovoltaik befinden sich verschiedene nanotechnische Ansätze in der Entwicklung oder an der Schwelle zur Markteinführung. Zu nennen sind hier zum einen Dünnschicht-Solarzellen, insbesondere so genannte Quantenpunkt-basierte Solarzellen (vgl. Kazmerski 2006), zum anderen Polymer-basierte und organische Solarzellen. Dünnschicht-Solarzellen sind (streng genommen) eigentlich nicht der

Nanotechnik zuzurechnen, da die Dicken der photoaktiven Schichten dieser Zellen häufig im Bereich mehrerer 100 bis 1000 nm liegen. Allerdings gibt es unter der Vielzahl von Dünnschicht-Solarzellen auch solche, deren aktive Schichten deutlich unter 100 nm dünn sind (bspw. CdTe/CdSe²⁶- oder Indiumoxid-basierte Zellen; vgl. Bosio et al. 2006). Quantenpunkt-basierte Solarzellen, als eine Untergruppe der Dünnschichtsolarzellen, hingegen sind klar nanotechnische Anwendungen, da hierbei nur wenige Nanometer kleine Halbleiterpartikel in die photoaktive Schicht eines anderen Halbleitermaterials eingelassen sind, wodurch sich die Ladungsträgerausbeute und damit der Wirkungsgrad der Solarzelle deutlich erhöhen (Kazmerski 2006). Während Dünnschicht-Solarzellen eher kurz- bis mittelfristig zur Marktreife gelangen können, befindet sich die Forschung zu Quantenpunkt-basierten Solarzellen noch am Anfang. Der Bereich der Polymer-basierten und organischen Solarzellen fällt auch in den Bereich nanotechnischer Photovoltaikanwendungen. Ihre photoaktiven Schichten weisen in der Regel eine Stärke unter 100 nm auf (vgl. Günes et al. 2007). Als bisher in ihrer Entwicklung am weitesten vorangeschrittene nanotechnische Solarzelle kann die Farbstoff-basierte oder auch Grätzel-Zelle betrachtet werden (vgl. Grätzel 2003). Bei dieser Solarzelle wird eine nanostrukturierte TiO₂-Schicht in Kombination mit einem sich in Lösung befindlichen organischen Farbstoff kombiniert. Allen genannten photovoltaischen Anwendungen aus dem Bereich der Nanotechnik ist gemein, dass sie von den nanotechnischen Funktionalitäten einer erhöhten Oberfläche (für Lichtabsorption und/oder Ladungsaustausch etc.) und/oder Quanteneffekten profitieren. Umweltentlastungseffekte ergeben sich aufgrund geringerer Energieaufwendungen (und nicht zuletzt auch Materialaufwendungen) zur Herstellung dieser Zellen (im Vergleich zu konventionellen Silizium-basierten Zellen) und evtl. auch durch einen höheren Wirkungsgrad. Allerdings fällt die ökobilanzielle Bewertung von inorganischen Dünnschicht-Solarzellen derzeit noch gemischt aus und muss daher kritisch betrachtet werden (bspw. Mohr et al. 2006; Meijer et al. 2003). Im Falle von organischen Solarzellen kommt allerdings eine geringere Toxizität der verwendeten Materialien

²⁶ Das dabei verwendete Cadmium ist ein sehr giftiges und umweltschädliches Metall, auch in den Verbindungen CdTe und CdSe. In den besagten Dünnschichtsolarzellen ist es aber zumindest in der Gebrauchsphase fest gebunden, sodass im Betrieb von den Solarmodulen keine Gesundheits- oder Umweltgefahren ausgehen. Für das Recycling der Solarzellen ergeben sich daraus allerdings Herausforderungen.

hinzu (im Vergleich zu anderen Dünnschicht-Solarzellen); Farbstoff-Solarzellen schneiden ökobilanziell – vor allem bezüglich der Energie-Amortisierung – eher gut ab (Veltkamp und Wild-Scholten 2006; Wild-Scholten und Veltkamp 2007). So sind für Farbstoff-Solarzellen Energie-Amortisationszeiten („energy pay-back times“, EPBT) von 1,4, 0,8 bzw. 0,6 Jahren für Nord-West-Europa, Süd-Europa bzw. die Sahara ermittelt worden. Zum Vergleich: die EPBT für die sehr weit verbreiteten multikristallinen Siliziumsolarzellen liegen bei 1,5 Jahren für Süd-Europa (Wild-Scholten und Veltkamp 2007). Einschränkend muss jedoch angemerkt werden, dass zum einen nur wenige ökobilanzielle Studien von Farbstoff-Solarzellen vorliegen, die zudem häufig die Recyclingphase nicht betrachten und sich sehr stark auf Fragen der energetischen Amortisierung konzentrieren. Zum anderen ist die Verwendung von organischen Lösungsmitteln im Elektrolyten der Farbstoff-Solarzellen aus Umweltsicht kritisch, nicht zuletzt, weil es Probleme mit der Versiegelung der Zellen gibt. An umweltfreundlicheren alternativen Elektrolyten, bspw. auf Gel-Basis, wird jedoch geforscht und erste vielversprechende Lösungen sind in Sicht (An et al. 2006).

Wasserstoffwirtschaft

Im Bereich der wasserstoffbasierten Energiesysteme kommt ein Einsatz nanotechnischer Lösungen gleich in mehrfacher Hinsicht in Frage (vgl. Mao/Chen 2007). Zum einen in der Brennstoffzelle, die aus dem kontrollierten Zusammenführen (sog. kalte Verbrennung) von Wasserstoff mit Sauerstoff elektrischen Strom und Wasser erzeugt. Hier können das nanostrukturierte Elektrolyt- und Katalysatormaterialien die Effizienz und Haltbarkeit der Zellen erhöhen (vgl. Dicks et al. 2006). Katalytische Prozesse laufen schließlich um so besser ab, je größer die zur Verfügung stehende Reaktionsfläche ist. Zum anderen mangelt es derzeit noch an geeigneten Systemen zur Speicherung des Wasserstoffes. Auch hier erscheinen nanoporöse Materialien als physikalische oder verschiedene Nanopulver als chemische Speicher als aussichtsreiche Lösungen (Berube et al. 2007). Schließlich befinden sich auch nanotechnische Ansätze bspw. zur photokatalytischen Gewinnung von Wasserstoff aus Wasser in der (Grundlagen-)Forschung (bspw. Ni et al. 2007). Die Umweltentlastungspotenziale sind hierbei eher langfristig in der Möglichkeit einer wasserstoffbasierten Energiewirtschaft zu sehen.

Energiespeicherung

Neben der oben bereits genannten Speicherung von Wasserstoff gewinnt die Nanotechnik auch im Bereich herkömmlicher Li-Ionen Batterien (bspw. Cheng/Chen 2006) oder Kondensatoren (Wu/Xu 2006) an Bedeutung. Die Leistungsfähigkeit sowohl der Batterien als auch der Kondensatoren kann durch die um Größenordnungen höheren Fläche-Volumen-Verhältnisse von bspw. auf Carbon-Nano-Tubes basierenden Elektroden stark erhöht werden. Zudem verringert sich die zum Aufladen benötigte Zeit drastisch. Solche Batterien oder Kondensatoren könnten helfen, die aus erneuerbaren Energien gewonnene elektrische Energie (zwischen) zu speichern und somit auch in mobilen Anwendungen wie Autos einzusetzen, ein Einsatzgebiet in dem es gegenwärtig noch keine wirklich klare und nachhaltige Alternative zu fossilen Treibstoffen gibt.

Energieeffizienz

Die Steigerung der Energieeffizienz auf Basis nanotechnischer Ansätze gehört sicher zu den kurz- und mittelfristig vielversprechendsten Ansätzen. Zu nennen sind hier OLEDs²⁷ und andere Licht erzeugende Techniken wie LCDs²⁸ und TFTs²⁹, welche in zahlreichen Anwendungen eingesetzt werden (Suzuki 2006). Allen genannten Techniken ist gemein, dass zentrale Bauteile aus Nanoelementen bestehen. Umweltentlastungspotenziale ergeben sich insbesondere durch einen geringeren Energieaufwand während des Betriebes solcher Bildschirme. Zumindest bezüglich der Verfügbarkeit der eingesetzten Rohstoffe zeichnen sich schon jetzt Engpässe ab, welche die Ökobilanzen trüben dürften: Sowohl bei den genannten Bildschirmtechnologien als auch bei den weiter oben genannten anorganischen Dünnschichtsolarzellen kommen Stoffe wie Indium, Germanium oder Tellur zum Einsatz, deren globale Reserven sehr klein sind bzw. deren Gewinnung aus Umweltsicht problematisch ist (Möller 2005).

²⁷ OLED: Organische Licht Emittierende Diode (engl. Organic Light Emitter Display)

²⁸ LCD: Flüssigkristallbildschirme (engl. Liquid Crystal Display)

²⁹ TFT: Bildschirme aus Dünnschicht-Transistoren (engl. Thin Film Transistor)

Eine weitere Gruppe nanotechnischer Anwendungen im Bereich Energieeffizienz bilden Dämmstoffe. Schließlich liegen im Bereich der Raumwärme die wohl größten noch zu erschließenden Effizienzpotenziale. Aufgrund einer um Größenordnungen erhöhten Porösität von Dämmstoffen oder auch mithilfe von nur Nanometer-dünnen transparenten Beschichtungen von bspw. Fenstergläsern ließen sich Wärmeverluste bspw. aus Gebäuden eventuell verringern. Entsprechende Forschungen an so genannten Aerogelen werden seit langem intensiv betrieben (vgl. bspw. Hrubesh 1998). Die Kommerzialisierung von Aerogel basierten Produkten kommt jedoch nur schleppend voran, da Aerogele recht brüchig und vor allem sehr teuer sind und ihre großflächige Herstellung Schwierigkeiten bereitet (Lee und Gould 2007). Eine der ganz wenigen Firmen weltweit, die bereits Aerogele für Dämmzwecke anbieten, ist die amerikanische Firma Cabot. Auf ihrer Internetseite gibt die Firma an, dass ihr Produkt Nanogel® Thermal Wrap™ „mindestens 100% besser isoliert als herkömmliche Dämmmaterialien“ (Cabot 2008).

Einen etwas anderen Weg geht die deutsche Firma BASF, die derzeit einen Nanoschaum als Dämmstoff mit Porengrößen „im Nanometerbereich“³⁰ entwickelt. Wann diese Entwicklung Marktreife erlangen wird, zu welchen Preisen das Produkt angeboten werden kann und welche Dämmleistungen in der Praxis tatsächlich erzielt werden können, ist derzeit jedoch noch unklar.

³⁰ „Das BASF-Labor an der Universität Louis Pasteur in Straßburg (ISIS, Institut de Science et d'Ingénierie Supramoléculaires) arbeitet auf dem Gebiet der supramolekularen Chemie und entwickelt Synthesewege für Kunststoffschäume mit Porengrößen im Nanometer-Bereich. Diese Nanoporen verhindern Zusammenstöße der Zellgasmoleküle und mindern damit die Wärmeleitung des Schaumstoffs. Im Vergleich zu den heute üblichen Materialien kann die Wärmeleitfähigkeit bis auf weniger als die Hälfte herabgesetzt werden. ... Er wird zu niedrigerem Energieverbrauch führen und Material einsparen: davon profitiert die Umwelt.“ (BASF 2008)

4 Bewertung von Entlastungseffekten für die Umwelt an konkreten Anwendungskontexten

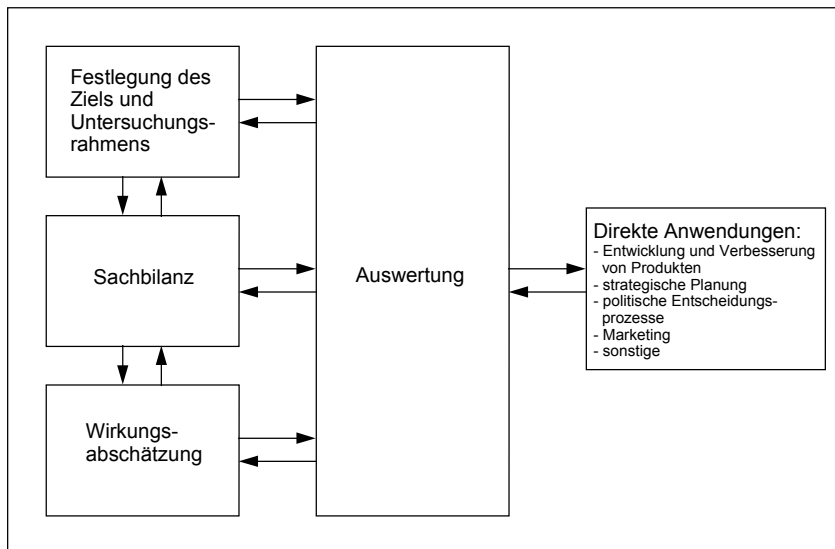
4.1 Ökologische Profilbetrachtungen als Bewertungsansatz von konkreten Anwendungsbeispielen

Da die Abschätzung von potenziellen Umweltwirkungen im Vordergrund steht, orientieren sich die ökologischen Profilbetrachtungen für die vertiefenden Fallstudien einerseits in ihrer Vorgehensweise an der Methodik der Ökobilanzierung. Sie können andererseits aber nicht immer die hohen Anforderungen der Norm erfüllen, da die notwendige Güte der Datenlage über die Produkte / Verfahren und über die Vergleichsprodukte / -verfahren nicht realisierbar ist und oft deutliche Lücken aufweist. 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 Umweltwirkungen 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. 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.

Abbildung 5: Schritte zur Erstellung einer Ökobilanz³¹



Im ersten Schritt erfolgt die **Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens**. Im Rahmen der **Sachbilanz** erfolgt die Erhebung, Zusammenstellung, Berechnung der Daten und die Erstellung eines Stoff- und Energiestrommodells. Eine Ökobilanz erstreckt sich über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes oder einer Dienstleistung. Die Stoff- und Energiedaten müssen 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.

³¹ Quelle: DIN EN ISO 14040 2006

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

Tabelle 3: Wirkungskategorien und dazu beitragende Substanzen³²

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

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 quantifizierbare Wirkungsmodelle. Dies muss insbesondere für die relevanten

³² Quelle: Ankele & Steinfeldt 2002

Kategorien Humantoxizität und Ökotoxizität festgestellt werden. So geht die Berücksichtigung der Belastung durch Feinstäube (PM₁₀-Risiko thematisiert ein mögliches Toxizitätspotenzial durch Partikel < 10 µm) in Ökobilanzen durch ihren Bezug auf das Gewicht und nicht auf die Partikelzahl bei Nanotechnikanwendungen allein schon größenordnungsmäßig am Ziel vorbei.

2. Ökobilanzen beziehen sich auf den Normalbetrieb von Anlagen, nicht auf mögliche Störfälle. Allgemein werden technische Risiken, z. B. auch die Eingriffstiefe sowie die Wirkmächtigkeit von Techniken (Länge der relevanten Wirkungsketten in Raum und Zeit) nicht betrachtet.

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

- Risiko- und Gefahrenanalyse
- 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 Technik oder von Anwendungsbereichen, die sich erst in der Entwicklung befinden und zu denen folglich statistisch auswertbare Erfahrungen in der Regel fehlen.

Die toxikologische Analyse umfasst unter anderem eine Prüfung auf akute Toxizität, chronische Toxizität, ätzende Wirkung, Hautreizung, Augenreizung, kanzerogene, mutagene und fortpflanzungsschädigende Wirkung sowie auf Sensibilisierung (potenzielle Allergie auslösende Wirkung).

Der Begriff der Eingriffstiefe einer Technik 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“ und die Wirkmächtigkeit einer Technologie bestimmt werden, z. B. hinsichtlich des

grundlegenden qualitativen Unterschieds 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 sowohl die Abschätzung der mit bestimmten Anwendungen verbundenen Umweltbelastungen und -risiken im Vergleich zu bestehenden Anwendungen ermöglichen als auch die Analyse erschließbarer Umweltentlastungspotenziale. 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.

In den folgenden Untersuchungen liegt der Schwerpunkt auf den potenziellen Umweltentlastungen durch nanotechnische Produkte und Verfahren. Die Modellierung der einzelnen Fallstudien, deren Berechnung und Auswertung nach geeigneten Umweltwirkungen, erfolgt mit der Ökobilanzsoftware Umberto. Die Wirkungsabschätzung und Auswertung der ökobilanziellen Betrachtungen basiert auf der teilaggregierten Methode des „Center of Environmental Science of Leiden University“ (CML 2001), in der verschiedenste Umweltwirkungen quantitativ ermittelt werden. Folgende Wirkungskategorien werden für die Wirkungsabschätzung genutzt:

Abiotischer Ressourcenverbrauch: Der Wirkungskategorieindikator bezieht sich auf die Extraktion von Mineralien und fossilen Brennstoffen in Bezug auf den Input in das System. Der Wert des abiotischen Ressourcenverbrauchs einer Substanz ist ein Maß für die Knappheit einer Substanz und der Entnahmerate. Das Potential wird berechnet für jede Extraktion von Mineralien und fossilen Brennstoffen (kg Antimon/ kg Extrahierung) basierend auf der Konzentration von Reserven und der Rate der Wiederanhäufung. Es werden Antimonäquivalente berechnet.

Treibhauseffekt: Das implementierte Charakterisierungsmodell dieser Wirkungskategorie wurde vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) entwickelt. Die Charakterisierungsfaktoren werden als Global Warming Potential (GWP) für einen Zeitraum von 100 Jahren in kg CO₂-Äquivalente berechnet.

Versauerung: Das Versauerungspotenzial beschreibt die Wirkung versauernder Emissionen und wird in massebezogenen SO_2 -Äquivalente ausgedrückt.

Eutrophierung (Überdüngung): Als Eutrophierung wird der Vorgang bezeichnet, bei dem an einem Standort eine Nahrungs- und Nährstoffanreicherung erfolgt. Das Eutrophierungspotenzial basiert auf einer stöchiometrischen Methode und wird berechnet als kg PO_4 -Äquivalente.

Ozonabbau: Das implementierte Charakterisierungsmodell dieser Wirkungskategorie wurde von der World Meteorological Organisation (WMO) entwickelt und definiert das Ozonabbaupotential (ODP) für verschiedene Gase in kg CFC_{11} -Äquivalente (Trichlorfluormethan) für einen Zeitraum von 40 Jahren.

Photochemische Oxidantienbildung (Sommersmog): Das Photochemische Oxidantienbildungspotenzial ist das massebezogene Äquivalent der Bildung von bodennahem Ozon durch Vorläufersubstanzen, die für die bodennahe O_3 -Bildung verantwortlich sind und so zum Sommersmog beitragen. Das Photochemische Oxidantienbildungspotenzial für Emissionen in Luft wird mit dem UNECE Trajectory Modell als $\text{kg C}_2\text{H}_2$ -Äquivalente (Ethylen) berechnet.

Risikoaspekte, insbesondere im Umgang mit Nanomaterialien werden in einzelnen Fallstudien jeweils separat im Rahmen einer Besorgnisanalyse angesprochen. Dabei wird mit Entlastungs- und Besorgniskriterien gearbeitet, die auch schon in einem frühen Technologieentwicklungsstadium anwendbar sind und die im nun folgenden Kapitel vorgestellt werden.

4.2 Besorgnisanalyse – ein Ansatz zur vorläufigen Bewertung von Nanomaterialien

Die Risikobewertung von Nanomaterialien versucht sich selbstverständlich auf wissenschaftliche Untersuchungen und Tests zu stützen, wie dies im Bereich der Gefahrstoffprüfung seit langem üblich ist. Gleichzeitig ist klar, dass diese Ergebnisse noch nicht vorliegen (können) und die Umsetzung entsprechender Forschungsprogramme noch einige Zeit dauern wird. Angesichts der dynamischen Markteinführung von Nanomaterialien sollten deshalb auch jetzt schon Möglichkeiten

zu einer vorläufigen Bewertung (preliminary assessment) erarbeitet werden. Mit Hilfe dieser Kriterien können zum einen diejenigen Nanomaterialien und Anwendungsbereiche erfasst werden, die prioritär in den entsprechenden Forschungsprogrammen untersucht werden sollten. Zum anderen können auf der Basis der Ergebnisse einer solchen vorläufigen Bewertung auch schon erste Maßnahmen im Rahmen eines am Vorsorgeprinzip orientierten Risikomanagements ergriffen werden.

Im Rahmen der vom Ministerium für Umwelt Reaktorsicherheit und Naturschutz federführend betreuten NanoKommission hat die Arbeitsgruppe ‚Risiken und Sicherheitsforschung‘ einen Satz von Kriterien festgelegt, die einerseits in Form von Besorgniskriterien einen Hinweis auf problematische Bereiche liefern, andererseits als Entlastungskriterien andeuten, in welchen Bereichen geringe Gefährdungen zu erwarten sind.

Entlastungsrelevant sind Hinweise darauf, dass Nanomaterialien entweder dauerhaft fest in einer Matrix eingebunden sind, oder dass sie ihre möglicherweise problematischen Nanoeigenschaften rasch verlieren, z. B. durch gute Löslichkeit oder schnelle Abbaubarkeit. **Besorgnisrelevant** sind hingegen Hinweise auf eine erwartbar hohe Exposition (bis hin zur Nicht-Rückholbarkeit), auf mögliche problematische Wirkungen und nicht zuletzt auch auf Probleme beim Nachweis und bei der Verfolgung freigesetzter Nanomaterialien.

Die Kriterien sind als Hinweise auf erwartbare (geringe oder höhere) Gefährdungen zu verstehen. Ihre Bedeutung nimmt in dem Maße ab, in dem das Wissen über Wirkungen und erwartbare Expositionen zunimmt. Die Arbeitsgruppe ‚Risiko und Sicherheitsforschung‘ versteht die Kriterien als ein relevantes Instrument für eine erste Einschätzung von Nanomaterialien. Beispielsweise deuten eine hohe Reaktivität, Mobilität und Persistenz von Nanomaterialien unter Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips auf Handlungsbedarf hin, während für Nanomaterialien, die über den gesamten Produktlebenszyklus in einer Matrix fest gebunden sind, Freisetzungen und damit eine etwaige Gefährdung von Mensch und Umwelt wenig wahrscheinlich ist.

Zu den **Entlastungskriterien** gehört insbesondere der Verlust der spezifischen Nanoeigenschaften durch:

- gute Löslichkeit (in Wasser, in Körperflüssigkeiten,...)
- schnelle Abbaubarkeit (biologisch, photokatalytisch,...) in nicht toxische Abbauprodukte
- feste und dauerhafte Einbindung in Matrices (Stabilität der Matrix, Bindungsart, Verhalten „end of life“)
- Bildung stabiler, großer Aggregate, Aggregationsverhalten (Größe, Stabilität, ...)
- Oberflächenmodifikationen und Nanostrukturen, die keine Partikel freisetzen und nicht reaktiv sind (z. B. Nanoporen, Lotuseffekt,...).

Die **Besorgniskriterien** beziehen sich auf drei Bereiche: 1. Hinweise auf eine erwartbar hohe Exposition, 2. Hinweise auf problematische Wirkungen und 3. Hinweise auf Probleme im Risikomanagement.

1. Hinweise auf eine erwartbar hohe Exposition:

- Produktionsmenge (Anwendungsbereich und Expositionswahrscheinlichkeit)
- Hohe Mobilität (in Organismen und Umwelt und/oder Mobilisierungspotenzial)
- Gezielte Freisetzung (z. B. Grundwassersanierung, Agraranwendungen, verbrauchernahe Anwendungen, Innenraumanwendungen....)
- Persistenz der Nanoeigenschaften
- Bioakkumulation

2. Hinweise auf problematische Wirkungen:

- Hohe Reaktivität (katalytisch / chemisch / biologisch)
- Problematische Morphologie
- Hinweise auf problematische Wechselwirkungen (Huckepack)
- Hinweise auf problematische Transformationen oder Metaboliten
- Hinweise auf Veränderungen oder Verlust des Coatings und damit möglicherweise Freisetzung eines toxischen „Kernpartikels“

3. Hinweise auf Probleme im Risikomanagement:

- Schlechte Nachweisbarkeit
- Unklarer Verbleib.

4.3 Auswahl der Fallbeispiele für vertiefende Untersuchungen

Auf der Basis des Screenings und vor dem Hintergrund der Typisierung von Umweltinnovationen wurde eine Gruppe von 13 Vorschlägen für vertiefte Untersuchungen erarbeitet. Das Kriterienraster zur Auswahl der Vorschläge umfasste Aspekte wie Art und Umfang der Umweltauswirkungen, Marktrelevanz, mögliches Anwendungsspektrum, Innovationsgrad, Innovationstyp, Stoffmengenumsätze aber auch praktische Aspekte wie Zugang zum Innovationsfeld und Datenverfügbarkeit für die Ökobilanzierung der einzelnen Produkte und Verfahren und deren Vergleichsgrößen. Die dreizehn Vorschläge sind im Anhang 2 aufgeführt.

Aus diesen Vorschlägen wurden dann in Abstimmung mit dem Auftraggeber und dem projektbegleitenden Arbeitskreis³³ folgende vier nanotechnische Anwendungen ausgewählt:

- Herstellung lötfähiger Endoberflächen auf Leiterplatten durch Nanotechnik, Ormecon GmbH, Ammersbek bei Hamburg
- MW Carbon Nanotubes-Anwendung für Folien in der Halbleiterindustrie, Bayer MaterialScience AG, Leverkusen
- Lithium-Ionen-Batterie zur Energiespeicherung, u.a. Litec GmbH, Kamenz
- Ultradur® High Speed-Kunststoff, BASF, Ludwigshafen (das zuerst favorisierte Thema Nanoschaum als Isolationsmaterial wurde auf Wunsch der BASF zurückgezogen).

³³ Der projektbegleitende Arbeitskreis setzt sich aus den Mitarbeitern der AG 1 „Chancen für Umwelt und Gesundheit“ des NanoDialogs 2006-2008 zusammen. Dieser Dialog steht in der Koordination der vom Bundesumweltministerium eingesetzten Nano-Kommission und soll Empfehlungen für den verantwortungsvollen Umgang mit Nanomaterialien erarbeiten.

4.4 Fallstudie 1:

Vergleich der Herstellung lötfähiger Endoberflächen auf Leiterplatten durch Nanotechnik und durch konventionelle Verfahren

Leiterplatten (LP) befinden sich in jedem elektronischen Gerät wie z.B. in Personalcomputer, Mobiltelefonen, Fernsehern aber auch in Autos, Flugzeugen, Satelliten. Computerchips und andere elektronische Komponenten werden an definierten Stellen auf den Leiterplatten in automatischen Lötverfahren befestigt, die dann über elektronische Schaltkreise miteinander kommunizieren. Weltweit werden derzeit ca. 250 Millionen m² Leiterplatten pro Jahr verarbeitet.

Der Herstellungsprozess einer Leiterplatte ist durchaus komplex. Auf dem Weg zu einem funktionierenden Endprodukt durchläuft sie viele Stationen in verschiedenen Zweigen der Leiterplattenindustrie. Nach ihrer Herstellung müssen die Kontaktflächen der Leiterplatten einige Monate bis zu einem Jahr lötfähig sein. Es muss garantiert sein, dass jede der bis zu Hunderten kleinen Kupferflächen beim automatischen Bestückungsprozess (der bis zu sieben Mal durchlaufen wird, wobei Temperaturen bis zu 260°C herrschen können) mit dem Lot benetzt wird, und damit eine haltbare Verbindung entsteht. Diese Verbindung muss über viele Jahre bestehen, und ggf. ständige Erschütterungen und Temperaturschwankungen aushalten.

Aus diesen Gründen ist die Qualität der Endoberfläche einer der kritischsten Punkte im Herstellungsprozess einer Leiterplatte.

Im Rahmen dieser Fallstudie wird das ökologische Potenzial eines neuen auf Nanotechnologie basierenden Verfahrens zur Herstellung lötfähiger Endoberflächen für Leiterplatten (Surface Finishing) der Fa. Ormecon GmbH, Ammersbek, im Vergleich zu verschiedenen konventionellen Verfahren untersucht.

4.4.1 Untersuchungsgegenstand und Untersuchungsrahmen für die ökobilanzielle Betrachtung

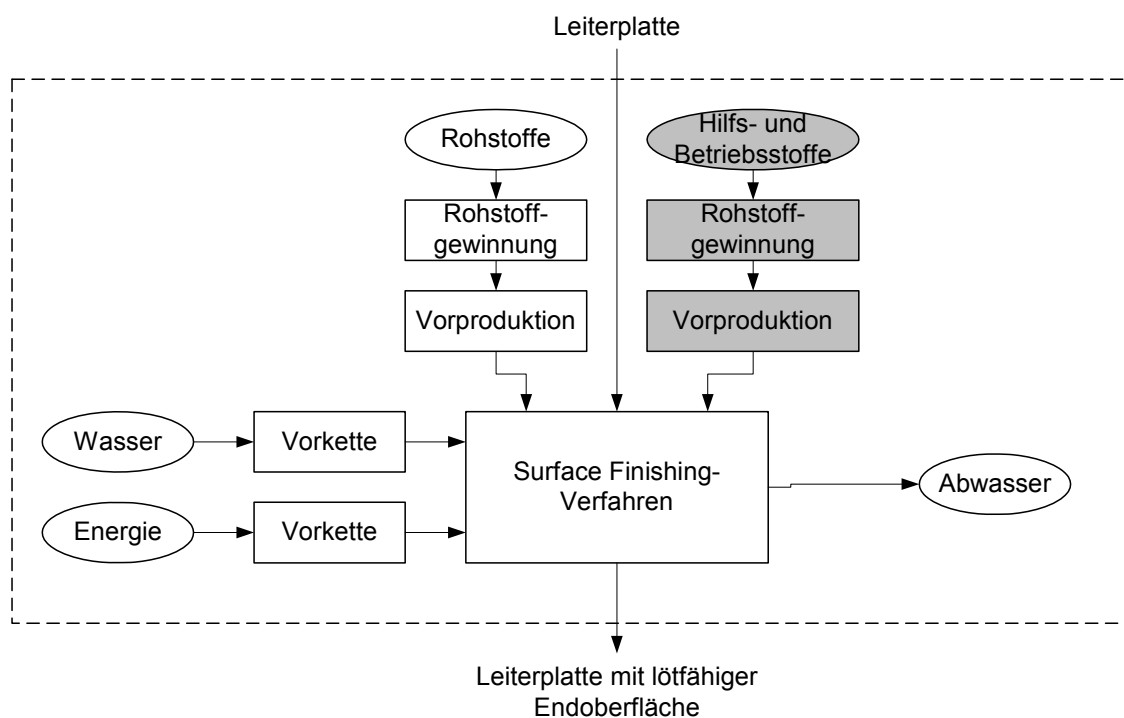
Untersuchungsgegenstand ist die Herstellung lötfähiger Endoberflächen für Leiterplatten. Der Bilanzraum für diese Fallstudie fokussiert sich auf die konkreten Herstellungsverfahren. Außerdem erfolgt die Einbeziehung der Vorketten (Rohstoffgewinnung, Vorproduktion) der eingesetzten Rohstoffe, die für die

Oberflächenherstellung notwendig sind. Die weiteren Lebenswegstufen werden nicht betrachtet, da davon ausgegangen werden kann, dass sich dort keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zu den etablierten Verfahren ergeben.

Für das neue nanotechnikbasierte Verfahren konnte eine weitergehende Ökobilanzierung erarbeitet werden. Auf Grund der sehr guten Zusammenarbeit mit dem Unternehmen im Rahmen des Projektes war es möglich, die Stoff- und Energieströme für alle relevanten chemischen Hilfs- und Betriebsstoffe und für die einzelnen Prozessschritte weitestgehend zu ermitteln (vgl. Abb. 6 grau unterlegte Felder).

Als funktionelle Einheit wurden 1000 m² Leiterplatte mit einer Beschichtungsrate von 25% bezogen auf die Leiterplattenfläche bestimmt.

Abbildung 6: Systemgrenze für die vergleichende Ökobilanz³⁴



³⁴ Quelle: eigene Darstellung

4.4.2 Konventionelle Surface Finishing-Verfahren

Die Surface Finishing-Verfahren umfassen grundsätzlich jeweils mehrere chemische Prozesse; dabei durchlaufen die Leiterplatten mehrere chemische Prozessbäder sowie Reinigungsbäder. Man kann Horizontal- und Vertikalanlagen unterscheiden. Bei den Horizontalanlagen durchlaufen die Leiterplatten mit Hilfe eines Förderbandes die einzelnen Prozessbäder; in Vertikalanlagen werden die Leiterplatten mit Hilfe von Körben in die Prozessbäder gesenkt.

Abbildung 7: Horizontalanlage³⁵



Unter Verwendung verschiedener Materialien und Technologien sind derzeit weltweit folgende Verfahren im Einsatz:

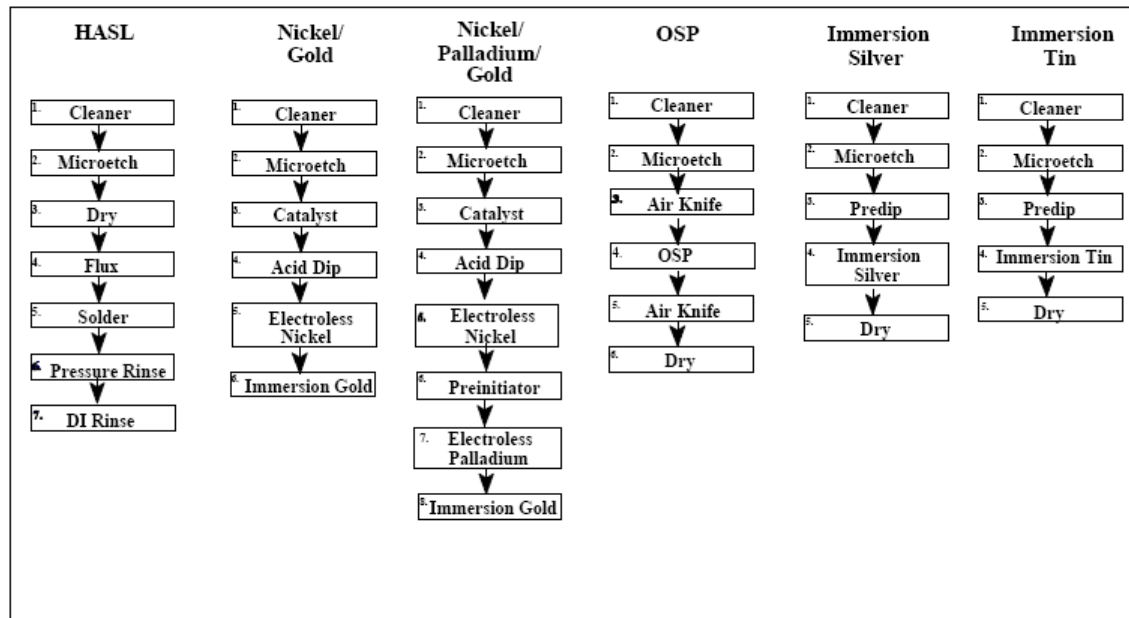
- Hot Air Solder Leveling (HASL, Heißverzinnung)	ca. 40% Marktanteil
- Electroless Nickel/Immersion Gold (ENIG, Galvanisch Nickel – Gold)	ca. 25% Marktanteil
- Immersion Silber (ImAg, Chemisch Silber)	ca. 8% Marktanteil
- Immersion Tin (ImSn, Chemisch Zinn)	ca. 4% Marktanteil
- Organic Solderability Preservative (OSP, Organische Passivierung)	ca. 23% Marktanteil

³⁵ Quelle: Zeysing 2005

Beim HASL handelt es sich um ein Heißverzinnungsverfahren und um die für das Löten am häufigsten eingesetzte Oberfläche. Das bedeutet, dass die Leiterplatten in ein Bad aus flüssigem Zinn (früher auch in Kombination mit Blei) getaucht werden. Beim Herausziehen sorgt dann ein Luftstrom mit hohem Druck dafür, dass das überschüssige Lot abgeblasen wird. Im Gegensatz zu den chemisch aufgetragenen Verfahren, Chemisch Silber und Chemisch Zinn, kann die Oberfläche auch galvanisch aufgebracht werden (Galvanisch Nickel – Gold)³⁶. Die organische Passivierung (OSP) von Kupfer auf Leiterplatten wird fast ausschließlich für die Massenproduktion eingesetzt. Die in diesem Verfahren erzeugte bleifreie Oberfläche ist für ein zuverlässiges Mehrfachlöten nicht geeignet, da die Passivierung nach der ersten thermischen Belastung von >150 °C aufbricht und das freiliegende Kupfer oxidiert. Die Lagerzeit beträgt deshalb auch nur maximal 6 Monate (vgl. Kühne und Lehnberger 2006, Schulz o. J.). Die Abbildung 8 stellt die typischen Prozessschritte der einzelnen Surface Finishing-Verfahren dar.

Bei allen Verfahren erfolgt in einem ersten Schritt die Reinigung in einem säurebasierten Reinigungsbad (Cleaner). Es folgt das Anätzen der Kupferoberfläche der Leiterplatten mit Hilfe verschiedener chemischer Verbindungen u.a. mit Schwefelsäure (Microetch). Dann schließen sich die technikspezifischen Verfahrensschritte an, die die entsprechende Oberflächenschicht auf das Kupfer der Leiterplatte aufbringen. Abschließend erfolgt eine Reinigung sowie die Trocknung (Dry) der Leiterplatte. Zwischen den einzelnen Prozessstufen durchlaufen die Leiterplatten verfahrensspezifisch verschiedene Wasserbäder zur Reinigung.

³⁶ Bei der Galvanik erfolgt eine elektrochemische Abscheidung von metallischen Überzügen auf Oberflächen, wobei der elektrische Strom von der Verbrauchselektrode Metallionen löst und sie durch Reduktion auf die entsprechende Oberfläche ablagert. Bei den chemischen Verfahren erfolgt dagegen die Metallisierung der Kupferoberfläche direkt aus einer chemischen Aktivlösung.

Abbildung 8: Typische Prozessschritte von Surface Finishing-Verfahren³⁷

Note: One or more intermediate rinse steps typically separate the process steps listed above. For simplicity, these intermediate rinse steps have not been included in the diagram.

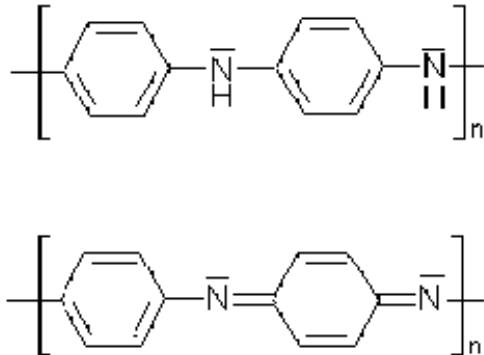
4.4.3 Organic Metal Nanofinish (OM Nanofinish)

Die neue, organische Endoberfläche der Fa. Ormecon GmbH besteht aus einem Komplex aus nanoskaligem Organischem Metall (Polyanilin) und Silber. Sie ist nur 55 Nanometer stark, bietet aber einen besseren Schutz vor Oxidation als die konventionellen Schichten, die 6 bis 100 Mal so dick sind.

Polyanilin und seine Vorkette

Polyanilin ist eines der ältesten bekannten synthetischen Polymere. Durch elektrochemische oder chemische Oxidation von Anilin, meist mit Ammoniumperoxodisulfat im sauren Milieu, wird ein lineares Polyanilin gewonnen, das in unterschiedlichen Oxidationsstufen existiert. Die Eigenschaften der Polyaniline sind stark von den Polymerisationsbedingungen abhängig. Durch Dotierung können sie leicht in elektrisch leitfähige Polymere umgewandelt werden, häufig schon während der Synthese (vgl. Chemgapedia o.J.).

³⁷ Quelle: EPA (2001b)

Abbildung 9: Unterschiedliche Oxidationsformen des Polyanilin³⁸

Das nanoskalige Polyanilin wird nach Aussage des Unternehmens vor Ort aus Anilin in Gegenwart einer organischen Säure oxidativ polymerisiert. Das ausfallende Polyanilin wird abgefiltert und gereinigt. Anschließend erfolgt eine Nachbehandlung sowie die Trocknung. Im nächsten Schritt werden die Polyanilinnanopartikel dispergiert. Diese Dispersion wird dann mit verschiedenen kommerziell erhältlichen Zusatzstoffen zu dem OM Nanofinish-Produkt weiterverarbeitet. Von diesen Zusatzstoffen gehen nach Aussage des Unternehmens keine besonderen Gefährdungen aus. In der Besorgnisanalyse wird von mindergiftigen organischen Substanzen ausgegangen. Im wässrigen OM Nanofinish-Produkt vor der Applikation betragen die Masseanteile an Polyanilin < 1% und der Silberverbindung < 2%, wohingegen über 90% Wasser enthalten sind.

Für die beschriebenen Fertigungsprozesse wurden die relevanten Stoff- und Energieströme bilanziert und modelliert. Für aus Gründen des Geheimnisschutzes vom Unternehmen nicht exakt benannte chemische Stoffe wurden in Absprache mit dem Unternehmen in der Ökobilanz Daten für artverwandte chemische Substanzen eingesetzt. Bspw. wurde für organische Säure ersatzweise der Ökobilanzdatensatz von Essigsäure berücksichtigt. Mit beiden Annahmen ist natürlich eine gewisse Unsicherheit verbunden.

³⁸ Quelle: Chemgapedia (o.J.)

Die Herstellung des Vorproduktes Anilin erfolgt wiederum über folgende Prozessstufen:

- Erdölgewinnung und Raffination
- Gewinnung von Benzol
- Synthese von Nitrobenzol
- Synthese von Anilin

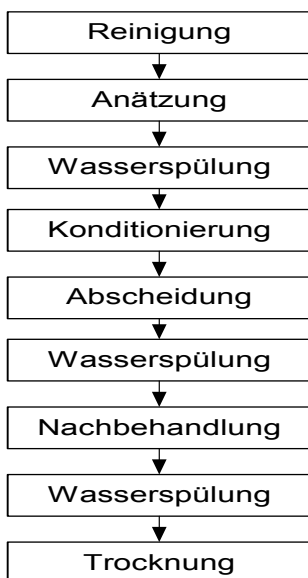
Bei Anilin ($\text{C}_6\text{H}_5\text{-NH}_2$) handelt es sich um ein Produkt der Petrochemie, als deren Rohstoffbasis insbesondere Erdgas sowie Erdöl eingesetzt werden. Grundbaustein für die Herstellung von Anilin ist Benzol, das heutzutage fast ausschließlich aus bei der Rohölraffination anfallenden Erdölderivaten hergestellt wird. Zur Gewinnung von Benzol über Pyrolysebenzin und Reformatbenzin werden deren aromatische von den nichtaromatischen Fraktionen getrennt und dann die aromatische Fraktion durch fraktionierte Destillation weiter aufgeteilt. Eine Alternative ist die Toluoldealkylierung bei der über einen Umlagerungsprozess das nicht so stark nachgefragte Toluol durch Hydroalkylierung in das am Markt stärker nachgefragte Benzol umgewandelt wird (vgl. Ullmann's 1985-96, Bd. A3, insb. S. 482ff; Arpe 2007, S. 345ff). Nitrobenzol wird industriell aus Benzol vorwiegend durch die Einwirkung von Nitriersäure, einem Gemisch unterschiedlicher Zusammensetzung aus konzentrierter Salpetersäure und Schwefelsäure sowohl diskontinuierlich als auch kontinuierlich hergestellt, wobei das bei der Synthese entstandene Nitrobenzol dann abgetrennt und gereinigt wird (vgl. Ullmann's 1985-96, Bd. A17, insb. S. 411ff; Arpe 2007, S. 415f). Das weltweit bedeutendste Herstellungsverfahren von Anilin stellt dann die katalytischen Hydrierung von Nitrobenzol dar, die sowohl in der Flüssigphase als auch in der Gasphase unter erhöhten Drücken durchgeführt werden kann. Sulfidische Verbindungen von Kupfer oder Nickel dienen dabei bspw. als Katalysatoren. Das bei der Reaktion entstehende Wasser wird aus dem Reaktionsgemisch entfernt sowie das Anilin durch Vakuumdestillation gereinigt (vgl. Ullmann's 1985-96, Bd. A2, insb. S. 303ff; Arpe 2007, S. 417ff).

Die in dieser Arbeit verwendeten Ökobilanzdaten für Anilin sowie für weitere chemische Stoffe stammen aus der Datenbank Ecoinvent (2007).

Das Verfahren OM Nanofinish

Wie bei den übrigen Surface-Finishing-Verfahren erfolgt auch bei diesem Verfahren in den ersten Bädern die Reinigung (mittels Badflüssigkeit ACL 7002) und das Anätzen (mittels Badflüssigkeit MET 7002). Nach einer Wasserspülung erfolgt dann in zwei Bädern das Aufbringen der organischen Metalloberfläche (mittels Konditionierer CND 7200 und Abscheidebadflüssigkeit OMN 7200). Nach einer Zwischenreinigung folgt noch eine Nachbehandlung sowie ein weiteres Reinigen und das abschließende Trocknen der Leiterplatten.

Abbildung 10: Prozessschritte des OM Nanofinish-Verfahrens³⁹



Eine Verschleppung der eingesetzten Chemikalien ist nicht zu vermeiden, sie findet in den Anlagen immer zu den Spülbädern hin statt.

4.4.4 Datengrundlagen und -verfügbarkeit

Für die Ökobilanzierung der konventionellen Surface Finishing-Verfahren liegen Daten aus der Studie „Printed Wiring Board Surface Finishes Cleaner Technologies Substitutes Assessment“ im Auftrag der U.S. Environmental Protection Agency (EPA 2001) vor. Im Rahmen dieser sehr umfassenden Studie wurden für die einzelnen Technologien auf der Grundlage einer Branchenbefragung detaillierte repräsentative

³⁹ Quelle: Ormecon (2008)

und vergleichbare Verfahrensmodelle entwickelt und die zugehörigen relevanten Stoff- und Energiestromdaten ermittelt. Folgende Daten der Studie wurden für die ökobilanziellen Betrachtungen übernommen:

- Schichtdicke, Materialzusammensetzung und daraus abgeleitet die spezifischen Verbräuche an Rohstoffen,
- spezifische Energieverbräuche,
- spezifische Wasserverbräuche zur Reinigung.

Erweitert wurden diese Daten durch Annahmen zu Materialverlusten bei der Verarbeitung. Außerdem erfolgte gegenüber der EPA-Studie, wie beschrieben, eine Erweiterung des Bilanzraumes um die jeweiligen Vorketten. Hierbei muss allerdings beachtet werden, dass nur die Ökobilanzdaten der Vorketten für die „reinen“ Materialien (bspw. Zinn oder Silber) berücksichtigt werden konnten, da für die jeweiligen chemischen Zwischenprodukte in den Verfahren keine Informationen vorlagen. Die entsprechenden Ökobilanzdaten wurden der Stoffdatenbank Ecoinvent (2007) entnommen.

Für das Verfahren OSP werden organische Spezialchemikalien wie Benzimidazole eingesetzt, für die keine Ökobilanzdaten vorhanden sind. Benzimidazole werden z.B. durch Kondensation der Leitsubstanz o-Phenylendiamin mit Ameisensäure hergestellt, wobei die Herstellung von Phenylendiamine z.B. durch Reduktion von Nitroaniline mit Wasserstoff in Toluol als Lösungsmittel in Gegenwart eines Katalysators erfolgt. Da auch für diese Spezialchemikalien keine Ökobilanzdaten zur Verfügung stehen, wurde für die im Verfahren OSP verwendete Chemikalie als Alternative Anilin berücksichtigt.

Für das neue Verfahren OM Nanofinish wurden im Unternehmen Ormecon GmbH durch Befragungen die notwendigen Stoff- und Energiestromdaten erhoben. Um eine hinreichende Vergleichbarkeit mit den Daten der EPA-Studie zu erreichen, wurden deren spezifische Modellannahmen für einzelne vergleichbare Prozessschritte übernommen. So wurden die dort aufgeführten Wasserverbräuche für die Spülbäder und die Energieverbräuche für einzelne technische Geräte wie Förderband, Badheizung, Trockner und Förderpumpen als Berechnungsgrundlage genutzt.

Im Gegensatz zur EPA-Studie, in der die verwendeten chemischen Hilfs- und Betriebsstoffe für die einzelnen Prozessschritte nur qualitativ erfasst und bewertet

wurden, wurde diese für das OM-Nanofinish auch detailliert erfasst. Aus diesem Grund werden für das neue Verfahren jeweils zwei Bilanzen berechnet, eine die die Vergleichbarkeit mit der EPA-Studie gewährleistet und eine mit den erweiterten Stoff- und Energieströmen.

Für die Bilanzierung der verschiedenen Varianten von Surface Finishing-Verfahren stehen somit weitreichende Ökobilanzdaten in hoher Qualität zur Verfügung. Die Bilanzierung erfolgte mit Hilfe der Ökobilanzsoftware Umberto. Im Anhang 4 sind die in der Ökobilanzsoftware Umberto realisierten Bilanzierungsflussbilder exemplarisch dargestellt.

4.4.5 Betrachtete Varianten

Da viele der Techniken verfahrenstechnisch durch Horizontal- und Vertikalanlagen umgesetzt werden und diese sich in den Stoff- und Energieströmen unterscheiden, wurden folgende zehn Varianten in den ökobilanziellen Vergleich einbezogen:

- ENIG Nickel/Gold, vertikal
- HASL, vertikal
- HASL, horizontal
- Immersion Silber, horizontal
- Immersion Zinn, vertikal
- Immersion Zinn, horizontal
- OSP, vertikal
- OSP, horizontal
- OM Nanofinish, vertikal
- OM Nanofinish, horizontal
- OM Nanofinish, vertikal, umfassender
- OM Nanofinish, horizontal, umfassender

4.4.6 Darstellung ausgewählter Verfahrensparameter und Sachbilanzdaten

Das größte Unterscheidungsmerkmal zwischen den Surface Finishing-Verfahren besteht einerseits in der Materialwahl für die Erzeugung der Endoberfläche sowie andererseits in der notwendigen Schichtdicke. In der folgenden Tabelle werden die absoluten Materialverbräuche für die funktionelle Einheit dargestellt. Auf Grund der sehr viel geringeren Schichtdicke wird hier schon die Vorteilhaftigkeit des neuen OM Nanofinish-Verfahrens gegenüber den konventionellen Verfahren ersichtlich.

Tabelle 4: Berechnungen zum Materialverbrauch⁴⁰

Verfahren	Schicht- bestandteile Stoff	Dichte* [g/cm³]	Schicht- dicke** [µm]	Schichtmasse Gesamt*** [kg/1.000 m²]	Schichtmasse inkl. Verluste Gesamt**** [kg/1.000 m²]
ENIG	Nickel	8,91	5,08	11,316	33,947
	Gold	19,32	0,18	0,859	2,576
	Gesamt			12,174	36,523
HASL	Zinn	7,31	3,20	5,849	5,849
	Silber*****	10,49	0,94	2,465	2,465
	Kupfer	8,92	0,94	2,096	2,096
	Gesamt			10,409	10,409
ImAg	Silber	10,49	0,15	0,400	1,199
ImSn	Zinn	7,31	0,64	1,160	3,481
OSP	Organik*****	1	0,30	0,076	0,229
OM Nanofinish	Polyanilin	1	0,05	0,013	0,038
	Silber	10,49	0,005	0,013	0,039
	Gesamt			0,026	0,077

* Quelle: Wikipedia (2008)

** Quelle: Die Angaben basieren auf der EPA-Studie (2001) sowie Aussagen der Fa. Ormecon GmbH.

*** Die Berechnung beruht darauf, dass entsprechend der EPA-Studie (2001) 25% der Oberfläche der Leiterplatte beschichtet werden.

**** Für die Verfahren ENIG, ImAg, ImSn, OSP sowie OM Nanofinish werden nach Aussagen der Fa. Ormecon GmbH Verlusten von 2/3 der eingesetzten Materialmengen unterstellt, für HASL keine Verluste.

***** Im Gegensatz zur EPA-Studie (2001) wird statt dem heute nicht mehr eingesetztem Blei gleichverteilt Silber und Kupfer verwendet.

***** Hierbei handelt es sich wie beschrieben um Benzimidazole. In den Ökobilanzberechnungen wird aber Anilin zu Grunde gelegt.

Die folgende Tabelle zeigt die aus der Verfahrensmodellierung abgeleiteten und berechneten Gesamtenergie- und Wasserverbräuche. In der EPA-Studie (2001) erfolgte eine detaillierte Aufschlüsselung der Anlagenkomponenten und die Berechnung der spezifischen Verbräuche. Berücksichtigung finden hierbei auch die

⁴⁰ Quelle: EPA (2001), Ormecon (2008) und eigene Berechnungen

jeweiligen Prozessraten, die technikbedingt von Verfahren zu Verfahren recht unterschiedlich sind. Um eine möglichst große Vergleichbarkeit mit den Daten der EPA-Studie zu erreichen, wurden für OM Nanofinish die Prozesszeiten des vergleichbaren OSP-Verfahrens übernommen und so der spezifische Energieaufwand entsprechend berechnet. Auffallend sind besonders die hohen Elektroenergieverbräuche des ENIG-Verfahrens. Grund dafür sind einerseits vier notwendige beheizte Prozessbäder sowie andererseits gegenüber den anderen Verfahren längere spezifische Prozesszeiten. Die unterschiedlichen Wasserverbräuche spiegeln die Anzahl sowie die Art von Reinigungsbädern der Verfahren wieder.

Tabelle 5: Darstellung der Energie- und Wasserverbräuche der Surface Finishing-Verfahren (ohne Vorkette)⁴¹

Verfahren	Gesamtenergieverbrauch		Gesamtwasser- verbrauch
	Elektroenergie (kWh/1000 m ² Leiterplatte (LP))	Erdgas (m ³ /1000m ² LP)	(m ³ /1.000m ² LP)
ENIG Nickel/Gold, vertikal	1.410,1	-	5,869
HASL, vertikal	400,5	27,22	3,523
HASL, horizontal	272,0	14,03	2,824
Immersion Silber, horizontal	443,9	43,68	1,501
Immersion Zinn, vertikal	377,6	50,64	5,135
Immersion Zinn, horizontal	855,4	74,91	2,502
OSP, vertikal	176,2	20,79	2,201
OSP, horizontal	125,5	9,81	1,501
OM Nanofinish, vertikal	95,4	20,79	1,467
OM Nanofinish, horizontal	87,4	9,81	1,001

⁴¹ Quelle: EPA (2001) und eigene Berechnungen

4.4.7 Wirkungsabschätzung und ausgewählte Auswertungen der Ökobilanzierungen

Aus den Ökobilanzberechnungen ergeben sich beispielhaft folgende Ergebnisse für ausgewählte Sachbilanzdaten und Umweltwirkungskategorien nach CML 2001.

Allgemein kann man sagen, dass die vergleichbaren OM Nanofinish-Varianten gegenüber den anderen Varianten in fast allen Umweltwirkungskategorien überlegen sind. Nur die OSP-Varianten liegen im gleichen Bewertungsbereich; die anderen Varianten liegen durchweg mit großen Faktoren über den jeweiligen Stoff- und Energieverbräuchen bzw. Umweltwirkungen der OM Nanofinish-Variante.

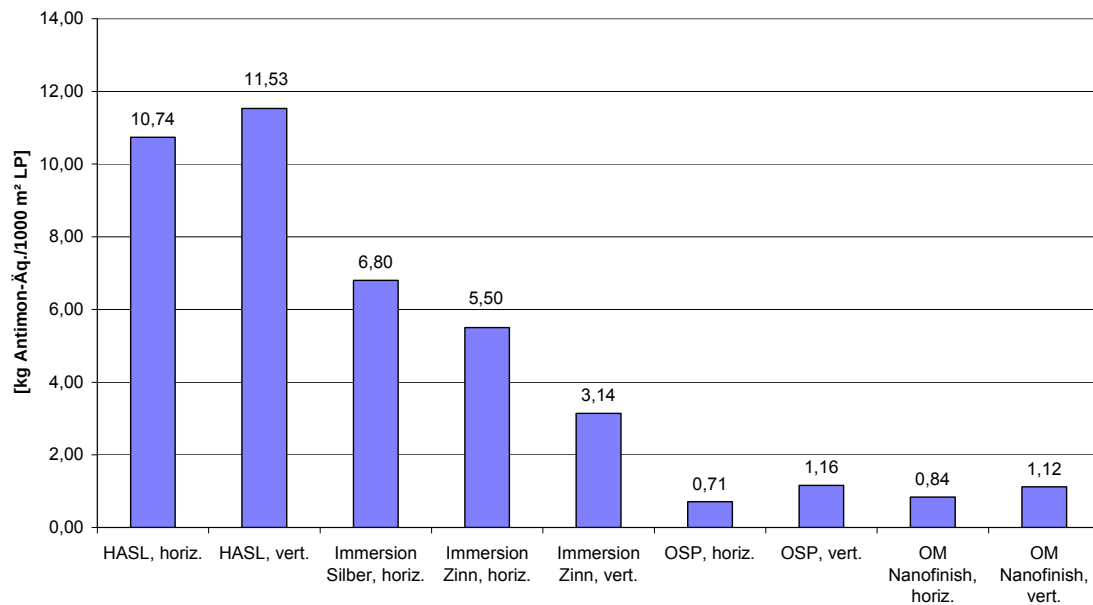
Mit Ausnahme des Immersion-Zinn-Verfahrens ist festzustellen, dass die horizontalen Verfahren gegenüber den vertikalen Verfahren in den Umweltwirkungskategorien immer besser liegen. Ursachen hierfür sind die höheren Durchsätze bei den horizontalen Anlagen; beim Immersion-Zinn-Verfahren hat dagegen das vertikale Verfahren einen höheren spezifischen Durchsatz (vgl. EPA 2001).

Zu den OSP-Varianten muss außerdem angemerkt werden, dass bei der Bilanzierung der Vorketten für die einzusetzende Spezialchemikalie Benzimidazol keine Ökobilanzdaten zur Verfügung standen und diese durch die Grundchemikalie Anilin ersetzt wurden. Es ist davon auszugehen, dass in der Realität der Herstellungsaufwand und somit auch die Umweltwirkungen der Spezialchemikalie bedeutend höher anzusetzen sind. Die Anwendungsfelder des OSP-Verfahrens liegen außerdem nicht in hochwertigen, sondern eher in Massenmärkten. Das Verfahren ist daher qualitativ nur bedingt mit dem OM Nanofinish-Verfahren zu vergleichen.

In den folgenden Abbildungen werden die Ergebnisse für einzelne Umweltwirkungen dargestellt. Die Daten für das ENIG-Verfahren konnten nicht in Grafik mit aufgenommen werden, da sie exorbitant aus dem Rahmen fallen. Sie werden deshalb in Klammern in der Titelzeile der jeweiligen Abbildungen aufgeführt.

Auf Grund des Einsatzes von Edelmetallen in einigen Surface Finishing-Verfahren ist der Vergleich des abiotischen Ressourcenverbrauchs besonders interessant, da die Gewinnung gerade dieser Materialien mit großen Aufwendungen verbunden ist. Der Verbrauch von abiotischen Ressourcen wird dabei umgerechnet in Antimon-Äquivalente dargestellt.

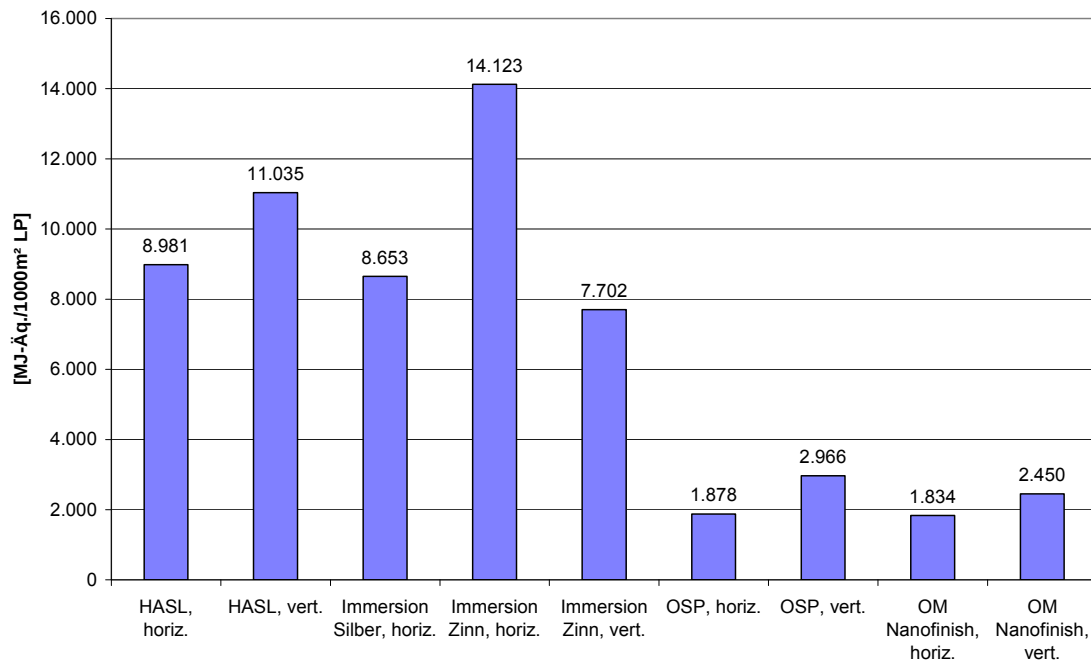
Abbildung 11: Abiotischer Ressourcenverbrauch (ENIG: 411,91 kg Antimon-Äq./1000 m² LP)⁴²



Das ENIG-Verfahren verbraucht etwa 400-mal so viele abiotische Ressourcen wie die vergleichbaren OM-Nanofinish-Verfahren. Gegenüber dem HASL-Verfahren schneidet das OM-Nanofinish-Verfahren um den Faktor 10 besser ab. Beim ENIG-Verfahren resultieren 98,24% des Beitrages zum Ressourcenverbrauch aus der Rohstoffgewinnung des Goldanteils, beim HASL-Verfahren entfallen ca. 75% auf die Silbergewinnung. Beim horizontalen OM-Nanofinish-Verfahren beträgt der Anteil durch Silber am gesamten Ressourcenverbrauch dagegen nur 12%.

⁴² Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, EPA 2001, Ormecon 2008, Ecoinvent 2007)

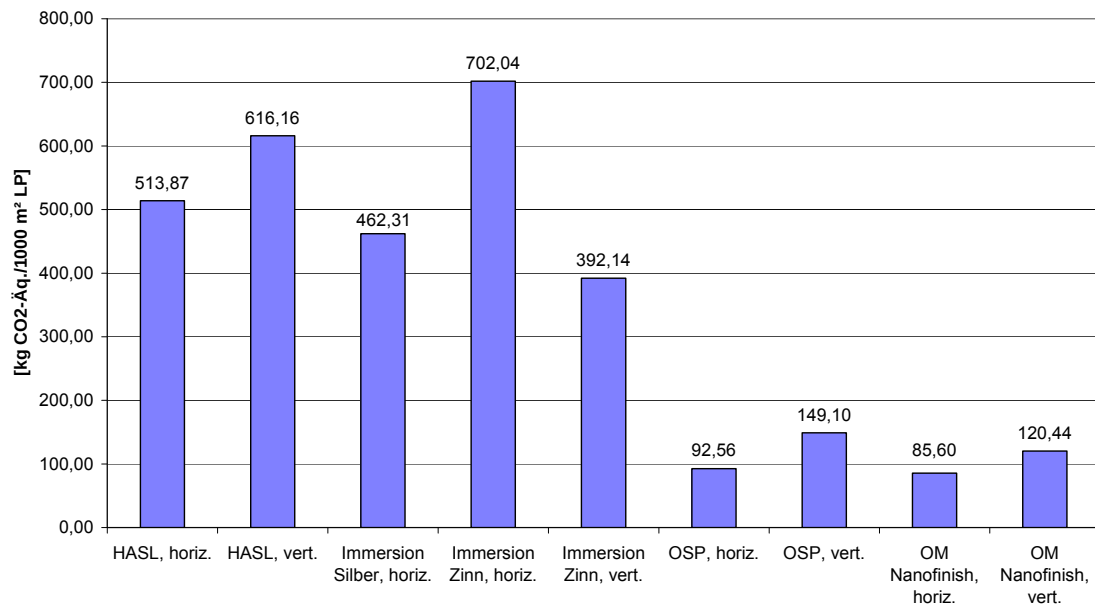
Abbildung 12: Verbrauch Energieressourcen (ENIG 554.454 MJ-Äq./1000 m² LP)⁴³



Das horizontale OM-Nanofinish-Verfahren ist mit dem geringsten Energieverbrauch verbunden. Das ENIG-Verfahren benötigt 300-mal soviel Energie. Die anderen Verfahren (außer dem OSP-Verfahren) schneiden auch mit Faktoren zwischen 4-7 schlechter ab. Der Energieverbrauch beim horizontalen OM-Nanofinish-Verfahren gliedert sich wie folgt auf: 57% resultieren aus dem Elektroenergieverbrauch und 26% aus dem thermische Energieverbrauch (Trocknung). 14% entfallen auf den energetischen Aufwand bei der Herstellung des Lösemittels, das bei der Polyanilinsynthese eingesetzt wird.

⁴³ Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, EPA 2001, Ormecon 2008, Ecoinvent 2007)

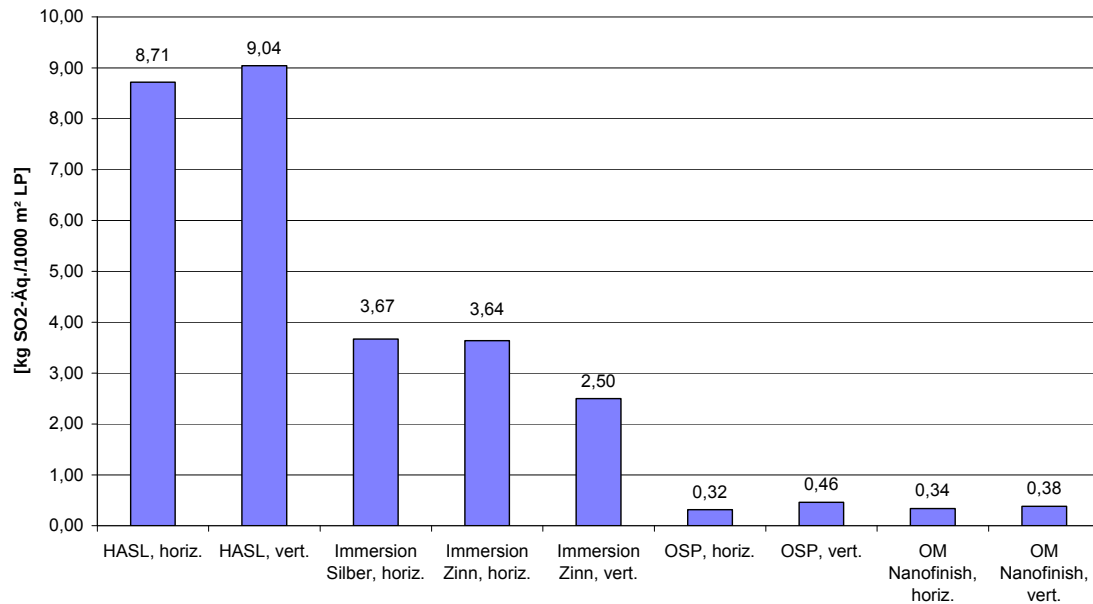
Abbildung 13: Treibhauspotenzial (ENIG 36.657 kg CO₂-Äq./1000 m² LP)⁴⁴



Beim Treibhauspotenzial sind die Verhältnisse identisch wie beim Energieverbrauch. Hier ist das ENIG-Verfahren um den Faktor 390 problematischer als das beste OM-Nanofinish-Verfahren; die anderen Verfahren (außer dem OSP-Verfahren) schneiden mit Faktoren zwischen 4,5-8,2 schlechter ab.

⁴⁴ Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, EPA 2001, Ormecon 2008, Ecoinvent 2007)

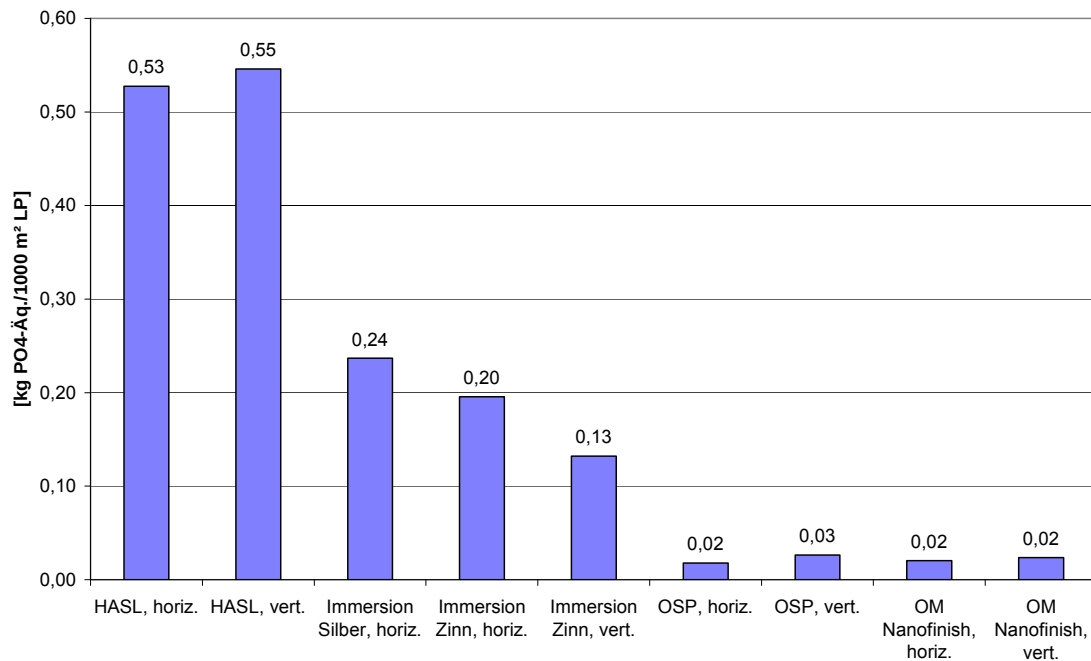
Abbildung 14: Versauerungspotenzial, generisch (ENIG 390 kg SO₂-Äq./1000 m² LP)⁴⁵



Beim Versauerungspotenzial zeigt sich ein etwas anderes Bild. Neben ENIG fallen hier besonders die HASL-Verfahren mit hohen Emissionen auf. Absolut am besten schneidet hier das horizontale OSP-Verfahren ab, das ca. 7% besser ist als das horizontale OM-Nanofinish-Verfahren. Wobei schon hier erwähnt werden muss, dass diese Unterschiede aufgrund der Annahme zur Hauptchemikalie des OSP-Verfahren aufgrund von Datenlücken als nicht signifikant zu werten sind.

⁴⁵ Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, EPA 2001, Ormecon 2008, Ecoinvent 2007)

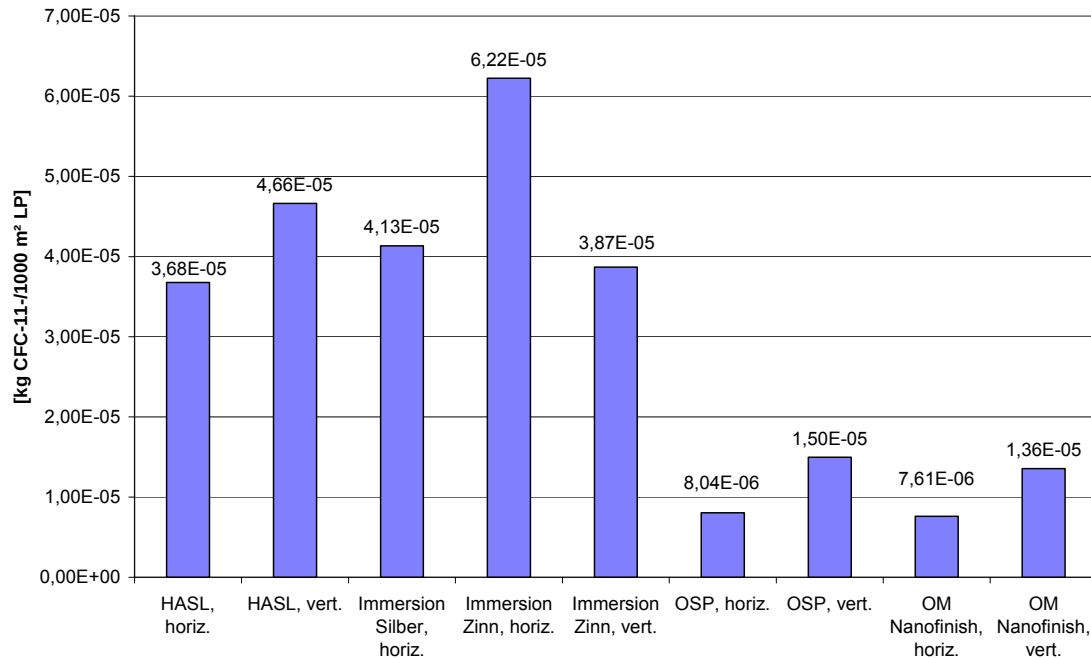
Abbildung 15: Überdüngungspotenzial, generisch (ENIG 46,78 kg PO₄-Äq./1000 m² LP)⁴⁶



Beim Überdüngungspotenzial zeigt sich ein ähnliches Bild wie beim Versauerungspotenzial, wobei der absolute Vorteil des OSP-Verfahrens mit 0,002 kg PO₄-Äq./1000 m² LP sehr gering ist. Wie oben beschrieben muss angemerkt werden, dass bei dessen Bilanzierung die Spezialchemikalie nur unzureichend berücksichtigt werden konnte. Der Beitrag des ENIG-Verfahrens zum Überdüngungspotenzial ist um den Faktor 2275 höher als der Beitrag des horizontalen OM-Nanofinish-Verfahrens.

⁴⁶ Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, EPA 2001, Ormecon 2008, Ecoinvent 2007)

Abbildung 16: Stratosphärischer Ozonabbau (ENIG 3,10E-03 kg CFC-11-Äq./1000 m² LP)⁴⁷



Bei der Umweltwirkungskategorie des stratosphärischen Ozonabbaus verursacht wieder das horizontale OM-Nanofinish-Verfahren die absolut geringsten Emissionen.

Die bisherigen Darstellungen orientierten sich zur Gewährleistung einer hohen Vergleichbarkeit stark an den Modellannahmen der EPA-Studie. Für das OM Nanofinish-Verfahren war es aber auch möglich, zusätzlich die Stoffströme der eingesetzten chemischen Hilfs- und Betriebsstoffe zu bilanzieren. Durch Berücksichtigung dieser Daten erhält man nun Ökobilanzdaten der erweiterten „umfassenderen“ OM Nanofinish-Varianten. Beim Vergleich mit den bisherigen Daten wird deutlich, dass sich die Werte für die einzelnen Umweltwirkungskategorien gegenüber der Ursprungsversion etwa um 70% bzw. 50% erhöhen, d.h. die Umweltwirkungen der im Verfahren eingesetzten chemischen Hilfs- und Betriebsstoffe beeinflussen die Ergebnisse der Ökobilanz doch beträchtlich und dürfen somit auf keinen Fall vernachlässigt werden. Beispielhaft dargestellt werden diese Effekte in den beiden folgenden Abbildungen.

⁴⁷ Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, EPA 2001, Ormecon 2008, Ecoinvent 2007)

Abbildung 17: Abiotischer Ressourcenverbrauch der OM Nanofinish-Varianten⁴⁸

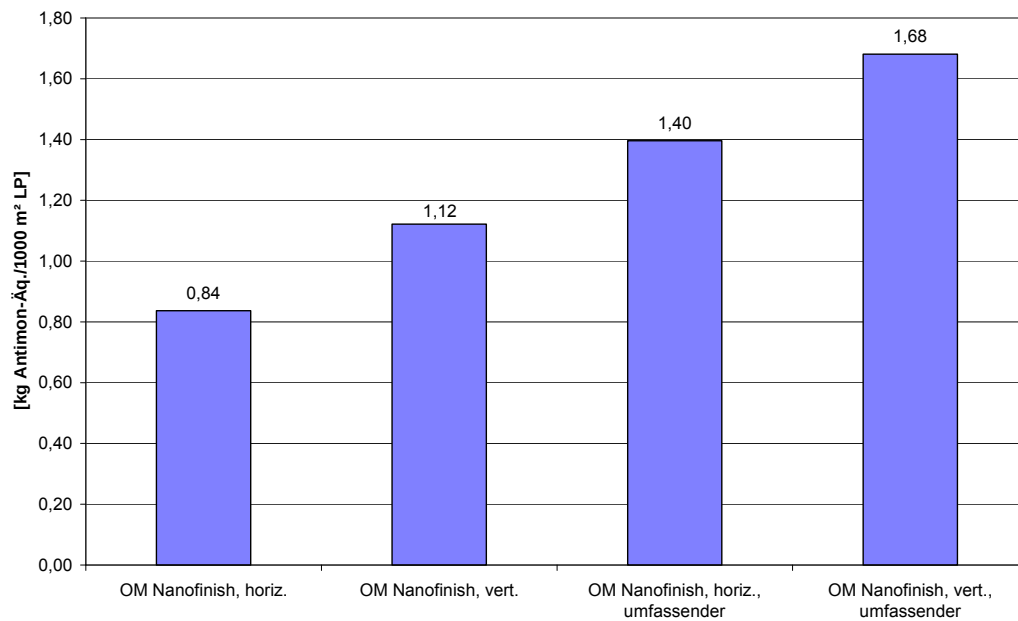
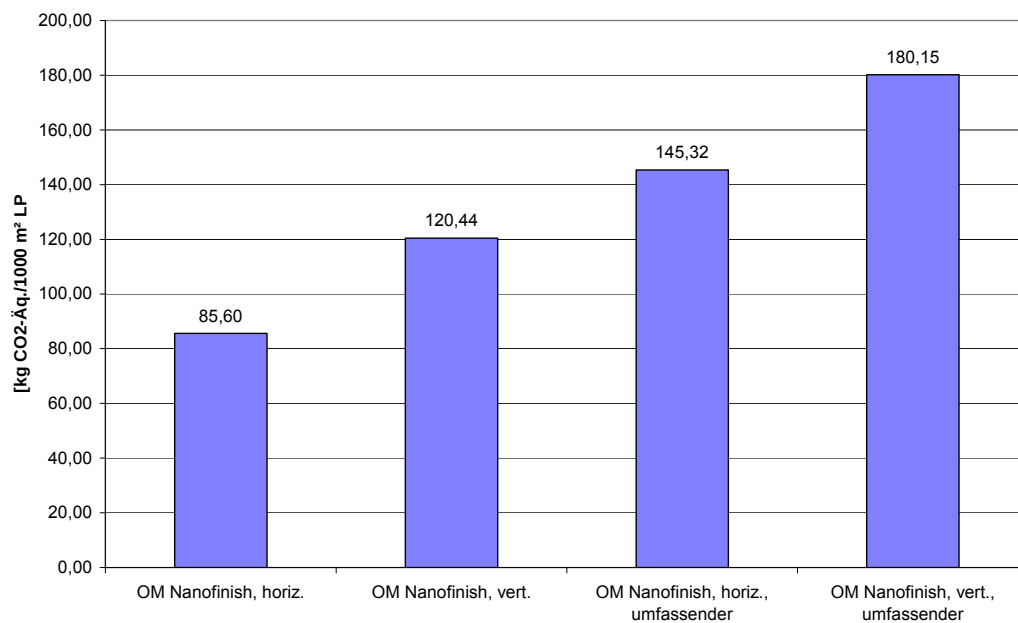


Abbildung 18: Treibhauspotenzial der OM Nanofinish-Varianten⁴⁹



⁴⁸ Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, EPA 2001, Ormecon 2008, Ecoinvent 2007)

⁴⁹ Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, EPA 2001, Ormecon 2008, Ecoinvent 2007)

Um eine Vorstellung vom maximalen theoretischen Umweltentlastungspotenzial durch das neue OM-Nanofinish-Verfahren zu bekommen, wird in der Berechnung der folgenden Tabelle unterstellt, dass die bestehenden Verfahren entsprechend ihrer Weltmarkanteile zu 100 % durch OM-Nanofinish ersetzt werden.

Tabelle 6: Theoretisch maximales Umweltentlastungspotenzial durch OM Nanofinish⁵⁰

Verfahren	Weltmarktanteil	35.909.575 GJ-Äq.	2.173.426 t CO₂-Äq.
ENIG Nickel/Gold, vert.	25%	34.653.362 GJ-Äq.	2.103.586 t CO ₂ -Äq.
HASL, horiz.	40%	898.140 GJ-Äq.	51.387 t CO ₂ -Äq.
Immersion Silber, horiz.	8%	173.060 GJ-Äq.	9.246 t CO ₂ -Äq.
Immersion Zinn, vert.	4%	77.022 GJ-Äq.	3.921 t CO ₂ -Äq.
OSP, horiz.	23%	107.991 GJ-Äq.	5.285 t CO ₂ -Äq.
OM Nanofinish, horiz.	100%	458.432 GJ-Äq.	21.401 t CO₂-Äq.
OM Nanofinish, horiz., umfassender	100%	828.270 GJ-Äq.	36.330 t CO₂-Äq.

Ein 100%iger Weltmarktanteil würde mit einem weltweiten theoretischen Einsparpotenzial von ca. 2 Mio. t CO₂-Äquivalenten einher gehen. Das entspricht einem theoretischen Einsparpotenzial an Energie von ca. 1,2 Mio. t Steinkohleeinheiten.

4.4.8 Besorgnisanalyse für OM Nanofinish

Entlastungskriterien (weisen eher auf eine geringe Besorgnis hin)

Ausgangsstoff zur Herstellung von Polyanilin ist Anilin. Anilin als Rohstoff und Monomer ist ein starkes Blutgift und nach Gefahrstoffverordnung als giftig und umweltgefährlich zu kennzeichnen sowie als krebserzeugend Kat. 3⁵¹ und erbgutverändernd Kat. 3⁵² eingestuft.

⁵⁰ Quelle: eigene Berechnungen (Datenbasis: eigen, EPA 2001, Ormecon 2008, Ecoinvent 2007)

⁵¹ Krebserzeugende Gefahrstoffe der Kategorie 3 geben zu der Besorgnis Anlass, dass sie beim Menschen Krebs erzeugen, für eine abschließende Beurteilung liegen jedoch nicht genügend Informationen vor.

⁵² Erbgutverändernde Gefahrstoffe der Kategorie 3 geben wegen möglicher erbgutverändernder Wirkung Anlass zur Besorgnis, für eine endgültige Beurteilung liegen jedoch nicht genügend Informationen vor.

Durch eine vollständige Polymerisation zu mikroskaligem Polyanilin und anschließender Reinigung des Produktes verliert der Stoff aber diese toxischen Eigenschaften des Monomers. Der weitere Herstellungsprozess zeichnet sich dadurch aus, dass die Polyanilin-Nanopartikel in einer Dispersion separiert werden, d.h. eine Emission von mobilen Nanopartikeln in Staubform ist unwahrscheinlich.

Löslichkeit: (Nanopartikuläres) Polyanilin ist in Wasser nicht löslich, es ist in allen Lösemitteln absolut unlöslich.

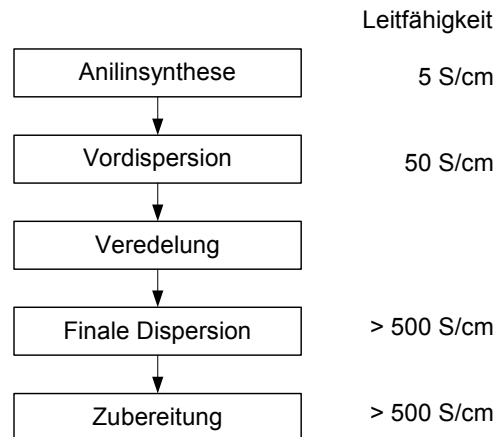
Die Herstellung der Dispersion ist nicht trivial; d.h. die Trennung der vorliegenden µm-großen Agglomerate ist sehr schwer zu realisieren, da die durch die sehr große Oberflächenenergie der Polyanilin-Partikel vorhandene hohe Neigung zur Aggregation überwunden werden muss.⁵³

In anderen Medien als Wasser, z.B. bei Zugabe oder Entfernung von Lösemitteln, Salzen, bei pH-Änderung etc, flokkulieren alle Dispersionen wieder, d.h. die Nanopartikel agglomerieren. Dispersionen sind generell sehr empfindliche Systeme, die nur unter den engen Verwendungsbedingungen stabil sind, anderenfalls sofort wieder ihre nanoskaligen Eigenschaften verlieren (was für die industrielle Anwendung eine Erschwernis darstellt, für die Betrachtung hier aus toxikologischer Sicht ein Vorteil).

Das Polyanilin-Pulver kann auf Grund seiner Unlöslichkeit und Unschmelzbarkeit nur als Dispersion verarbeitet werden. Außerdem ist es das Hauptziel, bei dem geeigneten durchgeführten Dispersionsprozess die elektrische Leitfähigkeit des Polymers zu erhöhen. Weitere eventuell toxikologisch relevante spezifische Nanoeigenschaften sind dem Unternehmen nicht bekannt. Alle bisherigen toxikologischen Untersuchungen (z.B. im Auftrag der EPA, USA) ergaben keine speziellen toxikologischen Risiken.

⁵³ Bei der Teilchenklassifizierung unterscheidet man zwischen Primärteilchen, Aggregate und Agglomerate. Mehrere Primärteilchen werden in den sogenannten Aggregaten durch starke Bindungen, z.B. kovalente Bindungen, zusammengehalten. Mehrere Aggregate bilden wiederum zusammen Agglomerate (Cluster). Die schwache Wechselwirkung der Aggregate untereinander ermöglicht allerdings ein mechanisches Zerstören der Agglomerate.

Abbildung 19: Erhöhung der Leitfähigkeit durch Dispergierung (in Siemens/cm)⁵⁴



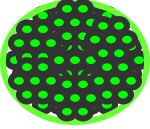
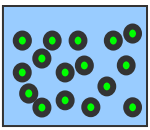
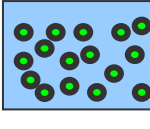
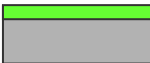
Die Verarbeitung erfolgt als wässrige Dispersion im Abscheidebad der OM Nanofinish-Anlage, die dadurch gekennzeichnet ist, dass der Masseanteil an Polyanilin sehr gering ist (< 1% Masseanteil); d.h. eine Emission von Nanopartikeln in die Luft während der Verarbeitung ist äußerst unwahrscheinlich.

Polyanilin-Dispersionen sind relativ empfindlich gegenüber einer hohen Ionen- oder Salzkonzentration im Lösungsmittel. Bei etwaigen Emissionen in Wasser (durch Leckagen, Behälterreinigung und dergleichen) wird davon ausgegangen, dass sie dann ausflocken. Das bedeutet, dass sich große Agglomerate bilden, so dass diese ausfallen und ohne Aufwendung von Energie nicht wieder dispergiert werden können. Dementsprechend verlieren sie ihre Nanoeigenschaften bei der Agglomeration.

Als Applikationsergebnis entsteht ein ca. 55 nm dicker Polyanilin-Film auf der Leiterplatte, der noch sehr geringe Mengen an Silber enthält. Eine Emission von Nanopartikeln aus dieser Polyanilin-Film-Matrix ist aufgrund der Wechselwirkungen untereinander sowie mit dem Substrat (Leiterplatte) quasi unmöglich, es ist nur mit konzentrierten Säuren oder starken Oxidationsmitteln möglich, die Nanoschicht vom Kupfersubstrat zu entfernen, wobei allerdings die Flokkulation stattfindet; mit Wasser oder organischen Lösemitteln z.B. lässt sich die Nanobeschichtung nicht entfernen.

⁵⁴ Quelle: Wessling 2004

Tabelle 7: Darstellung der Produktlebenswegstufen und Charakterisierung der jeweilig vorliegenden Produktform⁵⁵

Produktlebenswegstufe			Charakterisierung
Herstellung 1. Synthese des Anilins (Pulver)		- Polymerisation - Fällung - Waschung; Polyanilin in Pulverform	Polyanilin-Pulver, Agglomerate im μm -Bereich; gekennzeichnet durch hohe Oberflächenenergie
Herstellung 2. Dispersion (Trennung der Agglomerate extrem schwer zu erreichen)		- Dispersion in mehreren Schritten - Separation der Primärpartikel (ca. 10 nm)	Wässrige Polyanilin-Dispersion mit separierten ca. 10 nm-Primärpartikeln;
Verarbeitung in der OM Nanofinish-Anlage		- Dispersion im Abscheidebad, Anteil an Polyanilin < 1%	Wässrige Polyanilin-Dispersion mit separierten ca. 10 nm-Primärpartikeln;
Applikation / Produkt		- Getrocknete Endoberfläche auf der Leiterplatte	Polyanilin-Film (ca. 55 nm-dicker Film mit Silber); Wechselwirkungen der Nanopartikel untereinander und mit dem Substrat, Nanopartikel in Polyanilin-Filmmatrix, nicht mobil
Löten der Leiterplatte		Der Polyanilin-Film wird beim Lötvorgang ins Lot integriert.	Der Polyanilin-Film ist so stabil, dass mehrmaliges Löten unter Hitzebildung (bis 260°C) möglich ist. Beim Polyanilin-Film handelt es sich nicht um einen kohärenten Film, sondern um ca. 60 Nanopartikel auf 1 μm^2 . Diese werden beim Lötvorgang in die mehr als 100fache Menge an Lot integriert, sie sind bisher dort (aufgrund ihrer Nanoskaligkeit) nicht wiedergefunden worden.
Produktende		- LP-Recycling / Verbrennung / Entsorgung	Bei Verbrennung geht die Substanz sowie die Struktur verloren.

⁵⁵ Quelle: verändert nach Wessling 2001

Tabelle 8: Bewertung der Besorgniskriterien (weisen auf hohe Besorgnis hin)⁵⁶

Besorgniskriterien	Bewertung
Hinweise auf erwartbar hohe Exposition:	
Produktionsmenge	Die erwartbare Produktionsmenge bei Ormecon ist für den Anwendungsfall Endoberfläche als eher gering anzusehen. Bei einem Weltmarktanteil von 10% (d.h. 25 Mio m ² Leiterplatten würden von OM Nanofinish-Anlagen bearbeitet werden) benötigte man 950 kg Polyanilin pro Jahr.
Mobilität	???, nicht bekannt
Gezielte Freisetzung	nein
Persistenz der Nanoeigenschaft	nicht gegeben
Bioakkumulation	Kann nicht akkumulieren, da Polyanilin selbst aus wässrigen Dispersionen nicht bioverfügbar ist, nicht resorbiert werden kann
Hinweise auf eventuell problematische Wirkungen:	
Hohe Reaktivität	keine hohe Reaktivität
Problematische Morphologie	eher nicht, da nur in Schicht enthalten; Primärpartikel eher „rund“
Problematische Wechselwirkungen	???, nicht bekannt
Problematische Transformationen	???, nicht bekannt
Nanospezifische (Öko)Toxizität	???, nicht bekannt
Hinweise auf Probleme im Risikomanagement:	
Schlechte Nachweisbarkeit und unklarer Verbleib	eher nicht

Gesamtbeurteilung der Besorgnisanalyse

Nach vorhandenem Wissensstand zu nanopartikulärem Polyanilin im beschriebenen Anwendungskontext (Endoberfläche für Leiterplatten) ist aus unserer Sicht von einer geringen Besorgnis auszugehen.

Einziger offener kritischer Punkt ist die Frage nach dem Verhalten der separierten Primärpartikel, die bei der Herstellung (Rührbehälterreinigung etc.) sowie durch Verschleppen in die Reinigungsbädern freigesetzt werden können, wobei das

⁵⁶ Quelle: eigene Darstellung

Unternehmen davon ausgeht, dass diese sehr schnell agglomerieren. Außerdem ist deren Mengenrelevanz derzeitig eher als sehr gering einzuschätzen.

4.4.9 Fazit

Das neue OM Nanofinish-Verfahren ist gekennzeichnet durch eine Kombination aus neuer Materialfunktionalität (organisches Metall) und deren Nanoskaligkeit. OM Nanofinish als innovatives Verfahren zur Herstellung lötfähiger Endoberflächen auf Leiterplatten besitzt dadurch ein überaus hohes Entlastungspotenzial für die Umwelt gegenüber den qualitativ gleichwertigen konventionellen Verfahren, insbesondere gegenüber den ENIG-, HASL- und Immersion-Verfahren. Die auf vergleichsweise guter Datenbasis erfolgte ökobilanzielle Analyse verdeutlicht sehr anschaulich, dass OM Nanofinish gegenüber den HASL- und Immersion-Verfahren in allen Umweltwirkungskategorien um Faktoren zwischen 4 und 20 besser abschneidet, gegenüber dem ENIG-Verfahren liegt der Faktor immer im dreistelligen Bereich, beispielsweise beim Treibhauspotenzial bei 390.

Die Ökobilanzdaten der OSP-Verfahren liegen dagegen im gleichen Größenordnungsbereich wie das OM Nanofinish, wobei deren Anwendungsfelder nicht in hochwertigen, sondern eher in Massenmärkten liegen und daher qualitativ nur bedingt mit dem OM Nanofinish-Verfahren gleichzusetzen sind.

Der Einfluss der im Verfahren eingesetzten chemischen Hilfs- und Betriebsstoffe auf die gesamte Ökobilanz des OM Nanofinish-Verfahrens ist beträchtlich und auf keinen Fall zu vernachlässigen. Die Werte für die einzelnen Umweltwirkungskategorien erhöhen sich gegenüber der Ursprungsversion jeweils etwa um 70% bzw. 50%. Da dies aber für alle Verfahren in vergleichbarer Weise gilt, ändert sich nichts an der besseren Umweltverträglichkeit des OM Nanofinish-Verfahrens im Vergleich zu den bisher eingesetzten Verfahren.

Außerdem kann entsprechend der durchgeführten Besorgnisanalyse nach vorhandenem Wissensstand zu nanopartikulärem Polyanilin im beschriebenen Anwendungskontext (Endoberfläche für Leiterplatten) aus unserer Sicht von einer geringen Besorgnis ausgegangen werden.

4.5 Fallstudie 2:

Anwendung von mehrwandigen Kohlenstoffnanoröhren für leitfähige Folien in der Halbleiterindustrie

Kohlenstoffnanoröhren (CNT) verfügen über extrem hohe Festigkeiten und Steifigkeiten, leiten Wärme besser als Diamant und sind je nach spezifischer Struktur (Konfiguration der C-Atomnetze) elektrische Halbleiter oder Leiter. Vor über 15 Jahren wurden Kohlenstoffnanoröhren entdeckt und synthetisiert und erwiesen sich seitdem als Multitalente, die ungezählte Einsatzgebiete erobern könnten, wenn ihre Herstellung nicht so kostenintensiv wäre und es gesundheitliche Risiken zu beachten gäbe. Mit dem Einsatz von CNT werden große Erwartungen verbunden. Potenziale zu Umweltentlastungen sind insbesondere bei Anwendungen mit einer stark erhöhten Ressourceneffizienz vorstellbar. Zukünftige Anwendungsfelder von CNT werden u.a. im Bereich neuartiger ultrastabiler Leichtbaukonstruktionswerkstoffe gesehen bspw. in der Verwendung von CNT in Flügeln für Windkraftanlagen. Über die erwartbare höhere Energieeffizienz der Windkraftanlage wäre der Umweltnutzen besonders hoch.

Da das Wissen über die Umweltwirkungen von CNT noch sehr gering ist, die Produktion derzeit eher noch im Labor- und Technikumsmaßstab erfolgt und für derartige zukunftssträchtige Anwendungen noch große Herausforderungen in der Materialforschung zu bewältigen sind, wurde als Fallstudie mit CNT-Einsatz eine schon vorhandene industrielle Anwendung vertiefend untersucht. Ein Ziel bestand dabei u. a. darin, die bestehenden Wissenslücken zu Ökobilanzdaten von CNT zu schließen. Auf der Grundlage dieser Daten können dann auch in Zukunft Anwendungen mit weitreichenderen Umweltentlastungen betrachtet werden.

Die Fallstudie untersucht mögliche Potenziale zur Umweltentlastung durch den Einsatz von CNT genauer mehrwandigen Kohlenstoffnanoröhren (MWCNT) des Typs Baytubes® in leitfähigen Folien, die für die Verpackung von elektronischen Bauteilen Verwendung finden.

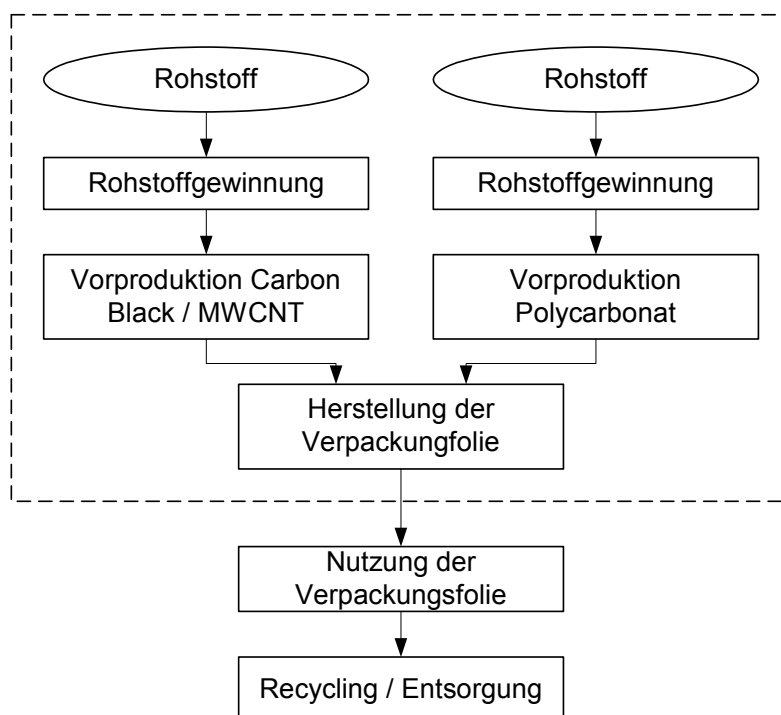
4.5.1 Untersuchungsgegenstand und Untersuchungsrahmen für die ökobilanziellen Betrachtungen

Untersuchungsgegenstand ist die Herstellung von leitfähigen Folien. Bisher wird zur Verpackung von elektronischen Bauteilen eine leitfähige Folie auf Basis Polycarbonat mit dem Additiv Carbon Black eingesetzt. Durch den Einsatz von MWCNT gelang es

nun, die gleiche Funktionalität der Folie zu erreichen, aber mit bedeutend geringerem Additivanteil. Ein weiterer Vorteil der neuartigen Folie besteht darin, dass zur Erreichung der gleichen Funktionalität eine geringere Foliendicke ausreicht. Als funktionelle Einheit wird für die konventionelle Folie die Herstellung von 1000 kg Folie betrachtet. Unter Beachtung der funktionellen Äquivalenz beträgt die betrachtete Menge für die neue Folie nur 800 kg.

Der Bilanzraum umfasst die Lebenswegstufen von der Rohstoffgewinnung über die Grundstoffherstellung bis zur Folienherstellung. Die Nutzungsphase sowie die Phase der Entsorgung bzw. des Recycling wurden in dieser Fallstudie nicht näher untersucht, da man davon ausgehen kann, dass sich diese Lebenszyklusphasen nicht signifikant unterscheiden. Mögliche Risiken durch den Einsatz von CNT insbesondere der Aspekt „Verhalten von CNT in der Müllverbrennung“ werden qualitativ im Kap. 4.5.5 diskutiert.

Abbildung 20: Systemgrenzen für die vergleichende Ökobilanz⁵⁷



⁵⁷ Quelle: eigene Darstellung

In der folgenden Tabelle sind die abgeleiteten Randparameter für den bilanziellen Vergleich dargestellt.

Tabelle 9: Randparameter für den bilanziellen Vergleich

	Folie Alt mit Carbon Black	Folie Neu mit MWCNT-
Hauptbestandteil	Polycarbonat, 85% Massenanteil	Polycarbonat, 97% Massenanteil
Additiv zur Gewährleistung der gleichen Leitfähigkeit	Carbon Black, 15% Massenanteil	MWCNT, 3% Massenanteil
Notwendige Foliendicke	100%	Verringerte Foliendicke, 80%
Verfahrenstechnik zur Folienherstellung	Tiefziehen	Tiefziehen
Funktionelle Einheit	1000kg	800kg

Die Modellierung der Stoff- und Energieströme erfolgte mit Hilfe der Ökobilanzsoftware Umberto. Im Anhang 4 sind die beiden realisierten Bilanzierungsflussbilder dargestellt. Für die Materialien Polycarbonat und Carbon Black sowie für den Folientiefziehprozess wurden Stoffdaten aus der Stoffdatenbank Ecoinvent (2007) genutzt. Die Ermittlung der Stoff- und Energiestromdaten für die Herstellung von MWCNT erfolgte in enger Kooperation mit der Bayer MaterialScience AG.

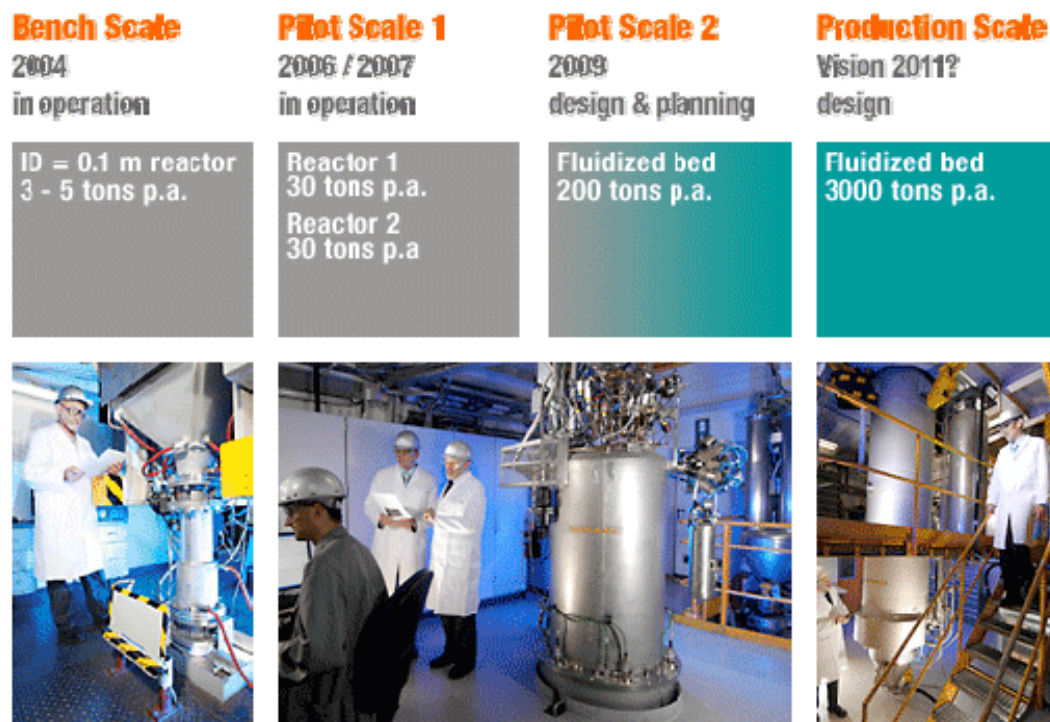
4.5.2 Modellierung des Herstellungsprozesses von MWCNT

Weltweit haben sich vor allem drei Syntheseverfahren zur Herstellung von CNT mit unterschiedlichen Varianten etabliert; die Lichtbogenentladung (arc-discharge), die Laserverdampfung (laser-ablation) sowie die chemische Gasphasen-Abscheidung (chemical vapor deposition, CVD). Bei den beiden Verfahren Lichtbogenentladung und Laserverdampfung wird als Rohstoffquelle Graphit verwendet, welches in der Reaktionskammer mittels Lichtbogen bzw. Laser verdampft wird. Beide Verfahren zeichnen sich durch einen hohen Energiebedarf aus (vgl. auch aufgeführte Tab. 12).

Die Bayer MaterialScience AG fokussiert in ihrer Entwicklungsstrategie für die Herstellung von MWCNT (Baytubes®) auf das dritte Verfahren in einer speziellen Form, auf die katalytische chemische Gasphasen-Abscheidung (CCVD) in einer Wirbelschicht. Ein großer Vorteil dieser Anlagenkonzeption ist es, dass eine Maßstabsvergrößerung (Up-Scaling) und somit eine kostengünstigere Produktion unter

größtechnischen Produktionsbedingungen möglich erscheint, was die geplanten Entwicklungsschritte (Abb. 21) auch verdeutlichen.

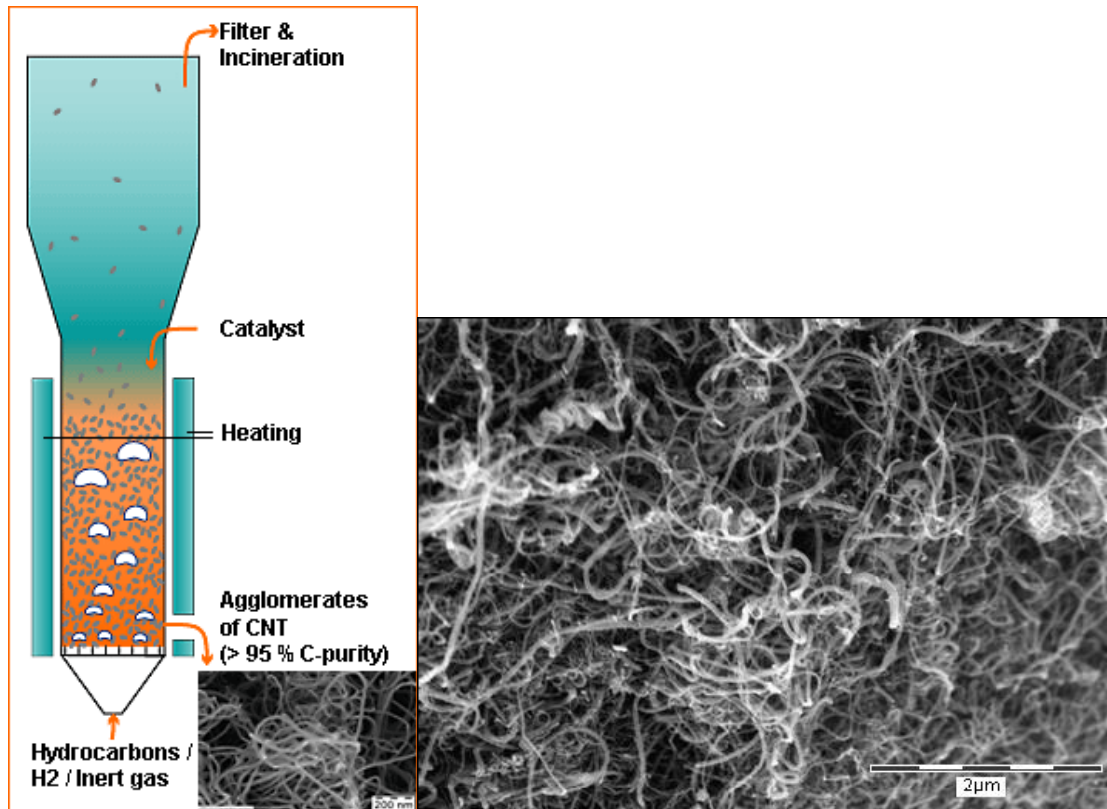
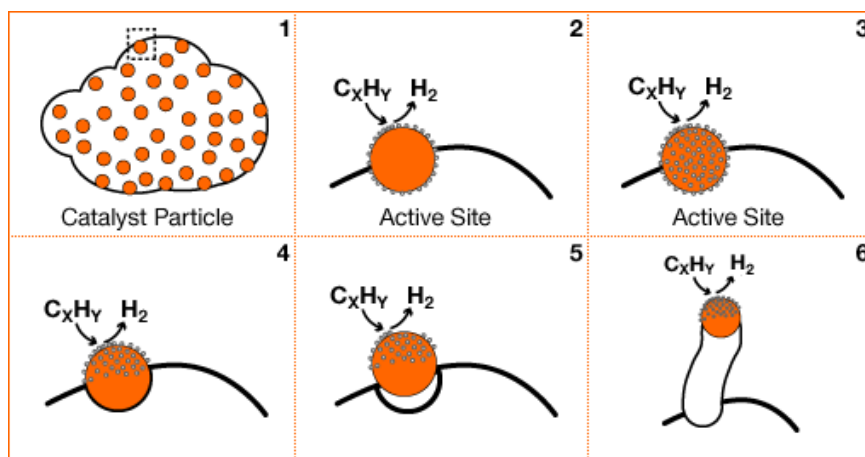
Abbildung 21: Maßstabsvergrößerung (Up-Scaling) des Baytubes® - Herstellungsverfahrens⁵⁸



Insgesamt verfügt Bayer MaterialScience in Laufenburg/Baden derzeit über zwei Pilotanlagen mit einer Jahreskapazität von 60 t Baytubes® und ist damit einer der weltweit führenden Hersteller von Kohlenstoff-Nanoröhrchen (vgl. Bayer 2007c). In der Mitte der Abbildung 21 ist die Leitwarte der neuen Produktionsanlage mit dem Kopf des Wirbelschichtreaktors dargestellt.

Die folgenden Abbildungen 22 und 23 stellen einerseits das Anlagenschema zur Erzeugung von MWCNT dar sowie andererseits den Wachstumsmechanismus der MWCNT.

⁵⁸ Quelle: Bayer (2008a)

Abbildung 22: Anlagenschema zur Herstellung von Baytubes^{®59}Abbildung 23: Mechanismus des Wachstums mit Hilfe von Metalkatalysatoren⁶⁰⁵⁹ Quelle: Bayer (2008a)⁶⁰ Quelle: Bayer (2008a)

Das von unten in den Reaktor eingeleitete kohlenstoffhaltige Gas durchströmt die Wirbelschicht. Das Wachstum der Kohlenstoffnanoröhrchen erfolgt dann nach der Zersetzung von Kohlenwasserstoffen an einem heterogenen Katalysator, wobei der Reaktor im Batch-Verfahren oder auch kontinuierlich betrieben werden kann. Der Reaktor wird von außen beheizt, wobei die bevorzugte Zersetzungstemperatur im Bereich von 550°C bis 750°C liegt. Im kontinuierlichen Betrieb erfolgt der Austrag der MWCNT über geeigneten Sichertervorrichtungen.

Entsprechend dem Reinheitsgrad bietet die Bayer MaterialScience AG derzeit zwei Baytubes®-Produkte an; das C 150 P mit einem C-Reinheitsgrad >95% sowie das C150 HP mit einem C-Reinheitsgrad >99% (vgl. Bayer 2007a und 2007b).

Tabelle 10: Produktspezifikation von Baytubes® C 150 HP⁶¹

Eigenschaft	Wert	Einheit	Nachweismethode
Reinheitsgrad	> 99	%	Elementaranalyse
Freier amorpher Kohlenstoff	nicht nachweisbar	%	Transmissionselektronenmikroskop (TEM)
Wandanzahl	3-15	-	TEM
Durchschnittlicher Außerdurchmesser	13-16	nm	TEM
Mittlere Streuung	5-20	nm	TEM
Durchschnittlicher Innendurchmesser	4	nm	TEM
Mittlere Streuung	2-6	nm	TEM
Länge	1 - >10	µm	Rasterelektronenmikroskop
Schüttdichte	140-230	kg/m ³	EN ISO 60

Zur Modellierung des Herstellungsprozesses von MWCNT (Baytubes®) konnte zusätzlich zu eigenen Recherchen dankenswerter Weise auf Angaben der Bayer MaterialScience AG zurückgegriffen werden. Auf Basis der beiden Informationsquellen wurden dann folgende Annahmen für die MWCNT-Herstellung abgeleitet.

Es können verschiedene Kohlenwasserstoffe eingesetzt werden (meist gasförmig, z.B. CH₄, C₂H₄, C₂H₆, C₆H₆, ...). In der Fallstudie wird als repräsentativer Kohlenwasserstoff Ethylen gewählt; als weitere zuzuführende gasförmige Edukte für die Herstellung werden die Gase Stickstoff und Wasserstoff berücksichtigt.

⁶¹ Quelle: Bayer (2007b)

Annahme zur Zusammensetzung des Gasgemisches: 40 Vol.-% Ethylen, 40 Vol.-% Wasserstoff und 20 Vol.-% Stickstoff.

Nach Angaben der Bayer MaterialScience AG werden üblicherweise 40-90% des Kohlenstoffes in CNT umgewandelt. Für die Szenarien der Fallstudie wird ein Wirkungsgrad von 65 % unterstellt; beim Szenario „Neu Optimum“ ein Wirkungsgrad von 90 %.

Aus diesen Annahmen ergeben sich folgende Ableitungen für die benötigten Gasgemischmengen.

Tabelle 11: Berechnung der Gasgemischmengen⁶²

Gasgemischbestandteile	Dichte	Volumenanteil	Masseanteil
C ₂ H ₄	1,178 kg/m ³	40%	0,471 kg/m ³
davon C			0,404 kg/m ³
H ₂	0,09 kg/m ³	40%	0,036 kg/m ³
N ₂	1,2506 kg/m ³	20%	0,250 kg/m ³
Gesamt			0,757 kg/m ³
Kohlenstoffanteil am Gasgemisch		Masseanteil 53,33%	0,404kg/m ³

Ausbeute	65%	
Kohlenstoff zu MWCNT aus 1 m ³ Gasgemisch		0,263 kg/m ³
Gasgemischmenge zur Herstellung von 1 kg MWCNT		2,885 kg

Ausbeute	90%	
Kohlenstoff zu MWCNT aus 1 m ³ Gasgemisch		0,36 kg/m ³
Gasgemischmenge zur Herstellung von 1 kg MWCNT		2,083 kg

Als Katalysator wird nach Angaben der Bayer MaterialScience AG ein Gemisch aus Trägermaterialien und Metallen eingesetzt. In der Fallstudie wird folgende Zusammensetzung des Katalysators unterstellt: Mangan (37 Gew.-%) und Kobalt (43 Gew.-%) sowie die Trägermaterialien Magnesiumoxid (10 Gew.-%) und Aluminiumoxid (10 Gew.-%). Außerdem werden nach Angaben der Bayer MaterialScience AG üblicherweise 5-25 g MWCNT auf Basis von 1 g Katalysator hergestellt. Der Katalysator wird mit dem Produkt ausgetragen. Für die Szenarien wird ein Verbrauchsverhältnis von 1:15 unterstellt.

Um den Einfluss des Katalysators auf die Gesamtökobilanz genauer zu bestimmen, werden Sensibilitätsbetrachtungen durchgeführt. Einerseits wird der Einfluss einer geänderter Katalysatorzusammensetzung untersucht, wobei zusätzlich noch Molybdän mit 10 Gew.-% bei entsprechender Verringerung der Mangan- und Kobaltanteile berücksichtigt wird (Szenario „Neu Kat Mol“). Andererseits erfolgt eine Berechnung unter Effizienzgesichtspunkten, d.h. statt einem Verbrauchsverhältnis von 1:15 wird in dem Szenario „Neu Optimum“ ein Verbrauchsverhältnis von 1:25 unterstellt.

Ausgangspunkt einer Abschätzung für den Energieverbrauch beim Herstellungsprozess war die Veröffentlichung von Sandén und Kushnir (2007), speziell die oberste Zeile der Tabelle. Diese kumulierten Energieverbrauchswerte stellten Anhaltspunkte für die Richtigkeit der benutzten und berechneten Energieverbrauchswerte in der Technikumsanlage der Bayer AG für die Szenarien dar.

Tabelle 12: Kumulierter Energieaufwand (KEA) von Verfahren zur Herstellung von Kohlenstoffnanopartikeln⁶³

Herstellungsverfahren	Produkt	Basisvariante		Effizienzvariante	
		Thermische Energie (MJth/kg)	Elektrische Energie (MJe/kg)	Thermische Energie (MJth/kg)	Elektrische Energie (MJe/kg)
Wirbelschicht (Fluidized Bed) CVD	SWNT	328	626	93	220
Floating Catalyst CVD	MWNT	295	187	331	74
HiPco (High Pressure CO Conversion)	SWNT	47	5769	-	-
Pyrolyse	C60	6341	678	5412	538
Laserverdampfung (Electric Arc)	MWNT	295	2170	75	2170
Lichtbogenentladung (Laser Ablation)	SWNT	211	9424	61	1600
Solarschmelzofen (Solar Furnace)	SWNT	292	(6200)+150	72	(6200) +150

Es kann davon ausgegangen werden, dass die thermischen Energieanteile (als Primärenergieäquivalente) durch das Gasgemisch in den Produktionsprozess gelangen, d.h. über den jeweiligen Heizwert der Edukte (z.B. Ethylen und Wasserstoff).

⁶² Quelle: eigene Berechnungen

Die Zerfallsreaktion von Ethylen zu MWCNT und Wasserstoff ist eine exotherme Reaktion, in der die Energiemenge von 8733 kJ/kg Ethylen (Reaktion zu ‚Ruß‘ und Wasserstoff) freigesetzt wird.

Nach Angaben der Bayer MaterialScience AG liegt der realistische elektrische Energieaufwand für die Technikumsanlage bei etwa 2 kWh Elektroenergie/kg MWCNT. Für das Szenarium „Neu Groß Zukunft“ (d.h. Herstellung von MWCNT in einer technischen Großanlage) kann nach Aussagen des Unternehmens mit einem mindestens um den Faktor 3 verringerten Elektroenergie-Verbrauch aufgrund von Effizienzsteigerungen im Zuge des Scaling-Up-Prozesses gerechnet werden, da sich durch Anlagenvergrößerung das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis verkleinert und damit geringere thermische Verluste anfallen.

Auf Grundlage dieser Annahmen ergeben sich aus der Bilanzierung für verschiedene Varianten folgende Primärenergieverbräuche für die Herstellung von jeweils 1kg Baytubes® im Vergleich zum konventionellen Carbon Black.

Tabelle 13: Spezifischer Primärenergieverbrauch (MJ-Äq./kg)⁶⁴

Material		
Carbon Black	86,93	MJ-Äq./kg
CNT Neu (Ausbeute: 65%; Elektroenergieverbrauch: 2 kWh; Verbrauchsverhältnis Katalysator: 1:15)	165,46	MJ-Äq./kg
CNT Neu Optimum (Ausbeute: 90%; Elektroenergieverbrauch: 2 kWh; Verbrauchsverhältnis Katalysator: 1:25)	125,01	MJ-Äq./kg
CNT Neu Groß Zukunft (Ausbeute: 90%, Elektroenergieverbrauch: 0,67 kWh; Verbrauchsverhältnis Katalysator: 1:25)	110,29	MJ-Äq./kg

Der spezifische Primärenergieverbrauch der derzeitigen Technikumsanlage zur Herstellung von MWCNT liegt um 50% höher als der erwartete Verbrauch einer zukünftigen technischen Großanlage.

Die Primärenergieverbräuche für die einzelnen MWCNT-Varianten lassen sich entsprechend der einzelnen Bilanzmodule differenziert auswerten (der vorhandene Datensatz für Carbon Black lässt eine derartige differenzierte Auswertung leider nicht

⁶³ Quelle: Sandén und Kushnir (2007)

⁶⁴ Quelle: Ecoinvent (2007), Bayer (2008b) und eigene Berechnungen

zu)(vgl. Tab. 14). Ersichtlich wird, dass das Ethylen als Kohlenstofflieferant für die MWCNT den größten Anteil am Primärenergieverbrauch besitzt. Je nach Variante beträgt der Anteil zwischen 69% und 79%. Der Anteil der elektrischen Prozessenergie für die Herstellung der MWCNT im Reaktor am Gesamtprimärenergieverbrauch ist bedeutend geringer. Für die erste Variante mit einem angenommenen Prozesswirkungsgrad von 65% beträgt der Anteil ca. 13%, in der Variante Zukunft, die sich durch eine höhere Katalysatorleistung sowie durch einen Prozesswirkungsgrad von 90% auszeichnet, dann nur noch knapp 7%. Der Anteil der beiden anderen Gasgemischbestandteile liegt zwischen 10,6% und 12%. Besonders interessant ist, dass der Einfluss des Katalysators auf den Gesamtenergieverbrauch sehr gering ist; der summarische Anteil der vier berücksichtigten Katalysatorbestandteile liegt immer unter 3%.

Tabelle 14: Differenzierte Darstellung der Anteile der bilanzierten Module am Primärenergieverbrauch zur Herstellung von Baytubes® (MJ-Äq./kg)⁶⁵

	MWCNT Neu		MWCNT Neu Optimum		MWCNT Neu Groß Zukunft	
Bilanzmodul	Primärenergieäquivalent					
Gesamt	165,46	MJ-Äq./kg	125,01	MJ-Äq./kg	110,29	MJ-Äq./kg
Anteil Elektroenergie für CNT-Herstellung	22,09	MJ-Äq./kg	22,09	MJ-Äq./kg	7,36	MJ-Äq./kg
Anteil durch Ethylen	120,18	MJ-Äq./kg	86,77	MJ-Äq./kg	86,77	MJ-Äq./kg
Anteil durchWasserstoff	9,58	MJ-Äq./kg	6,92	MJ-Äq./kg	6,92	MJ-Äq./kg
Anteil durch Stickstoff	8,76	MJ-Äq./kg	6,32	MJ-Äq./kg	6,32	MJ-Äq./kg
Anteil durch Katalysatorbestandteil Aluminiumoxid	0,12	MJ-Äq./kg	0,07	MJ-Äq./kg	0,07	MJ-Äq./kg
Anteil durch Katalysatorbestandteil Magnesiumoxid	0,02	MJ-Äq./kg	0,01	MJ-Äq./kg	0,01	MJ-Äq./kg
Anteil durch Katalysatorbestandteil Mangan	1,39	MJ-Äq./kg	0,84	MJ-Äq./kg	0,84	MJ-Äq./kg
Anteil durch Katalysatorbestandteil Kobalt	3,32	MJ-Äq./kg	1,99	MJ-Äq./kg	1,99	MJ-Äq./kg

4.5.3 MWCNT-Variantenbetrachtungen

Aus den unterschiedlichen Annahmen wurden nun verschiedene Herstellungsszenarien von in leitfähigen Folien einsetzbaren MWCNT (z.B.

Baytubes[®]) betrachtet. Die Variantenbetrachtungen stellen Sensibilitätsbetrachtungen dar, um Einflüsse auf die Ökobilanzergebnisse durch unterschiedliche Ausbeuten, Elektroenergieverbräuche und Katalysatoren zu bestimmen. Außerdem wird in dem Szenario Mateff der Einfluss der verringerten Folienmenge zur Erreichung der gleichen Funktionalität untersucht, indem dort als Vergleichswert nicht 800 kg wie bei allen MWCNT verstärkten Folien sondern wie im Carbon Black basierten Szenario Alt 1000 kg eingesetzt werden.

Tabelle 15: Betrachtete Szenarienvarianten mit Baytubes^{®66}

Szenario	Funktio- -nelle Einheit	Aus- beute	Gasgemisch- menge	Elektro- energie- Verbrauch	Verbrauchs- verhältnis Katalysator	Katalysator- zusammensetzung
Neu Gleiche Menge	1000 kg	65%	2,885 kg Gas- gemisch /kg	2 kWh/kg	01:15	Mangan (37 Gew.-%), Kobalt (43 Gew.-%), MgO (10 Gew.-%), Al ₂ O ₃ (10 Gew.-%)
Neu	800 kg	65%	2,885 kg Gas- gemisch /kg	2 kWh/kg	01:15	Mangan (37 Gew.-%), Kobalt (43 Gew.-%), MgO (10 Gew.-%), Al ₂ O ₃ (10 Gew.-%)
Neu Kat Mol	800 kg	65%	2,885 kg Gas- gemisch /kg	2 kWh/kg	01:15	Mangan (32 Gew.-%), Kobalt (38 Gew.-%), Molybdän (10 Gew.-%), MgO (10 Gew.-%), Al ₂ O ₃ (10 Gew.-%)
Neu Optimum	800 kg	90%	2,083 kg Gas- gemisch /kg	2 kWh/kg	01:25	Mangan (37 Gew.-%), Kobalt (43 Gew.-%), MgO (10 Gew.-%), Al ₂ O ₃ (10 Gew.-%)
Neu Groß Zukunft	800 kg	90%	2,083 kg Gas- gemisch /kg	0,667 kWh/kg	01:25	Mangan (37 Gew.-%), Kobalt (43 Gew.-%), MgO (10 Gew.-%), Al ₂ O ₃ (10 Gew.-%)

Für alle aufgeführten Stoffe wurden Ökobilanzdaten aus der Stoffdatenbank Ecoinvent (2007) zur Bilanzierung der jeweiligen Vorketten eingesetzt, wobei die Aufwendungen für die Herstellung des Gasgemisches sowie des Katalysators auf Grund fehlender Informationen nicht berücksichtigt werden konnten.

⁶⁵ Quelle: eigene Berechnungen (Datenbasis: eigen, Ecoinvent 2007, Bayer 2008b)

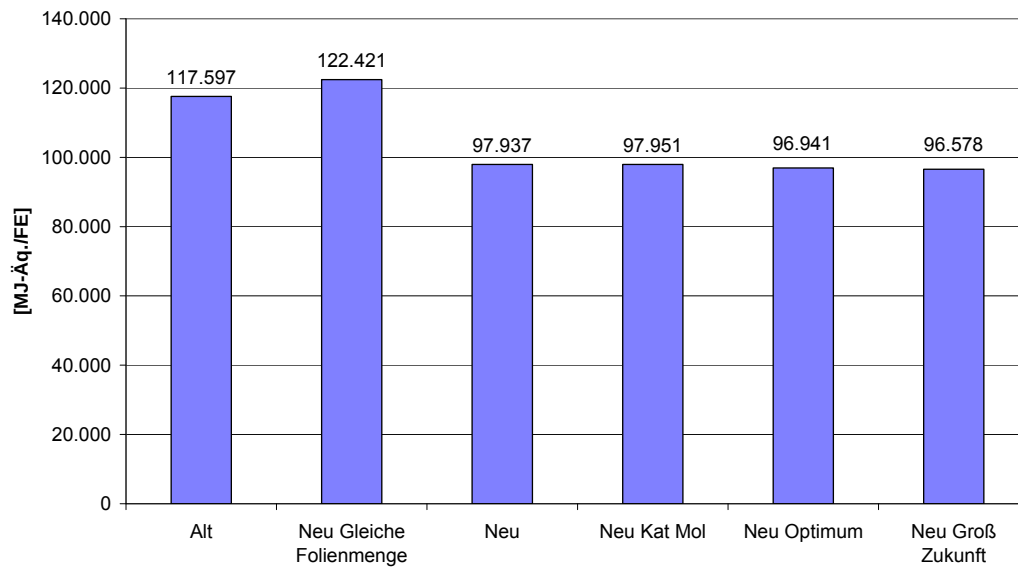
4.5.4 Wirkungsabschätzung und ausgewählte Auswertungen der Ökobilanzierungen

Aus den Ökobilanzberechnungen ergeben sich beispielhaft folgende Ergebnisse für ausgewählte Sachbilanzdaten und Umweltwirkungskategorien nach CML 2001.

Allgemein kann man feststellen, dass sich durchweg eine Reduktion der Umweltwirkungen abzeichnet. Das Polycarbonat als Hauptbestandteil der Folie bestimmt die meisten Umweltwirkungen so stark, dass die Unterschiede bei der Herstellung von MWCNT in den einzelnen Szenarien nicht zu Buche schlagen. Auch der Einfluss von unterschiedlichen Katalysatoren ist so gut wie nicht erkennbar. Die Optimum-Variante mit ihren als optimal unterstellten Herstellungsbedingungen sowie die Zukunfts-Variante führen zu weiteren kleinen Verbesserungen. Der größte Einfluss ergibt sich allerdings durch die Erhöhung der Materialeffizienz; also dadurch, dass statt 1000 kg „alter“ Folie jetzt nur noch 800 kg „neuer“ Folie benötigt werden.

Beim Energieverbrauch ist ersichtlich, dass die betrachteten Neu-Varianten mit der funktionellen Einheit (FE) auf Basis von 800 kg Folie gegenüber der alten Folie mit 1000 kg ca. 17% weniger Energie benötigen. Während sich der Energieverbrauch bei der alten Folie aus den Anteilen Polycarbonat-Vorkette (80%), Carbon Black-Vorkette (11%) und Folienherstellungsprozess (9%) zusammensetzt, beträgt der Anteil der Polycarbonat-Vorkette bei der neuen Folie 87-88% am Gesamtenergieverbrauch. Der Anteil des Folienherstellungsprozesses beträgt ebenfalls knapp 9%. Die restlichen prozentualen Anteile entfallen dann auf die MWCNT-Vorkette, wobei dort wiederum der größte Anteil auf das benötigte Ethylen für das Gasgemisch mit 3% bzw. 2,2% entfällt. Der energetische Aufwand für den Katalysator sowie für den reinen CVD-Herstellungsprozess der MWCNT ist dagegen sehr gering.

⁶⁶ Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 24: Verbrauch Energieressourcen⁶⁷**Tabelle 16: Anteil einzelner Verfahrensschritte am Primärenergieverbrauch in (MJ-Äq./FE) für die betrachteten Varianten⁶⁸**

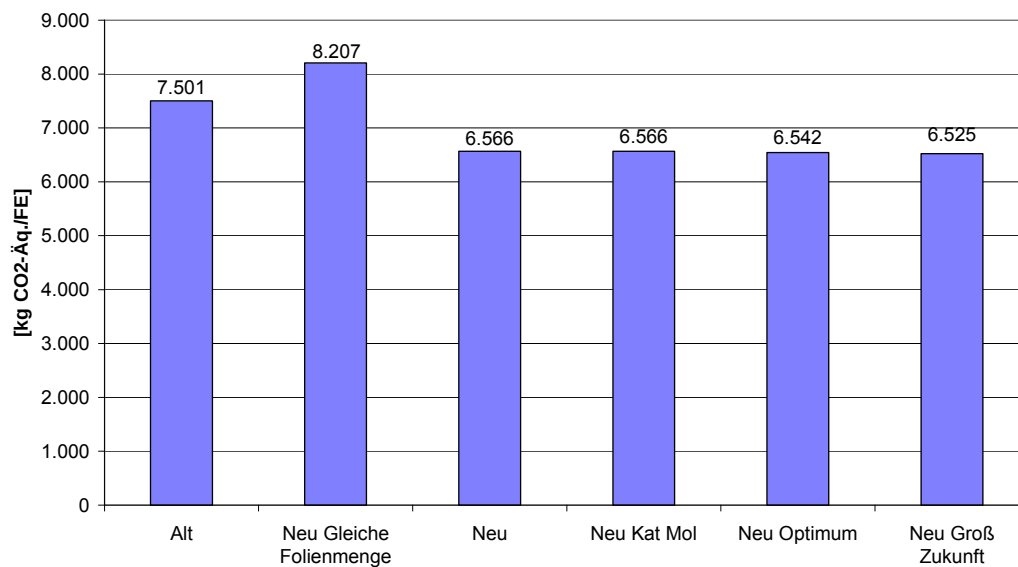
	Alt	Neu Gleiche Folien- menge	Neu	Neu Kat Mol	Neu Optimum	Neu Groß Zukunft
Polycarbonat, Herstellung	93.570,48	106.731,08	85.384,87	85.384,87	85.384,87	85.384,87
Carbon Black, Herstellung	13.373,75					
MWCNT, Herstellung Anteil Gasgemisch		4.261,86	3.409,49	3.409,57	2.461,68	2.461,68
MWCNT, Herstellung Anteil Katalysator		149,43	119,54	133,53	71,73	71,73
MWCNT, Herstellung Anteil Energie		674,75	539,80	539,80	539,79	179,93
Verpackungsfolie, Herstellung	10.652,83	10.603,53	8.482,83	8.482,83	8.482,83	8.480,27
Gesamt	117.597,06	122.420,65	97.936,52	97.950,59	96.940,90	96.578,48

⁶⁷ Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Ecoinvent 2007, Bayer 2008b)

⁶⁸ Quelle: eigene Berechnungen (Datenbasis: eigen, Ecoinvent 2007, Bayer 2008b)

Beim Treibhauspotenzial zeigt sich ein ähnliches Bild, wobei aber nur eine Verbesserung von 12,5-13% gegenüber der alten Folie erreicht wird. Die Ursache dafür liegt darin, dass der spezifische Beitrag durch das Polycarbonat bei der neuen Folie auf Grund des geringeren Anteils an MWCNT im Vergleich zum Anteil des Carbon Black in der alten Folie höher ausfällt. Im Anhang 4 (Tab. 31) sind exemplarisch für diese Umweltwirkungskategorie die Beiträge der einzelnen Prozessschritte differenziert dargestellt.

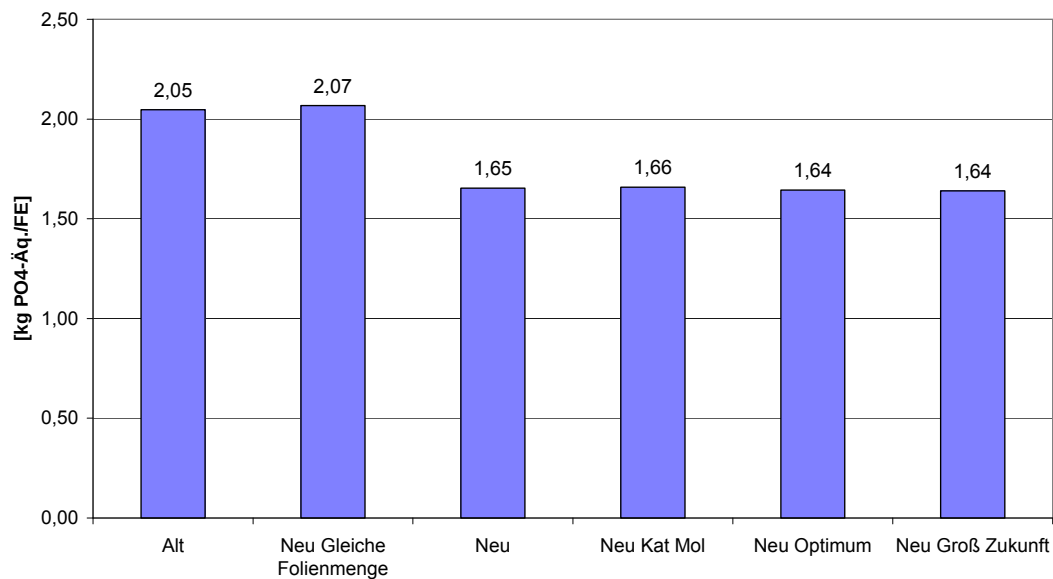
Abbildung 25: Treibhauspotenzial⁶⁹



⁶⁹ Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Ecoinvent 2007, Bayer 2008b)

Beim Überdüngungspotenzial ist ersichtlich, dass die betrachteten Neu-Varianten mit der funktionellen Einheit 800 kg gegenüber der alten Folie ca. 20% weniger Emissionen verursachen.

Abbildung 26: Überdüngungspotenzial, generisch⁷⁰

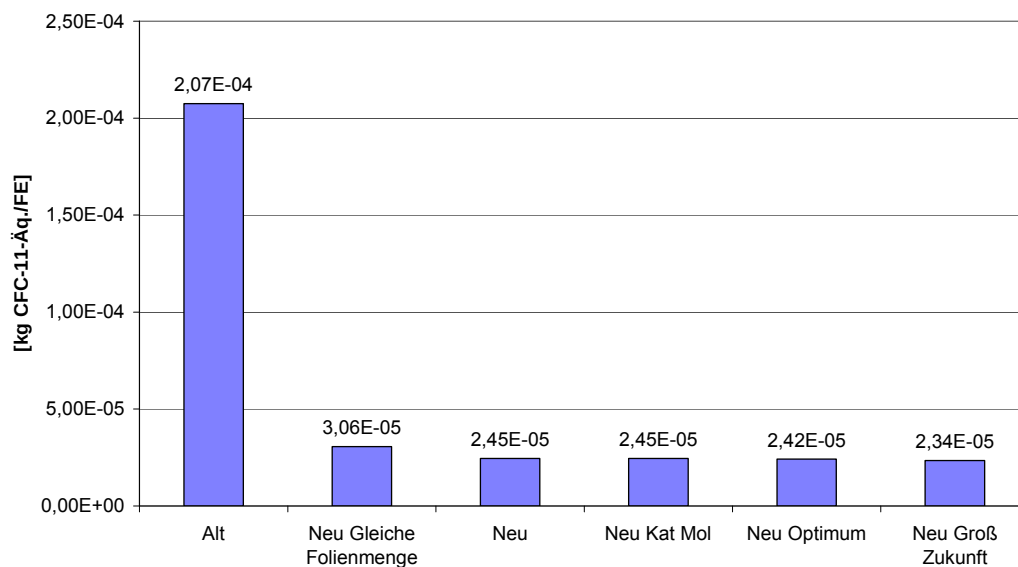


In ähnlicher Form verhalten sich auch die Ergebnisse bei den Umweltwirkungskategorien abiotischer Ressourcenverbrauch und Versauerungspotenzial, dargestellt im Anhang 4 (Abb. 59 und 60).

⁷⁰ Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Ecoinvent 2007, Bayer 2008b)

Bei der Umweltwirkungskategorie Stratosphärischer Ozonabbau zeigt sich hingegen ein anderes Bild. Hier schneiden alle MWCNT-Varianten um fast 90% besser ab als die bisherige Folie mit Carbon Black. Die Ursache liegt im Carbon Black-Herstellungsprozess begründet, da Emissionen dieses Prozesses⁷¹ zu 86% zur Umweltwirkung Ozonabbau beitragen. Im Gegensatz zu den anderen Umweltwirkungskategorien besitzt das im Endprodukt mengenmäßig überwiegende Polycarbonat bei dieser Umweltwirkung so gut wie keinen Einfluss.

Abbildung 27: Stratosphärischer Ozonabbau⁷²



4.5.5 Besorgnisanalyse für MWCNT

Im Rahmen der schon erwähnten Nanokommission wurde in der Arbeitsgruppe ‚Risiken und Sicherheitsforschung‘ auch eine vorläufige Gefährdungsbeschreibung für Mensch und Umwelt von elektrisch leitfähigen Folien über die verschiedenen Stufen

⁷¹ Entsprechend dem Dateninventar der Ecoinvent-Datenbank für den Herstellungsprozess liegt die Ursache an den spezifischen Emissionen von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) in Höhe von 1,00E-06 kg PAH/ kg Carbon Black.

⁷² Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Ecoinvent 2007, Bayer 2008b)

des Produktlebenszyklus erarbeitet, aus der im Folgenden einige Informationen übernommen werden.

Das Produktionsverfahren zur Herstellung von MWCNT erfolgt wie erwähnt in Wirbelschichtreaktoren, wobei der Prozess von der Eduktzuführung über die Abgasentsorgung (Verbrennung) bis zur Produktentnahme vollständig geschlossen abläuft, da der Sauerstoffeintrag insbesondere aus Explosionsschutzgründen vermieden werden muss.

Die Produktion der Folie erfolgt nach Angaben der Bayer MaterialScience AG in mehreren Teilschritten. Zunächst wird ein sogenannter Masterbatch⁷³ aus Polycarbonat und MWCNT hergestellt. Hierzu wird unbehandeltes Polycarbonatgranulat mit MWCNT gemischt, anschließend in einem Extruder aufgeschmolzen und dann granuliert. Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, das Additiv in das Polymer einzuarbeiten und einen polymergebundenen Zusatzstoff zu erzeugen. Dabei können MWCNTs in die Atmosphäre gelangen, wenn keine Vorsorgemaßnahmen getroffen werden. Etwaige Verschüttungen sind sehr lokal und können ohne Probleme unter Beachtung von entsprechenden Arbeitsschutzaspekten beseitigt werden, so dass ein Eintrag in die Geosphäre nicht zu erwarten ist. Ein Eintrag in die Hydrosphäre ist auch äußerst unwahrscheinlich, da Wasser nur in Kühlungsaggregaten des Extruders vorhanden ist und separat entsorgt werden kann. Eine Exposition von Beschäftigten gegenüber luftgetragenen MWCNTs ist bei der Beschickung des Extruders möglich, wobei durch geeignete Absaugvorrichtungen diese Exposition unterbunden werden kann. Eine dermale Exposition gegenüber MWCNTs besteht beim Entfernen von Verschüttungen, wenn geeignete persönliche Schutzmaßnahmen nicht zum Einsatz kommen.

Das Masterbatch wird in Form von Granulat erhalten und dann in einem zweiten Arbeitsschritt auf einer Extrudermaschine zusammen mit dem verdünnenden Polycarbonat zu Folie verarbeitet. Anfallende Schnittreste werden sofort wieder recycelt. Bei allen Verfahrensschritten ist kein Wasser involviert und die MWCNT

⁷³ Unter Masterbatch versteht man Kunststoffadditive in Form von Granulaten mit Gehalten an Farbstoffen und/oder Additiven, die höher sind als in der Endanwendung. Sie werden dem natürlichen Kunststoff (Rohpolymer) zur Veränderung der Eigenschaften beigemischt.

befinden sich eingeschlossen im Polymer. Bei der Extrusion, Umformung und Anwendung der Folie ist eine luftgetragene Exposition von MWCNTs nicht gegeben, da diese in der Kunststoffmatrix eingebunden sind. Eine dermale Aufnahme von MWCNTs durch Hautkontakt mit der Folie ist aus dem gleichen Grund sehr unwahrscheinlich.

Nach Nutzung der Folie kann ein stoffliches Recycling des MWCNT zu verstärkten Thermoplasten erfolgen oder es erfolgt als eine wahrscheinliche Entsorgungsrouten die Verbrennung. Bei der Entsorgung durch Verbrennung ist davon auszugehen, dass durch die Kunststoffmatrix und die damit verbundenen Anforderungen an die Verbrennungstemperatur eine vollständige Verbrennung des Kohlenstoffs sichergestellt werden kann.

Die vorliegenden Studien geben kein einheitliches Bild zur Human- und Öko-Toxizität von CNTs. Sie weisen aber darauf hin, dass es eine kausale Beziehung zwischen der spezifischen Struktur (Morphologie und ggf. auch molekulare Konfiguration) von bestimmten CNTs und ihren potenziellen pathogenen Effekten besteht.

Da es sich um unlösliche Partikel handelt steht bei der Gefährdungsbeurteilung mit Blick auf den Menschen zunächst die Aufnahme über die Atemwege und damit die Wirkung auf den Atemtrakt im Vordergrund. Sind die CNTs in der Matrix fest gebundene Nanomaterialien, wie dies bei der betrachteten Folie der Fall ist, wird das Risiko einer Schädigung trotz potenzieller Gefährdung aufgrund inhärenter Stoffeigenschaften des „freien“ Nanomaterials als gering eingeschätzt, weil die Exposition gegenüber dem „freien“ Nanomaterial ausgeschlossen oder minimiert ist.

4.5.6 Fazit

Die Fallstudie untersucht mögliche Entlastungseffekte für die Umwelt durch den Einsatz von CNT, genauer MWCNT (bspw. Baytubes®) in leitfähigen Folien, die für die Verpackung von elektronischen Bauteilen Verwendung finden. Diese konkrete Produktanwendung ließ von vornherein nicht so große Ressourceneffizienzpotenziale erwarten wie bspw. erhoffte zukünftige Anwendungsfelder von CNT im Bereich neuartiger ultrastabiler Leichtbaukonstruktionswerkstoffe.

Durch die Zusammenarbeit mit der Fa. Bayer MaterialScience AG ist es gelungen, detailliert den Herstellungsprozess von MWCNT zu modellieren und spezifische Ökobilanzdaten zu generieren. Auf dieser Basis konnte ein ökobilanzieller Vergleich

mit der herkömmlichen Folie auf der Basis von Carbon Black vorgenommen werden. Zusätzlich konnten über Sensitivitätsanalysen mögliche Einflussparameter auf das Ergebnis vertiefend untersucht werden.

Über alle Umweltwirkungen hinweg lässt sich für die neue Folie mit MWCNT eine gewisse Reduktion feststellen, die je nach Umweltwirkung zwischen 12,5% beim Treibhauspotenzial und 20% beim Überdüngungspotenzial liegt. Das Polycarbonat als Hauptbestandteil der Folie bestimmt die meisten Umweltwirkungen sehr stark, so dass die Unterschiede bei der Herstellung von MWCNT in den einzelnen Szenarien nicht zu Buche schlagen. Der größte Einfluss ergibt sich somit durch die Erhöhung der Materialeffizienz; also dadurch, dass statt 1000 kg „alter“ Folie jetzt nur noch 800 kg „neuer“ Folie benötigt werden. Die untersuchte Optimum-Variante mit sehr optimalen unterstellten Herstellungsbedingungen der derzeitigen Anlage sowie die Zukunfts-Variante unter optimalen industriellen Herstellungsbedingungen von MWCNT führen noch einmal zu kleineren Verbesserungen.

In der Besorgnisanalyse sind zunächst einige Besorgnis erregende Hinweise auf bestimmte Eigenschaften von ‚freien‘ Carbon Nanotubes zu erwähnen. Nicht aggregierte bzw. agglomerierte MWCNTs sind vermutlich lungengängig, nicht löslich und können aufgrund ihrer ‚inerten‘ Kohlenstoffbasis vermutlich schlecht biologisch abgebaut werden. Auch ihre Morphologie gibt - in Analogie zu Asbest oder Holzstaub, die beide als krebserregend eingestuft sind – zur Besorgnis Anlass. Die Tatsache, dass die MWCNTs meist in vergleichsweise großen Agglomeraten (im Mikrometerbereich) vorliegen, relativiert diese Sorge, wird sie aber wohl nicht ganz eliminieren können.

Entscheidend ist allerdings die Frage ob, genauer wo im Produktlebenszyklus der leitenden Folien eine Exposition gegenüber ‚freien‘ CNTs überhaupt möglich ist. Dies erscheint allenfalls am Anfang (bei der Herstellung der MWCNTs und bei der Einarbeitung der MWCNTs in das Polymer im Rahmen der Compoundierung⁷⁴) und evtl. noch am Ende des Produktlebenszyklusses bei der Müllverbrennung möglich zu

⁷⁴ Compoundierung (aus dem engl. Compound = Mischung) ist ein Begriff aus der Kunststofftechnik und beschreibt den Veredelungsprozess von Kunststoffen durch Beimischung von Zuschlagstoffen (Füllstoffe, Additive, ...) zur gezielten Optimierung der Eigenschaftsprofile.

sein. Für Anwender und Verbraucher gibt es also kaum Anlass zur Besorgnis. Ein ganzheitlicher Abwägungsprozess zwischen den doch vergleichsweise geringen Vorteilen im Bereich der ökobilanziell erfassbaren Entlastungspotenzialen und den noch offenen Fragen im Bereich der Gefährdungsanalyse sollte in diesem Fall mit Blick auf Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsaspekte letztendlich zur Vorsicht gemahnen.

4.6 Fallstudie 3: Entlastungseffekte für die Umwelt durch Anwendung von Lithium-Ionen-Batterien als Energiespeicher im Bereich von Hybridantriebssystemen im ÖPNV⁷⁵

Alternative Antriebssysteme im Verkehrsbereich werden derzeit intensiv erforscht und erprobt, insbesondere mit Blick auf Treibstoffeinsparungen und eine bessere Umweltverträglichkeit. Ein großes Hemmnis für den Einsatz von Hybrid- und reinen Elektroantrieben ist der Mangel an geeigneten Lösungen für die Stromspeicherung. Die Entwicklung immer leistungsfähigerer Stromspeicher auf Basis von Lithium-Ionen-Batterien ist eine mögliche Antwort auf diese technische Herausforderung und Nanotechniken bieten hierfür einige interessante Ansatzpunkte.

Im Rahmen der Fallstudie erfolgt eine vergleichende Untersuchung von konventionellen Angeboten im ÖPNV und neuen Systemen mit Hybridantrieb, insbesondere in Hinblick auf erwartbare Umweltentlastungspotenziale durch nanotechnikbasierte Weiterentwicklungen von Lithium-Ionen-Batterien.

4.6.1 Klassifikation der Hybridantriebe und Beschreibung von für Europa relevanten Bussystemen

Zwei unterschiedliche Hybridantriebe sind derzeit in der Erprobung bzw. Weiterentwicklung, der parallele sowie der serielle Hybridantrieb.

1. Paralleler Hybridbus Urbino 18 Hybrid von Solaris

Der Solaris Urbino 18 Hybrid ist der erste Hybridbus in Europa, der eine serienmäßige Technik verwendet. Vorgestellt wurde der Bus auf der IAA⁷⁶ Nutzfahrzeuge 2006 in Hannover. Mittlerweile kommen Solaris-Hybridbusse in Dresden, Leipzig, Bochum sowie im schweizerischen Lenzburg zum Einsatz. Fahrzeuge für Bremen, München Hannover und Posen/Poznan befinden sich derzeit in der Fertigung.

⁷⁵ ÖPNV: Öffentlicher Personennahverkehr

⁷⁶ IAA: Internationale Automobil-Ausstellung

Abbildung 28: Solaris Hybridbus Urbino 18 in Dresden⁷⁷



Das hier eingesetzte Allison-Hybridantriebssystem kombiniert im Urbino 18 Hybrid die Arbeit eines Verbrennungsmotors mit einem Elektroantrieb. Dank seiner Steuerung arbeitet der Motor die gesamte Zeit über im optimalen Kennlinienbereich und sein Leistungsüberschuss lädt während der Fahrt die Batterien auf. Durch diese Technologie ist auch eine Rückgewinnung der Bremsenergie des Fahrzeugs und ihre Speicherung in speziellen Batterien möglich (vgl. Abb. 29).

Der Cummins-Dieselmotor in der Ausführung ISLe4 mit 340 PS hat 8,9 Liter Hubraum bzw. in der Ausführung ISLe4 mit 250 PS einen Hubraum von 6,7 Liter. Das Hybridantriebssystem E^v 50 Drive wurde im Vorderwagen des Gelenkbusses platziert, unmittelbar hinter dem ersten Radkasten. Der Antrieb wird auf die zweite (mittlere) Achse des Busses übertragen. Zusätzliche Elemente des Hybridantriebssystems sind die Batterien auf dem Dach und der Umrichter.

⁷⁷ Quelle: Timm (2007)

Abbildung 29: Schematische Darstellung des Hybridantriebs⁷⁸

Das elektrische Antriebselement ist das Zentralelement des Hybridantriebs, in welchem die Kombination der Drehmomente beider Motoren stattfindet, und besteht aus zwei Elektromotoren sowie entsprechenden Synchronkupplungen und Planetengetrieben. Optisch ähnelt das E-Modul dem traditionellen Schaltgetriebe, es wiegt 417 kg. Die Steuerungseinheit wird durch zwei Steuermodule des Typs 1000/2000 der Firma Allison gebildet. Zu den Aufgaben der ersten Einheit gehören die Überwachung und Steuerung des Hybridantriebs, die zweite koordiniert die Zusammenarbeit mit anderen Fahrzeugsystemen. Das DPIM (Dual Power Inverter Module) ist ein wichtiger elektrischer Bestandteil des Allison-Systems. Es besteht aus zwei Umformer-Modulen, die insgesamt 75 kg wiegen. Das DPIM wird mit Öl gekühlt.

Die während des Bremsvorganges gewonnene, entsprechend in Strom umgewandelte Energie wird in speziellen Energiespeichern auf dem Busdach gespeichert. Die eingesetzten Batterien werden bei jedem Bremsvorgang aufgeladen und sind nicht von äußeren Energiequellen abhängig. Die Nutzungsdauer eines Satzes Nickel-Metall-Hybrid-Batterien (NiMH) mit einem Gewicht von 410 kg beträgt, in Abhängigkeit von der Art des Buseinsatzes, ca. sechs Jahre (vgl. Solaris 2008a).

⁷⁸ Quelle: Bosch (2007)

Der Bushersteller rechnet in Abhängigkeit der konkreten Einsatzbedingungen mit einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauches in der Größenordnung von 20 bis 43 Prozent (Timm 2007) bzw. in einer aktuellen Pressemitteilung von 15 – 30 % (Solaris 2008b).

2. Serieller Mercedes-Benz Hybridbus Citaro G BlueTec Hybrid

Bei dem Mercedes-Benz Stadtbus mit Diesel-elektrischem Hybridantrieb handelt es sich um einen seriellen Hybridantrieb, der abgasfreies Fahren im reinen Batteriebetrieb auf kurzen Strecken ermöglicht.

Abbildung 30: Mercedes-Benz Hybridbus Citaro⁷⁹



Der Antrieb wird in einen Gelenkbus vom Typ Citaro G eingebaut und ist in dieser Kombination zurzeit weltweit einzigartig. 2008 soll dieser Bus in den Versuchsbetrieb gehen. Eine Serienproduktion ist für 2009 geplant.

Der Dieselmotor arbeitet im seriellen Citaro Hybrid nicht mehr als ständiges Antriebsaggregat, sondern dient als Generatorantrieb zur bedarfsweisen Stromerzeugung. Den erzeugten Strom speichern wartungsfreie Lithium-Ionen-Batterien, die auf dem Dach des Citaro montiert sind. Die Batterien werden nicht nur durch den Dieselgenerator, sondern auch durch die beim Bremsen rückgewinnbare Energie gespeist, die so genannte Rekuperation. Den eigentlichen Antrieb auf die

⁷⁹ Quelle: Daimler (2007)

Räder des Citaro Hybrid übernehmen vier elektrische Radnabenmotoren an Mittel- und Hinterachse des Omnibusses. Die Gesamtleistung der Radnabenmotoren von 320 kW ist für einen Gelenkbus selbst unter schweren Einsatzbedingungen großzügig bemessen.

Die beim Bremsen während des Heranfahrens an Haltestellen oder Ampeln gewonnene Energie wird sowohl zur Versorgung des Fahrzeugs im Stand, als auch zum Anfahren genutzt. So kann der Hybridbus an Haltestellen, im Stand und beim Beschleunigen rein elektrisch und damit praktisch emissionsfrei agieren, einschließlich einer deutlichen Reduzierung der Geräusche.

Einer der großen Vorteile für die Technik des seriellen Hybrids im Citaro ist die Möglichkeit zur Verkleinerung und bedarfsgerechten Anpassung. Anstelle eines üblicherweise im Gelenkbus verwendeten großvolumigen Reihensechszylindermotors mit zwölf Litern Hubraum kommt ein kompakterer Motor mit 4,8 Litern Hubraum und 160 KW Leistung zum Einsatz. Das Motorgewicht reduziert sich auf diesem Weg von etwa 1.000 kg auf nur noch rund 450 kg. Da der Dieselmotor im Citaro-Hybrid nicht als Antriebsaggregat eingesetzt wird, muss er zum Beispiel keine Spitzenleistung abgeben und kann deshalb sehr wirtschaftlich und umweltfreundlich nahe seines Bestpunkts in einem engen Drehzahlfeld operieren. Deshalb ist die Drehmomentkennlinie des Motors emissions- und verbrauchsoptimiert auf die Betriebsweise im Hybridbus abgestimmt worden. Auf ein herkömmliches Automatikgetriebe kann der Citaro mit Hybridantrieb verzichten. Außerdem werden die Nebenaggregate wie Klimakompressor, Lenkhilfpumpe und Druckluftkompressor werden nicht mehr durch den Verbrennungsmotor über Riemen oder Zahnräder angetrieben, sondern einzeln per Elektromotor.

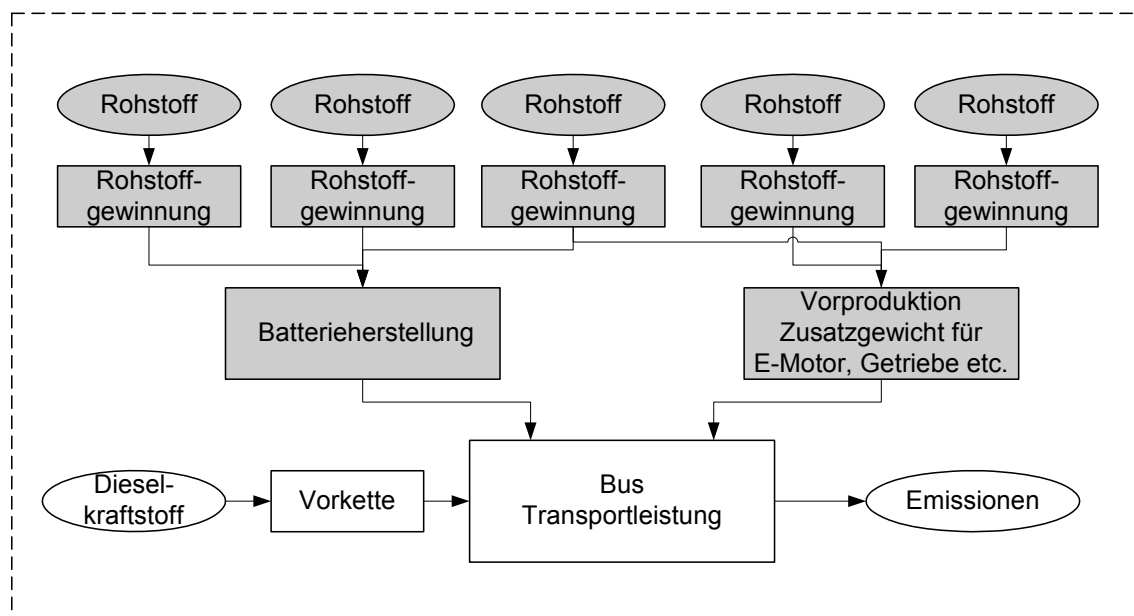
Aufgrund der technischen Anpassungen der Aggregate liegt das Mehrgewicht des Citaro-Hybrid mit ‚nur‘ rund einer Tonne im Vergleich zu einem herkömmlichen dieselgetriebenen Gelenkbus vergleichsweise günstig. Bei einem Gesamtgewicht von 28 t bedeutet dies eine Gewichtszunahme von knapp 4 %. Man erwartet trotz aufwändiger Hybrid-Technologie eine bis zu 30%-ige Kraftstoffersparnis. (vgl. Daimler 2007)

4.6.2 Untersuchungsgegenstand und -rahmen

Untersuchungsgegenstand ist die Erbringung einer bestimmten Leistung im ÖPNV. Als funktionelle Einheit soll hierbei eine bestimmte Kilometerleistung eines Busses; 240.000 km (in sechs Jahren à 40.000 km) betrachtet werden. Diese funktionelle Einheit ergibt sich aus der angenommenen jährlichen Kilometerleistung eines Busses sowie der Lebenserwartung des derzeitigen Energiespeichersystems. Es geht hier nicht in erster Linie um eine Bewertung der unterschiedlichen Hybridantriebsarten, sondern um den Einfluss effizienter Energiespeicherbatterien auf das Gesamtsystem.

Der Bilanzraum stellt sich wie folgt dar. Die Vergleichsbasis bildet der konventionelle Dieselbus. Die hybridangetriebenen Busse besitzen einerseits erwartbare Umweltentlastungseffekte in der Nutzungsphase auf Grund geringeren Kraftstoffverbrauches; andererseits verursachen die hybridangetriebenen Busse zusätzliche Umweltauswirkungen durch den notwendigen Mehraufwand und das höhere Gewicht auf Grund des komplexeren Antriebsystems (vgl. Abb. 31 grau unterlegte Felder). Diese Umweltauswirkungen werden, soweit möglich, über den gesamten Lebensweg ermittelt und den positiven Effekten gegenübergestellt.

Abbildung 31: Systemgrenze für die vergleichende Ökobilanz⁸⁰



⁸⁰ Quelle: eigene Darstellung

4.6.3 Betrachtete Varianten und Annahmen

Praxisbeispiele sowie Grundlage für Annahmen bilden die oben beschriebenen Busse, der **parallele Hybridbus Urbino 18 Hybrid von Solaris** sowie der geplante **serielle Mercedes-Benz Hybridbus Citaro**.

Die Variante 1 stellt einen konventionellen Stadtbus dar. In der Variante 2 wird ein Hybridbus mit einer NiMH-Batterie zum heutigen Stand der Technik modellhaft betrachtet, in der Variante 3 wird ein Hybridbus mit einer Li-Ionen-Batterie mit heutigem Leistungsstandard (Nanotechnikeinfluss ist z.B. schon über den Separator (vgl. Gutsch 2007) enthalten) untersucht, und in der Variante 4 wird dann ein Hybridbus mit zukünftig bedeutend höherer Leistungsfähigkeit modellhaft betrachtet. Die zu erwartende Leistungssteigerung basiert dabei stark auf nanotechnologischen Innovationen an den Li-Ionen-Batteriebestandteilen (insbesondere an den Anoden und Kathoden) und führt zu einer entsprechend höheren Kraftstoffeinsparung. Aktuelle Entwicklungen an den Batterien finden immer im Spannungsfeld Optimierung der Leistung versus Optimierung der Energiedichte statt. Dabei wird an allen drei wichtigen Batteriebestandteilen geforscht; bspw. an der Steigerung der spezifischen Kapazität der Kathodenmaterialien (nanostrukturierte Dünnschichtfilme; amorphe bzw. nanostrukturierte Matrixstrukturen, Siliziumnanodrähte, Kohlenstoffkomposite mit Nanosilizium, nanostrukturierte titandioxidbasierte Materialien); auch am Anodenmaterial wird intensiv geforscht, so an den nanoskaligen Schichtstrukturen und der Integration von Nanopartikeln (vgl. Wohlfahrt-Mertens 2007 und 2008, Chiang 2007, Hedderich 2007, House 2007, Tarascon 2006).

In der nachfolgenden Tabelle sind die Randbedingungen für die verschiedenen Varianten dargestellt. Für die Varianten 2 und 3 werden auf Basis zweier unterschiedlicher Datengrundlagen jeweils a und b-Varianten untersucht. Die a-Variante lehnt sich stark an die im umfassenden EU-SUBAT-Projekt (vgl. SUBAT 2005, Matheys et al 2006 und 2007; Van den Bossche et al 2006) ermittelten Daten zur Batteriezusammensetzung, zu Verbrauchsdaten etc. an und aktualisiert diese Daten mit einzelnen Datensätzen aus der Stoffdatenbank Ecoinvent (2007). Angaben zur Zusammensetzung der bilanzierten Batterien sind im Anhang 4 (Tab. 32 und 33) dargestellt. Für Batteriebestandteile, für die keine Ökobilanzdaten vorhanden sind, wurden vereinfachend artverwandte Stoffe bilanziert; bspw. wurden die

Elektrolytanteile der Li-Ion-Batterie durch den Stoffdatensatz ‚Organische Chemikalie‘ ersetzt.

In der b-Variante werden jeweils komplette in Ecoinvent (2007) bilanzierte Batterien für den bilanziellen Vergleich benutzt. Diese Daten beziehen sich zwar auf Batterien für einen Einsatz in Laptops; sollen hier als Vergleichswerte mit in die Betrachtungen einbezogen werden.⁸¹

Tabelle 17: Variantenbeschreibungen

Annahmen:	V1: Stadtbus konventionell	V2a: Hybridbus, NiMH SUBAT	V2b: Hybridbus, NiMH Ecoinvent	V3a: Hybridbus, Li-Ion SUBAT	V3b: Hybridbus, Li-Ion Ecoinvent	V4: Hybridbus, Li-Ion, Zukunft
Dieselmotorkraftstoffverbrauch [l/100km]	35	10% Minderung	10% Minderung	15% Minderung	15% Minderung	25% Minderung
Funktionelle Einheit						
Busfahrleistung [km]	240.000	240.000	240.000	240.000	240.000	240.000
Dieselmotorkraftstoffverbrauch, gesamt [l]	84.000	75.600	75.600	71.400	71.400	63.000
Busmehrgewicht [kg], gesamt		1000	1000	1000	1000	1000
Akkumulator [kg]	0	400	400	400	400	240
Lebensdauer		6	6	6	6	10
Elektromotoren, Getriebe, Elektronik [kg]	0	600	600	600	600	600
Annahmen zur Zusammensetzung						
Stahl [kg]	0	550	550	550	550	550
Kupfer [kg]	0	10	10	10	10	10
Kunststoff (PE) [kg]	0	20	20	20	20	20
Aluminium [kg]	0	20	20	20	20	20

Die Herstellerangaben zu realisierbaren Einsparungen von Dieselmotorkraftstoff sind in der Regel höher als die hier getroffenen Annahmen. Aussagen über erfolgte konkrete Messungen und Auswertungen des eingesetzten Solarisbusses in Dresden zufolge sind die Minderungspotenziale im realen Busbetrieb jedoch geringer als erwartet (Breitkopf 2008). Gegenüber der Variante 1, konventioneller Stadtbus, werden deshalb eher „konservative“ Kraftstoffeinsparungen zu Grunde gelegt: Der Hybridbus mit NiMH-Batterie besitzt einen um 10% verringerten Verbrauch. Auf Grund der höheren Energie- bzw. Leistungsdichte der Li-Ionen-Batterie wird diesem Batterietyp in der Variante 3 ein Einsparpotenzial von 15% zugerechnet. Mit Umsetzung des neuen Hybridantriebsystems gepaart mit einer zukünftigen bedeutenden Leistungssteigerung wird in der Variante 4 ein um 25% verringerter Kraftstoffverbrauch angesetzt.

⁸¹ Dieser Vergleich ist durchaus legitim, da zur Zeit sogar in den entwickelten E-Automobilen wie Tesla Roadster oder BMW Mini Laptop-Batterien eingebaut werden. Für den Mini E von BMW wurden z.B. 5088 einzelne Akkus in 48 Modulen zusammengefügt und im Fahrzeug untergebracht. (vgl. Grünweg 2008)

Das Mehrgewicht durch den Hybridantrieb für die Varianten 2-4 wird mit 1000 kg angenommen und entspricht den Angaben von Mercedes Benz. Dies bedeutet je nach Fahrzeuggröße ein Mehrgewicht von 4-8% bezogen auf das Gesamtgewicht eines Busses. Als Akkumulatorgewicht wird davon ein Anteil von 400 kg (entsprechend in etwa den Angaben der Fa. Solaris) zu Grunde gelegt. Des Weiteren wird in Anlehnung an die Zusammensetzung wichtiger Automobilbestandteile das Restgewicht auf Stahl, Kupfer, Aluminium und Kunststoff aufgeteilt. Für diese Stoffe werden Ökobilanzdaten aus der Stoffdatenbank Ecoinvent (2007) zur jeweiligen Vorkette genutzt; außerdem werden in der Modellierung für diese Stoffe Verarbeitungsprozesse berücksichtigt. Die Daten für die Batterieherstellung wurden dem EU-SUBAT-Projekt (SUBAT 2005) entnommen.

Die verlängerte Lebensdauer der Li-Ion-Batterie in der Variante 4 bewirkt außerdem, dass nur 60% des Batteriegewichtes der funktionellen Einheit in der Bilanz zugerechnet werden. Die Abgasemissionen werden in Anlehnung an die EU-Norm für Dieselmotoren berechnet; hierzu werden die Abgasgrenzwerte der EURO 5-Norm zu Grunde gelegt.

Die Modellierung der verschiedenen Varianten inklusive Rohstoffgewinnung, Weiterverarbeitungsprozesse und Assemblierung, deren Berechnung und Auswertung erfolgte mit der Ökobilanzsoftware Umberto. Exemplarische Bilanzierungsflussbilder sind im Anhang 4 (Abb. 61 - 63) dargestellt. Gutschriften für einzelne Materialien durch ein zukünftiges Recycling wurden in den Berechnungen nicht berücksichtigt.

4.6.4 Wirkungsabschätzung und ausgewählte Auswertungen der Ökobilanzierungen

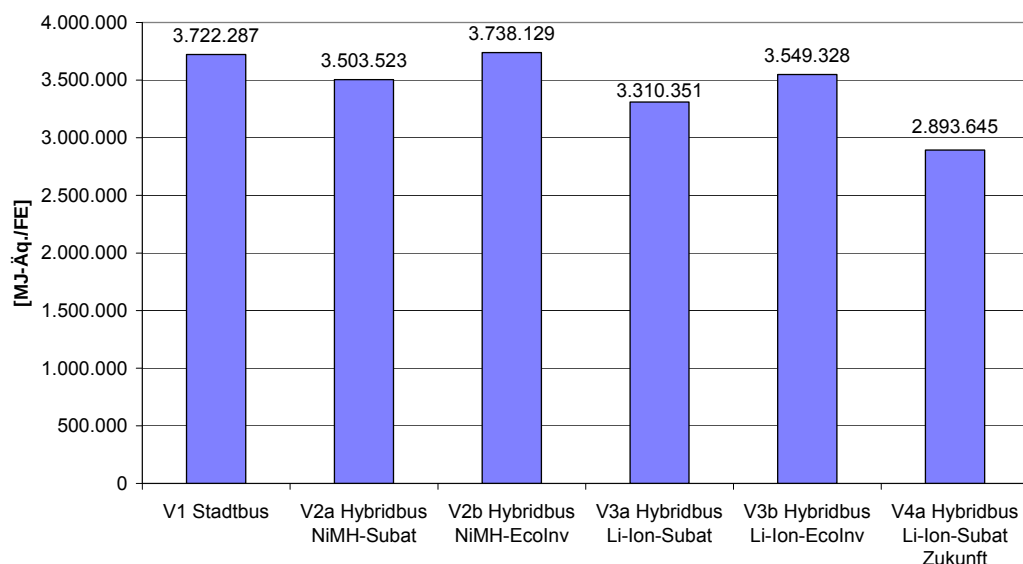
Aus den Ökobilanzberechnungen ergeben sich beispielhaft folgende Ergebnisse für ausgewählte Umweltwirkungskategorien nach CML 2001.

Allgemein kann man sagen, dass der Umweltnutzen durch den verringerten Kraftstoffverbrauch größer ist als die Mehraufwendungen durch das Hybridsystem. Der Einfluss dieser Mehraufwendungen nimmt besonders in der Zukunftsvariante 4 noch weiter ab, da hier die verlängerte Lebensdauer verstärkend wirkt. Insgesamt muss aber gesagt werden, dass die Signifikanz von Ergebnissen im Bereich 10% und weniger vergleichsweise gering ist, in Anbetracht der zahlreichen Annahmen, die in diesen

Analysen getroffen werden mussten. Besonders auffallend ist, dass bei allen Umweltkategorien die berechneten Größen der Ecoinvent-Daten (jeweils b-Variante) bedeutend schlechter abschneiden, als die Daten auf der Grundlage des SUBAT-Projektes. Die Ursache liegt darin, dass die Umweltwirkungen der Batterieherstellung bei den b-Varianten durchweg bedeutend höher sind als bei den SUBAT-Varianten. Die jeweiligen b-Varianten verdeutlichen, dass mindestens 10-15% Umweltentlastung durch Kraftsstoffeinsparung notwendig sein müssten, um die Umweltwirkungen der Mehraufwendungen durch das Hybridsystem zu kompensieren. Erst darüber hinaus sind wie in der berechneten Zukunftsvariante echte Umweltentlastungen mit hoher Wahrscheinlichkeit erwartbar.

Beim Energieverbrauch ist ersichtlich, dass erst die Zukunftsvariante signifikant weniger Energie benötigt und zwar gegenüber dem konventionellen Stadtbus um ca. 22%. Die unterschiedlichen Gesamtenergieverbräuche in den beiden Varianten 3a und 3b kommen bspw. dadurch zustande, dass in der Variante 3b für die Batterieherstellung ca. 350.000 MJ-Äq./Funktionelle Einheit (FE) benötigt werden, wohingegen in der Variante 3a nur ca. 110.000 MJ-Äq./FE.

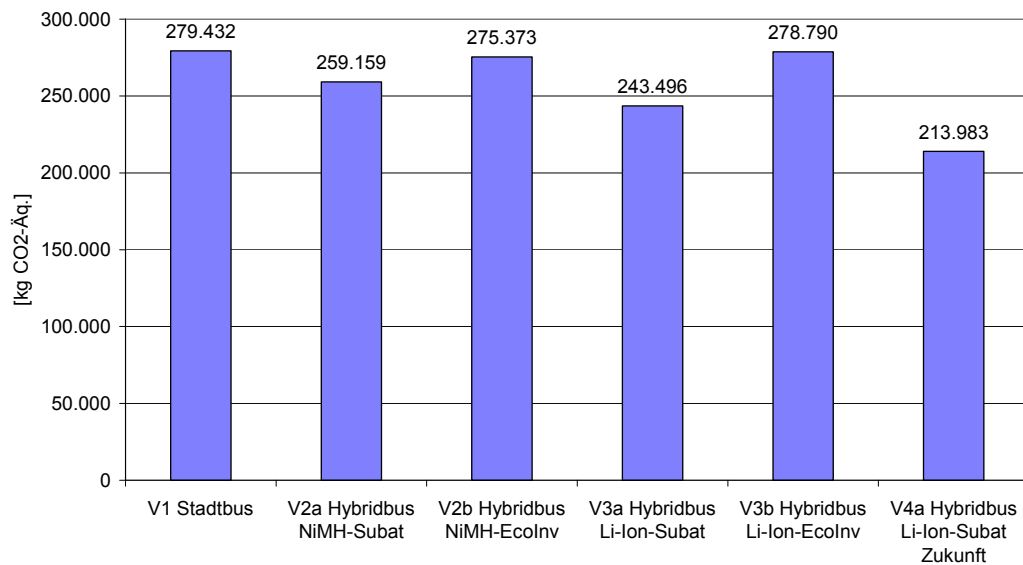
Abbildung 32: Verbrauch Energieressourcen⁸²



⁸² Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Ecoinvent 2007, SUBAT 2005)

Beim Treibhauspotenzial zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei Energieverbrauch, da sich die Verbrauchsminderungen adäquat in den Treibhausemissionen abbilden. In absoluten Zahlen ausgedrückt, ließen sich über sechs Jahre mit dem Bus der Zukunftsvariante gegenüber dem konventionellen Dieselbus ca. 65 t CO₂-Äq. einsparen.

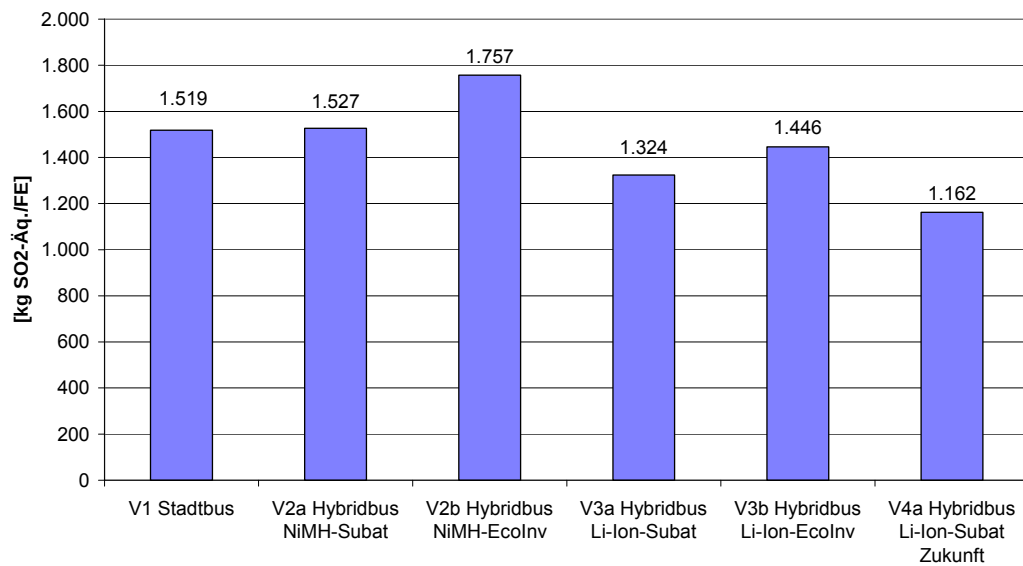
Abbildung 33: Treibhauspotenzial⁸³



⁸³ Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Ecoinvent 2007, SUBAT 2005)

Beim Versauerungspotenzial schneiden die Varianten auf Basis der NiMH-Batterie besonders schlecht ab, deren Ursache in den hohen spezifischen Beiträgen für die NiMH-Batterieherstellung liegen.

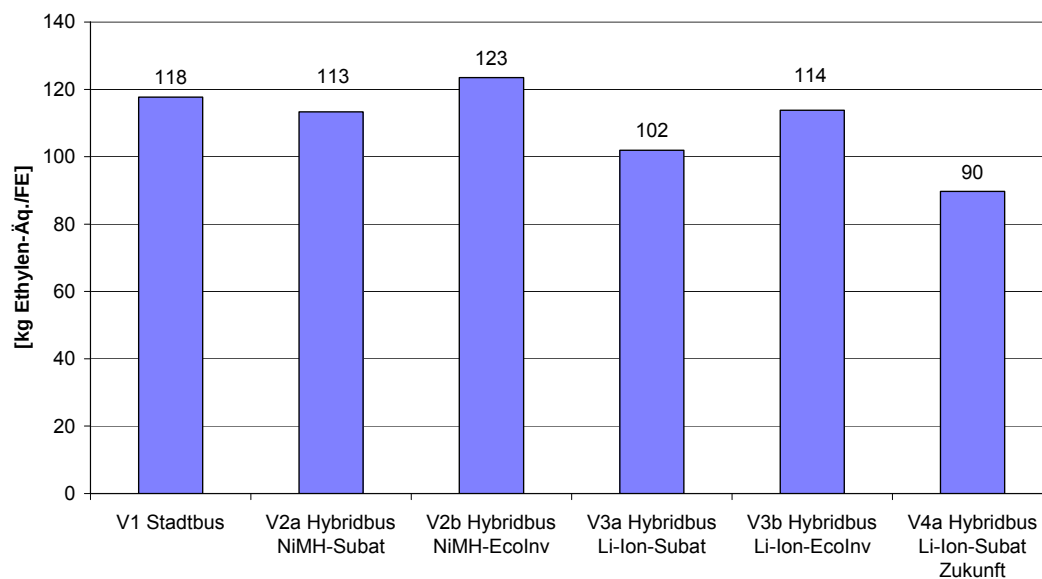
Abbildung 34: Versauerungspotenzial, generisch⁸⁴



⁸⁴ Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Ecoinvent 2007, SUBAT 2005)

Auch bei der Umweltwirkungskategorie Sommersmog zeigen sich eher Vorteile durch den Einsatz von Li-Ionen-Batterien. Der Hybridbus in der Zukunftsvariante würde ca. 23% weniger Emissionen zu dieser Umweltwirkung beisteuern als der konventionelle Stadtbus.

Abbildung 35: Sommersmog⁸⁵



Die unterschiedlichen Ergebnisse auf Basis der zugrunde gelegten SUBAT- und Ecolnvdaten bei den einzelnen Umweltwirkungen verdeutlichen außerdem die bestehenden Unsicherheiten im Umgang mit den vorliegenden Batterienökobilanzdaten, zumal noch keine großindustriellen Fertigungen von Li-Ionen-Batterien für den Einsatz in Hybridsystemen und demzufolge auch keine entsprechenden aktuellen Ökobilanzdaten existieren. Hier wäre es sehr wünschenswert, wenn gerade auch die deutschen Unternehmen, die sich in der Entwicklung leistungsfähiger Li-Ionen-Batterien engagieren, diesem Sachverhalt eine gewisse Bedeutung beimessen würden und die notwendigen Ökobilanzdaten zeitnah der Öffentlichkeit zugänglich machen würden. Im Projektverlauf zu dieser Fallstudie war es leider nicht mehr möglich, diese unterschiedlichen Bilanzergebnisse mit einem kompetenten Industriepartner zu diskutieren.

⁸⁵ Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Ecoinvent 2007, SUBAT 2005)

4.6.5 Fazit

Die Batterietechnik bildet einen Flaschenhals in der Entwicklung von Hybrid- und Elektroantrieben. Allgemein kann man vor dem Hintergrund der abgeleiteten und getroffenen Annahmen für den ökobilanziellen Vergleich sagen, dass der Umweltnutzen durch den verringerten Kraftstoffverbrauch größer ist als die materiellen Mehraufwendungen durch das Hybridsystem. Erst die bilanzierte Zukunftsvariante weist gegenüber dem konventionellen Dieselstadtbuss geringere Umweltwirkungen von über 20% aus.

Auf der Basis der schon existierenden und der in naher Zukunft erwartbar zu realisierenden Batterietechniken ist derzeit kein wirklicher Durchbruch in der Ökoeffizienz der betrachteten Hybridantriebsformen in Busanwendungen in Sicht. Ob und inwiefern letzteres gelingt, dürfte ganz maßgeblich davon abhängen, ob eine weitere Verminderung des Gewichts der Antriebssysteme realisierbar ist. Einen wichtigen Anteil an den Gesamtergebnissen (aber eben nur einen unter mehreren) hat dabei das Batteriesystem, sein Gewicht, seine Kapazität, Leistungsdichte und Ladegeschwindigkeit. In absoluten Zahlen ausgedrückt, ließen sich über sechs Jahre mit dem Bus der Zukunftsvariante gegenüber dem konventionellen Dieseldieselbus ca. 65 t CO₂-Äq. einsparen. Auch wenn sich die Mehrkosten von derzeit ca. 120.000 € pro Bus bei Serienanwendungen beträchtlich senken lassen, bleiben doch sehr hohe spezifische CO₂-Vermeidungskosten. Gegenzurechnen wären dann noch die weiteren Umweltvorteile des Hybridbusses, wie emissionsfreies Fahren im Haltestellenbereich und in der Fußgängerzone.

Die nanotechnischen Innovationen in der Batterietechnik könnten eventuell in anderen Anwendungen wie bspw. beim direkten Elektroantrieb von Kraftfahrzeugen zu höheren Umweltentlastungen führen. Um derartige Anwendungen ökobilanziell besser modellieren und untersuchen zu können, sind aktuelle Ökobilanzdaten zu Li-Ionen-Batterien notwendig. Hier wäre es sehr wünschenswert, wenn gerade auch die deutschen Unternehmen, die sich in der Entwicklung leistungsfähiger Li-Ionen-Batterien engagieren, diesem Sachverhalt eine gewisse Bedeutung beimessen würden und die notwendigen Ökobilanzdaten zeitnah der Öffentlichkeit zugänglich machen würden.

4.7 Fallstudie 4:

Nanotechnikbasierter Ultradur® High Speed-Kunststoff

Kunststoffe spielen eine sehr große Rolle im Alltag moderner Industriegesellschaften. Die weltweiten Produktionskapazitäten wichtiger polymerer Kunststoffe liegen zumeist im Millionen-t-Bereich pro Jahr.

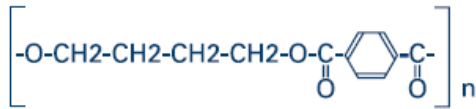
Beim Kunststoff Polybutylenterephthalat (PBT) kann derzeit von einer jährlichen Produktionsmenge von knapp 1 Million t ausgegangen werden, von denen in Europa ca. 40% produziert werden.

Im Rahmen dieser Fallstudie wird exemplarisch das energetische und stoffliche Einsparpotenzial von technischen Kunststoffen untersucht, deren Verarbeitungseigenschaften durch den gezielten Zusatz von Nanopartikeln wesentlich verbessert werden. Als konkretes Beispiel wird dazu der in seinen Fließeigenschaften verbesserte Ultradur® High Speed-Kunststoff der Fa. BASF betrachtet und ein Vergleich zum bisherigen Standard-PBT über den gesamten Produktlebensweg vorgenommen. Als Grundlage für diese Fallstudie dienen die Veröffentlichungen zu einer von der Fa. BASF selbst durchgeführten Öko-Effizienz-Analyse auf Basis ihrer selbst entwickelten Methode (vgl. BASF 2006). Für den Vergleich konnten somit nur frei zugängliche und aggregierte Daten verwendet werden. Eine Erhebung neuer bzw. eine Prüfung der vorliegenden Sachbilanzdaten fanden nicht statt.

4.7.1 Untersuchungsgegenstand und -rahmen

Untersuchungsgegenstand ist die Herstellung von Spritzgussteilen auf Basis von Polybutylenterephthalat (PBT). PBT ist ein thermoplastischer Kunststoff. Die chemische Struktur dieses Polyesters beruht auf der Polykondensation von Dimethylterephthalat und 1.4 Butandiol.

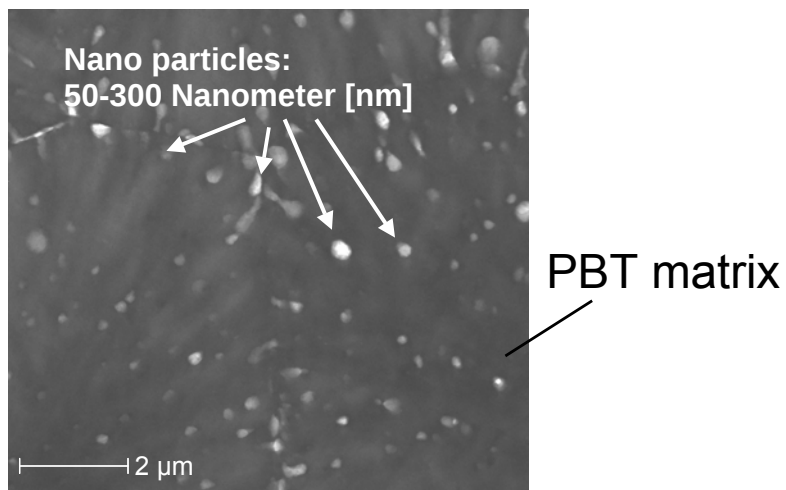
Abbildung 36: Chemische Struktur von Polybutylenterephthalat⁸⁶



Aufgrund seiner Eigenschaften wird der Kunststoff für eine Vielzahl von Anwendungen in den Elektro- / Elektronik-, Automobil- und Haushaltsgeräteindustrien und im Maschinenbau eingesetzt.

Das neue rheologie-modifizierte Ultradur® High Speed ist der erste technische Kunststoff, dessen Fließfähigkeit durch ein speziell entwickeltes Nanopartikelsystem signifikant verbessert wurde. Die Zugabe des Additivs erfolgt in Form von feinverteilten organischen Nanopartikeln, wobei die Teilchengröße im Bereich von 50 bis 300 Nanometer liegt. Weitere Aussagen zu Art und Eigenschaften der verwendeten Nanopartikel sowie zu deren Herstellung wurden von BASF nicht bekanntgegeben.

Abbildung 37: Nanopartikel in der Kunststoffmatrix⁸⁷



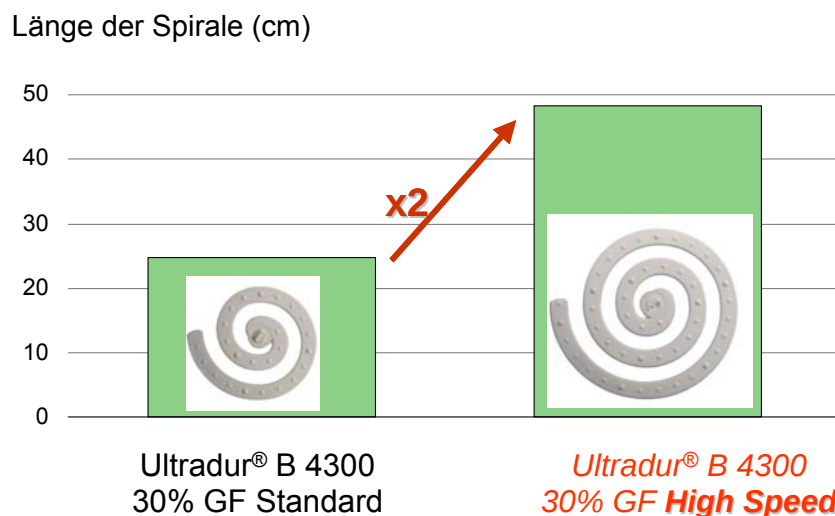
Dieses Additiv sowie die spezielle Art seiner Zumischung verändern die Rheologie des Basispolymers grundlegend: Die Schmelzviskosität nimmt bei gleichbleibender Strukturviskosität stark ab. Glasfaserverstärktes Ultradur® High Speed PBT fließt je

⁸⁶ Quelle: Polyone 2002

⁸⁷ Quelle: BASF 2005a

nach Glasfasergehalt mindestens doppelt so weit wie vergleichbare Standard-Ultradur®-PBT-Typen. Die anderen Eigenschaften des Werkstoffes wie Steifigkeit, Festigkeit, Schwindungsverhalten etc. werden durch die Modifizierung nicht beeinflusst.

Abbildung 38: Fließfähigkeit von Ultradur® Standard und Ultradur® High Speed im Vergleich⁸⁸



Die Vorteile dieses besonders gut fließfähigen Kunststoffes zeigen sich insbesondere in der Spritzgussverarbeitung. Das Spritzgießen gehört zu den Urformverfahren, bei denen der endgültige Stoffzusammenhalt bei der Herstellung der Teile entsteht. Durch Erwärmen werden thermoplastische Kunststoffe (Granulat) in den Schmelzzustand gebracht, anschließend in entsprechenden Spritzgusswerkzeugen geformt und durch Abkühlen in den stabilen Formzustand gebracht.

Auf Grund der niedrigen Schmelzeviskosität reichen geringere Einspritz- und Nachdrücke oder eine geringere Verarbeitungstemperatur aus um entsprechende Geometrien zu realisieren. Energieeinsparungen um bis zu 20% sind zu messen. Alternativ lässt sich die Zykluszeit⁸⁹ um bis zu 30 % reduzieren. Die Werkzeuge⁹⁰

⁸⁸ Quelle: BASF 2005a

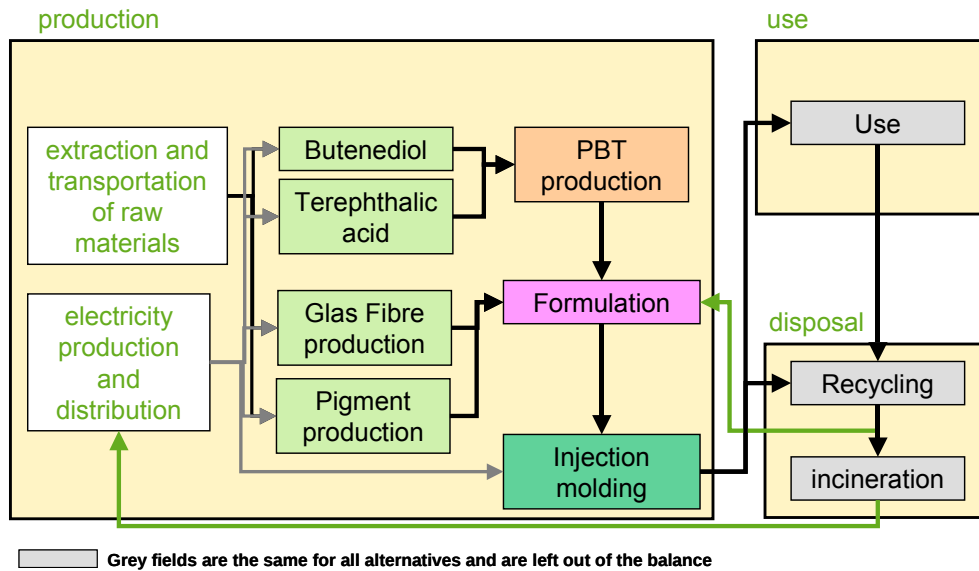
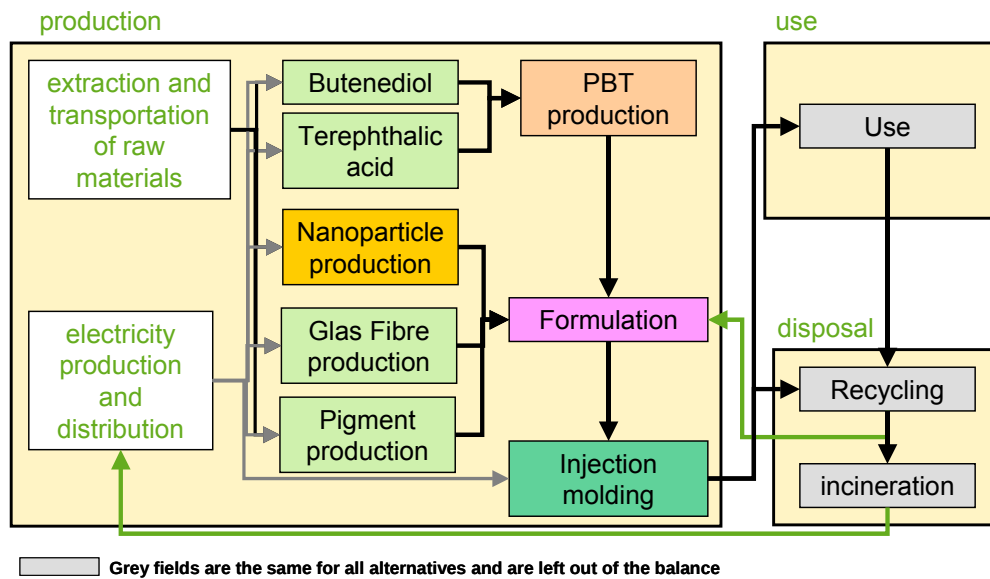
⁸⁹ Unter Zykluszeit versteht man die Zeit für den gesamten Zyklus beim Spritzgießen eines Formteils. Dieser Zyklus umfasst folgende Schritte: Schließen des Werkzeugs, Einspritzen der Schmelze, Abkühlen, Öffnen des Werkzeugs, Auswerfen des Formteils.

können effektiver gestaltet und neue Bauteile können dünnwandiger sein, so dass deutlich Material eingespart werden kann. Auch die Menge an Ausschuss nimmt ab, denn mit dem gut fließenden Kunststoff lässt sich das Werkzeug leichter füllen. Zusammengefasst bedeutet das: Auf der Kostenseite ebenso wie auf der Seite der Umweltauswirkungen ist Ultradur® High Speed das günstigere Produkt. (vgl. BASF 2007)

Der ökobilanzielle Vergleich erfolgt an Hand von zwei Varianten; in der Standardvariante auf Basis von Ultradur® 4300 G6, in der Innovationsvariante auf Basis von Ultradur® 4300 G6 High Speed. Die Kennzeichnung G6 in der Produktkennzeichnung verdeutlicht, dass im Kunststoff Glasfasern mit einem Masseanteil von 30% als Verstärkungstoff enthalten sind. Als funktionelle Einheit wurden 1000 Spritzgussteile mit einem spezifischen Gewicht von jeweils 100g gewählt, also insgesamt 100 kg. Die betrachteten Bilanzräume sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Wesentliche Unterschiede zwischen den beiden betrachteten Varianten bestehen laut Aussage von BASF einerseits in dem neuen Prozessschritt der Herstellung der Nanopartikel (Nanoparticle production) sowie andererseits in den veränderten Verarbeitungsparametern beim Spritzgießen (Injection molding). Die Sachbilanzdaten zu den anderen Bilanzmodulen ‚Herstellung von 1,4-Butandiol‘ (Butenediol), ‚Herstellung von Terephthalsäure‘ (Terephthalic acid), ‚Herstellung von PBT‘ (PBT production), ‚Herstellung der Glasfasern‘ (Glas Fibre production), ‚Pigmentherstellung‘ (Pigment production), ‚Herstellung von PBT (PBT production)‘, konnten entsprechend der veränderten Materialzusammensetzung für beide Varianten genutzt werden. Für die Module ‚Gebrauchsphase‘ (Use), ‚Recycling‘ und ‚Abfallverbrennung (Incineration)‘ wurden gleiche Bedingungen unterstellt und aus der Bilanzierung ausgenommen. Als Ökobilanzsoftware wurde für die Bilanzierung SimaPro eingesetzt.

⁹⁰ Das Werkzeug hat beim Spritzgießen die Aufgabe, die einströmende Schmelze zu formen und zu kühlen, sowie das fertige Bauteil zu entformen. Der Formhohlraum des Werkzeugs entspricht der Geometrie des herzustellenden Teiles, berücksichtigt ist jedoch die Werkstoffschwindung durch Abkühlung und Kristallisation.

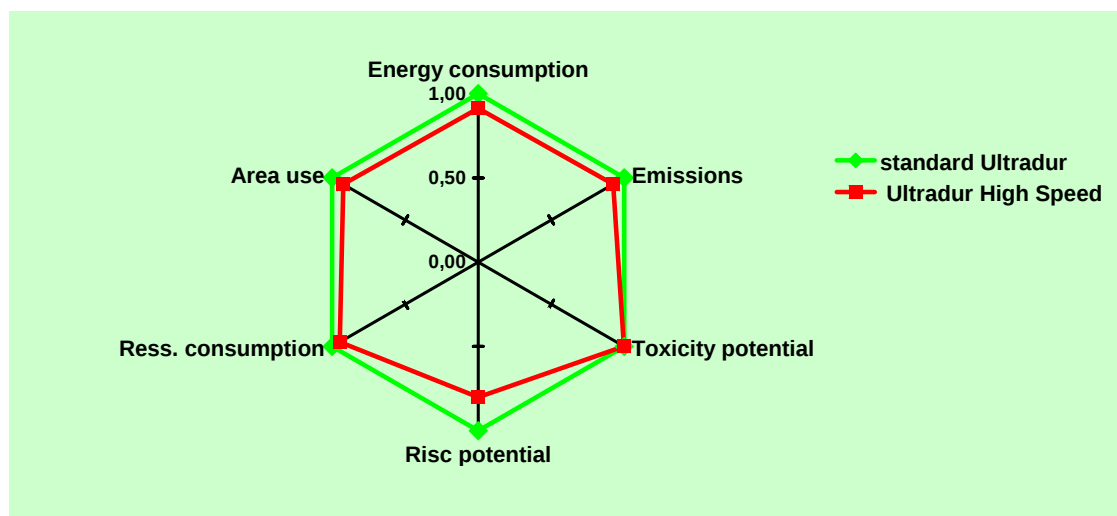
Abbildung 39: Bilanzraum der Standardvariante Ultradur®⁹¹Abbildung 40: Bilanzraum der Innovationsvariante Ultradur® High Speed⁹²⁹¹ Quelle: BASF 2005a⁹² Quelle: BASF 2005a

4.7.2 Bilanzauswertungen

Als Ergänzung zur Ökoeffizienz-Analyse hat die BASF eine Software entwickelt, mit deren Hilfe unterschiedliche Szenarienuntersuchungen durchgeführt und einfach ausgewertet werden können. Im Folgenden werden beispielhaft Ergebnisse für ein Szenario dargestellt, in dem bei gleichem Materialeinsatz eine Verringerung der Verarbeitungszeit um 20% unterstellt wird. Daraus resultieren Energieeinsparungen im Spritzgussprozess, die sich in den einzelnen Umweltaspekten widerspiegeln. Nur in der Umweltwirkungskategorie Stratosphärischer Ozonabbau ist eine Verschlechterung feststellbar. Die Ursache liegt nach Aussagen von BASF in der Herstellung der organischen Nanopartikel begründet.

Für Einsatzgebiete, in denen es gelingt, durch neues Werkstoffdesign zusätzliche Materialeinsparungseffekte zu realisieren, werden sich die Ökoeffizienzpotenziale weiter erhöhen.

Abbildung 41: Ökologischer “Fingerprint”⁹³



Diese normierte Abbildung verdeutlicht, dass entsprechend der BASF-Normierung das Ultradur® High Speed in den meisten Umweltkategorien gegenüber dem Standardkunststoff Vorteile aufweist.

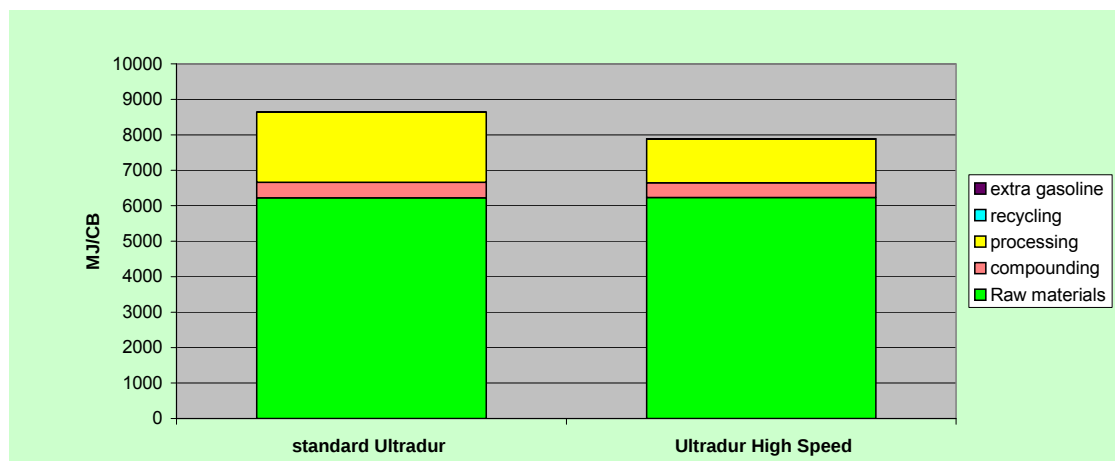
⁹³ Quelle: BASF (2005b), Verbrauch von Energie (engl. Energy consumption), Emissionen in Luft und Wasser sowie auf dem Entsorgungsweg (engl. Emissions), Toxizitätspotential (engl. Toxicity potential), Risikopotential (engl. Risc potential), Verbrauch von Rohstoffen (engl. Recc. Consumption), Flächenbedarf (engl. Area use)

In den folgenden Abbildungen erfolgt die Darstellung der Umweltwirkung bezogen auf die funktionelle Einheit, gekennzeichnet als CB (consumer benefit). Die Auswertung wird differenziert nach den in der Legende dargestellten Kategorien Rohstoffe (Raw materials), Compoundierung (Herstellung des Masterbatch, compounding), Spritzgussprozess (processing) dargestellt. Die beiden anderen Kategorien sind für diese Variantenbetrachtung nicht relevant, da keine Automobilanwendung mit unterschiedlichen Spritzgussteilgewichten untersucht wird, die zu unterschiedlichen Benzinverbräuchen führen könnten (extra gasoline) und das Recycling auf Grund der unterstellten Gleichheit nicht mit bilanziert wurde.

Für den Primärenergieverbrauch lässt sich eine Einsparung von ca. 755 MJ/1000 Teile errechnen, der aus der verringerten Verarbeitungszeit resultiert. Dies entspricht einer Verringerung von 9%.

Für die Herstellung von Ultradur wurden die Energieverbräuche am BASF-spezifischem Standort ermittelt und berücksichtigt. Für den Stromverbrauch für die Verarbeitung beim Kunden wurde mit EU-Strommix gerechnet.

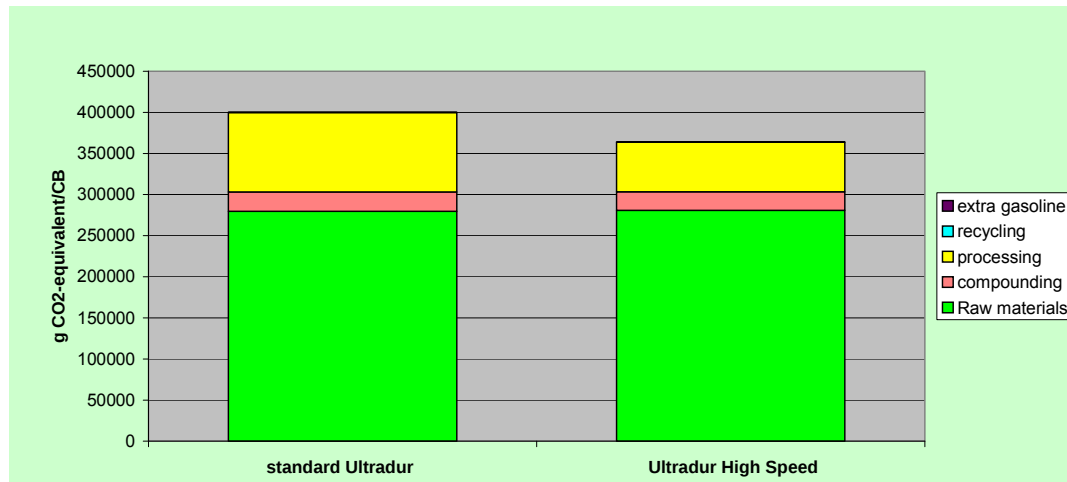
Abbildung 42: Primärenergieverbrauch⁹⁴



⁹⁴ Quelle: BASF (2005b)

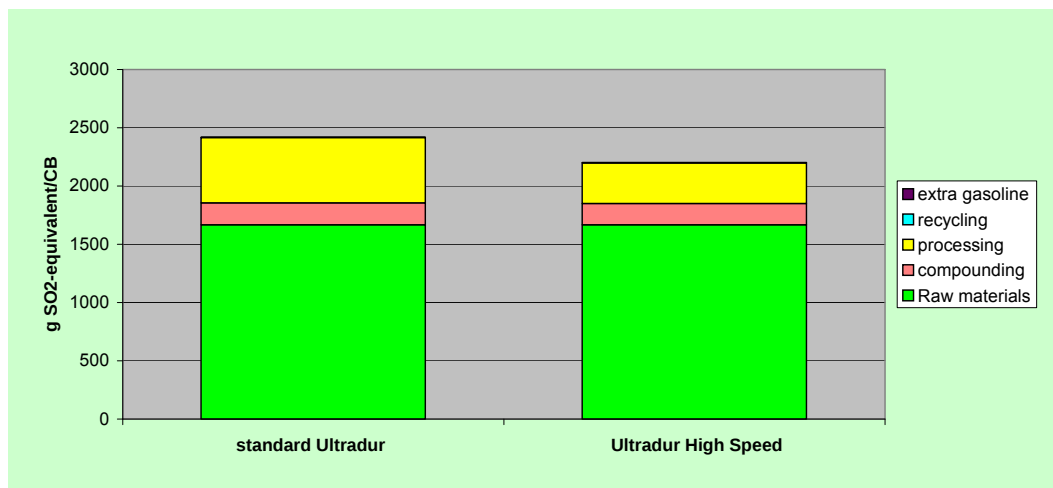
In Kopplung mit dem verringerten Energieverbrauch können auch beim Treibhauspotenzial pro 1000 Teile ca. 36 kg CO₂ –Äquivalente eingespart werden, was auch eine Verringerung um 9% bedeutet.

Abbildung 43: Treibhauspotenzial⁹⁵



Auch bei der Umweltwirkungskategorie Versauerung zeigt sich eine 9%-ige Verringerung gegenüber dem Standardkunststoff.

Abbildung 44: Versauerungspotenzial⁹⁶

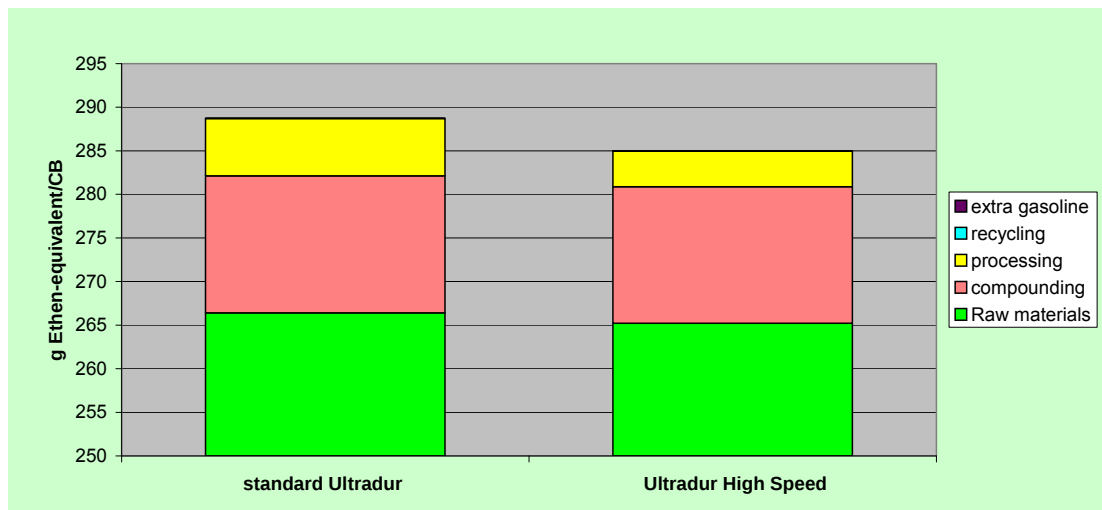


⁹⁵ Quelle: BASF (2005b)

⁹⁶ Quelle: BASF (2005b)

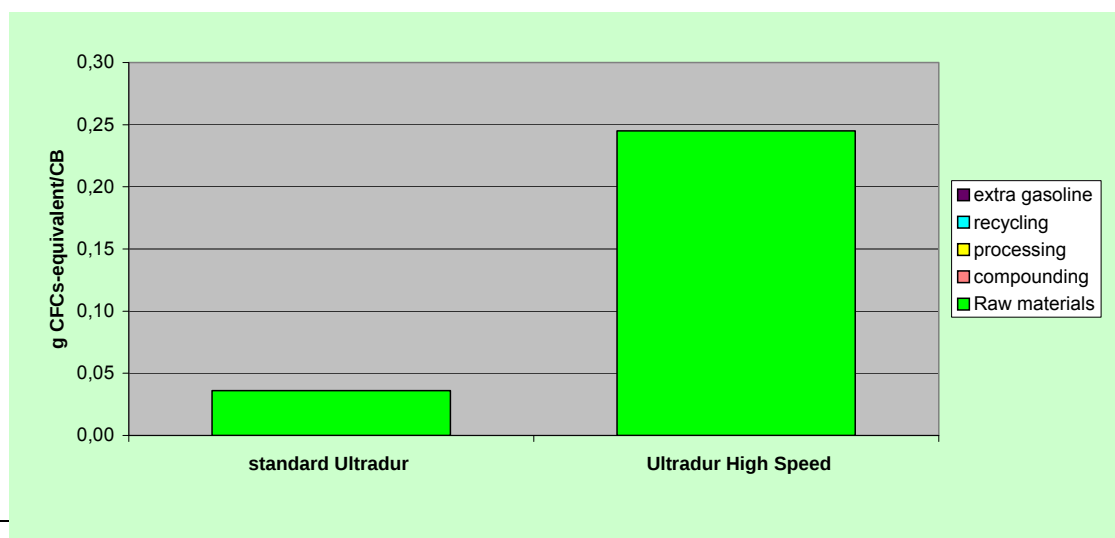
Die Differenz in der Umweltwirkungskategorie Sommersmog dagegen ist minimal. Die Variante mit den organischen Nanopartikel ist um knapp 1,5% besser als der bisherige Standardkunststoff.

Abbildung 45: Sommersmog⁹⁷



Bei der Umweltwirkungskategorie Stratosphärischer Ozonabbau ist dagegen eine Verschlechterung feststellbar, deren Ursache nach Aussage von BASF in der Herstellung der organischen Nanopartikel begründet liegt.

Abbildung 46: Stratosphärischer Ozonabbau⁹⁸



⁹⁷ Quelle: BASF (2005b)

⁹⁸ Quelle: BASF (2005b)

4.7.3 Fazit

In dieser Fallstudie wurden exemplarisch Umweltentlastungspotenziale von weiterentwickelten technischen Kunststoffen untersucht, deren Verarbeitungseigenschaften durch den gezielten Zusatz von Nanopartikeln wesentlich verbessert werden. Als konkretes Beispiel wurde dazu der rheologie-modifizierte Ultradur® High Speed-Kunststoff der Fa. BASF betrachtet und ein Vergleich zum bisherigen Standard-PBT über den gesamten Produktlebensweg vorgenommen. Die Vorteile dieses besonders gut fließfähigen Kunststoffes zeigen sich insbesondere in der Spritzgussverarbeitung. Auf Grund der niedrigen Schmelzeviskosität reichen geringere Einspritz- und Nachdrücke oder eine geringere Verarbeitungstemperatur aus um entsprechende Geometrien zu realisieren. Bei dem betrachteten Szenario, in dem bei gleichem Materialeinsatz eine Verringerung der Verarbeitungszeit um 20% unterstellt wurde, konnten Energieeinsparungen im Spritzgussprozess von ca. 9% erzielt werden. Die Verringerung spiegelte sich auch in den anderen Umweltaspekten wider. Nur in der Umweltwirkungskategorie Stratosphärischer Ozonabbau war eine Verschlechterung feststellbar.

5 Beschäftigungseffekte durch Nanotechniken

5.1 Untersuchungen zu den Beschäftigten in Nano-Unternehmen

Das wirtschaftspolitische Interesse an Nanotechnologie kommt u. a. durch die Nachfrage nach wirtschaftsstatistischen Informationen und Indikatoren zum Ausdruck, die einen Eindruck von der wirtschaftlichen und regionalen Bedeutung des Nanotechnologie-Marktes vermitteln sollen. Für den Nanotechnologie-Markt stellt sich – wie für andere relativ neue Märkte auch – allerdings das Problem, dass er noch nicht durch die amtliche Statistik abgebildet wird. Bei der Nanotechnologie handelt es sich um eine Querschnittstechnologie, deren Anbieter und Nutzer über ein weites Spektrum von Wirtschaftszweigen (WZ) verstreut sind. Mithin lässt sich kein homogener Wirtschaftszweig identifizieren und klassifizieren. Es gibt bisher keine statistische Konvention für den Bereich der Nanotechnologie, die eine einfache und rasche Präsentation von Wirtschaftsindikatoren für eine statistisch definierte „Nanotechnologie-Branche“ erlauben würde. Im vergleichbaren Fall der Querschnittstechnik „Umwelttechnik“ dauerte es nahezu 30 Jahre, bis es zu einer allgemein akzeptierten statistischen Konvention kam (OECD/EUROSTAT 1999).

Vor diesem Hintergrund lässt sich die wirtschaftliche Bedeutung des Nanotechnologie-Sektors allenfalls durch Ad-hoc-Untersuchungen annäherungsweise umschreiben. Das IÖW hat dementsprechend eine schriftliche Befragung von Nanotechnologieunternehmen durchgeführt. Die Nanotechnologieunternehmen wurden ganz überwiegend über Datenbanken (nano-map.de, nanoproducts.de und nanofirmen-datenbank.de) sowie über Internetrecherchen und Messekataloge identifiziert. In der Summe konnten 866 „Nano-Unternehmen“ in Deutschland identifiziert werden. Der ganz überwiegende Teil der Unternehmen war in der Datenbank nano-map.de vertreten.

Von den 866 an Nano-Unternehmen verschickten Fragebögen⁹⁹ haben wir insgesamt 168 schriftliche - teilweise auch telefonische - Rückantworten erhalten (Antwortquote

⁹⁹ Der Fragebogen ist im Anhang 5 aufgeführt.

19,4%). Davon haben 36 Unternehmen lediglich mitgeteilt, dass sie sich als dem Berichtskreis nicht zugehörig ansehen, ohne jedoch den Fragebogen ausgefüllt zu haben. Weitere 23 Unternehmen haben nur angegeben, nicht an der Befragung teilnehmen zu wollen; ob diese der Nanotechnologie zuzuordnen sind, wurde nicht bekannt. In der Summe sind damit 109 auswertbare Fragebögen eingegangen (Rücklaufquote der auswertbaren Fragebögen = 12,4%), in welchen 93 der Unternehmen angaben, aktuell Nanoaktivitäten zu verfolgen oder in naher Zukunft aufnehmen zu wollen.

Mit der vorliegenden Untersuchung liegen nunmehr für Deutschland drei Studien vor, die sich unter anderem der Frage nach den Beschäftigungswirkungen durch Nanotechnologien im Unternehmenssektor widmen (vgl. VDI TZ 2004; RWI et al 2008). Neben Gemeinsamkeiten und vergleichbaren methodischen Ansätzen weisen die drei Studien neben den unterschiedlichen Bezugsjahren auch erhebliche Unterschiede bei den Informationsquellen und den ausgewiesenen Indikatoren auf. Da sich die drei Studien auf unterschiedliche Basisjahre beziehen, kann der folgende Methoden-, Datenbasis- und Ergebnisvergleich auch interessante Anhaltspunkte zur Dynamik des Nanotechnologiesektors in Deutschland vermitteln.

5.2 Vergleich der methodischen Ansätze und Datenquellen

Für den folgenden Ergebnisvergleich ist es unabdingbar, auf die Gemeinsamkeiten, Ähnlichkeiten und Unterschiede jenseits der unterschiedlichen Bezugsjahre hinzuweisen. Dabei zeigt sich, dass die drei Studien in weiten Bereichen hohe Gemeinsamkeiten aufweisen (vgl. Tabelle 18).

Tabelle 18: Ausgewählte Untersuchungen zu den Beschäftigungseffekten in Nano-Unternehmen: Methoden und Datenquellen¹⁰⁰

Quellen Arbeitsschritte	VDI-TZ (2004)	RWI et al. (2008)	IÖW et al. (2008)
Definition Nanotechnologie	BMBF-Definition	BMBF-Definition	BMBF-Definition
Basisjahr	2002	2005	2007

¹⁰⁰ Quelle: IÖW

Quellen Arbeitsschritte	VDI-TZ (2004)	RWI et al. (2008)	IÖW et al. (2008)
Bestimmung der Grundgesamtheit von Nano-Unternehmen	Identifikation auf Grund von Selbstdeklaration von Unternehmen oder Teilnahme an Förderprogrammen Entwicklung der Nano-Map-Internetplattform	www.nano-map.de	www.nano-map.de www.nanoproducts.de www.nanofirmen-datenbank.de www.firmenwissen.de IVAM: Nano-/Mikroatlas; Anbieterhinweise auf Nano-Messen und -Konferenzen; Berücksichtigung der Unternehmensbefragung
Ermittlung von Unternehmensdaten für Nano-Unternehmen (bspw. Wirtschaftszweig, Beschäftigte)	Markus-Datenbank (Creditreform); Unternehmensberichte und Webseiten; Fecht et al. (2003)	Amadeus-Datenbank	www.firmenwissen.de (Creditreform) Unternehmenswebseiten
Ermittlung der Gesamtbeschäftigten in Nano-Unternehmen	Für die Stichprobe von 167 Unternehmen aus allen Größenklassen	Für Grundgesamtheit KMU mit weniger als 250 Beschäftigten	Für Stichprobe von KMU mit weniger als 250 Beschäftigten
Ermittlung der Nano-Anteile bei den Beschäftigten	Schätzung auf Grund einer Unternehmensbefragung und Ergänzung durch Fecht et al. (2003)	nein	Berichtskreisergebnisse ¹⁰¹ auf der Basis einer Unternehmensbefragung
Hochrechnung	Extrapolation der Stichprobenergebnisse nach Größenklassen	nein	nein
Potenzialschätzung	nein	nein	Schätzung auf der Basis der Nano-Anteile nach KMU Größenklassen und Wirtschaftszweigen
Schätzung der Beschäftigtenentwicklung im Nanobereich	Schätzung auf der Basis der Unternehmensbefragung für 2003-2006	nein	Qualitative Berichtskreisergebnisse für 2008-2010 im Vergleich zu 2007

Zunächst einmal ist festzuhalten, dass die drei Studien in konzeptioneller Hinsicht grundsätzlich einer vergleichbaren Sequenz von Arbeitsschritten folgen. Nach dem Versuch, eine Definition von Nanotechnologie vorzunehmen, erfolgt eine Identifizierung

¹⁰¹ Bei dem Berichtskreis handelt es sich um die Unternehmen, die auf die Befragung geantwortet haben.

von vermutlichen Nanotechnologie-Anbietern. Für die vermutete Grundgesamtheit von Nanotechnologie-Anbietern werden dann aus Unternehmens-Datenbanken Informationen zu Umsätzen und Beschäftigten gesammelt. Da diese Unternehmens-Datenbanken noch keine konkreten Informationen zu den Nano-Aktivitäten enthalten, werden z. T. Unternehmensbefragungen in der Nano-Grundgesamtheit nachgeschaltet, die dann in unterschiedlicher Weise für Hochrechnungen oder Potenzialschätzungen weiter verwendet werden.

Die Unterschiede zwischen den drei Studien resultieren vor allem aus Unterschieden bei den

- Anbieterverzeichnissen,
- verwendeten Unternehmensdaten,
- verfügbaren Informationen zu den Nano-Aktivitäten.

In der vorliegenden Studie ebenso wie in den Vergleichsuntersuchungen werden Nanotechniken gleichermaßen als „enabling technologies“ definiert, d. h. sie beeinflussen auch andere Technologien und führen hier zu neuen Produkten mit neuartigen Eigenschaften (Fleischer/Grunwald 2005). Als Folge dieser zugrunde gelegten Definitionen betreffen nanotechnologisch basierte Werkstoffe, Verfahren und Produkte und damit zusammenhängende Dienstleistungen ein breites Spektrum von Wirtschaftszweigen und Aktivitäten. Nano-Aktivitäten finden sich nicht nur entlang der klassischen Wertschöpfungskette – etwa F+E, Herstellung, Vermarktung usw. –, sondern definitionsgemäß auch bei den Anwendern, Nutzern und Investoren. Dadurch verschwimmt die in der amtlichen Statistik übliche Trennung zwischen Anbietern von Waren und Dienstleistungen einerseits (angebotsorientierter, produktionswirtschaftlicher Ansatz) und den Nutzern bzw. Anwendern andererseits (Investoren- oder Nutzerkonzept). Aus diesem Grund sind Untersuchungen auf der Basis derart breiter Definitionen und die dabei generierten wirtschaftsstatistischen Indikatoren nicht vergleichbar mit Unternehmens-, Umsatz- und Beschäftigungszahlen für Wirtschaftszweige der amtlichen Statistik.

Dies sei am Beispiel der Umweltwirtschaft in der amtlichen Statistik verdeutlicht. Sie umfasst die Anbieter von Waren und Dienstleistungen für den Umwelt- und Ressourcenschutz, hingegen nicht die Anwender von Umweltschutzgütern, auch wenn für letztere Umweltschutzanlagen und -dienstleistungen integraler Bestandteil oder

sogar Voraussetzung für ihre Unternehmensaktivitäten sind. Hier käme also niemand auf die Idee, Umsätze und Beschäftigte zu erfassen, die im Zusammenhang mit der Nutzung und Anwendung von Umwelttechnologien stehen.

Die extensive Definition von Nanotechnologie als Querschnittstechnologie schlägt naturgemäß auch bei dem nächsten Arbeitsschritt, der Bestimmung der vermuteten Grundgesamtheit von sogenannten Nano-Unternehmen durch, d. h., in den jeweiligen Grundgesamtheiten finden sich sowohl Anbieter als auch Anwender. Die Pionierarbeit des VDI TZ (2004) mündete immerhin in eine Internetplattform (nano-map.de), die alle relevanten Anbieter und Anwender einbezieht, „bei denen derzeit im Nanotechnologiebereich Aktivitäten feststehen oder zumindest stark vermutet werden“ (ebenda). Leider lässt die VDI TZ-Studie nicht erkennen, in welchem Maß die dafür durchgeführte Befragung der erfassten Anbieter und Anwender zu einer Korrektur der Grundgesamtheit beigetragen hat. Die RWI-Studie stützt sich ausschließlich auf nano-map.de ohne weitere Hinterfragung.

In der vorliegenden Studie wurden neben der VDI-Internetplattform noch weitere Informationsquellen genutzt. Darüber hinaus wurden auch die Ergebnisse unserer Unternehmensbefragung berücksichtigt, die darauf hindeuten, dass ein Teil der Unternehmen, die in den einschlägigen Unternehmensverzeichnissen als Nano-Anbieter geführt werden, sich nicht oder nicht mehr dem Nano-Markt zuordnen. Es ist davon auszugehen, dass dieser Sachverhalt auch für diejenigen Unternehmen zutrifft, die nicht auf die Befragung reagiert haben. Gleichwohl wurde mangels robuster Zusatzinformationen davon abgesehen, die Anzahl der Nicht-Marktteilnehmer hochzurechnen.

Die Gründe für die Nicht-Zuordnung zum Nano-Markt, die im Einzelnen nur teilweise verifiziert werden konnten, sind vielfältig:

- tatsächliches Ausscheiden aus dem Markt,
- Geheimhaltung der eigenen Nano-Aktivität,
- Vermeidung lästiger Fragebogenaktionen,
- mangelnde Transparenz hinsichtlich der Nano-Aktivitäten im (Groß-) Unternehmen,
- Insolvenz des Unternehmens,

- Verkauf oder Fusionierung des Unternehmens.

In jedem Falle bleibt festzuhalten, dass in den drei Vergleichsstudien die angenommene bzw. verwendete Grundgesamtheit um mehr als 10 % zu hoch angesetzt sein dürfte.

In Bezug auf die konsultierten Unternehmensdateien zur wirtschaftsstatistischen Beschreibung der ausgewählten Nano-Unternehmen ist festzuhalten, dass die vorliegende Untersuchung nicht über die Ressourcen verfügte, um aufwändige Recherchen in Unternehmens-Datenbanken durchzuführen: Daher ist der von uns erfasste Anteil von Nano-Unternehmen, für die Beschäftigungsangaben gewonnen werden konnten, so niedrig, dass er keine Hochrechnung für die angenommene Grundgesamtheit erlaubt.

Ausgehend vom RWI-Ansatz, nur die Gesamtbeschäftigten in den Nano-Unternehmen mit weniger als 250 Beschäftigten auszuweisen, können auch die Vergleichsdaten für die VDI TZ und die IÖW-Untersuchung berechnet werden. „Im Hinblick auf die Interpretation der nach diesem Konzept berechneten Beschäftigungsdaten ist allerdings [...] zu bedenken, dass nicht bekannt ist, in welchem Umfang die entsprechenden Unternehmen tatsächlich nanotechnisch basierte Produkte herstellen“ (RWI et al. 2008). Dagegen erscheint es plausibel, Großunternehmen nicht in die Betrachtung einzubeziehen, da es bei ihnen „noch sehr viel schwieriger [ist], den auf die Nanotechnologie entfallenden Produktionsanteil zu bestimmen, so dass die Einbeziehung dieser Unternehmensgruppe zu erheblichen und nicht mehr interpretierbaren Verzerrungen führen würde“ (ebenda). Insofern haben die Vergleichsergebnisse eher exemplarischen Charakter und können nicht als Indikator für das tatsächliche Beschäftigungsvolumen der Nanotechnologie herangezogen werden (ebenda).

Vor dem Hintergrund der fehlenden Aussagekraft von Beschäftigungs- und Umsatzangaben für Nano-Unternehmen aus den Unternehmens-Dateien drängen sich Unternehmensbefragungen in den vermuteten Grundgesamtheiten geradezu auf. Sowohl die VDI TZ-Studie als auch die vorliegende Untersuchung sind diesen Weg – mit unterschiedlichen Rückantwort-Quoten – gegangen, um damit eine Hochrechnung oder eine Potenzialschätzung zu wagen. In Bezug auf die Interpretation der ermittelten Nano-Anteile bei den Gesamtbeschäftigten ist allerdings darauf hinzuweisen, dass es

sich in beiden Studien nicht um Vollzeitäquivalente handelt. Die Ermittlung von x % der Gesamtbeschäftigten im unternehmerischen Nanobereich ist eine rein personenbezogene Betrachtungsweise. Sie sagt nichts über die tatsächliche Beschäftigung in Bezug auf Vollzeitäquivalente aus. Diese Anteile dürften in der Regel deutlich unter 100 % liegen.

In Bezug auf die VDI TZ-Studie ist noch zu bemerken, dass für die Ermittlung der Beschäftigtenzahlen im Nano-Bereich „keine absoluten Zahlen, sondern Größenbereiche abgefragt wurden“ (VDI TZ 2004). Dies führt zu erheblichen Unschärfen, wie die darauf aufbauenden Hochrechnungen zeigen.

Außerdem wurde „für die Ermittlung der Beschäftigtenzahlen der Umsatzanteil der Nanotechnologie herangezogen und 1:1 auf den Anteil der Beschäftigten im Zusammenhang mit der Nanotechnologie übertragen“ (ebenda). Dies führt zu erheblichen Verwerfungen, wie die umsatz- bzw. beschäftigungsbasierten Hochrechnungen in der VDI TZ-Studie zeigen. Detaillierte Analysen der Unternehmensangaben in der vorliegenden Studie unterstreichen die Tatsache, dass die Umsatzanteile in der Regel deutlich höher als die Beschäftigungsanteile im Nano-Bereich liegen.

In der VDI TZ-Studie wurde eine Extrapolation der Befragungsergebnisse auf die vermutete Grundgesamtheit vorgenommen. Die erhebliche Diskrepanz zwischen den Hochrechnungen auf der Basis von Umsatzzahlen und denen auf der Basis von Beschäftigungs-Anteilsklassen deutet auf erhebliche Schwächen des umsatzbezogenen Hochrechnungsansatzes hin.

Die vorliegende Untersuchung musste sich mangels ausreichender Unternehmensdaten für die Grundgesamtheit auf eine Potenzialschätzung beschränken. Dabei werden die Befragungsergebnisse mit der amtlichen Statistik verknüpft. Im Einzelnen werden die Nano-Anteile in den Beschäftigungsgrößenklassen der KMU mit den vergleichbaren Beschäftigungsdaten für die Kernbereiche des Nano-Marktes, d. h. für die Wirtschaftszweige mit signifikanten Besetzungen im Nano-Bereich, verknüpft. Dieser produktionswirtschaftliche, angebotsbezogene Ansatz orientiert sich an dem vom Niedersächsischen Institut für Wirtschaftsforschung (NIW) entwickelten Ansatz zur Schätzung der potenziellen Produktion von Waren für den Umwelt- und Klimaschutz (Legler et al. 2007).

Schließlich ist noch zu erwähnen, dass die vorliegende Studie sowie die VDI TZ-Untersuchung sich der künftigen Beschäftigungsentwicklung widmen. Während die vorliegende Untersuchung auf eine qualitative Abschätzung seitens der befragten Unternehmen abstellt, werden in der VDI TZ-Studie Wachstumsraten angeboten.

Angeichts der Schwächen der VDI TZ-Hochrechnung überrascht der Mut, den Beschäftigungszuwachs bis 2006 auf der Basis der unterschiedlichen Hochrechnungsverfahren zu quantifizieren. Darüber hinaus ist die Qualifizierung der Beschäftigungsentwicklung als „neu geschaffene Arbeitsplätze durch die Nanotechnologie“ (VDI TZ 2004) weder anhand der gestellten Frage in der Unternehmensbefragung noch aus methodischer Sicht (nur Behandlung von Brutto-Beschäftigungseffekten) vertretbar.

5.3 Vergleich ausgewählter Untersuchungsergebnisse

Im folgenden Teil sollen – soweit möglich und sinnvoll – ausgewählte Ergebnisse der für Deutschland bislang vorliegenden Studien gegenüber gestellt werden. Dabei handelt es sich im Einzelnen um Angaben zur

- vermuteten Grundgesamtheit von Nano-Unternehmen,
- Anzahl der Beschäftigten in Nano-Unternehmen,
- Anzahl der Nano-Beschäftigten in den Nano-Unternehmen,
- Extrapolation der Befragungsergebnisse,
- Abschätzung des Nano-Beschäftigungspotenzials sowie
- Beurteilung der Beschäftigungsentwicklung in den Nano-Unternehmen.

Soweit vorhanden werden die Ergebnisse auch nach Bundesländern, Wirtschaftszweigen und Unternehmensgrößenklassen differenziert ausgewiesen.

5.3.1 Die vermutete Grundgesamtheit von Unternehmen im Bereich Nanotechnologie

Der Ergebnisvergleich in Tabelle 19 illustriert sehr deutlich die Dynamik der Marktentwicklung im Bereich der Hersteller und Anwender von Nanotechniken. Wurden 2002 noch ca. 450 Anbieter gezählt, hatte sich diese Zahl (unkorrigiert) Anfang 2008 nahezu verdoppelt. Selbst in dem Zeitraum zwischen der RWI-Internetabfrage im Juli

2007 und den IÖW-Recherchen bis Anfang 2008 zeichnet sich ein rasanter Zuwachs an nanorelevanten Anbietern ab, auch wenn ein wesentlicher Erklärungsfaktor dabei die Berücksichtigung von Unternehmensverzeichnissen außerhalb der nano-map-Plattform sein dürfte. Berücksichtigt man darüber hinaus, dass die Anbieterzahlen sowohl bei der VDI TZ-Studie als auch bei der RWI-Untersuchung nicht anhand von Befragungsergebnissen nach unten korrigiert wurden, lässt sich die Hypothese einer hohen Marktdynamik auf der Angebotsseite sicherlich uneingeschränkt aufrechterhalten.

Tabelle 19: Vermutete Grundgesamtheit von Nanotechnologieunternehmen

Quellen	VDI TZ	RWI et al.	IÖW et al.
Indikatoren	2004	(2008)	(2008)
Basisjahr	2002	2007	2008
Unternehmen insgesamt	ca. 450	646	866
Davon: KMU mit weniger als 250 Beschäftigten	o.A.	521	o.A.
Korrigierte Grundgesamtheit	Nein	nein	800

Tabelle 20: In der Nanotechnologie aktive Akteure nach Bundesländern (2007)¹⁰²

Einrichtung	BW	Bay	Ber	Bra	Bre	HH	He	M-V	Ns	NRW	R-P	Saa	Sac	S-A	S-H	Th	Insg.
	Anzahl																
Netzwerke	5	9	2	0	0	5	4	0	4	11	2	2	3	0	1	0	48
Forschungseinrichtungen	17	6	6	5	2	2	2	2	7	13	3	3	18	2	2	4	94
Hochschulinstitute	13	18	4	2	4	5	14	2	17	44	3	3	22	1	4	6	162
KMU	62	73	37	4	10	11	69	9	20	81	18	20	56	14	19	18	521
Großunternehmen	15	30	2	0	0	4	20	0	9	23	5	3	8	0	1	5	125
Öffentliche Einrichtungen	3	5	6	1	2	1	6	1	4	10	1	1	3	1	2	1	48
Finanzinstitutionen	9	18	5	1	2	9	4	0	0	12	1	1	4	1	0	1	68
Insgesamt	124	159	62	13	20	37	119	14	61	194	33	33	114	19	29	35	1066
	Einrichtungen insgesamt = 100																
Netzwerke	10	19	4	0	0	10	8	0	8	23	4	4	6	0	2	0	100
Forschungseinrichtungen	18	6	6	5	2	2	2	2	7	14	3	3	19	2	2	4	100
Hochschulinstitute	8	11	2	1	2	3	9	1	10	27	2	2	14	1	2	4	100
KMU	12	14	7	1	2	2	13	2	4	16	3	4	11	3	4	3	100
Großunternehmen	12	24	2	0	0	3	16	0	7	18	4	2	6	0	1	4	100
Öffentliche Einrichtungen	6	10	13	2	4	2	13	2	8	21	2	2	6	2	4	2	100
Finanzinstitutionen	13	26	7	1	3	13	6	0	0	18	1	1	6	1	0	1	100
Insgesamt	12	15	6	1	2	3	11	1	6	18	3	3	11	2	3	3	100
Zum Vergleich:																	
Bevölkerungsanteil	13	15	4	3	1	2	7	2	10	22	5	1	5	3	3	3	100
BIP-Anteil	15	18	4	2	1	4	8	1	9	22	4	1	4	2	3	2	100
SV-Beschäftigtenanteil	14	16	4	3	1	3	8	2	9	21	4	1	5	3	3	3	100

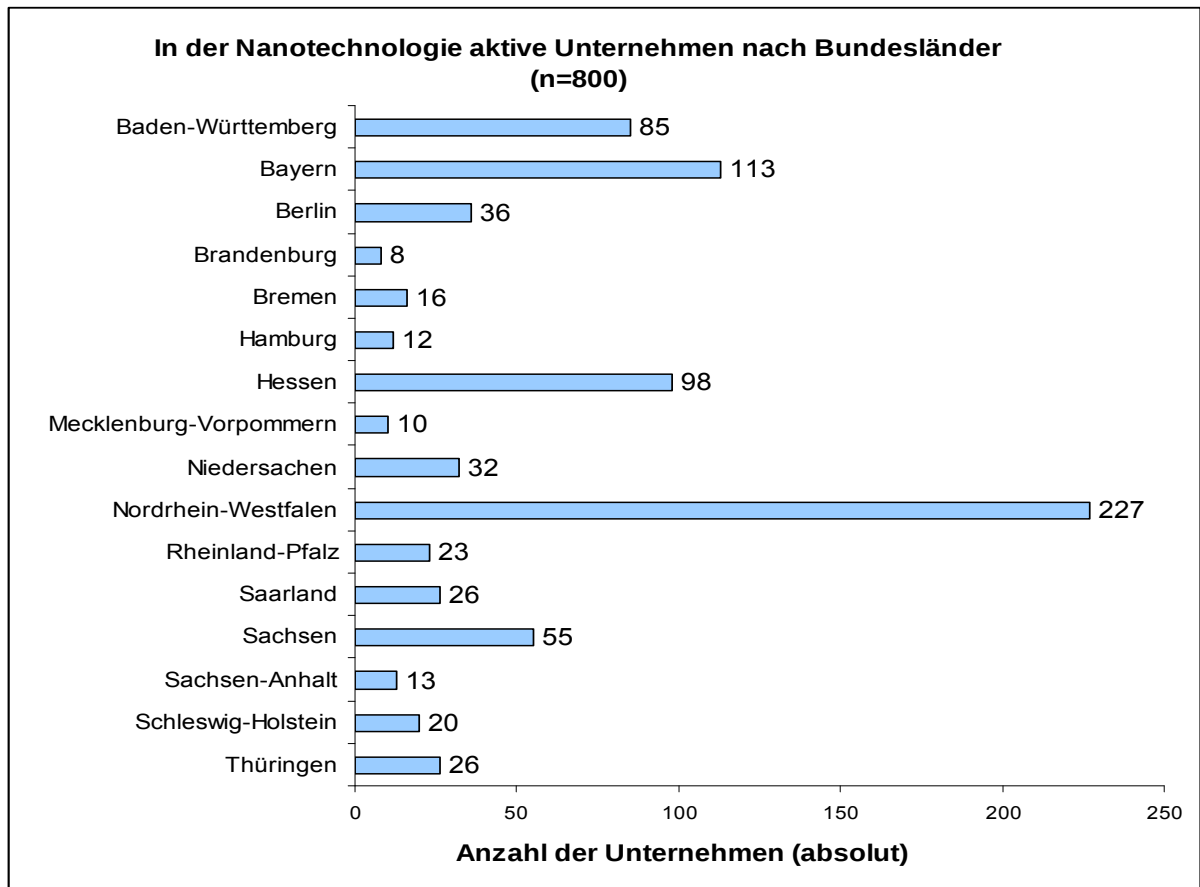
Was die Marktpräsenz anbetrifft, so dominieren – gemessen an der Zahl der Anbieter – eindeutig die KMU mit weniger als 250 Beschäftigten (vgl. Tab. 20).

Einen Überblick über die Akteure im Nanotechnologiebereich nach Bundesländern liefern Tab. 20 und Abb. 47. Hier wird trotz unterschiedlicher Grundgesamtheiten übereinstimmend die starke Präsenz von Anbietern aus Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Sachsen deutlich. Allerdings relativiert sich dieses Länder-Ranking, wenn man die Anzahl der Anbieter zu anderen Indikatoren – wie z.B. BIP oder sozialversicherungspflichtige Beschäftigten – in Beziehung setzt (vgl. Abb. 48).

In sektoraler Hinsicht zeigt sich, dass die meisten in der Nanotechnologie tätigen Unternehmen den Wirtschaftszweigen wirtschaftliche Dienstleistungen (KA), Elektrotechnik, DV und Optik (DL) sowie dem Handel und der Kfz-Reparatur (GA) zuzuordnen sind (vgl. Abb. 49).

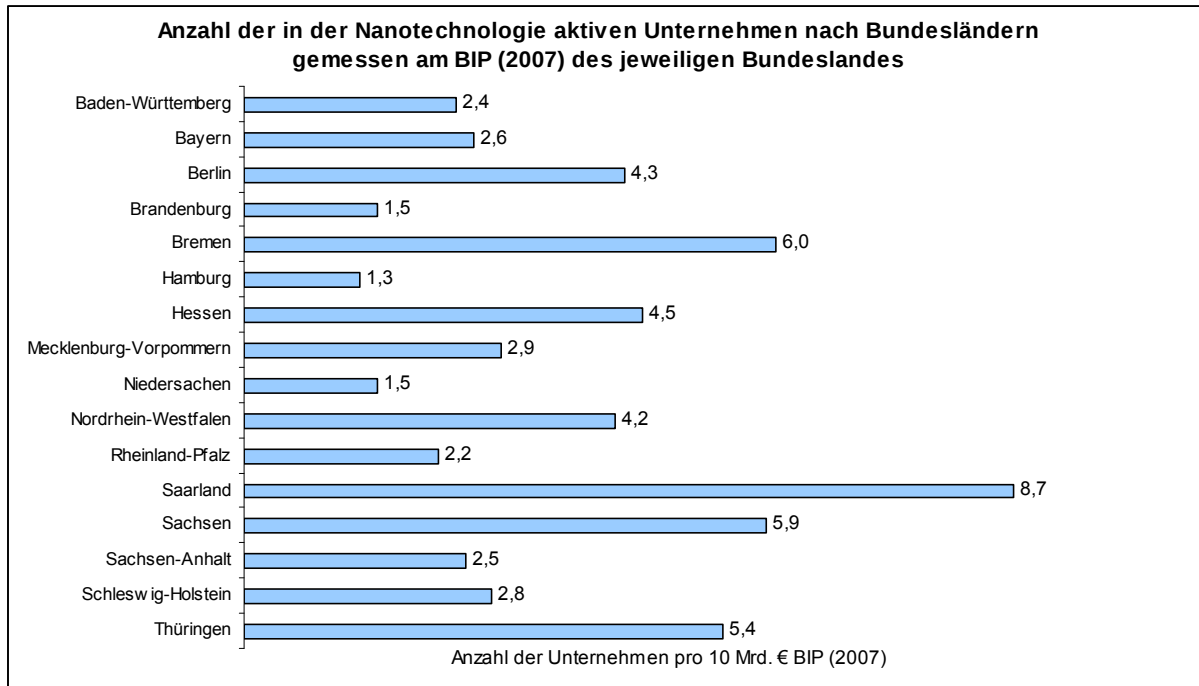
¹⁰² Quelle: RWI et al. (2008)

Abbildung 47: In der Nanotechnologie aktive Unternehmen nach Bundesländern (2008)¹⁰³



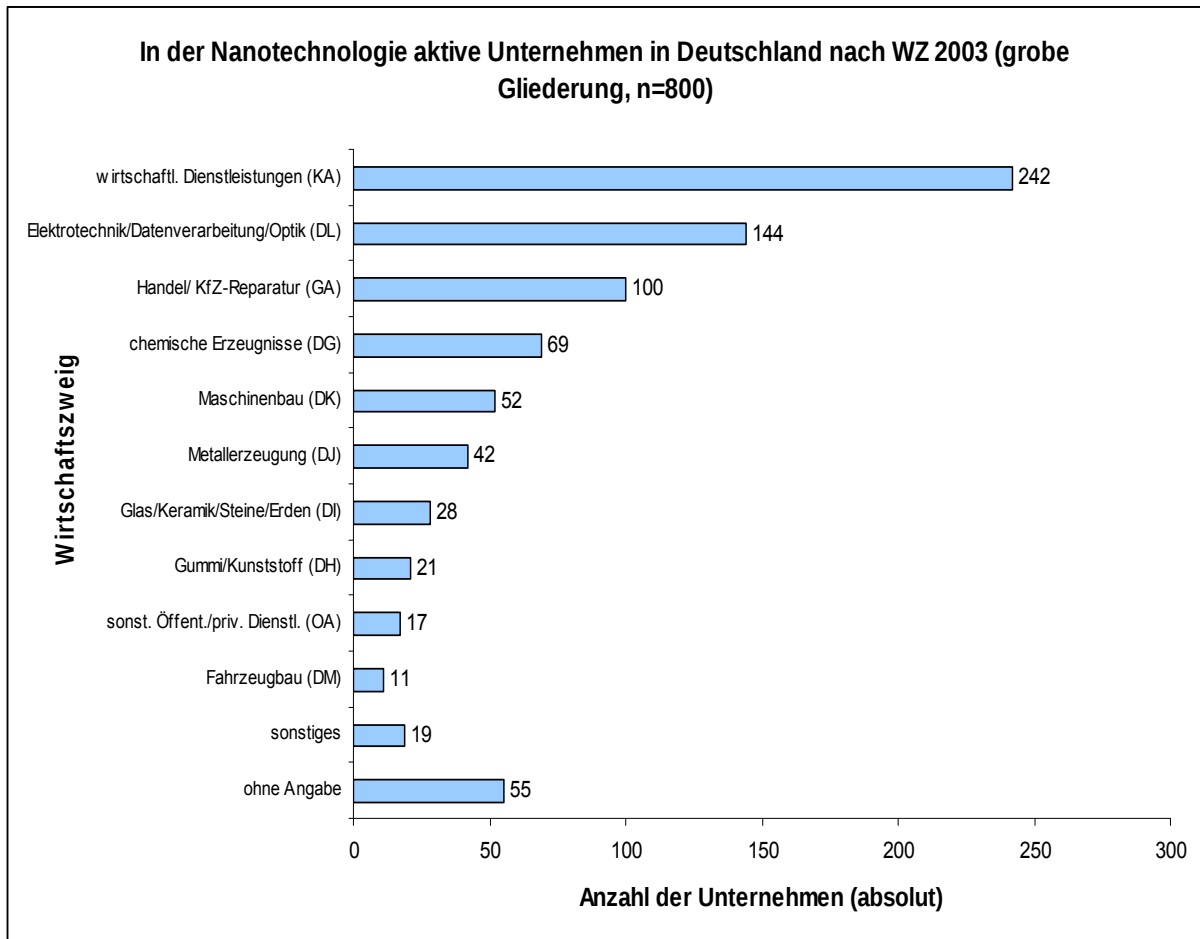
¹⁰³ Quelle: IÖW

Abbildung 48: Anzahl von Nanotechnologie-Unternehmen nach Bundesländern in Relation zum BIP der Länder¹⁰⁴



¹⁰⁴ Quelle: IÖW

Abbildung 49: Nanotechnologie-Unternehmen in Deutschland nach Wirtschaftszeigen (2008)¹⁰⁵



5.3.2 Beschäftigte in Nanotechnologie-Unternehmen

Zur Ermittlung von Beschäftigungseffekten von nanotechnologie-bezogenen Unternehmensaktivitäten sind in Abhängigkeit von Untersuchungsziel, Erkenntnisinteresse und von den verfügbaren Ressourcen höchst unterschiedliche Methoden und Datenquellen heranzuziehen. Grundsätzlich kommen folgende Beschäftigungseffekte in Betracht (vgl. Sprenger et al. 2003):

- positive und negative Beschäftigungseffekte,
- direkte und indirekte Beschäftigungseffekte,

¹⁰⁵ Quelle: IÖW

- einzel-, branchen-, regional- und gesamtwirtschaftliche Effekte,
- kurz-, mittel-, und langfristige Beschäftigungseffekte,
- Vollzeit- und Teilzeitbeschäftigung,
- dauerhafte und zeitlich befristete Beschäftigung,
- Schaffung neuer und Erhaltung bestehender Arbeitsplätze,
- Auswirkungen auf Qualitätsmerkmale bzw. Qualifikationsanforderungen bei Nano-Arbeitsplätzen,
- Brutto- und Nettoeffekte,
- quantifizierbare und nicht-quantifizierbare Beschäftigungseffekte.

Je nach Untersuchungsinteresse kann das Spektrum der einzusetzenden Methoden von Unternehmensangaben über erweiterte Input-Output-Rechnungen bis hin zu makro-ökonomischen Modellrechnungen reichen.

Die wohl einfachste, in ihrer Aussagekraft allerdings am stärksten eingeschränkte Methode ist die Ermittlung der Bruttoeffekte auf der Basis der in den identifizierten Nano-Unternehmen insgesamt Beschäftigten, die durch die Verknüpfung von Nano-Anbieterverzeichnissen und Unternehmensdateien bewerkstelligt wird.

Die in Tab. 21 dargestellten Untersuchungsergebnisse unterstellen, dass alle in den erfassten Nano-Unternehmen tätigen Beschäftigten als Vollzeitäquivalente ausschließlich in Nano-Aktivitäten involviert sind. Dies ist natürlich keine realistische Annahme, wie die nachfolgend unter 5.3.3 diskutierten Befragungsergebnisse verdeutlichen.

Sieht man einmal von dieser gravierenden Einschränkung der Aussagekraft der Vergleichsergebnisse ab, so zeigen sich auch erhebliche Unterschiede zwischen den relativ zeitnah durchgeführten Untersuchungen des RWI und des IÖW.

Tabelle 21: Anzahl der Gesamtbeschäftigten in Nanotechnologie-Unternehmen¹⁰⁶

Quellen	VDI-TZ	RWI et al.	IÖW
Indikatoren	(2004)	(2008)	
Basisjahr	2002	2005	2007
Einbezogene KMU mit weniger als 250 Beschäftigten	117	521	295
Anzahl der Gesamtbeschäftigten in KMU mit weniger als 250 Beschäftigten	3.793	9.782	14.144
Einbezogene Großunternehmen mit 250 und mehr Beschäftigten	50	162	184
Anzahl der Gesamtbeschäftigten in Groß-Unternehmen mit 250 und mehr Beschäftigten	1.258.405	o.A.	2.597.435

Trotz einer im Vergleich zum RWI deutlich geringeren Anzahl von einbezogenen KMU (295 vs. 521), für die Beschäftigtenzahlen ermittelt werden konnten, führt die Aggregation der Gesamtbeschäftigten in den Nano-KMU bei der IÖW-Analyse zu einer rd. 50 % höheren Beschäftigungszahl. Dies ist vermutlich auf die unterschiedlichen Datenquellen bei den Unternehmensdaten zurückzuführen.

Trotz der unterschiedlichen Teilgesamtheiten und widersprüchlichen Untersuchungsergebnissen bei den Gesamtbeschäftigten weisen die nach Bundesländern und Wirtschaftszweigen differenzierten Vergleichsergebnisse ein hohes Maß an Übereinstimmung aus (vgl. Tab. 22 und 23 sowie Abb. 50 und 51). Bei den Bundesländern dominieren übereinstimmend NRW, Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Sachsen. Auch bei der sektoralen Betrachtung wird übereinstimmend die starke Bedeutung der Wirtschaftszweige Elektronik/E-Technik (DL), F+E-Dienstleistungen (K73) und des Handels (GA) deutlich.

Auch wenn die vorliegenden Vergleichsergebnisse keine Auskunft über die tatsächlichen Beschäftigungsvolumina im Nano-Bereich vermitteln, liefern sie doch wichtige Anhaltspunkte zu den regionalen und sektoralen Schwerpunkten der Nano-Aktivitäten.

¹⁰⁶ Quelle: IÖW

**Tabelle 22: Beschäftigte in KMU der Nanotechnologie nach Bundesländern (n=521)
(Angaben für das Jahr 2005)¹⁰⁷**

	Zahl der Beschäftigten in den Nanotech-KMU	Anteil des Bundeslands an den Nanotech- Beschäftigten in %	Anteil des Bundeslands an den SV-Beschäftigten in %
Baden-Württemberg	1.106	11,3%	14,2%
Bayern	1.503	15,4%	16,3%
Berlin	494	5,1%	3,9%
Brandenburg	31	0,3%	2,7%
Bremen	189	1,9%	1,0%
Hamburg	162	1,7%	2,8%
Hessen	1.329	13,6%	8,0%
Mecklenburg-Vorpommern	221	2,3%	1,9%
Niedersachsen	807	8,2%	8,8%
Nordrhein-Westfalen	1.536	15,7%	21,2%
Rheinland-Pfalz	187	1,9%	4,4%
Saarland	192	2,0%	1,3%
Sachsen	1.137	11,6%	5,1%
Sachsen-Anhalt	72	0,7%	2,8%
Schleswig-Holstein	534	5,5%	2,9%
Thüringen	282	2,9%	2,7%
Deutschland	<u>9.782</u>	100,0%	100,0%

**Tabelle 23: Beschäftigte in KMU der Nanotechnologie nach Bundesländern (Angaben für
das Jahr 2007, n=295)¹⁰⁸**

	Zahl der Beschäftigten in den Nanotech-KMU	Anteil des Bundeslands an den Nanotech- Beschäftigten in %	Anteil des Bundeslands an den SV-Beschäftigten in %
Baden-Württemberg	1.507	10,65%	15,25%
Bayern	1.800	12,73%	17,09%
Berlin	778	5,50%	3,45%
Brandenburg	32	0,23%	2,51%
Bremen	184	1,30%	1,00%
Hamburg	163	1,15%	2,62%
Hessen	2.137	15,11%	7,69%
Mecklenburg-Vorpommern	254	1,80%	1,72%
Niedersachsen	795	5,62%	8,77%
Nordrhein-Westfalen	3.717	26,28%	21,10%
Rheinland-Pfalz	335	2,37%	4,45%
Saarland	294	2,08%	1,33%
Sachsen	1.007	7,12%	4,95%
Sachsen-Anhalt	92	0,65%	2,59%
Schleswig-Holstein	462	3,27%	2,79%
Thüringen	587	4,15%	2,69%
Deutschland	<u>14.144</u>	100,00%	100,00%

¹⁰⁷ Quelle: RWI et al (2008)

¹⁰⁸ Quelle: IÖW

Abbildung 50: Beschäftigung (in 2005) in KMU der Nanotechnologie nach Wirtschaftszweigen (WZ) (n=521 Unternehmen)¹⁰⁹

Beschäftigung in KMU der Nanotechnologie nach Wirtschaftszweigen

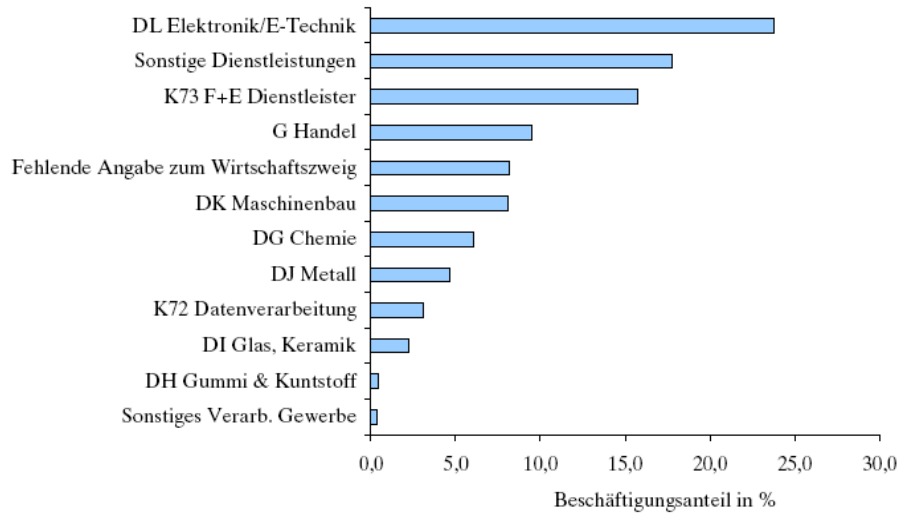
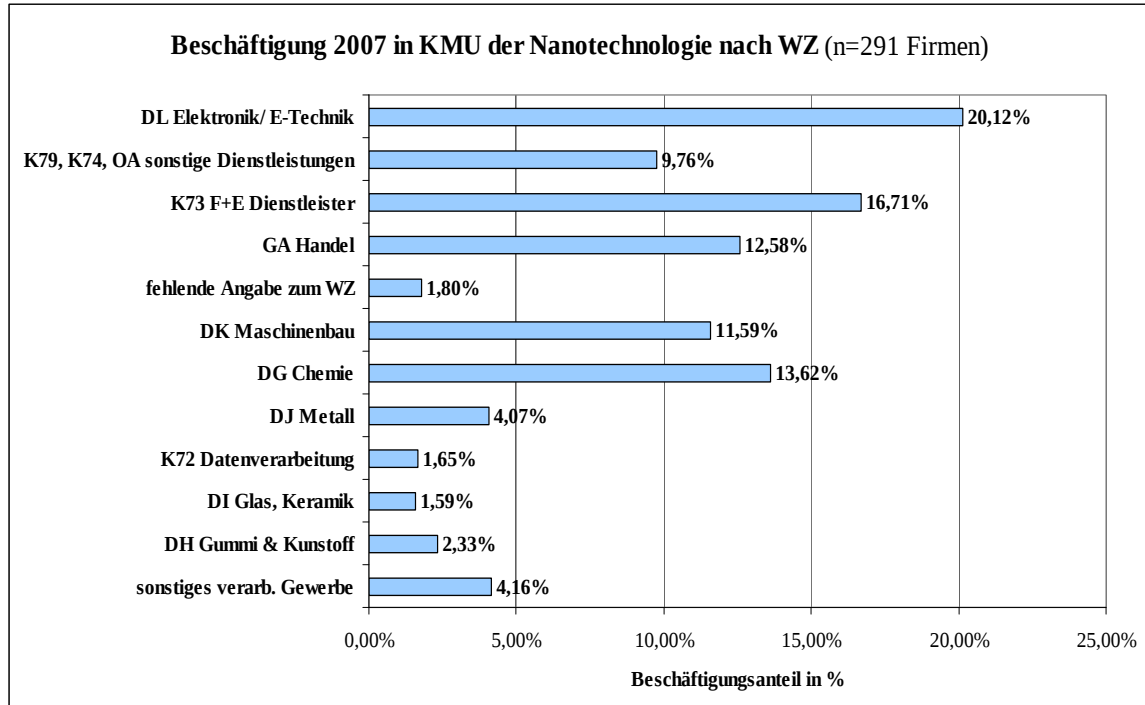


Abbildung 51: Beschäftigung (in 2007) in KMU der Nanotechnologie nach WZ (n=291 Unternehmen)¹¹⁰



¹⁰⁹ Quelle: RWI et al (2008)

¹¹⁰ Quelle: IÖW

5.3.3 Nano-Anteile der Beschäftigten in Unternehmen mit Nano-Aktivitäten

Da die Unternehmensdateien keine Auskunft zum Ausmaß der Nano-Aktivitäten der als Nano-Anbieter identifizierten Unternehmen liefern, sind Ad-hoc Befragungen dieser Anbieter erforderlich. Sowohl die VDI TZ-Studie als auch die vorliegende Untersuchung haben diesen methodischen Weg beschritten und sind zumindest in Bezug auf die Stichprobenergebnisse miteinander vergleichbar (vgl. Tab. 24).

Bei den Durchschnittswerten derjenigen Beschäftigten, die in Nano-Unternehmen mit weniger als 250 Beschäftigten auch nanobezogene Aufgaben erfüllen, zeigt sich ein hohes Maß an Übereinstimmung. Pro KMU sind durchschnittlich 9-10 Beschäftigte in Nano-Aktivitäten involviert. Die Gesamt- und Durchschnittszahlen beschreiben Personen- bzw. Kopffahlen, sagen aber nichts über Vollzeitäquivalente aus.

Die VDI TZ-Studie liefert auch Informationen über die Nano-Beschäftigten in Großunternehmen mit 250 und mehr Beschäftigten. Dabei wird tendenziell deutlich, dass die Mehrzahl der im Nano-Bereich Beschäftigten ihren Arbeitsplatz in Großunternehmen hat, obgleich vermutlich rd. 80% aller Unternehmen mit Nano-Aktivitäten den KMU zuzurechnen sind (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 24: Nano-Beschäftigte in Nanotechnologie-Unternehmen¹¹¹

	VDI - TZ	IÖW et al.
Basisjahr	2002	2007
Erfasste KMU mit weniger als 250 Beschäftigten	117	42
Nanotechnologie-Beschäftigte in KMU der Stichprobe	1.220 ¹	442
erfasste Großunternehmen der Stichprobe (mit 250 und mehr Beschäftigten)	50	11
Nanotechnologie-Beschäftigte in Großunternehmen (mit 250 und mehr Beschäftigten)	67.871 ¹	2.734 ²

1) geschätzt, 2) ein Großunternehmen in dieser Gruppe ordnete seine Gesamtmitarbeiterzahl [1200] als Nanomitarbeiter ein

¹¹¹ Quelle: IÖW

Bleibt noch der Hinweis auf den durchschnittlichen Anteil von Nano-Beschäftigten in den Unternehmen, für die Angaben oder Schätzungen zu den Gesamtbeschäftigten und den Nano-Anteilen verfügbar waren (vgl. Tab. 25). Die Schätzungen des VDI TZ ergaben für die Stichprobe von Unternehmen mit 100 und weniger Beschäftigten einen Nano-Anteil von 40%, während die Unternehmen mit 101 bis zu 250 Beschäftigten einen Vergleichswert von ca. 32% aufweisen.

Tabelle 25: Anteil der Nano-Beschäftigten in Nanotechnologie-Unternehmen der Stichprobe¹¹²

Unternehmensgrößenklasse	Nano-Anteile ¹ (2002) in %
1-20 Beschäftigte	46,5
21-100 Beschäftigte	37,0
101-259 Beschäftigte	23,1
251-500 Beschäftigte	18,9
501-1000 Beschäftigte	16,9
1.001-5000 Beschäftigte	18,4
5000 und mehr Beschäftigte	5,0

1) geschätzt über den Umsatz

Die Befragungsergebnisse des IÖW lassen signifikant niedrigere Vergleichswerte für die KMU (vgl. Tab. 26) erkennen. In den Unternehmen mit bis zu 99 Beschäftigten lag der entsprechende Nano-Beschäftigtenanteil bei 70%, während dieser Wert in Unternehmen mit 100-249 Beschäftigten auf ca. 16% absinkt.

Tabelle 26: Anteil der Nano-Beschäftigten in Nanotechnologie-KMU-Unternehmen des Berichtskreises (n=42)¹¹³

KMU Größenklasse	Nano-Anteile (2007) in %
1-49 Beschäftigte	33,0
50-99 Beschäftigte	37,0
100-249 Beschäftigte	15,6

Die merklichen Unterschiede zwischen den beiden Studien sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass es sich bei den VDI TZ-Werten um Schätzungen auf der Basis

¹¹² Quelle: VDI TZ (2004)

¹¹³ Quelle: IÖW

von Umsatzanteilen handelt, während die vergleichbaren IÖW-Nano-Anteile auf den entsprechenden Befragungsergebnissen beruhen. Damit entfällt die Gefahr von umrechnungsbedingten Verzerrungen durch Gleichsetzung von Umsatz- und Beschäftigtenanteilen für die Schätzung der Nano-Beschäftigung.

5.3.4 Hochrechnung der Nanobeschäftigten für die vermutete Grundgesamtheit von Nano-Unternehmen

Eine Hochrechnung für die vermutete Grundgesamtheit von ca. 450 Unternehmen mit Nano-Aktivitäten erfolgte nur in der zitierten VDI TZ-Studie des Jahres 2004. Auf der Basis der für die Stichprobe von 167 Unternehmen geschätzten Nanotechnologie-Beschäftigten im Jahre 2002 erfolgte eine Extrapolation für die vermutete Grundgesamtheit von ca. 450 Nano-Anbietern.

Da die exakten Nano-Beschäftigtenanteile nicht vorlagen, musste die Extrapolation mit Hilfe der abgefragten Anteilsklassen erfolgen. Dementsprechend fallen die Ergebnisse am unteren und oberen Rand der abgefragten Anteilsklassen unterschiedlich aus (Tab. 27).

Tabelle 27: Hochrechnung der Nanotechnologie-Beschäftigten für 2002¹¹⁴

Methodik	Grundgesamtheit	Anzahl der Nano-Beschäftigten
Hochrechnung auf Basis der Nano-Beschäftigten (Untergrenze 1)	450	20.000
Hochrechnung auf Basis der Nano-Beschäftigten (Untergrenze 2)	450	32.000
Hochrechnung auf Basis des Nano-Anteils am Umsatz	450	113.800

Die Hochrechnung über die Umsatzanteile erreicht ein Mehrfaches der hochgerechneten Beschäftigten auf der Basis der Beschäftigtenanteile und dürfte als wenig realistisch angesehen werden. Die Annahmen für den umsatzbezogenen Hochrechnungsansatz (u. a. Annahme eines Verhältnisses von 1:1 zwischen den erfragten Umsatzanteilen und den nicht genau erfragten Nano-Beschäftigten-Anteilen

und das übermäßige Gewicht der Großunternehmen) führen zu einer großen Varianz zwischen den Ergebnissen der unterschiedlichen Hochrechnungsergebnisse. Insofern kann es nicht verwundern, dass die Autoren der VDI TZ-Studie darauf hinweisen, dass „eine exakte Ermittlung der Arbeitsplätze im Bereich Nanotechnologie nicht möglich ist“ (Luther et al. 2004) und vorsichtig formulieren, „dass bereits heute mehrere zehntausend Arbeitsplätze in Deutschland in diesen Unternehmen direkt oder indirekt von der Nanotechnologie abhängig sind“ (ebenda).

5.3.5 Schätzung des Beschäftigungspotenzials der Nanotechnologie

Für die vorliegende Untersuchung lag kein kompletter Satz von Unternehmens- und Beschäftigungsdaten für die vermutete, korrigierte Grundgesamtheit von Unternehmen mit Nanoaktivitäten vor. Daher konnte auch keine Hochrechnung auf der Basis der Befragungsdaten erfolgen.

Als eine Alternative bot sich der Ansatz der angebotsorientierten, produktionswirtschaftlichen Potenzialrechnung an, der sich inzwischen in der Literatur und Berichten der Bundesregierung zur technologischen Leistungsfähigkeit Deutschlands etabliert hat (vgl. u. a. BMBF 2007; Legler et al. 2007). Bei diesem sog. NIW-Ansatz, der vor allem bei der Produktion von Umweltschutzgütern seit 1995 Anwendung findet, wird abgestellt auf Güter, die ihrer Art nach einem bestimmten Zweck dienen können (vgl. BMBF 2007). Dabei ist die vollständige Einbeziehung der relevanten Gütergruppen in die Potenzialschätzung völlig unabhängig davon, ob der jeweilige Funktionsanteil bei 1% oder 100% liegt.

Die vorliegende Potenzialschätzung unterscheidet sich in folgenden Punkten von dem bekannten NIW-Ansatz:

- a. Es wird nicht auf die Produktionswerte von Warengruppen abgestellt, die ihrer Art nach auf Nanotechniken aufbauen oder ihrer Anwendung dienen, sondern auf Unternehmen und ihre Beschäftigten.
- b. Es werden nicht nur Waren, sondern auch Dienstleistungen im Zusammenhang mit dem Angebot von Nanotechniken berücksichtigt.

¹¹⁴ Quelle: VDI TZ (2004)

- c. Während bei dem NIW-Potenzialansatz letztlich unbekannt ist, in welchem Maß die erfassten Gütergruppen tatsächlich dem untersuchten Produktionszweck dienen, werden in dem vorliegenden Potenzialansatz die ermittelten Nano-Beschäftigungsanteile herangezogen, die erwartungsgemäß signifikant unter 100% liegen (vgl. Tab. 25 und 26).
- d. Es werden im vorliegenden Ansatz nur diejenigen Wirtschaftszweige („Kernbereiche“) mit ihren KMU und Beschäftigten berücksichtigt, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt von der Anzahl der Anbieter her den Nano-Markt prägen (vgl. Abb. 47).

Im Ergebnis zeigt die Schätzung des Beschäftigtenpotenzials von Nanotechniken in den Kernbereichen, welche Beschäftigung sich in 2005 ergeben hätte, wenn alle KMU in diesen Kernbereichen ihr Angebot, das seiner Art nach auch auf Nanotechnologien aufbauen könnte, anteilmäßig auch tatsächlich auf Nanotechniken aufgebaut hätten. (vgl. Tab. 28 und 29).

Tabelle 28: KMU und Beschäftigte¹¹⁵ in den Kernbereichen mit Nano-Aktivitäten im Jahr 2005¹¹⁶

Wirtschafts- gruppe	Unternehmen mit sozialversicherungspflichtig Beschäftigten von... bis...					
	1 - 49		50 - 99		100 - 249	
	Anzahl	SV-Besch	Anzahl	SV-Besch	Anzahl	SV-Besch
DG ¹⁾	2.624	28.726	365	26.012	325	51.450
DJ ²⁾	36.107	304.922	1.675	115.472	1.049	159.796
DK ³⁾	17.697	182.843	1.474	101.997	1.157	181.795
DL ⁴⁾	23.610	193.057	1.049	72.713	827	127.353
GA ⁵⁾	350.611	1.781.547	5.118	349.857	2.617	390.452
KA ⁶⁾	292.920	1.352.144	4.579	317.465	2.934	447.038
Insgesamt	<u>723.569</u>	<u>3.843.239</u>	<u>14.260</u>	<u>983.516</u>	<u>8.909</u>	<u>1.357.884</u>

1) Herstellung chem. Erzeugnisse, 2) Metallerzeugung und -bearbeitung, 3) Maschinenbau, 4) Elektrotechnik, Feinmechanik und Optik, 5) Handel, Reparatur von Kfz, 6) sonstige Dienstleistungen

¹¹⁵ SV-Besch: Gesamtheit der sozialversicherungspflichtigen Beschäftigten

¹¹⁶ Quelle: Statistisches Bundesamt (2008)

Tabelle 29. Beschäftigtenpotenzial in KMU der Kernbereiche mit Nano-Aktivitäten im Jahr 2005¹¹⁷

Wirtschafts- gruppe	Nanomitarbeiter bei Unternehmen mit sozialversicherungspflichtig Beschäftigten von... bis...			
	1 - 49	50 - 99	100 - 249	Summe
DG ¹⁾	9.480	9.788	8.042	27.310
DJ ²⁾	100.624	43.452	24.976	169.052
DK ³⁾	60.338	38.381	28.415	127.134
DL ⁴⁾	63.709	27.362	19.905	110.976
GA ⁵⁾	587.911	131.651	61.028	780.590
KA ⁶⁾	446.208	119.462	69.872	635.542
Insgesamt:	<u>1.268.270</u>	<u>370.096</u>	<u>212.238</u>	<u>1.850.604</u>

1) Herstellung chem. Erzeugnisse, 2) Metallherzeugung und -bearbeitung, 3) Maschinenbau, 4) Elektrotechnik, Feinmechanik und Optik, 5) Handel, Reparatur von Kfz, 6) sonstige Dienstleistungen

Das Beschäftigungspotenzial von rd. 1,850 Mio. SV-Beschäftigten allein in den Kernbereichen und in KMU mit weniger als 250 Beschäftigten mag sicherlich in seiner Größenordnung überraschen. Wenn man allerdings berücksichtigt, dass Nanotechniken als „enabling technologies“ definiert werden und bei den Unternehmensakteuren im nano-Bereich sowohl Hersteller als auch Anwender bzw. Nutzer mit einbezogen werden, so verdeutlichen die vorliegenden Schätzungen die enorme Breitenwirkung, die Nanotechniken auslösen können.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass es sich bei den vorliegenden Schätzwerten nicht um Vollzeitäquivalente handelt und dass die möglichen Beschäftigungseffekte nicht als neu geschaffene Arbeitsplätze interpretiert werden dürfen. Es handelt sich eine Bruttorechnung, die naturgemäß Verdrängungseffekte nicht berücksichtigt.

5.3.6 Erwartete Beschäftigungsentwicklung in den Nano-Unternehmen

Die vorangegangene Potenzialschätzung hat bereits deutlich gemacht, welches Wachstums- und Beschäftigungspotenzial im Nanotechnologie-Markt möglich wäre, wenn nano-affine KMU in den Kernbereichen ihr Leistungsangebot nur zum

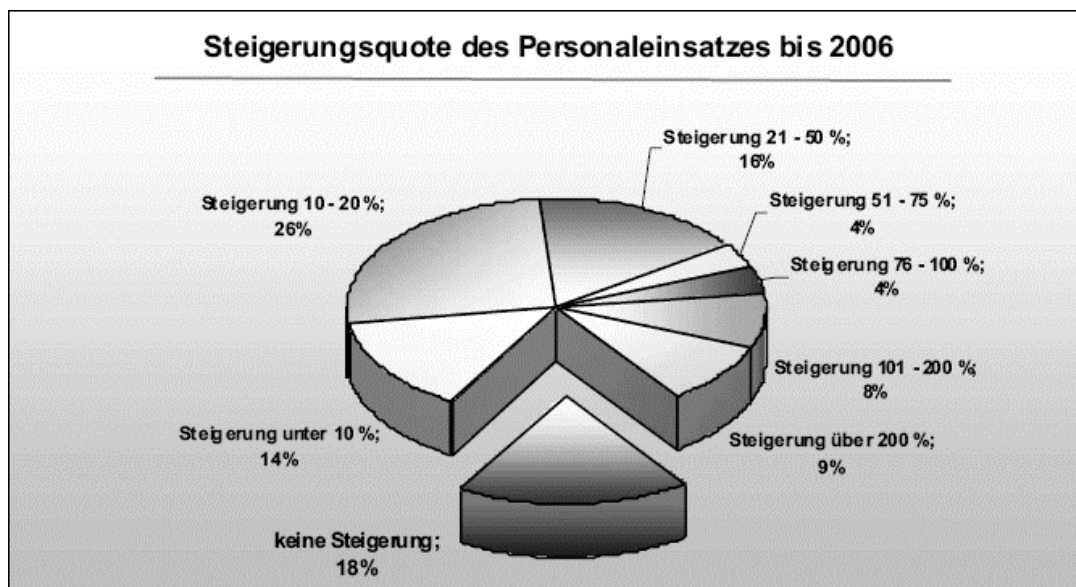
¹¹⁷ Quelle: Statistisches Bundesamt (2008)

durchschnittlichen Anteil ihrer bereits nano-aktiven Branchenkollegen auf Nanotechnologien aufgebaut hätten bzw. aufbauen würden.

Diese eher hypothetische Rechnung wurde in der VDI TZ-Studie und in der vorliegenden Studie ergänzt durch Unternehmensbefragungen zu den konkreten Erwartungen der nano-aktiven Unternehmen hinsichtlich Umsatz- und Beschäftigungsentwicklung in den nächsten drei Jahren, die dem jeweiligen Basisjahr folgen.

Folgt man den Angaben in der VDI TZ-Studie „erwarten insgesamt 81,4 Prozent der befragten Unternehmen einen mehr oder weniger großen Mitarbeiterzuwachs durch die Nanotechnologie im eigenen Unternehmen“ (VDI TZ, 2004). Nur 21,5% der KMU (mit bis zu 5000 Beschäftigten) und 13,5% der Großunternehmen (mit 5000 und mehr Beschäftigten) rechnen mit keiner Personalaufstockung von 2004 bis 2006 in ihrem Nano-Bereich (ebenda). Von den KMU (mit bis zu 5000 Beschäftigten) rechnete knapp die Hälfte mit einem Mitarbeiterzuwachs von mehr als 20%, ein Drittel mit mehr als 50% und fast 20% noch mit einem Wachstum von sogar über 100% bis 2006 in ihrem Nano-Bereich. Bei den Großunternehmen gingen dagegen nur mehr als die Hälfte von einem Zuwachs von mehr als 10% aus (vgl. Abb. 52).

Abbildung 52: Anstieg des Personaleinsatzes in Nanotechnologie im Unternehmen¹¹⁸



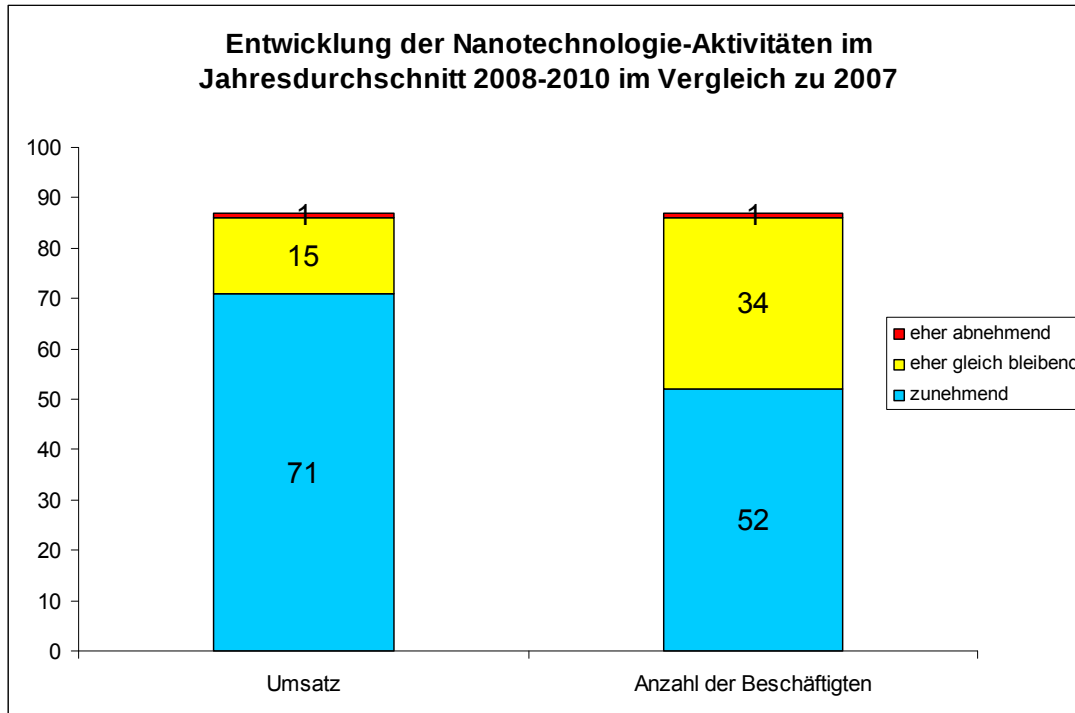
¹¹⁸ Quelle: VDI TZ (2004)

Auf Basis der von den befragten Unternehmen erwarteten Personalsteigerungen im Bereich Nanotechnologie wurde vom VDI TZ eine Abschätzung des absoluten Zuwachses an Beschäftigten vorgenommen. Hierfür wurden die gleichen Annahmen wie für die konservative Schätzung bei der Ermittlung der derzeitigen Beschäftigung getroffen (Spanne von 20.000 bis 32.000 und 114.000). Danach ergibt sich ein erwarteter absoluter Beschäftigungszuwachs von mindestens 2.000 bis 10.000 zusätzlichen Arbeitsplätzen bis 2006 alleine für die etwa 450 existierenden Nanotechnologieunternehmen in Deutschland. Legt man alternative Annahmen zu Grunde, so ist mit einem Zuwachs an neu geschaffenen Arbeitsplätzen durch die Nanotechnologie in der Größenordnung von mindestens 10.000 bis 15.000 auszugehen (ebenda).

Diese quantifizierten Schätzungen sind angesichts der zuvor diskutierten Probleme der Schätzmethode als sehr optimistisch anzusehen. Außerdem ist die Quantifizierung des angenommenen Beschäftigungszuwachses als „neu geschaffene Arbeitsplätze“ problematisch, nachdem laut Aussagen der VDI TZ „bei Großunternehmen allerdings davon auszugehen (ist), dass die Anzahl der Mitarbeiter in der Nanotechnologie eher durch unternehmensinterne Umstrukturierung oder Umwidmungen erhärtet wird als durch die Schaffung zusätzlicher Arbeitsplätze“ (ebenda).

Wie bereits im Methodenvergleich beschrieben, bezieht sich die vorliegende Untersuchung auf qualitative Erwartungen der befragten und antwortenden Nano-Unternehmen. Was die Entwicklung bei den Umsätzen und Beschäftigten in den Jahren 2008-2010 im Vergleich zu 2007 anbetrifft, so sind die Unternehmen im Vergleich zu der VDI TZ Umfrage im Jahre 2003 weniger optimistisch (vgl. Abb. 53), obgleich der Tendenz nach mit einer Personalaufstockung oder -versetzung im Nano-Bereich gerechnet wird.

Abbildung 53: Entwicklung der Nanotechnologie-Aktivitäten im Jahresdurchschnitt 2008-2010 im Vergleich zu 2007 (n= 87)¹¹⁹



Etwa 60% Unternehmen gehen von einem Beschäftigungszuwachs bis 2010 aus. Mehr als ein Drittel der antwortenden Unternehmen gehen von einem gleich bleibenden Verhältnis aus, während mit einem Beschäftigungsrückgang nur in einem Unternehmen, mit entsprechenden Angaben, gerechnet wird.

Nachdem die Umsatzentwicklung im Berichtskreis deutlich optimistischer eingeschätzt wird, zeigt sich noch einmal, dass Umsätze und Beschäftigte im Nano-Bereich nicht 1:1 miteinander korrelieren.

¹¹⁹ Quelle: IÖW

5.4 Fazit

Im Ergebnis der Untersuchung ist festzustellen, dass die Nanotechnologieunternehmen hinsichtlich ihrer Nanoaktivitäten insbesondere beim Umsatz positive Entwicklungserwartungen haben. Die durchgeführte Analyse des Beschäftigtenpotenzials im Bereich der Nanotechnologie zeigt, dass die wirtschaftliche Bedeutung der Nanotechnologie nicht zu unterschätzen ist. Es ist in diesem Zusammenhang allerdings darauf zu verweisen, dass Nanotechniken als „enabling technologies“ angesehen werden und damit ähnlich, wie übrigens die Materialwissenschaften auch, zwar eine wichtige Rolle für das Innovationsgeschehen und die wirtschaftliche Entwicklung haben, dass diese aber letztlich nur sehr begrenzt dazu führt, dass tatsächlich neue „eigenständige“ Nano-Arbeitsplätze entstehen. Vielmehr ist davon auszugehen, dass die Nanotechnologie bzw. der Einsatz der Nanotechnik in den unterschiedlichen Verfahren und Produkten zu einer Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit dieser Verfahren und Produkte führen kann, dass es sich aber dabei in der Regel nicht um neu geschaffene Arbeitsplätze handelt, sondern vielmehr um den Erhalt bestehender Arbeitsplätze. Ein Arbeitsplatzaufbau könnte dann erfolgen, wenn es gelingt, Nanotechniken für Prozesse und Produkte so nutzbar zu machen, dass diese auf den diversen Absatzmärkten wettbewerbsfähiger werden. Nanotechniken werden in der Perspektive eine Voraussetzung für wettbewerbsfähige Arbeitsplätze sein, wenn es gelingt, die technisch-wirtschaftlichen Potenziale der Nanotechniken zu erschließen und in wettbewerbsfähigere Produkte und Verfahren umzusetzen.

6 Handlungsempfehlungen

6.1 Generell

Nanotechniken werden in der Regel als „enabling technologies“ charakterisiert, d. h., man erwartet, dass sie einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung existierender Produkte und Verfahren leisten können sowie ggf. einen Beitrag zur Überwindung technischer „Bottlenecks“. Es ist aber darauf hinzuweisen, dass sich mögliche nanotechnische Innovationen, jenseits eher „einfacher“ Anwendungen, noch überwiegend in der Grundlagenforschung und der FuE-Phase befinden. Besonders weit reichende technische Möglichkeiten mit einem direkten Einfluss auf Umwelt- und Ressourcenschutz sind nach den Erkenntnissen der Studie eher noch die Ausnahme. Des Weiteren ist darauf hinzuweisen, dass Nanotechniken mehr oder weniger ubiquitär eingesetzt werden können und insofern ihr Beitrag bezüglich der Problemlösungskapazitäten in den unterschiedlichen technischen Anwendungen (Bandbreite der Energietechnologien etc.) zu sehen ist. Die Umsetzung der FuE-Aktivitäten im Bereich der Nanotechniken wird dementsprechend in den jeweiligen Anwendungsfeldern (Prozesse und Produkte) erfolgen und kann ggf. auch neue technische Lösungsansätze generieren und – beispielsweise via Kostensenkung – bislang „unrentable“ technische Lösungen marktfähig machen.

Es ist des Weiteren zu betonen, dass die möglichen Umwelt- und Ressourcenentlastungseffekte durch Nanotechniken nicht per se hinreichend sein werden, um für die Marktakteure ausreichende Anreize für ihre Entwicklung zu setzen. Entscheidend für den Einsatz von Nanotechniken für den Umwelt- und Ressourcenschutz ist vielmehr, dass unter sonst gleichen Bedingungen ein Mehrwert geschaffen wird, der eine Balance herstellt zwischen der Nutzung der neuen Funktionalitäten (u. a. im Sinne des Umwelt- und Ressourcenschutzes) und den Kosten, die mit den neuen Verfahren verbunden sind. Ein Idealfall wären Kostenreduktionen durch den Einsatz von Nanotechnik und zugleich Umwelt- und Ressourcenentlastungen, eine Situation, die sich gegenwärtig erst in einem begrenzten Maße abzeichnet.

In der Folge werden die drei typisierten grundsätzlichen Treiber für die Entwicklung der Nanotechnik kurz skizziert, auf die sich auch je spezifische Maßnahmenoptionen beziehen sollten.

6.2 Treiber: Gesetzliche Regulation

Die additiven Techniken sind zumeist dadurch gekennzeichnet, dass diese Märkte durch staatliche Umweltregulierungen geprägt sind. Weiterentwicklungen von Produkten und Verfahren des additiven Umweltschutzes hängen von daher in starkem Maße von der staatlichen Umweltregulierung ab (ein klassisches Beispiel: Autokatalysator). Vielfach ist im Bereich der additiven Techniken festzustellen, dass bei den Anbietern Verfahren und Produkte für den Umweltschutz verfügbar sind, dass diese aber nicht nachgefragt werden, weil die Angebote der Unternehmen sich verteuern und marktseitig i.d.R. zu wenig Anreize existieren, dass entsprechende Techniken zum Einsatz kommen.

Dass Nanotechnik hier einen wesentlichen Beitrag leisten kann (bspw. durch Kostenreduktion entsprechender Techniken), ist zwar mit guten Gründen erwartbar, derzeit aber noch nicht wahrnehmbar. Die durch Nanotechniken ermöglichten technischen Verfahren sind gegenwärtig ganz überwiegend noch im Grundlagen- und FuE-Stadium. Daneben müssen auch diejenigen Techniken zur Umweltenlastung mit in Betracht gezogen werden (u.a. Filtertechnologien oder Katalysatoren), bei denen Nanotechniken zur Leistungssteigerung beitragen können.

6.3 Treiber: Ökonomisches Kalkül; win-win-Situation

Die integrierten Techniken, die im Grundsatz auf den Ressourcenschutz (Ressourceneffizienz, Energieeffizienz) zielen, erhalten gerade durch die steigenden Energie- und Rohstoffpreise einen deutlichen Schub. Energie- bzw. Materialeinsparung werden zu einem zunehmend wichtigeren Wettbewerbsargument, wenn bspw. bei gleichen Kosten der Techniken Einspareffekte bei den Energie- und Ressourcenkosten erreicht werden können. Die massiven Energiepreiserhöhungen der jüngeren Vergangenheit sowie insbesondere die Klimadiskussion (bei zweifelsohne noch keineswegs hinreichenden politischen Reaktionen auf der internationalen Ebene) führen zu einer Belebung des Innovationsgeschehens. So ist die Rede von einem Innovationsschub, der durch die Energiekrise ausgelöst wird und die

Technikentwicklung befördert u. a. auch durch die Auslotung der Potenziale der Nano- und Biotechnik. Damit sind erhebliche Anreize gesetzt, damit die Technikentwicklung vorankommen kann. Welche Entwicklungsrichtungen genau dabei eingeschlagen werden, hängt jedoch nicht zuletzt von den politischen Rahmensetzungen ab.

Die Heterogenität der Nanotechniken, aber auch der jeweiligen Energie- und „Werkstoff“techniken führt dazu, dass ein einheitliches Gesamtkonzept nicht sinnvoll erscheint. Vielmehr wird es darauf ankommen, die jeweiligen „Bottlenecks“ der Entwicklungen der Energietechnik und die Lösungsbeiträge der Nanotechnik zu identifizieren.

FuE-Aktivitäten sind generell durch Externalitäten geprägt, insbesondere dann, wenn es sich um marktferne Aktivitäten handelt. Dabei besteht die Gefahr, dass ein „zu wenig“ an FuE betrieben wird. Ein Screening bei relevanten Techniken und die Identifizierung von technisch bedingten „Bottlenecks“, bei deren Überwindung Nanotechniken einen wesentlichen Beitrag leisten können, sowie die Unterlegung mit entsprechenden FuE-Förderungen (vorwettbewerblich) könnte zum einen die Potenziale der Nanotechnik für den Umwelt- und Ressourcenschutz befördern und zum anderen die Entlastungspotenziale erschließen.

Dem in dieser Studie verfolgten Ansatz der prospektiven Ökobilanzen könnte im Kontext von technologischen „Road maps“ dabei eine wichtige Funktion zu kommen.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde an konkreten Produkten und Verfahren analysiert, inwieweit zum einen die Anwendung von Nanotechnik Beiträge zur Umweltentlastung leisten kann, zum anderen, inwieweit diese Möglichkeiten auch erschlossen werden können. Dies hebt auf die Chancendimension der Nanotechniken ab. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass durch Nanotechnologien in einigen der untersuchten Anwendungsbereiche hohe Umweltentlastungspotenziale erschlossen werden 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 Problem aber auch schlicht darin, dass

diese Innovationen sich – wie alle Innovationen – gegenüber Trägheitskräften durchsetzen müssen, z.B. dass die „sunk costs“¹²⁰ bestehender Anlagen die Markteinführung neuer nanotechnologiebasierter Verfahren behindern. Derartige Trägheitsmomente verhindern die Marktdurchdringung entsprechender Innovationen und stellen somit wesentliche Innovationshemmnisse dar. Auch hiervon hängt also zu einem erheblichen Teil die praktische Umsetzbarkeit der umweltentlastenden Potenziale der Nanotechniken in Verfahren und Produkte ab.

Die positiven Ergebnisse der Ökoprofile könnten (und sollten!) allerdings durch Rückspiegelung der Ergebnisse in die Entwicklungsprozesse dazu beitragen, die entsprechende Gestaltung der Prozesse und Produkte weiter voran zu treiben und zu optimieren. Untersuchungen zu solchen sich selbst verstärkenden Rückwirkungen liegen bisher 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 systematische Bereitstellen von Ökobilanztools und Daten für die relevanten industriell hergestellten Nanomaterialien (CNT, TiO₂, SiO₂, ...) würde weitere Ökoprobetrachtungen wesentlich erleichtern. Das Umweltbundesamt könnte versuchen, diese Ansätze speziell für diesen Bereich in Zusammenarbeit mit der Industrie zu verstärken und in vorhandene Strukturen einzuordnen (PROBAS, GEMIS).
- Auch die BMBF-geförderten Nanotechnologieprojekte sollten hinsichtlich ihrer Aussagen zu Umwelt-/Nachhaltigkeitsaspekten stärker auf quantifizierbare Aussagen hinsichtlich der Umweltperformance und nutzbare Ökobilanzdaten orientiert werden, die wieder in den öffentlichen und wissenschaftlichen Diskurs zurückfließen können.
- Eine Quantifizierung des Umweltnutzens von Nanotechniken für Deutschland wäre nicht nur für die Förderpolitik, sondern insbesondere auch für die Ausgestaltung der High-Tech-Strategie, Klimastrategie und der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung von hohem Nutzen. Welchen Beitrag können Nanotechniken zur Überwindung von existierenden „Bottlenecks“ leisten, bspw. hinsichtlich des CO₂-Minderungspotenzials oder bezüglich der Ressourceneffizienz, dies auf der Basis von technologischen

¹²⁰ Sunk costs: versunkene Kosten, sind betriebswirtschaftliche Kosten, die bereits in der Vergangenheit entstanden sind (z.B. Kapitalkosten einer Maschine). Ihr zentrales Merkmal ist, dass sie in der Gegenwart und in der Zukunft nicht mehr beeinflusst werden können - daher die Bezeichnung „versunken“.

„Road maps“ und prospektiven Ökobilanzen (und damit in Anlehnung von ersten entsprechenden britischen Studien zu „carbon footprints“).

- Was bisher völlig fehlt ist schließlich die Analyse/Bewertung der Umweltentlastungspotenziale besonders weitreichender eher „visionärer“ Anwendungsgebiete wie ultrastabile Leichtbaukonstruktionswerkstoffe, Nanobionik, Innovationen auf der Schnittstelle Nano-/Biotechnologie bis hin zur künstlichen Photosynthese.

6.4 Treiber: Öffentliche Debatte, gesellschaftliche Akzeptanz

In diesem Bereich dreht sich Vieles um die Formulierung eines „sicheren“ Zielkorridors (Leitbilder und Leitplanken) und darüber die Realisierung von Akzeptabilität und Akzeptanz sehr weit reichender Innovation auf der Basis von Nanotechnik.

Ein wichtiger Ansatz bestünde darin, in Anlehnung an die schon laufenden Bemühungen des Umweltbundesamtes hinsichtlich der Umsetzung des Leitbildes einer ‚Sustainable Chemistry‘ auch den Prozess für ein Leitbild „Green Nanotechnology“ mit zu initiieren und zu unterstützen.

Technikentwicklung ist nicht oder doch nur sehr begrenzt durch politische Interventionen steuerbar, vielmehr ergibt sich aus dem Zusammenwirken unterschiedlichster Akteure eine Pfadentwicklung der Technik, die gestaltend begleitet werden kann, u. a. durch das Arbeiten mit Leitbildern als Steuerungsinstrumente. Da sich die Nanotechniken im Grundsatz noch in einer Frühphase der Entwicklung befinden, existieren zumindest grundsätzlich noch große Freiheitsgrade, um den Suchraum für nanotechnische Innovationen in eine „nachhaltige“ Richtung zu lenken. Einen Beitrag dazu können die oben angeführten Instrumente „Road maps“, prospektive Ökobilanzen und früh ansetzende Besorgnisanalysen leisten. Mit diesen Instrumenten und der Kommunikation in der wissenschaftlichen Fachöffentlichkeit kann der Leitbildentwicklungsprozess im Sinne der begleitenden Technologieentwicklung („real-time TA“, vgl. Guston und Sarewitz 2001) maßgeblich beeinflusst werden.

Eine leitbildorientierte Gestaltung ist vom grünen Tisch aus nicht vorgebbar. Sie ist in starkem Maße ein Kommunikationsprozess zwischen unterschiedlichsten Akteuren. Insofern gehören Maßnahmenoptionen für diesen Ansatz exakt in den hier zur Debatte stehenden Bereich der öffentlichen Diskurse.

Als Grundlage und Ansatzpunkt könnte ein Leitbild wie „Green Nanotechnology“ oder Nanobionik dienen. Ein interessanter Ansatz in diese Richtung ergibt sich im Übrigen direkt im Anschluss an die oben dargestellten Kriterien der Besorgnisanalyse. Zumindest zum Teil lassen sich aus der Umkehrung der Besorgniskriterien auch Kriterien für ein sichereres Design, für eine nachhaltigkeitsorientierte Gestaltung nanotechnikbasierter Innovationen ableiten.

7 Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben "Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte" hatte vorrangig zum Ziel, die umwelt- und nachhaltigkeitsbezogenen Chancen und Risiken dieser sich entwickelnden Techniklinie anhand ausgewählter Beispiele zu spezifizieren und soweit wie möglich zu quantifizieren. Das zugrundegelegte Verständnis von Umweltentlastungspotenzialen umfasst dabei nicht nur die Umwelttechnik im engeren Sinne (End-of-Pipe-Technologien), sondern insbesondere auch den prozess-, produktions- und produktintegrierten Umweltschutz und damit nicht zuletzt auch die ‚Input-Seite‘ auf dem Weg zu einem nachhaltigen Wirtschaften, also die Verringerung und Veränderung der Quantitäten (Ressourceneffizienz) und Qualitäten (Konsistenz) der Stoff- und Energieströme, die in die Technosphäre eintreten.

Das Vorhaben gliederte sich in vier Schritte und bediente sich dabei jeweils spezifischer Untersuchungsmethoden:

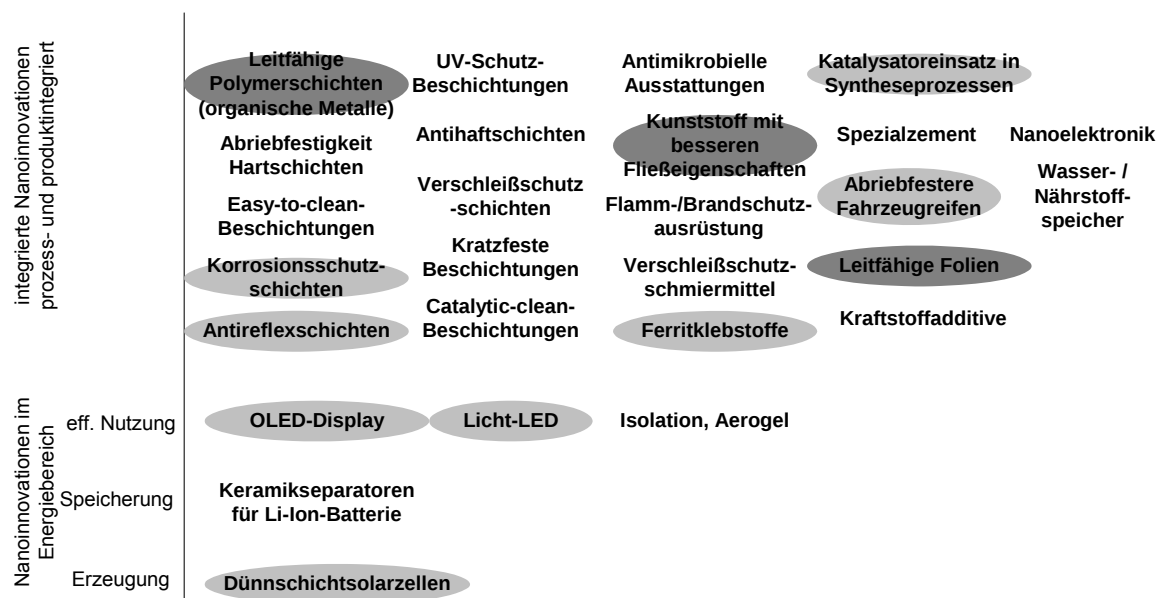
- Analyse von bereits auf dem Markt befindlichen oder kurz vor der Vermarktung stehenden Produkten und Prozessen und ihrer Anwendungen
- Untersuchung und zunächst qualitative Bewertung der jeweiligen Produkte und Verfahren hinsichtlich ihres umweltentlastenden (und ggf. umweltbelastenden) Wirkungspotenzials
- Vertiefende lebenszyklusorientierte Untersuchung und Bewertung von vier ausgewählten Verfahren oder Produkten im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren oder Produkten
- Ergänzung der umweltbezogenen Bewertung der ausgewählten Verfahren oder Produkte um eine Abschätzung von Beschäftigungspotenzialen.

Die Analyse von bereits auf dem Markt befindlichen oder kurz vor der Vermarktung stehenden nanotechnischen Produkten und Prozessen mit Bezug auf Umweltschutz/Umweltentlastung ergab eine große Vielfalt an schon realisierten und potenziell erwartbaren Anwendungsbereichen. Festzustellen ist hierbei aber, dass deren Umweltrelevanz bisher fast ausschließlich qualitativ dargestellt wird.

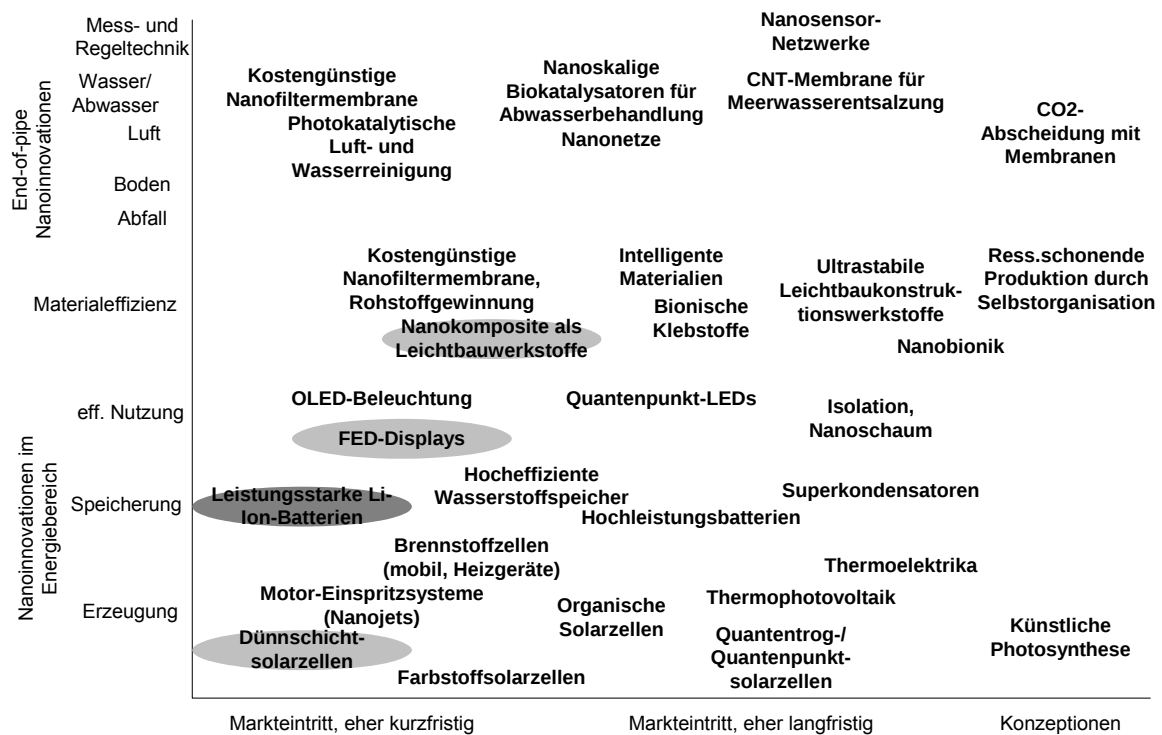
Quantifizierende Untersuchungen zu erwartbaren – bzw. erst zu realisierenden – Umweltentlastungen durch einzelne nanotechnische Produkte und Prozesse sowie weiter reichende Umweltinnovationen im Sinne des produkt- und produktionsintegrierten Umweltschutzes bilden bisher die Ausnahme.

Neben den Anwendungspotenzialen im Bereich von End-of-pipe-Technologien wie Membranen (die Katalyse reicht jenseits der Abgasreinigung in vielen Bereichen ja schon weit in den integrierten Bereich hinein) verdeutlichen die folgenden Abbildungen, dass die überwiegenden und besonders weit reichenden Potenziale für Nano-Umweltinnovationen bei den integrierten Innovationen sowie bei den Innovationen im Energiebereich liegen. In vielen Anwendungsfeldern eröffnen sich vielfältige Potenziale, um Umweltentlastungseffekte zu realisieren. Für die in den Abbildungen hervorgehobenen Anwendungen existieren bereits einzelne Fallstudien, in denen auch schon quantitative Angaben zu Umweltentlastungspotenziale ermittelt wurden (hellgrau). Die dunkelgrau hinterlegten wurden für vertiefende Untersuchungen in der vorliegenden Studie ausgewählt.

Abbildung 54: Nanotechnikbasierte Produkte / Anwendungen am Markt ¹²¹



¹²¹ Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 55: Erwartbare nanotechnikbasierte Anwendungen¹²²

Bewertung konkreter Anwendungskontexte - Ökobilanz

Als Bewertungsansatz orientieren 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 wie jede Methode auch Defizite. So existieren z. B. bisher nicht für alle Wirkungskategorien allgemein akzeptierte Wirkungsmodelle. Dies gilt insbesondere für die relevanten Kategorien Humantoxizität und Ökotoxizität. Außerdem werden in Ökobilanzen technische Risiken sowie die Wirkmächtigkeit von Anwendungen nicht betrachtet. Ein umfassendes Methodenset müsste derartige Analysen mit beinhalten.

¹²² Quelle: eigene Darstellung

In den folgenden Untersuchungen liegt der Schwerpunkt auf den potenziellen Umweltentlastungen durch nanotechnische Produkte und Verfahren. Die Modellierung der einzelnen Fallstudien, deren Berechnung und Auswertung nach geeigneten Umweltwirkungen, erfolgt mit der Ökobilanzsoftware Umberto. Die Wirkungsabschätzung und Auswertung der ökobilanziellen Betrachtungen basiert auf der teilaggregierten Methode des „Center of Environmental Science of Leiden University“, nach der die verschiedenen Umweltwirkungen quantitativ ermittelt werden. Risikoaspekte, insbesondere im Umgang mit Nanomaterialien, werden in einzelnen Fallstudien jeweils separat im Rahmen einer Besorgnisanalyse angesprochen. Dabei wird mit den Entlastungs- und Besorgniskriterien gearbeitet, die die Arbeitsgruppe ‚Risiken und Sicherheitsforschung‘ im Rahmen der vom Ministerium für Umwelt Reaktorsicherheit und Naturschutz federführend betreuten NanoKommission festgelegt hat und die im Sinne einer vorläufigen Abschätzung (preliminary assessment) auch schon in einem frühen Technologieentwicklungsstadium anwendbar sind.

Aufbauend auf einer Typisierung von Umweltinnovationen wurde ein Technologiescreening durchgeführt und eine Gruppe von 13 Vorschlägen für vertiefte Untersuchungen erarbeitet, aus der folgende vier nanotechnische Anwendungen für lebenszyklusorientierte Betrachtungen ausgewählt wurden:

- Herstellung lötfähiger Endoberflächen auf Leiterplatten durch Nanotechnik, Ormecon GmbH, Ammersbek bei Hamburg
- MW Carbon Nanotubes-Anwendung für Folien in der Halbleiterindustrie, Bayer MaterialScience AG, Leverkusen
- Lithium-Ionen-Batterie zur Energiespeicherung, u.a. Litec GmbH, Kamenz
- Ultradur® High Speed-Kunststoff, BASF, Ludwigshafen.

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

Die Belastbarkeit der ermittelten Zahlen ist selbstverständlich abhängig von der Qualität und Verfügbarkeit der vorliegenden Stoff- und Energiedaten für die einzelnen Anwendungen. Für noch in Entwicklung befindliche Nanoinnovationen liegen quantitative Aussagen für den Herstellungsaufwand und den Einsatz meist nicht vor. Es müssen auf der Basis der Kenntnisse über die Verfahren und Produkte Annahmen getroffen werden. Zudem gilt es bei Vergleichen von etablierten bzw. ‚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 große bisher unausgeschöpfte Effizienzsteigerungspotenziale in sich bergen.

Leiterplatten befinden sich in jedem elektronischen Gerät wie z.B. in Personalcomputern, Mobiltelefonen, Fernsehern aber auch in Autos, Flugzeugen, Satelliten. Weltweit werden derzeit ca. 250 Millionen m² Leiterplatten pro Jahr verarbeitet. Im Rahmen der ersten Fallstudie wurde das ökologische Potenzial eines neuen auf Nanotechnologie basierenden Verfahrens zur **Herstellung lötfähiger Endoberflächen auf Leiterplatten (Surface Finishing)** der Fa. Ormecon GmbH Ammersbek im Vergleich zu verschiedenen konventionellen Verfahren untersucht. Das neue OM Nanofinish-Verfahren ist gekennzeichnet durch eine Kombination aus neuer Materialfunktionalität (organisches Metall) und deren Nanoskaligkeit. OM Nanofinish als innovatives Verfahren zur Herstellung lötfähiger Endoberflächen auf Leiterplatten besitzt ein überaus hohes Entlastungspotenzial für die Umwelt gegenüber den qualitativ gleichwertigen konventionellen Verfahren, insbesondere gegenüber den ENIG-, HASL- und Immersion-Verfahren. Die auf vergleichsweise guter Datenbasis erfolgte ökobilanzielle Analyse verdeutlicht anschaulich, dass OM Nanofinish gegenüber den HASL- und Immersion-Verfahren in allen Umweltwirkungskategorien um Faktoren zwischen 4 und 20 besser abschneidet. Gegenüber dem ENIG-Verfahren liegt der Faktor immer im dreistelligen Bereich, beispielsweise beim Treibhauspotenzial bei 390. Die Ökobilanzdaten der OSP-Verfahren liegen dagegen im gleichen Größenordnungsbereich wie das OM Nanofinish, wobei deren Anwendungsfelder nicht in hochwertigen, sondern eher in Massenmärkten liegen und daher qualitativ nur bedingt mit dem OM Nanofinish-Verfahren gleichzusetzen sind.

Außerdem kann entsprechend der durchgeführten Besorgnisanalyse nach vorhandenem Wissensstand zu nanopartikulärem Polyanilin im beschriebenen

Anwendungskontext (Endoberfläche für Leiterplatten) aus unserer Sicht von einer geringen Besorgnis ausgegangen werden.

Da das Wissen über mögliche Umweltwirkungen von Kohlenstoffnanoröhren (CNT) noch sehr gering ist, die Produktion derzeit eher noch im Labor- und Technikumsmaßstab erfolgt und für zukunftssträchtige Anwendungen noch große Herausforderungen in der Materialforschung zu bewältigen sind, wurde in der Fallstudie **„MW Carbon Nanotubes-Anwendung für Folien in der Halbleiterindustrie“** eine schon vorhandene industrielle Anwendung vertiefend untersucht. Diese konkrete Produktanwendung ließ von vornherein nicht so große Ressourceneffizienzpotenziale erwarten wie andere erhoffte zukünftige Anwendungsfelder von CNT bspw. im Bereich neuartiger ultrastabiler Leichtbaukonstruktionswerkstoffe. Ein Ziel der Fallstudie bestand nichtsdestotrotz auch, darin, die bestehenden Wissenslücken zu Ökobilanzdaten von CNT zu schließen. Durch die Zusammenarbeit mit der Fa. Bayer MaterialScience AG ist es gelungen, detailliert den Herstellungsprozess von MWCNT zu modellieren und spezifische Ökobilanzdaten zu generieren. Auf dieser Basis konnte ein ökobilanzieller Vergleich mit der herkömmlichen Folie auf der Basis von Carbon Black vorgenommen werden. Zusätzlich konnten über Sensitivitätsanalysen mögliche Einflussparameter auf das Ergebnis vertiefend untersucht werden.

Über alle Umweltwirkungen hinweg lässt sich für die neue Folie mit MWCNT eine gewisse Reduktion feststellen, die je nach Umweltwirkung zwischen 12,5% beim Treibhauspotenzial und 20% beim Überdüngungspotenzial liegt. Das Polycarbonat als Hauptbestandteil der Folie bestimmt dabei die meisten Umweltwirkungen so stark, dass die Unterschiede bei der Herstellung von MWCNT in den einzelnen Szenarien nicht zu Buche schlagen. Der größte Einfluss ergibt sich somit durch die Erhöhung der Materialeffizienz; also dadurch, dass statt 1000 kg „alter“ Folie jetzt nur noch 800 kg „neuer“ Folie benötigt werden.

In der Besorgnisanalyse sind zunächst einige Besorgnis erregende Hinweise auf bestimmte Eigenschaften von ‚freien‘ Carbon Nanotubes zu erwähnen. Nicht aggregierte bzw. agglomerierte MWCNTs sind vermutlich lungengängig, nicht löslich und können aufgrund ihrer ‚inerten‘ Kohlenstoffbasis vermutlich schlecht biologisch abgebaut werden. Auch die Morphologie einiger Nanotubes gibt - in Analogie zu

Asbest oder Holzstaub, die beide als krebserregend eingestuft sind – zur Besorgnis Anlass. Die Tatsache, dass die MWCNTs meist in vergleichsweise großen Agglomeraten (im Mikrometerbereich) vorliegen, relativiert diese Sorge, wird sie aber wohl nicht ganz eliminieren können. Entscheidend ist allerdings die Frage ob, bzw. genauer wo im Produktlebenszyklus der leitenden Folien eine Exposition gegenüber ‚freien‘ CNTs überhaupt möglich ist. Dies erscheint allenfalls am Anfang bei der Produktion, bei Pack- und Mischvorgängen und evtl. noch am Ende des Produktlebenszyklusses bei der Müllverbrennung möglich zu sein. Für Anwender und Verbraucher gibt es also keinen unmittelbaren Anlass zur Besorgnis. Ein ganzheitlicher Abwägungsprozess zwischen den doch vergleichsweise geringen Vorteilen im Bereich der ökobilanziell erfassbaren Entlastungspotenzialen und den noch offenen Fragen im Bereich der Gefährdungsanalyse sollte in diesem Fall mit Blick auf Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsaspekte letztendlich zur Vorsicht gemahnen.

Alternative Antriebssysteme im Verkehrsbereich werden derzeit intensiv erforscht und erprobt, insbesondere mit Blick auf Treibstoffeinsparungen und eine bessere Umweltverträglichkeit. Ein großes Hemmnis für den Einsatz von Hybrid- und reinen Elektroantrieben ist der Mangel an geeigneten Lösungen für die Stromspeicherung. Die Entwicklung immer leistungsfähigerer Stromspeicher auf Basis von Lithium-Ionen-Batterien ist eine mögliche Antwort auf diese technische Herausforderung, und Nanotechniken bieten hierfür einige interessante Ansatzpunkte.

Im Rahmen der dritten noch stärker prospektiv angelegten Fallstudie erfolgte eine vergleichende Untersuchung von konventionellen Angeboten im ÖPNV und neuen Systemen mit Hybridantrieb, insbesondere in Hinblick auf erwartbare **Umweltentlastungspotenziale durch nanotechnikbasierte Weiterentwicklungen von Lithium-Ionen-Batterien.**

Als Ergebnis der Untersuchungen kann vor dem Hintergrund der abgeleiteten und getroffenen Annahmen für den ökobilanziellen Vergleich festgestellt werden, dass der Umweltnutzen durch den verringerten Kraftstoffverbrauch größer ist als die materiellen Mehraufwendungen durch das Hybridsystem. Aber erst die bilanzierte Zukunftsvariante weist gegenüber dem konventionellen Dieselstadtbuss geringere Umweltwirkungen von über 20% aus. Auf der Basis der schon existierenden und der in naher Zukunft erwartbar zu realisierenden Batterietechniken ist derzeit kein wirklicher Durchbruch in

der Ökoeffizienz der betrachteten Hybridantriebsformen in Busanwendungen in Sicht. In absoluten Zahlen ausgedrückt, ließen sich über sechs Jahre mit dem Bus der Zukunftsvariante gegenüber dem konventionellen Dieselbus ca. 65 t CO₂-Äq. einsparen. Auch wenn sich die Mehrkosten von derzeit ca. 120.000 € pro Bus bei Serienanwendungen beträchtlich senken lassen, bleiben doch sehr hohe spezifische CO₂-Vermeidungskosten. Gegenzurechnen wären dann noch die weiteren Umweltvorteile des Hybridbusses, wie emissionsfreies Fahren im Haltestellenbereich und in der Fußgängerzone.

Die nanotechnischen Innovationen in der Batterietechnik könnten in anderen Anwendungen wie bspw. beim direkten Elektroantrieb von Kraftfahrzeugen zu höheren spezifischen Umweltentlastungen führen. Um derartige Anwendungen ökobilanziell besser modellieren und untersuchen zu können, sind aktuelle Ökobilanzdaten zu Li-Ionen-Batterien notwendig. Hier wäre es sehr wünschenswert, wenn gerade auch die deutschen Unternehmen, die sich in der Entwicklung leistungsfähiger Li-Ionen-Batterien engagieren, diesem Sachverhalt eine gewisse Bedeutung beimessen würden und die notwendigen Ökobilanzdaten zeitnah der Öffentlichkeit zugänglich machen würden.

In der Fallstudie „**Nanotechnikbasierter Ultradur® High Speed-Kunststoff**“ wurden exemplarisch Umweltentlastungspotenziale von weiterentwickelten technischen Kunststoffen untersucht, deren Verarbeitungseigenschaften durch den gezielten Zusatz von Nanopartikeln wesentlich verbessert werden. Als konkretes Beispiel wurde dazu der rheologie-modifizierte Ultradur® High Speed-Kunststoff der Fa. BASF betrachtet und ein Vergleich zum bisherigen Standard-PBT über den gesamten Produktlebensweg vorgenommen. Als Grundlage dienten die Veröffentlichungen zu einer von der Fa. BASF selbst durchgeführten Öko-Effizienz-Analyse.

Die Vorteile dieses besonders gut fließfähigen Kunststoffes zeigen sich insbesondere in der Spritzgussverarbeitung. Auf Grund der niedrigen Schmelzeviskosität reichen geringere Einspritz- und Nachdrücke oder eine geringere Verarbeitungstemperatur aus, um entsprechend komplexe Geometrien zu realisieren. Bei dem betrachteten Szenario, in dem bei gleichem Materialeinsatz eine Verringerung der Verarbeitungszeit um 20% unterstellt wurde, konnten Energieeinsparungen im Spritzgussprozess von ca. 9% erzielt werden. Die Verringerung spiegelte sich auch in den anderen

Umweltaspekten wider. Nur in der Umweltwirkungskategorie Stratosphärischer Ozonabbau war eine Verschlechterung feststellbar, deren Ursache nach Aussage von BASF im Herstellungsprozess der organischen Nanopartikel begründet liegt.

Beschäftigungseffekte durch Nanotechniken

Als Ergebnis der Untersuchung zu Beschäftigungseffekten, die auf Auswertung bestehender Studien sowie einer durchgeführten Befragung beruhen, ist festzustellen, dass die Nanotechnologieunternehmen hinsichtlich ihrer Nanoaktivitäten insbesondere beim Umsatz positive Entwicklungserwartungen haben. Die Analyse zeigt, dass die wirtschaftliche Bedeutung der Nanotechnologie nicht unterschätzt werden sollte. Es ist in diesem Zusammenhang allerdings darauf zu verweisen, dass Nanotechniken als „enabling technologies“ eingestuft werden können und damit - ähnlich wie die Materialwissenschaften - zwar eine wichtige Rolle für das Innovationsgeschehen und die wirtschaftliche Entwicklung haben, dass diese aber letztlich nur sehr begrenzt dazu führt, dass tatsächlich neue „eigenständige“ Nano-Arbeitsplätze entstehen. Vielmehr ist davon auszugehen, dass die Nanotechnologie bzw. der Einsatz der Nanotechnik in den unterschiedlichen Verfahren und Produkten zu einer Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit dieser Verfahren und Produkte führen kann, dass es sich aber dabei in der Regel nicht um neu geschaffene Arbeitsplätze handelt, sondern vielmehr um den Erhalt bestehender Arbeitsplätze durch Verbesserungsinnovationen. Ein weiter gehender Arbeitsplatzaufbau könnte dann erfolgen, wenn es gelingt, Nanotechniken für neue Prozesse und Produkte so nutzbar zu machen, dass durch diese auch neue Absatzmärkte erschlossen werden können.

Fazit und Handlungsbedarf

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde an konkreten Produkten und Verfahren analysiert, inwieweit die Anwendung von Nanotechnik Beiträge zur Umweltentlastung leisten kann. Dies hebt auf die Chancendimension der Nanotechniken ab. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass durch Nanotechnologien in einigen der untersuchten und dargestellten Anwendungsbereiche hohe Umweltentlastungspotenziale erschlossen werden 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 nicht nur Abschätzungsprobleme, weil die Verfahren sich noch in einem eher frühen Stadium der Entwicklung befinden. Ein zentrales Problem liegt schlicht darin, dass diese Innovationen sich – wie alle Innovationen – gegenüber Trägheitskräften durchsetzen müssen, dass z. B. die drohenden „sunk costs“ bestehender Anlagen die Markteinführung neuer nanotechnologiebasierter Verfahren behindern.

Weder die Risiken noch die Chancen von Nanotechnologien sind Selbstläufer. Die Bedeutung von Studien wie der vorliegenden liegt darin, Potenziale aufzuzeigen, die realisiert werden können aber auch realisiert werden müssen, Potenziale zur Realisierung von Chancen und Potenziale zur Minimierung von Risiken. Die positiven Ergebnisse der Ökopprofile sollen also durch Rückspiegelung der Ergebnisse in die Entwicklungsprozesse dazu beitragen, die entsprechende Gestaltung der Prozesse und Produkte weiter voran zu treiben und zu optimieren. Untersuchungen zu solchen sich selbst verstärkenden Rückkopplungsprozessen liegen allerdings bisher nicht vor und waren im Rahmen dieser Studie auch nicht möglich.

Festgehalten werden kann:

- Die begleitende und prospektive Ökobilanzierung stellt ein wichtiges und praktikables Instrument dar, um wesentliche Bestandteile „nachhaltiger“ Technologieentwicklung zu identifizieren. Das systematische Bereitstellen von Ökobilanztools und Daten für die relevanten industriell hergestellten Nanomaterialien (CNT, TiO₂, SiO₂, ...) würde weitere Ökopprofilbetrachtungen wesentlich erleichtern. Das Umweltbundesamt könnte versuchen, diese Ansätze speziell für diesen Bereich in Zusammenarbeit mit der Industrie zu verstärken und in vorhandene Strukturen einzuordnen (PROBAS, GEMIS).
- Auch die BMBF-geförderten Nanotechnologieprojekte sollten hinsichtlich ihrer Aussagen zu Umwelt-/Nachhaltigkeitsaspekten stärker auf quantifizierbare Aussagen hinsichtlich der Umweltpformance bzw. auf nutzbare Ökobilanzdaten orientiert werden, die wieder in den öffentlichen und wissenschaftlichen Diskurs zurückfließen können.
- Eine Quantifizierung des Umweltnutzens von nanotechnischen Verfahren und Produkten für Deutschland wäre nicht nur für die Förderpolitik, sondern

insbesondere auch für die Ausgestaltung der High-Tech-Strategie, Klimastrategie und der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung von hohem Nutzen. Welchen Beitrag können Nanotechniken zur Überwindung von existierenden „Bottlenecks“ leisten, bspw. hinsichtlich des CO₂-Minderungspotenzials oder bezüglich der Ressourceneffizienz, dies auf der Basis von technologischen „Road maps“ und prospektiven Ökobilanzen (und damit auch in Anlehnung an Studien mit vereinfachten ökobilanziellen Ansätzen wie z. B. dem „Carbon Footprint“).

- Was bisher völlig fehlt ist schließlich die Analyse/Bewertung der Umweltentlastungspotenziale besonders weitreichender eher „visionärer“ Anwendungsgebiete wie ultrastabile Leichtbaukonstruktionswerkstoffe, aktive Nanosysteme, Innovationen auf der Schnittstelle Nano-/Biotechnologie bis hin zur künstlichen Photosynthese und Nanobionik.

Im gesellschaftlichen Kontext dreht sich Vieles um die Formulierung eines „sicheren“ Zielkorridors (Leitbilder und Leitplanken) und damit um größtmögliche Freiheit im Innovationsprozess einerseits und Umsetzung des Vorsorgeprinzips andererseits nicht zuletzt mit Blick auf die Akzeptabilität und Akzeptanz sehr weit reichender Innovation auf der Basis von Nanotechnik. Ein wichtiger Ansatz bestünde darin, in Anlehnung an die schon laufenden Bemühungen des Umweltbundesamtes hinsichtlich der Umsetzung des Leitbildes einer ‚Sustainable Chemistry‘ auch den Prozess für ein Leitbild „Green Nanotechnology“ mit zu initiieren und zu unterstützen.

Technikentwicklung ist nicht oder doch nur sehr begrenzt durch politische Interventionen steuerbar, vielmehr ergibt sich aus dem Zusammenwirken unterschiedlichster Akteure eine Pfadentwicklung der Technik, die gestaltend begleitet werden kann, u. a. durch das Arbeiten mit Leitbildern als Steuerungsinstrumente. Da sich die Nanotechniken im Grundsatz noch in einer Frühphase der Entwicklung befinden, existieren zumindest grundsätzlich noch große Freiheitsgrade, um den Suchraum für nanotechnische Innovationen in eine „nachhaltige“ Richtung zu lenken.

Als Grundlage und Ansatzpunkt könnte ein Leitbild wie „Green Nanotechnology“ oder Nanobionik dienen. Ein interessanter Ansatz in diese Richtung ergibt sich im Anschluss an die im Rahmen der vom Ministerium für Umwelt Reaktorsicherheit und Naturschutz federführend betreuten NanoKommission von der Arbeitsgruppe ‚Risiken und

Sicherheitsforschung' festgelegten Kriterien der Besorgnisanalyse. Zumindest zum Teil lassen sich aus der erweiterten Umkehrung der Besorgniskriterien auch Kriterien für ein sichereres Design, für eine nachhaltigkeitsorientierte Gestaltung nanotechnikbasierter Innovationen ableiten.

8 Summary

The top priority of the research project “Environmental Relief Effects through Nanotechnological Processes and Products” was to identify and quantify, to the extent possible and by means of selected examples, the environmental and sustainability opportunities and risks associated with this rapidly developing line of technology. Environmental relief potentials are understood here to include not only environmental engineering in the narrower sense (end-of-pipe technologies), but also and specifically process, production, and product-integrated environmental protection, thus not least the “input side” on the path to a sustainable economy: the reduction and modification of quantities (resource efficiency) and properties (consistence) of the material and energy flows entering the technosphere.

The project consisted of four stages, each making use of a specific method of investigation:

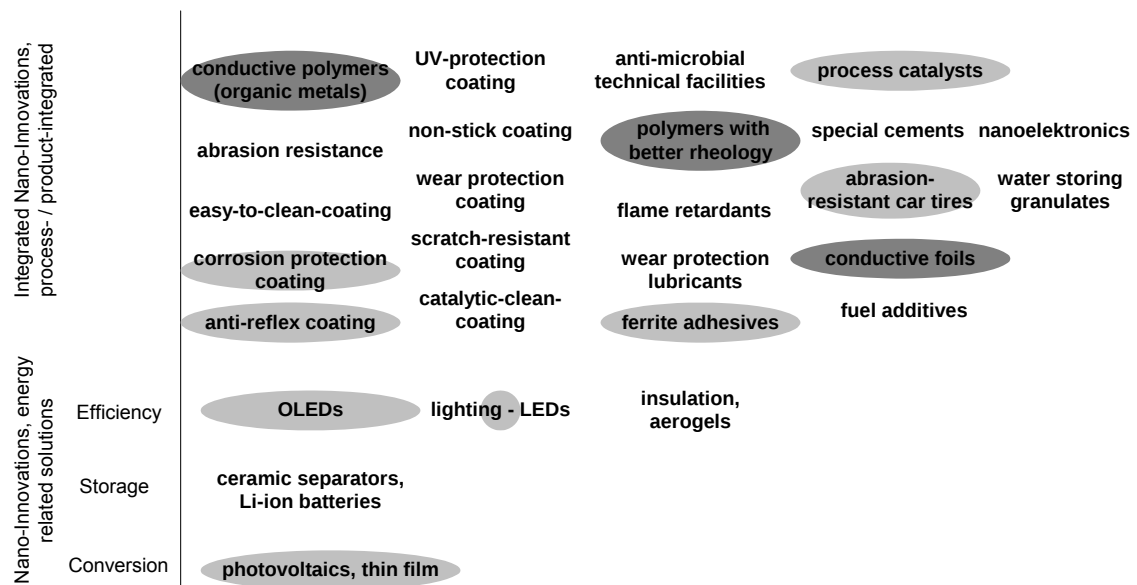
- Analysis of products and processes already on the market or soon to be made available and their application
- Examination and initial qualitative assessment of each of the products and processes with respect to its potential for environmental relief (or burden, as the case may be)
- In-depth life cycle analysis and assessment of four selected processes or products as compared to conventional processes or products
- Supplemental to the environmental assessment, an appraisal of employment potentials for the selected processes and products.

The analysis of new and existing nanotech products and processes with respect to environmental protection/pollution revealed a large and varied number of existing and potential areas of application; however, it must be noted that their environmental relevance has so far only been qualitatively represented. Quantitative investigations of anticipated or still to be realized environmental benefits arising from specific nanotechnical products and processes, as well as further-ranging environmental

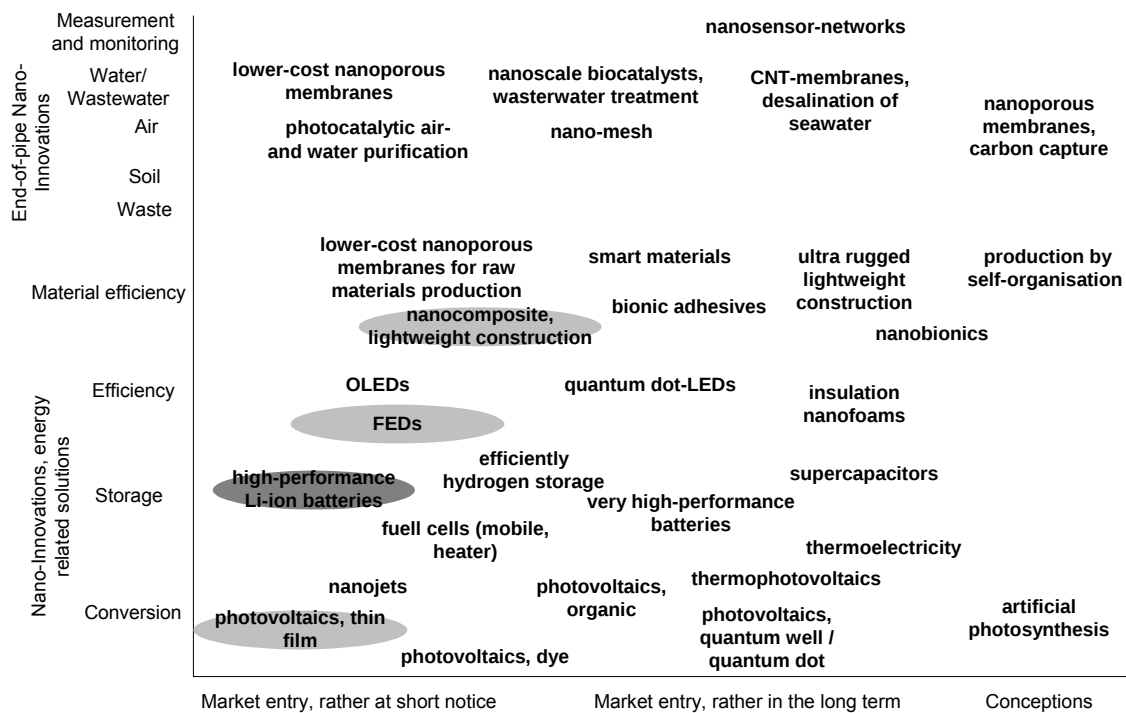
innovations such as product and production-integrated environmental protection have so far been the exception.

In addition to the potential applications in the area of end-of-pipe technologies, such as membranes (catalysis already extends beyond the purification of exhaust gases in many areas well into the area of integration), the following illustrations make clear that the most predominant and especially far-ranging potentials for nano-environmental innovation are to be found in the areas of integrated innovation and energy. In many fields of application numerous potentials for the realization of environmental benefits are opening up. Those applications for which separate case studies already exist and thus quantitative data with respect to potential environmental benefits are available are indicated below with a light-grey background. The applications with a dark-grey background are those that were chosen for in-depth investigation in this study.

Abbildung 56: Nanotechnology-based products / applications on the market¹²³



¹²³ Source: authors

Abbildung 57: Anticipated nanotechnology-based applications¹²⁴

Evaluation of specific application contexts—life cycle assessment

As an assessment approach, the environmental profiles prepared are based on the life cycle assessment methodology. The life cycle assessment (LCA) is the most extensively developed and standardized methodology for assessing environmental aspects and potential product-specific environmental impacts associated with the entire life cycle of a product. It has the advantage that by means of comparative assessments, an (extrapolative) analysis of eco-efficiency potentials in comparison to existing applications is possible. With its method of extrapolation, however, this study goes far beyond the current state of the methodology. At the same time, the LCA methodology—as with all methodologies—has its characteristic deficits: there are impact categories for which generally accepted impact models and quantifiable assessments do not exist. This is particularly true in the relevant categories of human

¹²⁴ Source: authors

and environmental toxicity. Furthermore, in LCA assessments the risks and the technological power (hazard) effectiveness of applications are not considered. A comprehensive methodology must provide for such analyses.

In the following investigations, the focus is placed on the potential environmental relief provided by nanotechnology products and processes. The modelling of individual case studies and their evaluation and analysis according to applicable environmental impacts was carried out by means of the LCA software Umberto. The life cycle impact assessment and evaluation of ecological considerations is based on the partial aggregation method of the Institute of Environmental Sciences (CML) of Leiden University, which allows for the various environmental impacts to be quantitatively ascertained. Risk aspects, particularly in dealing with nanomaterials, are separately addressed in the individual case studies within the framework of a 'concern analysis' utilizing relief and concern criteria established by the 'Risks and Safety Research' Work Group within the framework of the German NanoCommission, under the direction of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, and Nuclear Safety. In the form of a preliminary assessment these criteria could be applied in an early stage of technological development, in which (eco)toxicological data are not yet available.

Building on a standardization of environmental innovations, a technology screening was carried out and a group of thirteen proposals for in-depth investigation were drawn up, from which four nanotechnology applications were selected for life cycle impact considerations:

- Manufacture of solderable surface finishes on printed circuit boards by means of nanotechnology, Ormecon GmbH, Ammersbek bei Hamburg
- MW carbon nanotube application for foils in the semiconductor industry, Bayer MaterialScience AG, Leverkusen
- Lithium batteries for energy storage, among others, Litec GmbH, Kamen
- Ultradur® High Speed plastic, BASF, Ludwigshafen.

The results of the LCA comparisons make clear that nanotech applications neither intrinsically nor exclusively can be associated with the potential for a large degree of environmental relief. Nevertheless, for the majority of the application contexts—

selected with these aspects in mind—potentials for significant environmental relief could be ascertained using the chosen methods based on a comparative functionality of the different solutions.

The reliability of the ascertained numbers is, of course, dependant on the quality and accessibility of the material and energy data available for the individual applications. For those nanotechnological processes still in development, only limited quantitative data are available. Likewise, when comparing established or mature technologies with those still in development, one must recognize that the new technology is at the beginning of its “learning curve,” i.e., that it holds the potential for significantly greater increases in efficiency.

Printed circuit boards (PCBs) are found in almost all electronic devices, including personal computers, mobile telephones, and televisions, but also in automobiles, airplanes, and satellites. Worldwide approx. 250 million m² of PCB are manufactured each year. In the first case study, the ecological potential of a new nanotechnology-based process for the **manufacture of solderable surface finishes on printed circuit boards** developed by Ormecon GmbH Ammersbek was investigated and compared to various conventional processes. The new OM Nanofinish process is characterized by a combination of new material functionality (organic metal) and its nanoscale nature. As an innovative process for the manufacture of solderable surface finishes on printed circuit boards, OM Nanofinish possesses an enormous potential for environmental relief compared to qualitatively equivalent conventional processes—particularly in comparison to the ENIG, HASL, and immersion processes. The life cycle analysis, based on a comparatively good data pool, clearly demonstrates that the OM Nanofinish performs four to twenty times better than the HASL and immersion processes in all environmental categories. When compared to the ENIG process, this jumps to three digits, for example, in the area of greenhouse gases to a factor of 390. The life cycle assessment data for the OSP process are of the same magnitude as those for the OM Nanofinish, but it must be noted that the fields of application for OSP are not in high-grade production but rather the mass markets and thus only a limited qualitative comparison with the OM Nanofinish process is possible.

Commensurate with the concern analysis that was conducted and in accordance with the knowledge currently available for polyanilin nanoparticles in the application context

described (surface finishes for printed circuit boards), it is the view of this study that a minimal level of concern can be assumed.

Current knowledge about the possible environmental impact of carbon nanotubes (CNT) is still quite limited; production to date has been mostly limited to laboratory and research quantities and promising applications still must overcome significant material research challenges. Thus in the case study **“MW Carbon Nanotube Applications for Foils in the Semiconductor Industry,”** the decision was made to look at an already existing industrial application. From the start it was clear that in this particular product application the resource efficiency potentials would not be as great as those hoped to be found in future CNT applications, e.g., in the area of new ultra stable lightweight construction materials. Nonetheless, one goal of the case study was also to fill the current knowledge gap with respect to life cycle assessment data for CNTs. With the cooperation of the firm Bayer MaterialScience AG, it was possible to produce a detailed model of the manufacturing process for multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) and to generate specific life cycle assessment data. It was thus possible to make a life cycle assessment comparison with conventional plastic sheets made electrically conductive by adding carbon black. In addition, sensitivity analyses made it possible to identify for more in-depth investigation those parameters having an important influence upon the results.

For all environmental impacts along the life cycle of the new foils with MWCNT, it was possible to establish a positive reduction ranging from a 12.5% for global warming potential to 20% for eutrophication. Polycarbonate, as the main component of the foil so strongly influences environmental impact that manufacturing differences for MWCNT play no role in the individual scenarios. The greatest influence is thus found in increased material efficiency: where before 1000 kg of “old” plastic sheets was required, now only 800 kg of the “new” foil is needed.

With respect to the ‘concern analysis’, one must first address the concerns raised by specific properties of ‘free’ carbon nanotubes. Unaggregated or unagglomerated MWCNTs are presumed to be respirable, are insoluble, and, because of their inert carbon composition, are presumed to have only limited biodegradability. Likewise, the morphology of some nanotubes—in analogy to asbestos or wood dust, both of which have in combination with persistence been determined to be carcinogenic—is also a

cause for concern. The fact that MWCNTs are generally found in relatively large agglomerates (in the micrometer range) mitigates this concern certainly, but cannot eliminate it entirely.

Decisive, however, is the question of whether—or more specifically, where—in the product life cycle of the conductive foils an exposure to free CNTs would even be possible. At most this only appears to be possible at the beginning of production of MWCNTs, in the packaging and mixing (formulation) processes, and perhaps at the end of the product life cycle during waste incineration. In the use phase for the user resp. consumer there is thus no immediate cause for concern. In the end, a comprehensive and balanced consideration of what are certainly comparatively minimal advantages in the area of ascertainable LCA environmental relief potentials vs. still unanswered questions in the area of hazard analysis with respect to environmental, health and safety aspects should urge caution.

Alternative power train systems in public transport are currently being intensively researched and investigated, particularly with a view to fuel efficiency and improved environmental compatibility. A tremendous restraint on the deployment of hybrid and pure electric power trains is the lack of suitable solutions to the problem of energy storage. The development of ever more powerful storage units using lithium-ion batteries is one possible solution to these technical challenges, and here, nanotechnology offers some interesting points of departure.

In the course of the third case study, even more prospective in its outlook, a comparative study was carried out of conventional offerings in short-range transit vs. new systems utilizing hybrid power trains—particularly with a view to **environmental relief potentials anticipated from nanotechnology-based further developments in lithium-ion batteries**.

As a result of the investigation but against a background of deductions and assumptions necessary for the LCA comparison, it was possible to establish that the environmental advantages achieved through reductions in fuel consumption by the hybrid system more than offset the additional material expenditures. But only the future variant model demonstrates a difference in environmental impact of more than 20% less than the conventional diesel city bus. On the basis of existing battery technologies as well as those anticipated in the near future, no real breakthrough in environmental

efficiency for hybrid power systems in the bus applications examined is presently in sight. Expressed in absolute numbers, over a period of six years a bus based on the future variant model would provide savings of approx. 65 t CO₂ equivalents compared to conventional diesel buses. Even though the additional expense of currently roughly €120,000 per bus can be significantly reduced in series production, there still remain very high specific CO₂ avoidance costs. This must be balanced against the further environmental advantages of the hybrid bus, such as emission-free operation at passenger stops and in the pedestrian zone.

In other applications, nanotech innovations in battery technology—for example, direct electric-drive power trains for motor vehicles—could lead to greater specific environmental relief. In order to better be able to model and make life-cycle assessments of such applications, up-to-date life cycle assessment data for lithium-ion batteries is essential. It certainly would be most welcome if those German firms involved in the development of higher-performance lithium-ion batteries would also do their part to address the issue by making the needed life cycle assessment data publically available in a timely manner.

The case study “**Nanotechnology-based Ultradur[®] High-Speed Plastic**” looks at the environmental relief potentials of advanced technological plastics, whose working properties have been substantially improved through the selective addition of nanoparticles. Specifically, the rheologically modified engineering plastic Ultradur[®] High Speed PBT from BASF was selected for investigation and compared across the entire product life cycle with the previous standard PBT. BASF’s own life-cycle analysis served in part as the basis for the case study.

The advantages of this new plastic, with its significantly improved flowability, become particularly evident in injection molding applications. Due to the low melt viscosity, lower injection and holding pressures and a lower processing temperature are sufficient for the realization of equally complex geometries. In the scenario that was studied, a 20% reduction in working time for the same amount of material was ascertained, leading to energy savings of approx. 9% in the injection moulding process. These reductions are also reflected in the other environmental aspects. Only in the environmental impact category stratospheric ozone depletion was a negative impact

noted, the origin of which according to BASF is due to the manufacturing process for the organic nanoparticles.

Nanotechnology employment effects

As a result of an investigation of employment effects, based on an appraisal of existing studies as well as a survey that was conducted, it was found that nanotechnology firms have positive expectations for development with respect to their nano-activities—particularly for turnover. The analysis shows that the economic importance of nanotechnology should not be underestimated. In this context, however, it should be noted that nanotechnology can be classified as an “enabling technology” and thus—much as in the material sciences—certainly plays an important role in innovation and economic development, but that ultimately its direct impact upon the creation of new independent “nano-jobs” is very limited. Instead it is much more likely that nanotechnology or the deployment of nanotechnology in the various production methods and products will lead to improvements in the competitiveness of these methods and products, but as a rule this does not involve the creation of new jobs, rather more so the preservation of existing jobs by means of innovative improvements. The further creation of new jobs could then follow with the development of nanotechnology-based processes and products that are so useful that they then lead to the development of new markets.

Conclusions and recommendations for action

In the course of this research project, actual products and processes were analyzed to determine the extent to which the application of nanotechnology can make a contribution to environmental relief. This emphasizes the dimension of opportunities based on nanotechnology. As a result it was found that the application of nanotechnologies in some of the areas of application that were investigated can lead to the achievement of large environmental relief potentials.

At the same time it must be noted that there is no guarantee that processes showing promising results in the prospective life cycle assessment will automatically succeed in the marketplace. Assessment problems are not the only aspect in this connection—many of the processes are still in a rather early stage of development. A key problem is simply that these innovations—as is the case with all forms of innovation—must

overcome the forces of inertia—the threat of sunk costs in existing facilities, for example, that hinder the market introduction of new nanotechnology-based processes.

Neither the risks nor the opportunities offered by nanotechnology are a sure thing. The importance of studies such as this one is in demonstrating the potentials that can and must be realized: potentials for the realization of opportunities and potentials for the minimization of risks. Feeding the results of the environmental assessment profiles back into the development process should thus lead to further improvements and optimizations in the design of processes and products; however, investigations of the success of such reinforcing feedback processes do not exist yet and were not possible within the scope of this study.

It could be determined that:

- The concurrent and prospective life cycle assessment has proven itself to be an important instrument in identifying essential elements of sustainable technological development. The systematic provision of life cycle assessment tools and data for the relevant industrially manufactured nanomaterials (CNT, TiO₂, SiO₂, ...) would significantly facilitate further life cycle assessment profiles. The German Federal Environmental Agency, in cooperation with industry, could attempt to strengthen these approaches specifically for these areas and incorporate them into the currently available structures and databases (PROBAS, GEMIS).
- Statements on environmental/sustainability aspects from nanotechnology projects sponsored by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) should be more strongly based on quantifiable evidence with respect to environmental performance and usable life cycle assessment data, which can then be fed back into the public and scientific discourse.
- A quantification of the environmental benefits to Germany provided by nanotechnological processes and products would be helpful not only in federal funding policy, but also and especially for the formulation of the Federal Government's high-tech, climate, and sustainability strategies. Which contribution nanotechnology can make to overcoming existing bottlenecks, for example, with respect to CO₂ reduction potential or resource efficiency? This

should be discussed on the basis of technological road maps, of prospective life cycle assessments and last not least following the example of studies with simplified ecobalance approaches such as the carbon footprint.

- What has been completely lacking so far is an analysis/assessment of the environmental relief potentials offered by particularly far-ranging or even visionary areas of nanotechnology application, such as ultrastable lightweight construction materials, active nanosystems, and innovations at the interface of nano and biotechnology up to and including artificial photosynthesis and nanobionics.

In the social context, there has been much concern about the establishment of a “safe” corridor for development (conducted by guiding principles as well as guide rails). To assure the greatest possible freedom in the innovation process on the one hand and the implementation of the precautionary principle on the other—and not least with a view to the acceptability and acceptance of very far-ranging innovations based upon nanotechnology. An important initial approach—taking the example of the already ongoing efforts of the German Federal Environmental Agency with respect to the implementation of a guiding principle for a “sustainable chemistry”—would be to likewise initiate and support the development of a new guiding principle: a “green nanotechnology.”

It is not possible—or if so, only to a very limited extent—to shape technological development by means of political intervention; rather, it is through the interaction of the various players that a path of development arises that can be constructively influenced by, among other things, the use of a guiding principle as a steering instrument. Since nanotechnology is still principally in an early phase of its development, there still exists in theory at least a large degree of freedom to steer research efforts in the direction of sustainability.

A guiding principle such as “green nanotechnology” or nanobionics could serve as a foundation or starting point. An interesting approach in this direction is found subsequently in the above mentioned criteria of the ‘concern analysis’, prepared by the Working Group on Risks and Safety Research, within the framework of the German NanoCommission, under the direction of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, and Nuclear Safety. At the very least, working from an expanded

inversion of the concern criteria it should be possible, at least in part, to also derive 'safety design' criteria for the sustainability-oriented development of nanotechnology-based innovations.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anzahl der Produkte, geordnet nach Produktkategorien	10
Abbildung 2: Nanotechnikbasierte Produkte / Anwendungen am Markt I.....	31
Abbildung 3: Nanotechnikbasierte Produkte / Anwendungen am Markt II.....	31
Abbildung 4: Erwartbare nanotechnikbasierte Anwendungen	32
Abbildung 5: Schritte zur Erstellung einer Ökobilanz.....	43
Abbildung 6: Systemgrenze für die vergleichende Ökobilanz	52
Abbildung 7: Horizontalanlage.....	53
Abbildung 8: Typische Prozessschritte von Surface Finishing-Verfahren	55
Abbildung 9: Unterschiedliche Oxidationsformen des Polyanilin.....	56
Abbildung 10: Prozessschritte des OM Nanofinish-Verfahrens.....	58
Abbildung 11: Abiotischer Ressourcenverbrauch (ENIG: 411,91 kg Antimon-Äq./1000 m ² LP).....	64
Abbildung 12: Verbrauch Energieressourcen (ENIG 554.454 MJ-Äq./1000 m ² LP).....	65
Abbildung 13: Treibhauspotenzial (ENIG 36.657 kg CO ₂ -Äq./1000 m ² LP).....	66
Abbildung 14: Versauerungspotenzial, generisch (ENIG 390 kg SO ₂ -Äq./1000 m ² LP).....	67
Abbildung 15: Überdüngungspotenzial, generisch (ENIG 46,78 kg PO ₄ -Äq./1000 m ² LP).....	68
Abbildung 16: Stratosphärischer Ozonabbau (ENIG 3,10E-03 kg CFC-11-Äq./1000 m ² LP).....	69
Abbildung 17: Abiotischer Ressourcenverbrauch der OM Nanofinish-Varianten	70
Abbildung 18: Treibhauspotenzial der OM Nanofinish-Varianten	70
Abbildung 19: Erhöhung der Leitfähigkeit durch Dispergierung (in Siemens/cm)	73
Abbildung 20: Systemgrenzen für die vergleichende Ökobilanz	78
Abbildung 21: Maßstabsvergrößerung (Up-Scaling) des Baytubes® - Herstellungsverfahrens.....	80
Abbildung 22: Anlagenschema zur Herstellung von Baytubes®	81

Abbildung 23: Mechanismus des Wachstums mit Hilfe von Metallkatalysatoren	81
Abbildung 24: Verbrauch Energieressourcen	89
Abbildung 25: Treibhauspotenzial	90
Abbildung 26: Überdüngungspotenzial, generisch	91
Abbildung 27: Stratosphärischer Ozonabbau	92
Abbildung 28: Solaris Hybridbus Urbino 18 in Dresden.....	98
Abbildung 29: Schematische Darstellung des Hybridantriebs	99
Abbildung 30: Mercedes-Benz Hybridbus Citaro.....	100
Abbildung 31: Systemgrenze für die vergleichende Ökobilanz	102
Abbildung 32: Verbrauch Energieressourcen	106
Abbildung 33: Treibhauspotenzial	107
Abbildung 34: Versauerungspotenzial, generisch	108
Abbildung 35: Sommersmog	109
Abbildung 36: Chemische Struktur von Polybutylenterephthalat.....	112
Abbildung 37: Nanopartikel in der Kunststoffmatrix.....	112
Abbildung 38: Fließfähigkeit von Ultradur® Standard und Ultradur® High Speed im Vergleich.....	113
Abbildung 39: Bilanzraum der Standardvariante Ultradur®.....	115
Abbildung 40: Bilanzraum der Innovationsvariante Ultradur® High Speed	115
Abbildung 41: Ökologischer "Fingerprint"	116
Abbildung 42: Primärenergieverbrauch	117
Abbildung 43: Treibhauspotenzial	118
Abbildung 44: Versauerungspotenzial	118
Abbildung 45: Sommersmog	119
Abbildung 46: Stratosphärischer Ozonabbau	119
Abbildung 47: In der Nanotechnologie aktive Unternehmen nach Bundesländern (2008)	131

Abbildung 48: Anzahl von Nanotechnologie-Unternehmen nach Bundesländern in Relation zum BIP der Länder	132
Abbildung 49: Nanotechnologie-Unternehmen in Deutschland nach Wirtschaftszeigen (2008)	133
Abbildung 50: Beschäftigung (in 2005) in KMU der Nanotechnologie nach Wirtschaftszweigen (WZ) (n=521 Unternehmen)	137
Abbildung 51: Beschäftigung (in 2007) in KMU der Nanotechnologie nach WZ (n=291 Unternehmen).....	137
Abbildung 52: Anstieg des Personaleinsatzes in Nanotechnologie im Unternehmen	144
Abbildung 53: Entwicklung der Nanotechnologie-Aktivitäten im Jahresdurchschnitt 2008-2010 im Vergleich zu 2007 (n= 87)	146
Abbildung 54: Nanotechnikbasierte Produkte / Anwendungen am Markt	155
Abbildung 55: Erwartbare nanotechnikbasierte Anwendungen	156
Abbildung 56: Nanotechnology-based products / applications on the market	167
Abbildung 57: Anticipated nanotechnology-based applications.....	168
Abbildung 58: Fallstudie 1, Verfahren ENIG Nickel/Gold, vertikal	218
Abbildung 59: Fallstudie 1, Verfahren OM Nanofinish, horizontal, vergleichbar.....	219
Abbildung 60: Fallstudie 1, Verfahren OM Nanofinish, horizontal, umfassender	220
Abbildung 61: Fallstudie 2, Szenario Folie Alt mit Carbon Black.....	221
Abbildung 62: Fallstudie 2, Szenario Folie Neu mit MWCNT	222
Abbildung 63: Fallstudie 2, Abiotischer Ressourcenverbrauch	
Abbildung 64: Fallstudie 2, Versauerungspotenzial, generisch	224
Abbildung 65: Fallstudie 3, Variante V1 Stadtbuss	225
Abbildung 66: Fallstudie 3, Variante V2a Hybridbus NiMH Subat	226
Abbildung 67: Fallstudie 3, Variante V4a Li-Ion Subat Zukunft	227

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über quantifizierende Studien zu nanotechnischen Innovationen	14
Tabelle 2: Überblick über Projekte zum Thema Nanotechnologie und LCA der U.S. EPA	16
Tabelle 3: Wirkungskategorien und dazu beitragende Substanzen	44
Tabelle 4: Berechnungen zum Materialverbrauch	61
Tabelle 5: Darstellung der Energie- und Wasserverbräuche der Surface Finishing- Verfahren (ohne Vorkette)	62
Tabelle 6: Theoretisch maximales Umweltentlastungspotenzial durch OM Nanofinish	71
Tabelle 7: Darstellung der Produktlebenswegstufen und Charakterisierung der jeweilig vorliegenden Produktform	74
Tabelle 8: Bewertung der Besorgniskriterien (weisen auf hohe Besorgnis hin)	75
Tabelle 9: Randparameter für den bilanziellen Vergleich	79
Tabelle 10: Produktspezifikation von Baytubes® C 150 HP	82
Tabelle 11: Berechnung der Gasgemischmengen	83
Tabelle 12: Kumulierter Energieaufwand (KEA) von Verfahren zur Herstellung von Kohlenstoffnanopartikeln	84
Tabelle 13: Spezifischer Primärenergieverbrauch (MJ-Äq./kg)	85
Tabelle 14: Differenzierte Darstellung der Anteile der bilanzierten Module am Primärenergieverbrauch zur Herstellung von Baytubes® (MJ-Äq./kg)	86
Tabelle 15: Betrachtete Szenarienvarianten mit Baytubes®	87
Tabelle 16: Anteil einzelner Verfahrensschritte am Primärenergieverbrauch in (MJ- Äq./FE) für die betrachteten Varianten	89
Tabelle 17: Variantenbeschreibungen	104
Tabelle 18: Ausgewählte Untersuchungen zu den Beschäftigungseffekten in Nano- Unternehmen: Methoden und Datenquellen	122
Tabelle 19: Vermutete Grundgesamtheit von Nanotechnologieunternehmen	129
Tabelle 20: In der Nanotechnologie aktive Akteure nach Bundesländern (2007)	130

Tabelle 21: Anzahl der Gesamtbeschäftigten in Nanotechnologie-Unternehmen	135
Tabelle 22: Beschäftigte in KMU der Nanotechnologie nach Bundesländern (n=521) (Angaben für das Jahr 2005)	136
Tabelle 23: Beschäftigte in KMU der Nanotechnologie nach Bundesländern (Angaben für das Jahr 2007, n=295)	136
Tabelle 24: Nano-Beschäftigte in Nanotechnologie-Unternehmen	138
Tabelle 25: Anteil der Nano-Beschäftigten in Nanotechnologie-Unternehmen der Stichprobe	139
Tabelle 26: Anteil der Nano-Beschäftigten in Nanotechnologie-KMU-Unternehmen des Berichtskreises (n=42)	139
Tabelle 27: Hochrechnung der Nanotechnologie-Beschäftigten für 2002	140
Tabelle 28: KMU und Beschäftigte in den Kernbereichen mit Nano-Aktivitäten im Jahr 2005	142
Tabelle 29: Beschäftigtenpotenzial in KMU der Kernbereiche mit Nano-Aktivitäten im Jahr 2005	143
Tabelle 30: Umweltrelevante Anwendungen in Vorträgen auf dem Workshop	185
Tabelle 31: Fallstudie 2, Anteile der einzelnen Bilanzmodule am Treibhauspotenzial (CO ₂ -Äq./FE)	223
Tabelle 32: Fallstudie 3, Zusammensetzung der NiMH Batterie, SUBAT-Projekt	228
Tabelle 33: Fallstudie 3, Zusammensetzung der Li-Ion-Batterie, SUBAT-Projekt	229

11 Anhang

11.1 Anhang 1: Ausgewertete Tagungen und Workshops

- Nanofrontiers, February 9-10, 2006, Washington

Ausgewertete Unterlagen: Schmidt Karen F. (2007a) Nanofrontiers. Vision for the Future of Nanotechnology. (Workshopreport)

Dieser Workshop diskutierte in seinen Beiträgen besonders die drei Bereiche Energie, Medizin sowie Trinkwasser. Der Bereich Energie wurde dabei unterteilt in Energieumwandlung, Energiespeicherung, Energieübertragung sowie Energienutzung. Im Bereich Trinkwasser wurde über nanotechnische Entwicklungen in den Bereichen Entsalzung, Gewinnung sowie neue Schadstoffe diskutiert.

Quantifizierungen in den einzelnen Anwendungsfelder wurden nicht dargestellt.

- Safer Nano 2006, March 6-7, 2006, Portland
- Safer Nano 2007, March 12 – 13, 2007, Eugene

Ausgewertete Unterlagen: Workshopvorträge

Diese beiden Workshops thematisierten einerseits Risikopotenziale durch den Einsatz von Nanomaterialien insbesondere toxikologische Fragen. Andererseits benannten auch einzelne Beiträgen bekannte Anwendungsbereiche wie verschiedene Energiebereiche, Nanofilter, Katalysatoren, selbstreinigende Oberflächen, Nanosensoren zum Umweltmonitoring ... mit Umweltnutzen; dies aber auch nur in qualitativer Form (vgl. Renfroe 2006, Murdock 2006).

Hutchison Jim (2006) stellte außerdem sein Konzept einer Green Nanoscience vor, indem die Prinzipien der Green Chemistry für die Nanotechnologie angepasst wurden. Außerdem stellte er 2007 Beispiele für effizientere Herstellungsverfahren wie Diafiltration bei der Reinigung von Nanopartikeln sowie Ansätze zur biomolekularen Nanolithographie vor.

- ACS Green Nanotechnology and the Environment, March 26-29, 2006, Atlanta

Ausgewertete Unterlagen: Schmidt Karen F. (2007b) Green Nanotechnology: It's easier than you think. (Symposiumreport), Washington

Auf diesem mehrtägigen Symposium zum Thema „Grüne Nanotechnologie“ wurden aktuelle Forschungsprojekte und –ergebnisse in den folgenden Bereichen präsentiert und diskutiert:

- Grüne Syntheseverfahren (bspw. Niedrigtemperatursynthese, Mikrowellennutzung)
- Grüne Nanoelektronik (bspw. Nanolithographie, bleifreie Materialien)
- Grüne Produktionsverfahren (bspw. Nanofasern mittels Elektrosponningverfahren)
- Energie (bspw. Brennstoffzelle, Wasserstoffspeicherung)
- Umwelt-/Sanierungstechnologien (bspw. Arsenbeseitigung, neue Katalysatoren)

Quantifizierungen in den einzelnen konkreten Anwendungsfelder wurden nicht dargestellt. In einem Beispiel zur Reinigung von Quecksilber und anderen Schwermetallen aus Abwasser bei der Erdgas- und Erdölsuche berichtete Shas Mattigod von der Pacific National Laboratory, Richland, dass ein neues Verfahren die Konzentration des anfallenden Quecksilbers um 99% abbauen kann.

- Nanoforum-Workshop “Nano & the Environment”, 30 and 31 March 2006, Brüssel

Ausgewertete Unterlagen: Nanoforum and the Institute for Environment and Sustainability (2006) Nano & the Environment. Workshop Report, 30 and 31 March 2006, Brüssel (Report und Vorträge).

Tabelle 30: Umweltrelevante Anwendungen in Vorträgen auf dem Workshop

Umweltanwendungen bzw. -entwicklungen	Anwendungsbereich	Organisation / Unternehmen	Quelle
Nanoschaum	Isolation	BASF	Keßenich (2006)
Envirox TM (Ce ₂ O) als Dieseladditiv	Energieeffizienz und Emissionsminderung	BASF	Keßenich (2006)
Nano-Fe ₃ O ₄ zur Beseitigung von Arsen	Trinkwasseraufbereitung	CBEN	Colvin (2006)
Li-Ionen Batterie	Energiespeicherung	EU-Projekt	Tarascon (2006)
Nanostrukturierte dünne Filmsensoren	Umweltmonitoring	European Commission Joint Research Centre	Rickerby (2006)
Sensor Network	Umweltmonitoring		Skouloudis (2006)
Nanostrukturierter Sensor	Wassermonitoring	Eberhard Karls Universität Tübingen	Proll und Gauglitz (2006)
Nano-Metalloxid- Katalysatoren	Bodensanierung	EU-Projekt Concorde	Corberán (2006)

Die Anwendungsbeispiele wurden in den einzelnen Vorträgen genannt, ohne genauere quantifizierte Angaben zu Umweltentlastungspotenzialen zu machen.

- Nanotechnology and Life Cycle Assessment, 2-3 October 2006, Washington DC

Ausgewertete Unterlagen: WWIC (ed) (2007) Nanotechnology and Life Cycle Assessment. Synthesis of Results Obtained at a Workshop, 2-3 October 2006, Washington

Dieser Workshop thematisierte die Probleme der Anwendung ökobilanzieller Methoden wie die LCA im Bereich der Nanotechnologien, insbesondere die Einhaltung von Qualitätsstandards beim Vorliegen unzureichender Lebensweginformationen zu den Stoff-und Energieströmen sowie zu toxikologischen Auswirkungen eingesetzter Nanomaterialien. Da ein sehr großes Interesse an derartigen Studien besteht, wurde bspw. für einen eher pragmatischen Umgang mit fehlenden Informationen geworben.

- Forum Zukunft - Nano – Chancen für nachhaltiges Wachstum, 25. Oktober 2006, Berlin

Ausgewertete Unterlagen: VCI (Hrsg.) (2006) Nano – Chancen für nachhaltiges Wachstum. Veranstaltungsreport, 25. Oktober 2006 (Veranstaltungsreport)

Auf dieser Vortrags- und Dialogveranstaltung wurden von Seiten der Industrie folgende nanotechnische Anwendungen präsentiert, die Umweltpotenziale aufweisen:

- BASF: Kunststoffe, Nanoschaum-Dämmplatten, Antifouling-Beschichtungen,
- Creavis: Lithium-Ionen-Batterien,
- Henkel: Metallvorbehandlung (Korrosionsschutz),
- Merck: Antireflexglas.

- Nanotechnology – Products and Processes for Environmental Benefit, 16.-17. Mai 2007, London

Ausgewertete Unterlagen: Teilnahme sowie Tagungsunterlagen und Vorträge

Die Tagung befasste sich mit dem obigen Thema in der Art, dass die Tagung in folgende Sessionsunterthemen unterteilt war, zu denen jeweils zwei-drei Referenten Vorträge hielten:

- o Session 1: Nanotechnology and Reducing Environmental Impact
- o Session 2: Nanotechnology – Towards Reducing Pollution
- o Session 3: Nanotechnology and Environmental Monitoring
- o Session 4: Nanotechnology and Decontamination
- o Session 5: Nanotechnology - Reducing Environmental Damage and Benefiting Health
- o Session 6: Nanotechnology for Better Products
- o Special Session: Nanotechnology Benefits and Risks

Damit bot sich ein guter Überblick über den derzeitigen Wissensstand insbesondere in Großbritannien (die überwiegende Mehrzahl der Referenten waren aus GB) zu diesen

Themen. Ganz neue bisher nicht bekannte bzw. im Fokus stehende Themen wurden nicht präsentiert.

Mögliche Potenziale zur Umweltentlastung durch Nanotechniken wurden durchweg nur qualitativ aufgelistet und dargestellt.

- Pollution Prevention through Nanotechnology, 25.-26. September 2007, Arlington, VA

Ausgewertete Unterlagen: Teilnahme sowie Tagungsunterlagen und Vorträge

Mit ca. 150-200 Personen (fast ausschließlich US-Amerikaner) war die von der EPA organisierte Tagung sehr gut besucht, neben vielen Vertretern aus Ministerien auch viele Vertreter aus Wissenschaft und Unternehmen. Die Tagung befasste sich mit dem obigen Thema in der Art, dass die Tagung in folgende Sessionsunterthemen unterteilt war, zu denen jeweils drei-vier Referenten Vorträge hielten (einschließlich kurzer Nachfragen):

- Session 1: Politische Einführung/Einordnung seitens der EPA
- Session 2: Nanotechnology Life-Cycle Considerations
- Session 3: Nanotechnology Products (ChromVI-Substitution; Oberflächenanwendungen, Thermoelektrik)
- Session 4: Nanotechnology Processes (UltraHighPerformance-Beton, Nanoelektronik)
- Session 5: Energy or Resource Efficiency (Solarzelle, poröse Materialien zur H₂-Speicherung, Solar-Glas)
- Session 6: Case Study 1: Catalysts (für chemische Synthesen; Abgasreinigung)
- Session 7: Case Study 2: Flame Retardants
- Session 8: Case Study 3: Lithium-Ion Batteries
- Session 9: Perspektiven

Von den Vertretern der EPA wurde einleitend viel von der Notwendigkeit des „Life-Cycle-Thinking“ also des Denkens über den gesamten Lebensweg in Bezug auf nanotechnische Verfahren und Produkte gesprochen. Besonders interessant an der Tagung waren einerseits die Schwerpunktsetzungen und andererseits die hochkarätige

fachliche Besetzung der einzelnen Tagungsblöcken mit zumeist Vertretern aus Wissenschaft und aus entsprechenden Unternehmen.

Viele der dargestellten Themen zeigten eher Anwendungspotenziale auf als schon fertige Lösungen. Ganz neue bisher nicht bekannte oder im Fokus stehende Themen wurden nicht präsentiert. Mögliche Potenziale zur Umweltentlastung durch Nanotechniken wurde leider fast durchweg nur qualitativ aufgelistet und dargestellt.

Das Thema zu Katalysatoren hatte besonders viele Bezüge zum Thema Green Chemistry; hier läuft ein Programm von Seiten der EPA. Flammenschutzmittel sind in den USA ein besonderes Thema, das sonst eigentlich nicht so breit präsentiert wird. Ein interessanter Beitrag befasste sich aber mit dem Thema, was man aus den Flammenschutzmitteldiskussionen zu Toxikologie etc. auf Nanopartikel lernen und übertragen könnte.

11.2 Anhang 2: Beschreibung der Vorschläge für vertiefende Untersuchungen

Ormecon GmbH & Co. KG, Ammersbek bei Hamburg: Herstellung lötfähiger Endoberflächen auf Leiterplatten durch Nanotechnik

Leiterplatten müssen nach ihrer Herstellung mindestens 1 Jahr lötfähig sein. Hierzu wird in der aufwändigen, ca. 170 Arbeitsschritte umfassenden Leiterplattenherstellung heute weltweit ein Fertigungsschritt praktiziert, bei dem ca. 30 g Zinn pro Quadratmeter erforderlich sind. Das hier verwendete Zinn enthält normalerweise ca. 37% Blei. Der weltweite Verbrauch dieser Legierung beläuft sich für diese Anwendung schätzungsweise auf 750 Tonnen pro Jahr, darin über 250 t Blei.

Nach Vorbehandlung des Kupfers mit einer extrem feinen Dispersion eines organischen Metalls konnte die Aufbringung des Zinns extrem verbessert werden. Hierdurch werden weitere deutliche Verkleinerungen der Leiterplatten möglich. Zusätzlich können die Aufbringungsverluste nun praktisch vollständig vermieden werden, so dass nur noch etwa 5% der Zinnmenge für die gleiche Fläche erforderlich sind. Dies entspräche einer Reduktion des Zinn/Blei-Verbrauchs um über 700 Tonnen pro Jahr. Hinzu kommt eine nennenswerte Energieeinsparung.

Diese immense Effizienzsteigerung wird mit einem vergleichsweise geringen Aufwand des neuartigen metallischen Kunststoffes Polyanilin erreicht. Mit einem Liter der Polyanilin-Dispersion können ca. 10 m² produziert werden, wobei die Polyanilin-Belegung bei nur ca. 15 mg pro m² liegt. Als Dispersionsmittel dient Wasser.

ItN Nanovation AG, Saarbrücken: Nanocomp AC für den Einsatz in Wasseraufbereitungsanlagen

NANOCOMP AC sind neu entwickelte Beschichtungssysteme, die das Kristallisationsfouling bspw. in Wasseraufbereitungsanlagen unterdrücken. Dadurch ergeben sich interessante Effizienzpotenziale in der Wasseraufbereitung.

ItN Nanovation AG, Saarbrücken: Nanocomp MC als Entformungshilfe für Gießereien

Die ItN Nanovation AG besitzt das technische Know-how, Nanopartikel in gleichbleibender Qualität und homogener Größe herzustellen und bei der Produktion von Nanopartikeln „Verklumpungen“ zu verhindern.

Die mit spezifischen Eigenschaften versehenen Nanopartikel bilden die Basis für verschiedene keramische Beschichtungen. **NANOCOMP MC** sind hierbei wasserbasierte Systeme, die speziell für das Gießen von Aluminium und Messing im Kokillenguss optimiert wurden. Die hochmodernen Schichten auf Basis keramischer Nanotechnologie zeichnen sich durch eine einfache Handhabung aus und steigern die Produktivität.

Im Aluminium-Kokillenguss stellt der hohe Werkzeugverschleiß aufgrund des häufigen Sandstrahlens einen wichtigen Kostenfaktor dar. Hartnäckige Anhaftungen von Aluminium an Werkzeugen (Abreißer) erhöhen den Werkzeugverschleiß zunehmend. Die Folge sind zeitaufwändige Arbeitsunterbrechungen und somit geringere Produktionszahlen. Durch den Opferschicht-Effekt von Nanocomp MC wird die Kokille vor Anhaftungen und Verschleiß geschützt, wodurch sich die Reinigungsintervalle verlängern. Im Messing-Kokillenguss stellt die Verwendung von Graphit einen zusätzlichen Kostenfaktor dar. Durch Graphit bedingte hohe Ausschussraten verringern die Produktionszahlen. Es kommt bei einigen Geometrien zu Rissbildungen, Einschlüssen und Verwirbelungen. Vermehrtes Sandstrahlen hat zur Folge, dass der Werkzeugverschleiß steigt. Hinzu kommen Kosten zur Entsorgung der Graphit-Rückstände und der hohe Verschmutzungsgrad in der Gießerei.

Die MetCast Produkte (Nanokeramische Schlichte) sind geeignet für Gravitations- und Niederdruckgussverfahren. Durch den Einsatz der innovativen Beschichtung entfällt die bisher angewandte Graphit-Schlichte und ermöglicht somit durch einfaches Applizieren (Aufsprühen) eine Standzeit von vielen Hundert bis zu 350 Gussteilen (geometrieabhängig). (ItN o.J. a)

Nanogate AG, Saarbrücken: Antihafbeschichtung/Oberflächenveredelung von Papierwalzen

Im Bereich der Druckmaschinenindustrie sind funktionelle Oberflächen für die Leistungsfähigkeit einzelner Komponenten entscheidend für die Druckqualität. Flexible Maschinenlaufzeiten sowie eine schnelle Umrüstung für den nächsten Druckauftrag sind wichtige Elemente eines effizienten Prozesses. Ein Beispiel für die Produktivitätsverbesserung mit Hilfe der Nanogate-Technologie® stellt die Oberflächenveredelung von Rotationskörpern in Druckmaschinen dar, hier insbesondere von Papierleitwalzen im Zeitungsdruck. Basis der Nanogate-Technologie® sind kolloidchemische Nanotechnologien. Das Unternehmen setzt hierbei gezielt chemisches Know-how aus Verfahren und Prozessen bspw. der Kolloidchemie oder der Sol-Gel-Chemie ein, um nanostrukturierte Materialien aufzubauen, die anschließend in Produkten und Prozessen kundenspezifisch Verwendung finden. Die einem hohen Verschleiß ausgesetzten Walzenoberflächen werden durch eine widerstandsfähige hauchdünne Schicht so veredelt, dass sich die frische Druckfarbe nicht mehr so stark auf der Walzenoberfläche ablegt. Hiermit wird die Laufzeit der Maschine verlängert, der Reinigungsaufwand minimiert und somit die Produktivität gesteigert. Ein speziell entwickeltes Applikationsverfahren sorgt für die qualitätsgesicherte und mittlerweile serienereprobte, hohe Zuverlässigkeit des Systems. (Nanogate o.J. a)

Nanogate AG, Saarbrücken: nanoremove®, Entformung von Epoxidharzkomponenten

Viele Massenprodukte werden durch Abformen oder Gießen der Rohware in einer Werkzeugform hergestellt. Dabei kann es im Serienprozess zu Ablagerungen und Verschmutzungen auf der Werkzeugoberfläche kommen, die erheblichen Einfluss auf den Prozessablauf als auch auf die Qualität des Produktes haben. Die Nanogate-Technologie® bietet hier vielfältige Möglichkeiten, auf Basis ihrer Produktplattform **nanoremove®** interessante Lösungen aufzuzeigen. So konnte beispielsweise bei der Entformung von Epoxidharzkomponenten die Standzeit der Werkzeuge deutlich verlängert (6-fache Standzeit) und der Einsatz von Trennmitteln um über 80 % reduziert werden. Somit wurden für den Gesamtprozess die Kosten gesenkt und die Produktivität gesteigert. (Nanogate o.J. b)

IFAM, Bremen: PermaCLEANPLAS®-Beschichtung

Verzinkte Bodengitterroste werden in Lackierereien eingesetzt und sind nach längerem Gebrauch mit einer dicken Farbschicht umhüllt, die sich nur schwer entfernen lässt. Werden die Gitterroste vor ihrem Einsatz PermaCLEANPLAS®-beschichtet, lassen sich die Lackablagerungen mit Hilfe einer Wasserhochdruck-Technologie (WHD) mit unter 500 bar sehr umwelt- und komponentenschonend reinigen. Die Lebensdauer der Gitterroste wird um ein Vielfaches erhöht, da sie weder thermisch entlackt noch gestrahlt werden müssen. Langzeittests in einer Lackiererei zeigen, dass bei beschichteten Gitterrosten nach zwei Jahren und ca. 400 Reinigungszyklen mit Wasserhochdruck von 250 bis 2.500 bar noch eine effektive Antihaftung wirksam ist. Thermisch entlackte Gitterroste müssen dagegen schon nach etwa 15 Reinigungszyklen verschrottet werden. Die Antihafteigenschaft der PermaCLEANPLAS®-Beschichtung lässt sich für viele Lacksysteme dem Anwendungszweck entsprechend einstellen. Die Beschichtung basiert auf einer plasmapolymeren Abscheidung mittels Niederdruckplasmatechnik, wobei die Schichtdicke variabel im nm-Bereich bis kleiner 0,5 µm eingestellt werden kann (IFAM o.J.a).

IFAM, Bremen: Best SkinPLAS®-Beschichtung

In Großbäckereien dürfen Backwaren nicht auf den Backgutträgern haften. Das Backgut muss sich leicht und ohne Beschädigung abnehmen lassen, denn ein beschädigtes Backgut ist für den Verkauf nicht geeignet und stört insbesondere den automatisierten Ablauf. Üblicherweise werden Trennschichten aus Polytetrafluorethylen (PTFE) oder silikonartigen Substanzen eingesetzt. Diese weisen diverse Nachteile auf, wie z.B. geringer Wärmeübergang, schlechte Haftung zum Blech, Temperaturempfindlichkeit in Bezug auf die Trenneigenschaften und Einschränkungen beim Wiederbeschichten. Diese Nachteile weisen Backbleche, die Best SKINPLAS®-beschichtet sind, nicht auf. Die Best SKINPLAS®-Beschichtung nutzt sich nicht ab und ist für viele Backzyklen einsetzbar. Bis zu 10.000 Backvorgänge können erreicht werden, wie Praxistests bewiesen haben. Wurde die Beschichtung versehentlich durch Schneiden oder Kratzen beschädigt, ist eine Nachbeschichtung möglich. Die Best SKINPLAS®-Beschichtung gehört zur Gruppe der Easy-to-clean-Beschichtungen und ist für den Lebensmittelbereich besonders gut geeignet. Sie besitzt dauerhafte Antihafteigenschaften in der Nutzung, haftet jedoch selbst so gut auf dem Untergrund, dass sie auch nach einer Verletzung (Kratzer) nicht unterwandert

wird und damit nicht abblättert. Die Beschichtung ist hoch vernetzt und chemisch außerordentlich stabil. Die Schichtdicke kann variabel im Bereich von 0,05 bis 0,4 µm eingestellt werden. (IFAM o.J. b)

Degussa AG: Ferritklebstoffe

Hierbei handelt es sich um Strukturklebstoffe, die durch die Zugabe von Nanoferriten (nanostrukturiertes Eisenoxid) zu herkömmlichen Klebstoffen ein gezieltes und beschleunigtes Kleben und Aushärten bewirken. Die Eisenoxid-Nanopartikel (MagSilica) sind umhüllt von Siliziumdioxid angeordnet in einer Matrix. Es handelt sich um 5 bis 25 Nanometer große Eisenoxidkristalle, die in Siliziumdioxid-„Kügelchen“ ähnlicher Größe eingeschmolzen werden. Die Siliziumdioxid-Matrix sorgt für die chemische und thermische Beständigkeit der Eisenoxidkristalle in dem Klebstoff. Durch die Einbettung der Partikel in Siliziumdioxid berühren sich die Kristalle nicht. Durch Anlegen eines hochfrequenten Magnetwechselfeldes werden diese Partikel erwärmt und härten den 1-K oder auch 2-K Klebstoff aus. Dabei wird die superparamagnetische Eigenschaft der Nanopartikel ausgenutzt. Dadurch wird einerseits schnelles Härten des Klebstoffes durch hohen Temperaturanstieg – ca. 10 °C/s (abhängig von Intensität des Magnetwechselfeldes sowie des Ferritanteils im Klebstoff) – ermöglicht. Andererseits werden die zu verbindenden Materialien nur an der Klebestelle erwärmt. Dadurch wird eine Überhitzung der Nachbarmaterialien vermieden, so dass auch hitzeempfindliche Materialien wie bspw. ABS-Kunststoffe¹²⁵ zusammengefügt werden können. Beispielweise führen 100 Sekunden Härtung von ABS-Teilen im Magnetfeld zu ähnlicher Festigkeit wie eine Ofenhärtung über 60 min bei 80°C. Insbesondere das Kleben größerer Teile lässt somit eine beträchtliche Energieeinsparung erwarten. (Pridöhl et al 2005)

BASF: Nanoschaum als Isolationsmaterial

Nanoschaum als künftiges Isolationsmaterial kann durch die Nutzung des Knudsen-Effektes über stark verbesserte Wärmedämmeigenschaften verfügen. Die Nanoporen verringern die Beweglichkeit der Gasmoleküle, so dass

¹²⁵ ABS: Acrylnitril-Butadien-Styrol

der Lamda-Wert der Gaskomponente, die den Gesamtlamda-Wert des Isolationsschaumes im Wesentlichen beeinflusst, stark verringert werden kann. Hier kann prospektiv das Umweltentlastungspotenzial ermittelt werden.

Bayer/CNT-Initiative: CNT-Anwendung für Folien in der Halbleiterindustrie Bayer

Als Beispiel für eine CNT-Anwendung werden Folien für die Halbleiterindustrie benannt. Bei diesen Folien werden Carbon-Black-Partikel durch CNT ersetzt, wodurch einerseits die eingesetzte Menge deutlich verringert und andererseits die Funktionalität deutlich verbessert werden kann. Die beiden Verfahren sollten dabei from cradle to grave analysiert werden, also von der Herstellung über die Anwendung bis zum Recycling bzw. Verwertungsverhalten.

Carbon Black hat einen Anteil von 10-20% in den Folien, wohingegen CNT nur zu ca. 3% zugesetzt werden müssen. Außerdem werden die Eigenschaften des Materials (Transportsicherheit, Verhinderung der Aufladung) verbessert. Die erhobenen Daten zu CNT könnten dann ggf. auch in andere Fallstudien (Lithiumbatterie) mit einfließen.

Degussa AG u.a.: Lithiumbatterie zur Energiespeicherung (inkl. CNT-Anwendung)

Die Lithiumbatterie erscheint als eine sehr zukunftssträchtige Technologie zur Energiespeicherung in vielfältigen Anwendungskontexten. Diese Produkt(weiter)-entwicklung vereinigt vielfältige Entwicklungslinien mit nanotechnischer Ausrichtung (bspw. Einsatz von CNT) und ist durch eine sehr hohe Dynamik geprägt. Als mögliches Anwendungsbeispiel könnte der Lithiumbatterieeinsatz in Hybrid-Bussen im ÖPNV gewählt werden.

Hierbei würde es sich im Wesentlichen um eine prospektive Betrachtung von Umweltentlastungspotenzialen handeln.

Siemens AG: Nanosensortechnologie

Nanosensortechnologienanwendungen (Mess- und Regeltechnik), insbesondere mit Fokus auf den Energiebereich (Erzeugung, Speicherung, Verteilung etc.), ermöglichen eine effizientere und exaktere Steuerung von Prozessen, was den Wirkungsgrad steigert und zu einem rationelleren Einsatz von Energie führt. Eine mögliche konkrete Anwendung wird derzeit noch geprüft.

Hierbei würde es sich in der Tendenz auch stärker um eine prospektive Betrachtung von Umweltentlastungspotenzialen handeln, da sich die möglichen Anwendungsfälle wohl noch in der Entwicklung befinden.

BASF, Bosch, Merck und Schott: organische Photovoltaik

Da die organische Photovoltaik schon jetzt gegenüber Silizium basierten Solarzellen eine bessere Ökobilanz aufzuweisen scheint als anorganische Dünnschicht-Solarzellen (vgl. Kapitel 3.5.3), rückt die organische Photovoltaik als potenzielles Fallbeispiel ebenfalls in den Fokus. Allerdings ist diese Form der Photovoltaik noch längst nicht so weit entwickelt wie die anorganische, weswegen genauere Erkenntnisse zu deren (potenziellen) Wirkungsgraden und Umweltauswirkungen noch nicht vorliegen. Jedoch weisen organische Solarzellen Vorteile gegenüber anderen Solarzellen auf (bspw. einfachere und kostengünstigere Herstellung, flexible und daher breit einsetzbare Materialien, Verwendung von Stoffen mit geringerer Toxizität), weswegen sie aus Marktsicht mittel- bis langfristig von großem Interesse sein werden. An der Überwindung der derzeit noch bestehenden Nachteile wie Instabilität der Zellen und geringe Wirkungsgrade wird intensiv geforscht – auch die jüngste Initiative der vier genannten Unternehmen in Kooperation mit dem BMBF (insgesamt 360 Mio. €) zielt in diese Richtung.

11.3 Anhang 3: Nanotechnologieunternehmen in Deutschland (Auswahl)

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
1	aap Implantate AG	Ostim®	Berlin	www.aap.de	Medizin	Knochenersatz
2	advalytix AG	PlateBooster	München	www.advalytix.com	Life Science, Nanobiotechnologie	Homogenisierung von Komponenten injeziert durch Nanospender, Nanopumpen zur berührungslosen Positionierung von Reagenzien
3	AEZ Leichtmetallräder GmbH	AEZ Raver	Siegburg	www.aez-wheels.com	Oberflächen/Beschichtungen	Autofelgenbeschichtung auf Basis chem. Nanotechnologie
4	Akzo Nobel Deco GmbH	CETOL SF 730	Wunstorf	www.sikkens-joinery.de	Oberflächen/Beschichtungen	Lärchenholzöl auf Basis natürlicher pflanzlicher Öle und Harze - mit Nano-UV- Schutz
5	Alfred Clouth Lackfabrik GmbH & Co.	WL-Nano CB, antibakterieller 1K- Wasserlack	Offenbach am Main	www.clou.de	Oberflächen/Beschichtungen	Antibakterieller 1K-Wasserlack auf Basis von Nanosilber
6	Alfred Clouth Lackfabrik GmbH & Co.	CLOUCRYL Nano-Finish, antibakterieller 2K-PUR-Lack	Offenbach am Main	www.clou.de	Oberflächen/Beschichtungen	Antibakterieller 2K-PUR-Lack auf Basis von Nanosilber
7	Alfred Clouth Lackfabrik GmbH & Co.	CLOU Hartwachs-Öl antibakteriell	Offenbach am Main	www.clou.de	Oberflächen/Beschichtungen	Antibakterielles Hartwachs-Öl auf Basis von Nanosilber
8	ALRISE Biosystems GmbH	Wirkstoffbeladene Nanopartikel	Berlin	www.alrise.de	Life Science, Pharma	Kapselung von Nanopartikel
9	AMO GmbH	Nanoimprint Stempel&Materialien	Aachen	www.amo.de	Anlagen-/Gerätebau	Nanophotonik, UV-Nanoimprint-Lithografie
10	Analytik Jena AG		Jena	www.analytik-jena.de	Oberflächen/Beschichtungen	Oberflächen und Beschichtungen für spez. Anwendungen, spezielle Elektroniken

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
11	AQUANOVA German Solubilisate Technologies (AGT) GmbH	NovaSOL® Solubilisate	Darmstadt	www.aquanova.de	Life Science, Nanobiotechnologie	nanoskaliges Trägermedium, micellare Formulierungen für aktive Roh- und Wirkstoffe bspw. für Vitamine, Nahrungsmittel, Functional Food, Getränke sowie Kosmetik und Pharma
12	Ara-Coatings GmbH & Co. KG	Nano-Farbschichten	Erlangen	www.ara-coatings.de	Oberflächen/Beschichtungen	easy-to-clean, Antifingerprint, Kratzschutz-, Verschleißschuttschichten auf Basis von PVD-(Physical Vapor Deposition) oder CVD-(Chemical Vapor Deposition)
13	ARTOSS GmbH	NanoBone®	Rostock	www.artoss.com	Life Science	Knochenaufbaumaterial bei Knochendefekten
14	atech innovations gmbh	Filtrationsmembrane, UF- / NF-Membrane	Gladbeck	http://www.atech-innovations.com	Filtration	Filtrationsmembrane aus hochreinem Alpha-Aluminiumoxid, Titanoxid oder Zirkoniumoxid
15	Auto-Clean-Service-Center	LPS©-Nanoversiegelung	Gröbenried	www.auto-clean-service.de	Oberflächen/Beschichtungen	Autolackversiegelung auf Basis chemischer Nanotechnologie
16	Azzurro Semiconductors AG	Wafer für Hochleistungs-Hochspannungsschalter	Magdeburg	www.azzurro-semiconductors.com	Nanoelektronik	GaN-epi-Wafer auf Basis von Galliumnitrid, Anwendungen in LED, Transistoren
17	BARAT CARBIDE HOLDING GmbH	MASTER GRADE B15MN	Burghaun	www.baratcarbide.com	Nanomaterialienherstellung	Straßenfräsmeißel, Verstärkung des verschleißanfälligeren Hartmetallbinders mit Hilfe von Nano-Technologie; Einbettung von Nano-Partikel (Partikel feiner als 100 nm) aus Wolfram und Kobalt und/oder Kohlenstoff im Binder und in der Co-Matrix
18	BASF AG	Col. 9® Bindemittel für Fassadenanstriche	Ludwigshafen	www.basf.de		Additiv

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
19	BASF AG	Ultradur® High Speed technischer Kunststoff	Ludwigshafen	www.basf.de	Nanomaterialienherstellung, Kunststoffe	Spritzgussteile wie Steckverbindungen, organische Nanopartikel als Additive in PBT (Polybutylenterephthalat) verbessern die Fließeigenschaften
20	BASF AG	Hydroxylapatit	Ludwigshafen	www.basf.de	Kosmetik	nanoskaliges Additiv für Zahncreme
21	BASF AG	Mincor® TXTT	Ludwigshafen	www.basf.de	Oberflächen/Beschichtungen	Textilbeschichtung
22	BASF AG	PCI Nanolight®	Ludwigshafen	www.basf.de	Nanomaterialienherstellung	Fliesenkleber; Basierend auf einer patentierten Kombination spezieller Füllstoff- und Bindemittel bilden sich spezielle Nanostrukturen.
23	BASF AG	COL.9®	Ludwigshafen	www.basf.de	Additive	wässrige Polymerdispersionen
24	Bayer AG	Kontrastmittel	Leverkusen	www.bayer.de	Nanomaterialienherstellung	
25	Bayer AG	Lackrohstoffe - nanomodifiziert	Leverkusen	www.bayer.de	Nanomaterialienherstellung	nanomodifizierte Lackrohstoffe
26	Bayer AG	Carbon Nanotubes	Leverkusen	www.bayer.de	Nanomaterialienherstellung	Nanopartikel
27	Bayer MaterialScience AG	Baytubes	Leverkusen	www.bayer.de	Nanomaterialienherstellung	CNT, Additiv als Zumischung bei Lack, Karosserieteilen etc.
28	Bayer MaterialScience AG	Silica-Dispersionen Dispercoll® S	Leverkusen	www.bayer.de	Nanomaterialienherstellung	Additiv, Formulierkomponente für Dispersionsklebstoffe
29	Bayer MaterialScience AG	Polycarbonat/ABS-Blends Bayblend® FR.	Leverkusen	www.bayer.de	Nanomaterialienherstellung	Additiv, flammenhemmende Kunststoffe
30	Bayer MaterialScience AG	Sol-Gel-Technologie	Leverkusen	www.bayer.de	Oberflächen/Beschichtungen	Beschichtungen auf Basis chemischer Nanotechnologie
31	Bio-Gate AG	HyGate™ / HyGentic™	Nürnberg/Bremen	www.bio-gate.de	Oberflächen/Beschichtungen	antimikrobielle Plasmapolymerschichtung für die Medizintechnik auf Basis von Nanosilber

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
32	Bioni CS GmbH	BIONI NATURE®	Oberhausen	www.bioni.de	Oberflächen/Beschichtungen	Nano-funktionalisierte Beschichtungen gegen mikrobiellen Befall auf Basis von Nano-Silber-Partikeln
33	Bioni CS GmbH	Bioni Perform Fassadenfarbe	Oberhausen	www.bioni.de	Oberflächen/Beschichtungen	Nano-funktionalisierte Beschichtungen gegen mikrobiellen Befall auf Basis von Nano-Silber-Partikeln
34	Bioni CS GmbH	Bioni Hygienic Innenbeschichtung	Oberhausen	www.bioni.de	Oberflächen/Beschichtungen	Nano-funktionalisierte Beschichtungen gegen mikrobiellen Befall auf Basis von Nano-Silber-Partikeln
35	Boehringer Ingelheim microParts GmbH	Microspektrometer	Ingelheim	http://www.boehringer-ingelheim.de/produkte/mikrosystemtechnik	Analytik	
36	Boehringer Ingelheim microParts GmbH	Lab-on-a-Chip-Systeme	Ingelheim	http://www.boehringer-ingelheim.de/produkte/mikrosystemtechnik	Analytik	
37	boraident GmbH	Basistechnologie LEFPOS	Halle	www.boraglas.de	Lasertechnologie	Glasveredelung (Markierungen,etc.), LEFPOS:Laserstrahl induzierte Erzeugung von farbigen und polarisierenden Strukturen im Glas; Lasertechnologie, die in ein-, zwei- und sogar dreidimensionalen räumlichen Bereichen in Nano-Dimensionen die optischen Eigenschaften von Gläsern durch Bildung, Formänderung und lokale Anordnung von Nanoellipsoiden definiert darstellen kann
38	Bruker AXS GmbH	Analysegerät Nanoschichten + Strukturen	Karlsruhe	www.bruker-axs.de	Analytik	Analysegerät für Nanoschichten + Strukturen
39	Bruker AXS GmbH	Analysegerät Nanopartikel	Karlsruhe	www.bruker-axs.de	Analytik	Analysegerät für Nanopartikel

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
41	BYK Chemie	NANOBYK®	Wesel	www.byk.com	Nanomaterialienherstellung	nanoskaliges Zinkoxid verbessert UV-Beständigkeit, Kratzfestigkeit
42	Capsulation NanoScience AG	Nanokapseln (LBL-Technologie®)	Berlin	www.capsulation.com	Medizin	Diagnostik
43	CeramTec	BIOLOX forte, BIOLOX delta	Plochingen	www.ceramtec.com	Medizintechnik	Orthopädie, biokompatible Hochleistungsmischkeramik, Aluminiumoxid-Matrix mit Einlagerung von Yttrium-stabilisierten, tetragonalen Zirkonoxid-Nanopartikeln (Y-TZP) in eine stabile
44	Cetelon Nanotechnik GmbH	CETOSIL Acrylat Nanokomposit-Lacken	Leipzig	www.cetelon-nanotechnik.de	Oberflächen/Beschichtungen	Acrylat-Nanokomposit-Lacke, die als Füllstoff bis zu 30 Gew.% nanoskaliges SiO ₂ besitzen
45	Chemetall GmbH	Vorbehandlungs-Technologie SAM - Self Assembling Molecules	Frankfurt am Main	www.chemetall.de	Oberflächen/Beschichtungen	Aluminiumräder, Felgen
46	chemicell GmbH	fluidMAG	Berlin	www.chemicell.com	Biotechnologie, Life Science, Nanomaterialienherstellung	magnetische Nanopartikel, Ferrofluide
47	CINVENTION AG	Drug-delivery coatings	Wiesbaden	www.cinvention.com	Life Science	nano-structured carbon-composite coatings for medical devices
48	CIS-Solartechnik GmbH	CIS-Dünnschicht-Solarzellen	Hamburg	www.cis-solartechnik.de	Energiegewinnung	Gewinnung erneuerbarer Energie aus Solarstrahlung
49	Cleancorp GmbH	Nano Pearl Glas, Nano SC Self Clean, Nano AFP EC, Nano Stone WO, Nano Scratch, Nano Corr KR, Nano TEX	Olching	www.cleancorp.de	Oberflächen/Beschichtungen	Nanobeschichtungseffekte durch chemische Nanotechnologie, alle Effekte, auf Keramik, Stein ...

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
50	Costec Technologies	Nano-Max	Marschacht bei Hamburg	www.nano-max.eu	Oberflächen/Beschichtungen	als Additiv in Motorenöl; Nano-Max® basierend auf nanoskaligem Siliziumoxid bildet auf den Reibungsoberflächen eine flexibel, elastische und permanent haftende Verschleißschutzschicht, die sich durch Druck und Temperatur aufbaut.
51	Cotec GmbH	DURALONUltraTec	Nidderau	http://www.cotec-gmbh.com/	Oberflächen/Beschichtungen	ultra hydrophobic material, für Glasses, Quartz, Ceramics, Metals, Pre treated plastics, Natural material, Natural fibers
52	Creation-Direkt GmbH	Holz u. Stein Gebäudeversiegelungsprodukte	Idar Oberstein	www.creation-direkt.net	Oberflächen/Beschichtungen	Nanobeschichtungseffekte durch chemische Nanotechnologie
53	Creation-Direkt GmbH	KfZ-Lackveredelung	Idar Oberstein	www.creation-direkt.net	Oberflächen/Beschichtungen	Nanobeschichtungseffekte durch chemische Nanotechnologie
54	Creation-Direkt GmbH	Indoor Oberflächenveredelung	Idar Oberstein	www.creation-direkt.net	Oberflächen/Beschichtungen	Nanobeschichtungseffekte durch chemische Nanotechnologie
55	Creavis/ Evonik	Separion	Marl	www.creavis.com	Nanomaterialienherstellung	Keramikmembran für Li-Ionen-Batterie
56	Creavis/ Evonik	Euroflex	Marl	www.creavis.com	Nanomaterialienherstellung	
57	Creavis/ Evonik	ccflex	Marl	www.cc-flex.de	Nanomaterialienherstellung	flexible Keramik, keramischer Wandbelag
58	CTC Nanotechnology GmbH	Nano Glas – Auto Hydrophobierung, Nanoident Textil Forte	Merzig	http://www.ctc-nanotechnology.com/	Oberflächen/Beschichtungen	Nano Glas – Auto Hydrophobierung, Nanoident Textil Forte, Nanobionic Textilhydrophobierung und Schutzausrüstung
59	Cynora GmbH	Palladium-Nanopartikel	Herzogenrath	www.cynora.de	Nanomaterialienherstellung	Palladium-Nanopartikel für Katalyse

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
60	De Cie GmbH	Nanotechnologische Oberflächenversiegelungen	Frankfurt	www.decie.de	Oberflächen/Beschichtungen	Nanotechnologische Oberflächenversiegelungen für breite Anwendungsgebiete auf Basis chemischer Nanotechnologie
61	Deichmann	Nano-Sport Imprägnierspray	Essen	www.deichmann.com	Oberflächen/Beschichtungen	Nano-Sport Imprägnierspray, winzige NANO-Teilchen bilden ein unsichtbares, hochwirksames Schutznetz
62	Deichmann	Nano-Schmutz Blocker	Essen	www.deichmann.com	Oberflächen/Beschichtungen	Nano-Schmutz Blocker mit UV-Schutz
63	Deichmann	Nano-Formel-S Schuhdeo	Essen	www.deichmann.com	Oberflächen/Beschichtungen	Nano-Formel-S Schuhdeo" werden nanokleine Silberpartikelchen
64	Deichmann	Nano Nässe Blocker	Essen	www.deichmann.com	Oberflächen/Beschichtungen	Imprägnierspray
65	DSL Dresden Material-Innovation GmbH c/o IFW Dresden	Grids for Lead-Acid Batteries	Dresden	www.dsl-dresden.de	Energiespeicherung	Herstellung von Batterien
66	DURTEC GmbH	Nanopumpe	Hockenheim	www.durtec-gmbh.de	Anlagen/Gerätebau	Nano-Pumpe
67	Dyckerhoff AG	Nanodur	Wiesbaden	www.dyckerhoff.de	Nanomaterialienherstellung, Bauindustrie	Spezialzement, Bindemittel aus Normzement, Feinstzementkomponenten und nanoskaligen synthetischen Kieselsäuren
68	EADS Deutschland GmbH	nanomodifizierte Oberflächen, nanomodifizierte Metalllegierungen	München	www.eads.com	Oberflächen/Beschichtungen	nanomodifizierte Oberflächen, nanomodifizierte Metalllegierungen
69	Electrovac curamik GmbH	ENF® Electrovac Carbon Nanofibers	Regensburg	www.electrovac.com	Nanomaterialienherstellung	als Funktionsfüllstoff verwendbar um Eigenschaften von Kunststoffen zu verbessern
70	Engineered nanoProducts	Nanoglas-Oberfläche	Saarbrücken	www.e-p-g.de	Oberflächen/Beschichtungen	Nanoglas-Oberfläche

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
	Germany EPG AG					
71	EWABO Chemie GmbH & Co.KG	nanotoi [®] Versiegelung	Wietmarschen	http://www.ewabo.de/	Oberflächen/Beschichtungen	nanotoi [®] mittels Einsatz von Nano-Polymeren, hydrophobe (Wasser abweisende) lipophobe (Fett abweisende) und oleophobe (Öl abweisende) Versiegelung
72	Ferrotec GmbH	Ferrofluide	Unterensingen	www.ferrotec-europe.de	Nanomaterialienherstellung	Ferrofluide, Magnetic Nano Partikel, 10 nm Nanopartikel aus einem Eisenoxid mit superparamagnetischen Eigenschaften
73	FEW Chemicals GmbH	Sol-Gel-Coatings	Wolfen	www.few.de	Oberflächen/Beschichtungen	Sol-Gel-Coatings
74	FHR Anlagenbau GmbH	Dünnschichtanlagen	Ottendorf-Okrilla	www.fhr.de	Anlagen/Gerätebau	Dünnschichtanlagen
75	Flachglas MarkenKreis GmbH	Pilkington Activ [™]	Gelsenkirchen	www.flachglas-markenkreis.de	Oberflächen/Beschichtungen	Selbstreinigung der Glasscheiben
76	Frangart Wassertechnik GmbH & Co. KG	Tafelwasseranlage	Waldmohr	www.frangart.de	Oberflächen/Beschichtungen	Wasseraufbereitung
77	FRT GmbH	MicroProf, MicroGlider	Bergisch Gladbach	http://www.frt-gmbh.com/de/	Analytik	Mikroskopie, Messung der Materialbeschaffenheit
78	FRT GmbH	Rasterkraftmikroskop (AFM)	Bergisch Gladbach	http://www.frt-gmbh.com/de/	Analytik	Mikroskopie, Bestimmung der Topographie, Rauheit oder magnetische und mechanische Eigenschaften von Oberflächen
79	FutureCarbon GmbH	CarbonNanoTubes (CNT) und CarbonNanoFilaments (CNF)	Bayreuth	www.future-carbon.de	Nanomaterialienherstellung	Dispersionen, Harzsysteme, Metallisierte Systeme, Netzwerke, Basismaterialien
80	Genthe -X- Coatings	Sol-Gel-Technologie	Goslar	www.gxc-coatings.de	Oberflächen/Beschichtungen	Antifog, Easy to Clean, Kratzfestigkeit

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
	GmbH					
81	Geohumus International Vertriebs GmbH	Geohumus	Frankfurt	www.geohumus.com/	Nanomaterialienherstellung	Bodenhilfsstoff zur Wasserspeicherung, Mineralienabgabe
82	GeSiM mbH	Nano-PlotterTM	Grosserkmannsdorf	www.gesim.de	Anlagen/Gerätebau	Kleinstpipette, Dosiersystem für Nanobiotechnologie
83	GeSiM mbH	µKontakt-Drucker	Grosserkmannsdorf	www.gesim.de	Anlagen/Gerätebau	Drucker für Nanobiotechnologie
84	GFD Gesellschaft für Diamantprodukte mbH	PSD Klingen	Ulm	www.diamaze-gfd.com/	Oberflächen/Beschichtungen	Oberflächenveredelung bei Klingen
85	GPN GmbH Gesellschaft für Photokatalyse und Nanotechnik	AEROPUR [®] , Titan Aire [®]	Köln	www.gpn-gmbh.de	Filtration, Luftreinigung	Photokatalytische Raum-Luftreiniger mittels Titandioxid
86	GPN GmbH Gesellschaft für Photokatalyse und Nanotechnik	AeroCleanStar [®]	Köln	www.gpn-gmbh.de	Oberflächen/Beschichtungen	Oberflächen im Innen- und Außenbereich, AeroCleanStar [®] ist eine leicht-gelbliche kolloidale Suspension aus Titandioxid-Nanopartikeln. Nach der Beschichtung und Trocknung ist die Schutzschicht farblos, hart und stabil.
87	Grünbeck Wasseraufbereitung GmbH	Nanofilter	Höchstädt	www.gruenbeck.de	Filtration	Wasseraufbereitung
88	H.C. Starck GmbH	Leitfähige Polymere	Goslar	www.hcstarck.de/index.php?page_id=87	Nanomaterialienherstellung	Leitfähige Polymere

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
89	H.C. Starck GmbH	LEVASIL®	Goslar	www.hcstarck.de/index.php?page_id=86	Nanomaterialienherstellung	Die LEVASIL®-Typen sind wässrige kolloiddisperse Lösungen von amorphem Siliciumdioxid (SiO ₂). Das Siliciumdioxid liegt in Form von untereinander unvernetzten, kugelförmigen Einzelpartikeln vor, die an der Oberfläche Hydroxyl -gruppen enthalten. Die Größe der Partikel liegt im Nano-Bereich. Die durchschnittliche Partikelgröße beträgt je nach Typ 5–75 nm.
90	H.C. Starck GmbH	nanoskaliges Tantal	Goslar	www.hcstarck.de/index.php?page_id=87	Nanomaterialienherstellung	Tantal-Pulver mit nanoskaligen Primärteilchen ermöglichen Kondensatoren, deren elektrisches Speichervermögen zwei- bis dreifach höher ist als das der jetzigen Speichervermögen.
91	H.C. Starck GmbH	Nanoskaliges Yttrium stabilisiertes Zirkonoxid	Goslar	www.hcstarck.de/index.php?page_id=86	Nanomaterialienherstellung	
92	H.C. Starck GmbH	Nanostrukturierte Niob- und Nioboxidpulver	Goslar	www.hcstarck.de/index.php?page_id=87	Nanomaterialienherstellung	Nanostrukturierte Niob- und Nioboxidpulver sind die Basis für eine völlig neue Generation hochkapazitiver Kondensatoren, die durch ihre Preis-Performance-Relation den Tantal- und Aluminium-Kondensatoren mindestens gleichwertig und teilweise überlegen sind.
93	H.C. Starck GmbH	Nanoskaliges Bor	Goslar	www.hcstarck.de/index.php?page_id=87	Nanomaterialienherstellung	
94	H.C. Starck GmbH	Alternative Binder für die Hartmetallherstellung	Goslar	www.hcstarck.de/index.php?page_id=88	Nanomaterialienherstellung	

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
95	Hager & Werken GmbH & Co. KG	nanosensitive hca	Duisburg	www.miradent.de	Kosmetik	Nanopartikel-Zahncreme; Wirkstoff NovaMin® bildet natürliche Schutzschicht durch natürliche nanopartikuläre Mineralien
96	Halcyonics GmbH	aktive Schwingungsisolationsgeräte	Göttingen	www.halcyonics.de	Anlagen/Gerätebau	Schwingungsisolationsgerät
97	Hanse Chemie AG	Nanopox®	Geesthacht	www.hanse-chemie.com	Nanomaterialienherstellung	Additiv, optimiert die Materialqualität von Epoxidharzen
98	Hanse Chemie AG	Nanocryl®	Geesthacht	www.hanse-chemie.com	Nanomaterialienherstellung	Additiv, Verbesserung der Biegefestigkeit, Lebensdauer und Belastbarkeit von Compositmaterialien
99	Hanse Chemie AG	Nanocone®	Geesthacht	www.hanse-chemie.com	Nanomaterialienherstellung	Additiv, Verbesserung der mechanischen Eigenschaften
100	Hans-J. Kemper GmbH	NanoLine	Ennigerloh	www.kempergmbh.de	Oberflächen/Beschichtungen	Nanolacke
101	Harzlack Limited	In-Mould-Coatings	Halberstadt	www.harzlack.de	Oberflächen/Beschichtungen	Durch Einsatz von Nanopartikeln werden definierte Systemparameter, wie erhöhte Oberflächenhärte, Kratzfestigkeit, flammhemmendes Verhalten, fungizide und antibakterielle Eigenschaften, elektrische Leitfähigkeit und andere gezielt einstellbar
102	Heidelberger Druckmaschinen AG	Nano-Offsetdruckplatten	Heidelberg	http://www.heidelberg.com	Anlagen/Gerätebau	Nano-Offsetdruckplatten
103	heliateg GmbH	organische Solarzellen	Dresden	www.heliateg.com	Energiegewinnung	Gewinnung erneuerbarer Energie aus Solarstrahlung
104	helsa-automotive GmbH & Co. KG	Kabinenluftfilter	Ludwigsburg	www.helsa-automotive.net	Anlagen/Gerätebau	Kabinenluftfilter mit effizienzsteigernden Nanofasern

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
105	Henkel KGaA	Nanit active	Düsseldorf	www.nanit-active.de	Kosmetik	Wirkstoff für Zahnpflege aus Nano-Calciumphosphat (Apatit) und Protein, genau aus den gleichen Bestandteilen wie natürliches Zahnmaterial.
106	Henkel KGaA	Theramed Spender Sensitiv	Düsseldorf	www.theramed.de	Kosmetik	Zahncreme mit Nanit active
107	Hitachi High-Technologies Europe GmbH	hochauflösende Rasterelektronenmikroskope	Krefeld	http://hht-eu.com	Analytik	Mikroskop
108	Hitachi High-Technologies Europe GmbH	hochauflösende Transmissionselektronenmikroskop	Krefeld	http://hht-eu.com	Analytik	Mikroskop
109	HJS Fahrzeugtechnik GmbH & Co KG	katalytische Beschichtungen	Menden	www.hjs.com	Oberflächen/Beschichtungen	katalytische Beschichtungen
110	HL-Planartechnik GmbH	PVD-Beschichtungen	Dortmund	www.hlplanar.com	Oberflächen/Beschichtungen	PVD-Beschichtungen
111	HL-Planartechnik GmbH	CVD-Beschichtungen	Dortmund	www.hlplanar.com	Oberflächen/Beschichtungen	CVD-Beschichtungen
112	Hollingsworth & Vose GmbH	Nanoweb®	Hatzfeld	www.hollingsworth-vose.com	Nanomaterialienherstellung	Nanofasern, Nanogewebe mittels Elektrosinnens
113	Hollingsworth & Vose GmbH	Filterwerkstoffe mit Nanofasern	Hatzfeld	www.hollingsworth-vose.com	Filtration	Filter mit Nanofasern
114	Ibu-tec	Nanopulver	Weimar	www.ibu-tec.de	Nanomaterialienherstellung	Nanopulver mittels Pulsationsreaktor Al ₂ O ₃ , ZnO, ZrO ₂ , ZnO/SiO ₂
115	IDM Institut für Dünnschichttechnologie und Mikrosensorik e.V.	Polymernanopartikel + Hybride	Teltow	www.idm-teltow.de	Nanomaterialienherstellung	
116	Incoatec GmbH	Röntgenanalytik:	Geesthacht	www.incoatec.de	Analytik	

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
		Optiken				
117	Incoatec GmbH	Röntgenanalytik: Quellen	Geesthacht	www.incoatec.de	Analytik	
118	Incoatec GmbH	Gesputterte dünne Schichten	Geesthacht	www.incoatec.de	Oberflächen/Beschichtungen	Gesputterte dünne Schichten (PVD)
119	inocermic GmbH	Sol-Gel-Beschichtung	Hermsdorf	www.inocermic.de	Oberflächen/Beschichtungen	Nanokompositlacke, Kratzschutzbeschichtung für PMMA mit SiO ₂
120	inomat GmbH	chino®wool, ino®decor und ino®flex	Bexbach	www.inomat.de	Oberflächen/Beschichtungen	multifunktionelle Bindemittel und Oberflächen auf der Basis chemischer Nanotechnologie
121	inomat GmbH	inosil	Bexbach	www.inomat.de	Nanomaterialienherstellung	Nanopartikeldispersion
122	inomat GmbH	inodecor	Bexbach	www.inomat.de	Oberflächen/Beschichtungen	Nanokomposite für email-artige Dekors
123	inopor GmbH	inopor® nano	Hermsdorf	www.inopor.com	Filtration	Nanofiltrationmembrane, z.B. für Gewinnung von modifiziertem Inulin, Entfärbung von Textilabwässern, Trinkwasseraufbereitung
124	IoLiTec GmbH & Co. KG	Nanopartikel	Denzlingen	www.iolitec.de	Nanomaterialienherstellung	Nanopartikelherstellung: 10 nm Nano-Ag, 20 nm Nano-ZnO, 9 nm Fe ₃ O ₄ , 10nm NiO, 10nm Fe ₂ O ₃ , 12nm CuO, 8nm SnO ₂
125	IoLiTec GmbH & Co. KG	Dispersionen/ Formulierungen	Denzlingen	www.iolitec.de	Nanomaterialienherstellung	Dispersionen/ Formulierungen auf Basis von Nanopartikeln
126	iplas Innovative Plasma Systems	PA-CVD Anlagen	Troisdorf	info@cyrannus.com	Anlagen/Gerätebau	PA-CVD-Anlagen
127	ItN Nanovation GmbH	Nanocat	Saarbrücken	www.itn-nanovation.com	Oberflächen/Beschichtungen	Backöfen, Rauchgasreinigung, chemische Synthese, Katalysatorwirkung

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
128	ItN Nanovation GmbH	Nanocomp PP	Saarbrücken	www.itn-nanovation.com	Oberflächen/Beschichtungen	Verhinderung Anbackungen etc. an Kraftwerksrohren
129	ItN Nanovation GmbH	Nanocomp MetCast	Saarbrücken	www.itn-nanovation.com	Oberflächen/Beschichtungen	Schichten von mineralischen und metallischen Untergründen
130	ItN Nanovation GmbH	Nanopore	Saarbrücken	www.itn-nanovation.com	Filtration	Nanofiltrationkeramik
131	ItN Nanovation GmbH	Nanopolish	Saarbrücken	www.itn-nanovation.com	Oberflächen/Beschichtungen	Oberflächenbeschichtungen mit Easy-to-Clean-Effekt
132	ItN Nanovation GmbH	Nanoresist	Saarbrücken	www.itn-nanovation.com	Oberflächen/Beschichtungen	Versiegelungen für Textilien, Autolacke und Boote, Holzwerkstoffe, poröse mineralische Oberflächen, Graffiti-Schutz
133	Johanna Solar Technology GmbH	Dünnschicht-Solarzellen	Brandenburg	www.johanna-solar.com	Energiegewinnung	Dünnschicht-Solarmodule auf die CIGSSe-Technologie
134	JP Coatings GmbH	Pall-X Nano	Würzburg	www.pallmann.net	Oberflächen/Beschichtungen	Wasserbasierende 1K-Parkettversiegelung
135	Junker-Filter GmbH	Nanofasern + Nanobeschichtungen für Fasern	Sinsheim	www.junkerfilter.de	Filtration	Nanofasern + Nanobeschichtungen für Fasern
136	Kallies Feinchemie AG	Metalloxid-Nanosole, Sebosil®	Sebnitz	www.feinchemie.de	Oberflächen/Beschichtungen	Metalloxid-Nanosole besitzen einen Feststoffgehalt von 5 – 20 % und lassen sich mit 80 %igem Ethanol verdünnen, Sebosil® Siliziumdioxid-Nanosole
137	Kammrath & Weiss GmbH	Spezialentwicklungen für die Mikroskopie	Dortmund	www.kammrath-weiss.com	Analytik	Mikroskopie, elektrische Halbleiterprüfung, Qualitätskontrolle
138	Kleinmann	Finy	Sonnenbühl	www.kleinmann.net	Oberflächen/Beschichtungen	Oberflächenbeschichtungen mit diversen Effekten
139	Klocke Nanotechnik	Nanomotor®	Aachen	www.nanomotor.de	Anlagen/Gerätebau	Motor; Bewegungen nm genau, Nanopositionierungen

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
140	Klocke Nanotechnik	Nanoanalytik	Aachen	www.nanomotor.de	Analytik	
141	Klocke Nanotechnik	Nanorobotik	Aachen	www.nanomotor.de	Anlagen/Gerätebau	Nanorobotik
142	KVT Krettek Verfahrenstechnik GmbH	Nano-CUT NCS 3000	Viersen	www.classifying- kvt.com	Anlagen/Gerätebau	Zentrifugen zur Klassierung von Partikelkollektionen
143	Luko International Technology Limited	myNano-24	Schwerin	www.luko- international.de	Oberflächen/Beschichtungen	Endanwenderbeschichtungen
144	Masterflex AG	Polyurethan	Gelsenkirchen	www.masterflex.de	Nanomaterialienherstellung	Spezialkunststoff; Polyurethan-Katheder, Polyurethan-Schläuche
145	microdrop Technologies GmbH	Mikrodosiersysteme	Norderstedt	www.microdrop.de	Anlagen/Gerätebau	Dosiersysteme
146	micromod Partikeltechnologie GmbH	nanomag®; micromer®; sicastar®	Rostock- Warnemuende	www.micromod.de	Nanomaterialienherstellung	Nanopartikel mit funktionellen Eigenschaften für biochemische Anwendungen
147	MiltenyiBiotec GmbH	medizintechnische Geräte	Bergisch Gladbach	www.miltenyibiotec.co m/	Anlagen/Gerätebau	Medizintechnik
148	MiltenyiBiotec GmbH	funktionalisierte Nanopartikel	Bergisch Gladbach	www.miltenyibiotec.co m/	Life Science, Nanomaterialienherstellung	funktionalisierte Nanopartikel
149	Mondi Business Paper	NEOX-Papier	Unterföhring	www.mondigroup.com	Nanomaterialienherstellung	Papierherstellung durch Nano-Hybrid- Technologie, wobei 50 nm große Teilchen (Nano-Hybrid-Pigmente) auf das Papier aufgetragen werden
150	MSH Mineralstoffhandel GmbH	NanoVit	Ulm-Donautal	www.msh-nanovit.de	Nanomaterialienherstellung	Nanoverschleißschutz für Motoren
151	NAMOS GmbH	S-Layer Proteine	Dresden	www.namos.de	Oberflächen/Beschichtungen	Definierte nanostrukturierte Oberflächen durch selbstorganisierende Proteine
152	NAMOS GmbH	NamoDots	Dresden	www.namos.de	Nanomaterialienherstellung	Nanopartikel; Quantumdots ohne

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
						toxischen CdSe-Kern
153	NANO 4 YOU GmbH	Multifunktionale Oberflächenveredlungen; Temporäre Aufreißsysteme	Bexbach	www.nano4you.com	Oberflächen/Beschichtungen	Multifunktionale Oberflächenveredlungen
154	Nano-Care Deutschland AG	NANOFLEX®	Dillingen	www.nanocare-ag.de	Oberflächen/Beschichtungen	Nanoflex® -Intelligente Oberfläche, Unsichtbarer Witterungsschutz, unsichtbarer Faserschutz
155	nanonic GmbH	Elektronenstrahlolithografieanlagen	Regensburg	www.nanonic.de	Anlagen/Gerätebau	Lithografie
156	nanoplan GmbH	SUN ELE STEIN	Griesheim	www.nanoplan.eu/	Nanomaterialienherstellung	Baustein
157	nanoplan GmbH	nanoterraSAFE®	Griesheim	www.nanoplan.eu/	Nanomaterialienherstellung	Nanoadditiv für Abdichtungen, Dichtungsschichten
158	nanoplan GmbH	nanoterra SOIL®	Griesheim	www.nanoplan.eu/	Nanomaterialienherstellung	Bindemittel für Böden
159	nanoplan GmbH	nanolux	Griesheim	www.nanoplan.eu/	Oberflächen/Beschichtungen	nanotechnische Oberflächenversiegelung
160	Nanoproofed ®	Nanoproofed ®	Süsel/ Gothendorf	www.nanoproofed.de	Oberflächen/Beschichtungen	langlebige nanotechnischen Oberflächenversiegelung
161	Nanoscale Systems GmbH	3D-Nanostrukturierung	Darmstadt	www.nanoss.de	Oberflächen/Beschichtungen, 3D-Nanostrukturierung	Oberflächenbearbeitung in allen drei Raumdimensionen mit Nanometer- präzision, Die Technik der Direktabbildung auf Basis von hoch fokussierten Elektronen- und Ionenstrahlen und chemischen Reaktionen ermöglicht die Herstellung von Nanostrukturen.
162	NanoScape AG	Nanozeolithe	München	http://www.nanoscape.de	Nanomaterialienherstellung	NanoZeo – modified nanocrystalline powder, nanocrystalline silicate and aluminosilicate materials (available in powder form or suspension)

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
163	NANO-X GmbH	x-coat® Black 4001	Saarbrücken	www.nano-x.de	Oberflächen/Beschichtungen	Oberflächenbeschichtung auf Alufolien, Bratpfanne
164	NANO-X GmbH	x-clean® EC 5000	Saarbrücken	www.nano-x.de	Oberflächen/Beschichtungen	Oberflächenbeschichtung auf Textilien
165	NANO-X GmbH	SMF®	Saarbrücken	www.nano-x.de	Oberflächen/Beschichtungen	Oberflächenbeschichtung in Katalysatoren
166	Nanoxid	Nanoxid	Bous	www.nanoxid.com	Oberflächen/Beschichtungen	Oberflächenbeschichtungen mit diversen Effekten
167	NETZSCH-Feinmahltechnik GmbH	Nanomühle ZETA® RS	Selb	www.netzsch-feinmahltechnik.de	Anlagen/Gerätebau	Feinmahltechnik
168	NovaLED GmbH	OLED-Materialien	Dresden	www.novaled.com	Nanomaterialienherstellung	OLED-Materialien
169	novosom AG	Liposomale Wirkstofftransporte im nanoskaligen Bereich	Halle	www.novosom.de	Life Science, Nanobiotechnologie	Wirkstofftransporte im nanoskaligen Bereich
170	NTC Nano Tech Coatings GmbH	Basecoat U-Sil-Serie	Tholey	www.ntcgmbh.com	Oberflächen/Beschichtungen	Sol-Gel-Technologie, Korrosionsschutz, Easy-to-clean Oberflächen für Aerospace, Automotive, Elektronik, Bauindustrie, Architektur, Medizintechnik, Verkehrstechnik
171	n-tec GmbH	Oberflächenbeschichtungen	Regensburg	www.n-tec-systems.de	Oberflächen/Beschichtungen	Oberflächenbeschichtungen mit diversen Effekten
172	Oberflächentechnik Preimeß	KFZ-Scheiben Versiegelung	Wollbach	www.preimess.de	Oberflächen/Beschichtungen	Oberflächenversiegelungen
173	Oberflächentechnik Preimeß	Lackversiegelung	Wollbach	www.preimess.de	Oberflächen/Beschichtungen	Oberflächenversiegelungen
174	Oberflächentechnik Preimeß	Glasversiegelung	Wollbach	www.preimess.de	Oberflächen/Beschichtungen	Oberflächenversiegelungen
175	ODB-Tec GmbH & Co.	Analytik	Heek	www.odt-tec.de	Analytik	

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
	KG					
176	OKALUX GmbH	Okagel Isolierglas	Marktheidenfeld	www.okalux.de	Wärmedämmung	lichtstreuendes Nanogel Isolierglas mit transluzentes nanoporöses Nanogel® der Firma Cabot Corporation (SiO ₂)
177	PlaTeG GmbH	Anlagen zur Oberflächenbehandlung	Siegen	www.plateg.de	Anlagen/Gerätebau	Plasmatechnologieranlagen zur Oberflächenbehandlung von Kunststoffen, Metallen
178	PlaTeG GmbH	Plasmaoberflächentechnik	Siegen	www.plateg.de	Oberflächen/Beschichtungen	Nano-Schichten zum Korrosionsschutz mittels Plasma-CVD; Hartschichten
179	PolyAn GmbH	Molekulares Oberflächen Engineering, molekulares Prägen	Berlin	www.poly-an.de	Oberflächen/Beschichtungen	Molekulares Oberflächen Engineering, molekulares Prägen, Oberflächenfunktionalisierung für Biotechnologie, Medizin, Lebensmitteltechnologie und in der chemischen sowie petrochemischen Industrie
180	POLYTOP® Autopflege GmbH	Hochglanzpolitur SF	Dreieich	www.polytop.de	Oberflächen/Beschichtungen	Autoflegepolitur
181	PPG Industries Lacke GmbH	kratzbeständige Automobilbeschichtungen	Dortmund	www.ppg.com	Oberflächen/Beschichtungen	
182	QIAGEN GmbH	Transfektinsreagenzien (Dendrimere)	Hilden	www.qiagen.com	Life Science, Nanomaterialienherstellung, Pharma/Medizin	Transfektinsreagenzien (Dendrimere)
183	QIAGEN GmbH	Magnetpartikel	Hilden	www.qiagen.com	Life Science, Nanomaterialienherstellung, Pharma/Medizin	Magnetpartikel
184	QIAGEN GmbH	Nanostrukturierte Oberflächen	Hilden	www.qiagen.com	Oberflächen/Beschichtungen	Nanostrukturierte Oberflächen

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
185	REMA TIP TOP GmbH	NANO DIAMANT	Poing	www.rema-tiptop.com	Nanomaterialienherstellung	Additiv für Kettenspray
186	rent a scientist GmbH	Nanosilber AgPURE	Regensburg	www.rent-a-scientist.com	Nanosilberanwendung	
187	Rewitec GmbH	M2, Nanoverschleißschutz		www.rewitec.com	Oberflächen/Beschichtungen	Beschichtungen für Motoren und Betriebe (Verschleißschutz)
188	Rittal GmbH & Co. KG	RiNano-Beschichtung	Herborn		Oberflächen/Beschichtungen	PLUS-Kühlgeräte mit neuartiger Nanobeschichtung der Verflüssigeroberfläche (RiNano-Beschichtung)
189	Rowenta	Bügeleisen			Oberflächen/Beschichtungen	Nanoglas-Oberfläche auf hochwertigem Bügeleisen
190	Sachtleben	Hombitec S 120A	Duisburg	www.sachtleben.de	Nanomaterialienherstellung	Additiv, Ultra feines und transparentes Titandioxid für den Einsatz als hocheffektiver UV-Schutz in PA- und CV-Synthesefasern
191	Sachtleben	Hombitec S 120G	Duisburg	www.sachtleben.de	Nanomaterialienherstellung	Additiv, ultra feines und transparentes Titandioxid für den Einsatz als hocheffektiver UV-Schutz in PES-Synthesefasern
192	Sachtleben	Hombitec RM 300/400	Duisburg	www.sachtleben.de	Oberflächen/Beschichtungen	Möbellacke mit Titandioxid als UV-Schutz
193	Sachtleben	HombitecRM130F	Duisburg	www.sachtleben.de	Verpackung	Lebensmittelfolie mit Titandioxid als UV-Schutz
194	Sachtleben	Hombitec®RM200/220	Duisburg	www.sachtleben.de	Oberflächen/Beschichtungen	Autolack mit Titandioxid als UV-Schutz
195	Sachtleben	Sachtoperse	Duisburg	www.sachtleben.de	Nanomaterialienherstellung	Funktionsadditiv auf der Basis eines nanofeinen Bariumsulfats

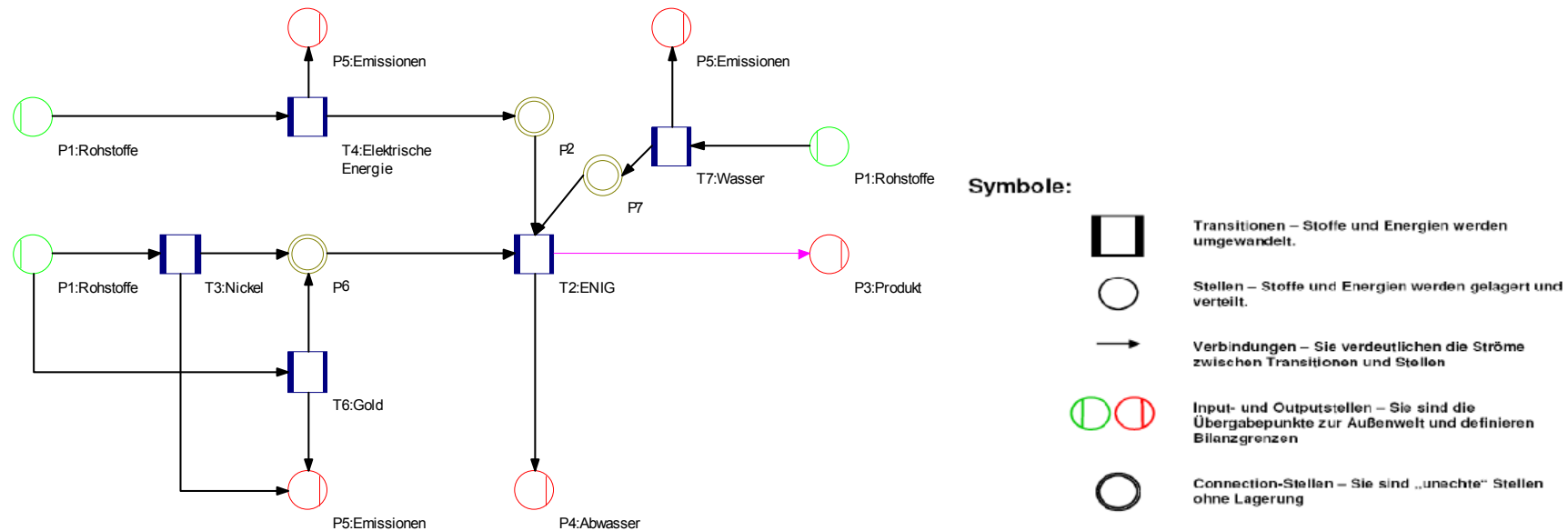
	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
196	Samsung Electronics GmbH	Silver Nano Health System	Schwalbach/Ts,	www.samsung.de	Nanomaterialienherstellung	Desinfektion Waschmaschine
197	Sartorius AG	Sensoren in/mit Nanotechnologie	Göttingen	www.sartorius-mechatronics.de	Analytik	Sensoren
198	Schmitz-Werke GmbH + Co. KG	Markisenstoffe	Emsdetten	www.markilux.de	Oberflächen/Beschichtungen	Markisenstoffe, Schmutzabweisende Oberflächenbeschichtung auf Markisenstoffe
199	Schmitz-Werke GmbH	Dekostoff, luftreinigend	Emsdetten	www.markilux.de	Oberflächen/Beschichtungen	Dekostoffe, Oberflächenbeschichtung
200	SCHOTT Solar GmbH	ASI®-F Module	Alzenau	www.schott.com	Energiegewinnung	Gewinnung erneuerbarer Energie aus Solarstrahlung
201	Schüco International KG	PowClean & NanoLine	Bielefeld	www.schueco.de	Oberflächen/Beschichtungen	Selbstreinigung von Aluminiumoberflächen, von ntc
202	Scienion AG	Biochips	Taunusstein	www.scienion.com	Life Science	
203	Scienion AG	Pikoliter Handling	Taunusstein	www.scienion.com	Life Science	
204	Sensitec GmbH	Magnetoresistive Sensoren	Lahnau - Waldgirmes	www.sensitec.com	Analytik	Sensoren
205	SFC Smart Fuel Cell AG	Smart Full Cell	Brunnthal-Nord	www.smartfuelcell.de	Energiespeicherung	kompakte Brennstoffzellen
206	SGS INSTITUT FRESENIUS GmbH	Lotus-Effekt in Farbanstrichen	Taunusstein	http://www.institut-fresenius.de/index.shtml	Oberflächen/Beschichtungen	Lotus-Effekt in Farbanstrichen
207	Solarcoating Machinery GmbH	flexible solar cell	Dormagen	http://www.solarcoating.de/	Energiegewinnung	
208	Solarion GmbH	CIS-Dünnschicht-Solarzellen	Leipzig	www.solarion.de	Energiegewinnung	Gewinnung erneuerbarer Energie aus Solarstrahlung
209	Solution Glöckner GmbH	SOLUPROTECT®, SOLUGARD®	Ludwigshafen	http://www.solution-gloeckner.de	Oberflächen/Beschichtungen	Antihafbeschichtung für vielfältigste Oberflächen

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
210	Southwall Europe GmbH	Hüper Optik	Großröhrsdorf		Nanomaterialienherstellung	Sonnenschutzfolien für Auto, Haus etc.
211	Starnberger Beschichtungen GmbH	NanoFinish Funktionsbeschichtung	Landsberg	www.starnberger.de	Oberflächen/Beschichtungen	NanoFinish, Funktionsbeschichtung
212	Süd Chemie AG	Nanofil®	München	www.sud-chemie.com	Nanomaterialienherstellung	Additiv, Füllstoff für Polymer-Anwendungen
213	SUNCoat GmbH	Folienbeschichtungen	Zittau	www.suncoat.de	Oberflächen/Beschichtungen	Folienbeschichtungen
214	SusTech GmbH & Co. KG	Bond-on-Command	Darmstadt	http://www.sustech.de/	Nanomaterialienherstellung	Ferritklebstoff, enthält nanostrukturierte Eisenoxidpartikel
215	SusTech GmbH & Co. KG	Nanopartikuläres Zinkoxid	Darmstadt	http://www.sustech.de/	Nanomaterialienherstellung	Nanopartikuläres Zinkoxid (5-15nm)
216	TASCON GmbH	ION-TOF TOF-SIMS IV	Münster	www.tascon-gmbh.de	Analytik, Dienstleistung, F&E	Mikroskopie, Flugzeitsekundärionen-massenspektrometer
217	TZO Leipzig GmbH	Anwendung von Beschichtungsverfahren	Leipzig	www.tzoleipzig.de	Oberflächen/Beschichtungen	
218	ULM-photonics GmbH	Halbleiter-Laserdioden	ULM	www.ulm-photonics.de	Nanophotonik	
219	ultra.air gmbh	ultra.air MF 05/25	Hilden	www.ultraair-group.com	Filtration	Gas- / Luftfilter
220	Vistec Electron Beam GmbH	Elektronenstrahlbeschichtungen	Köln	www.vistec-semi.com	Oberflächen/Beschichtungen	
221	VOSSCHEMIE GmbH	NANO - HIGH TECH Yachtpflegeprodukte	Uetersen	www.vosschemie.de	Oberflächen/Beschichtungen	Yachtpflegeprodukte, Yachtcare-Pro-Speed, Yachtcare Propellerversiegelung, Yachtcare-Decksbelag-Restorer, Yachtcare-Power-Polish

	Hersteller	Produktname	Ort	Internetadresse	Anwendungsgebiet grob	Anwendungsgebiet fein/ Funktionalität
222	VTD Vakuumtechnik Dresden GmbH	Plasmaphysikalische Beschichtung	Dresden	www.vtd.de	Oberflächen/Beschichtungen	
223	Wacker Chemie AG	GENIOPERL®	München	www.wacker.com	Nanomaterialienherstellung	Additiv für Farben, Lacke, Kunststoffe oder Klebstoffe
224	Xantec GmbH	Bioinerte Beschichtungen	Münster	www.xantec.com	Oberflächen/Beschichtungen , Life Science	Bioinerte Beschichtungen mit 5 bis 2000 nm dünnen, biofunktionalisierbaren Hydrogelen für Bio(sensor)chips, Proteinmicroarrays, Medizintechnik

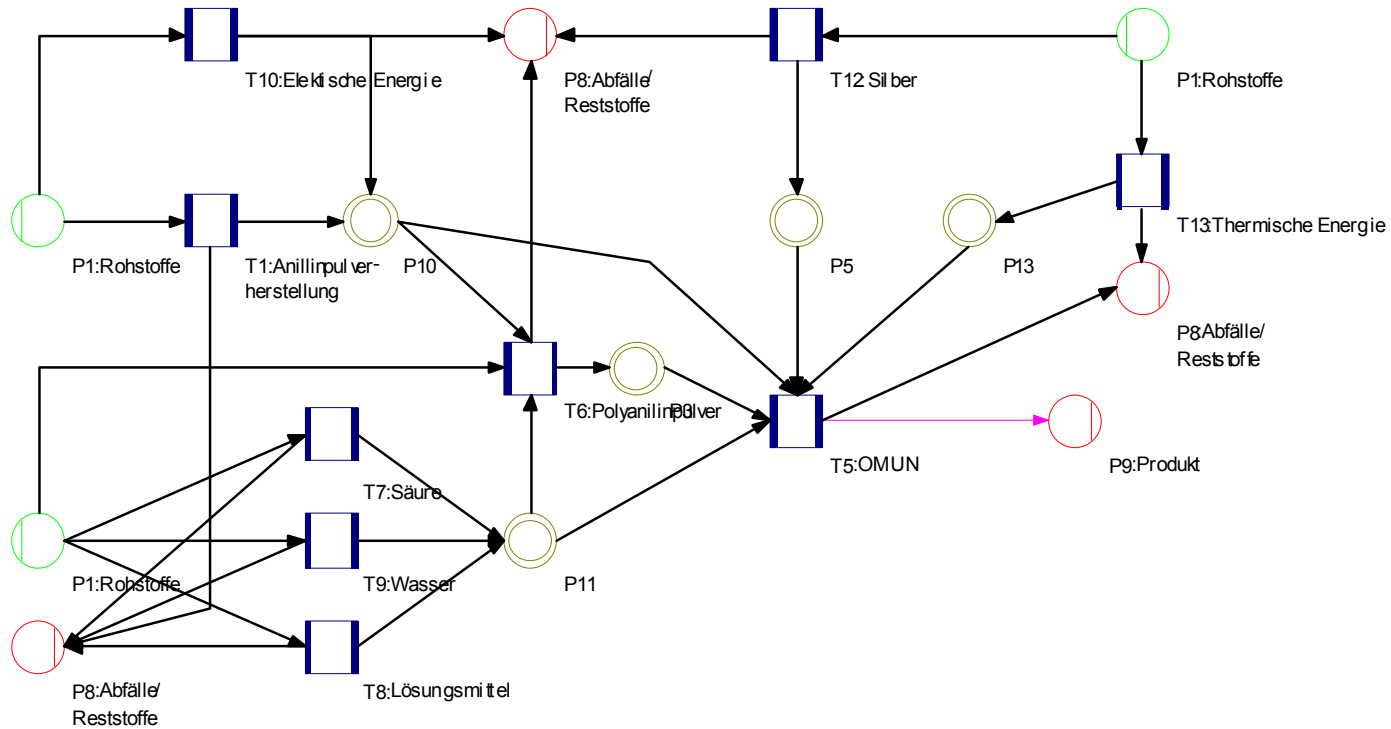
11.4 Anhang 4: Auswahl an Bilanzierungsflussbildern in Umberto und Ökobilanzdaten

Abbildung 58: Fallstudie 1, Verfahren ENIG Nickel/Gold, vertikal¹²⁶



¹²⁶ Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 59: Fallstudie 1, Verfahren OM Nanofinish, horizontal, vergleichbar¹²⁷



¹²⁷ Quelle: eigene Darstellung

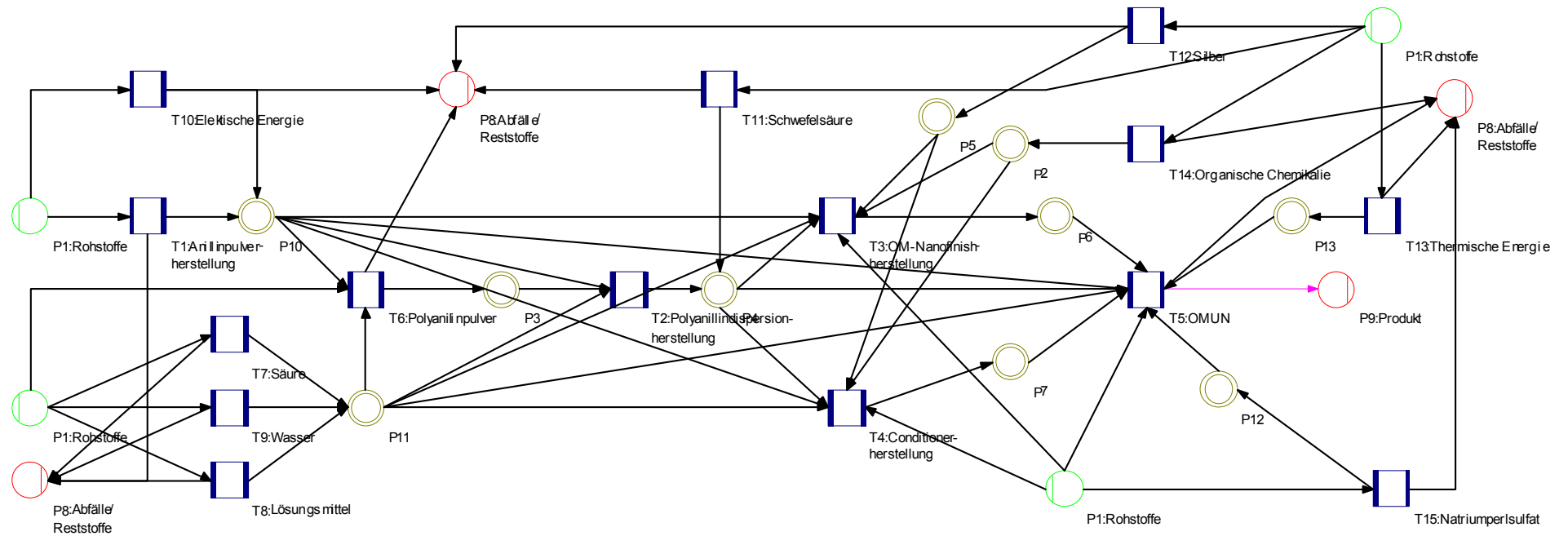
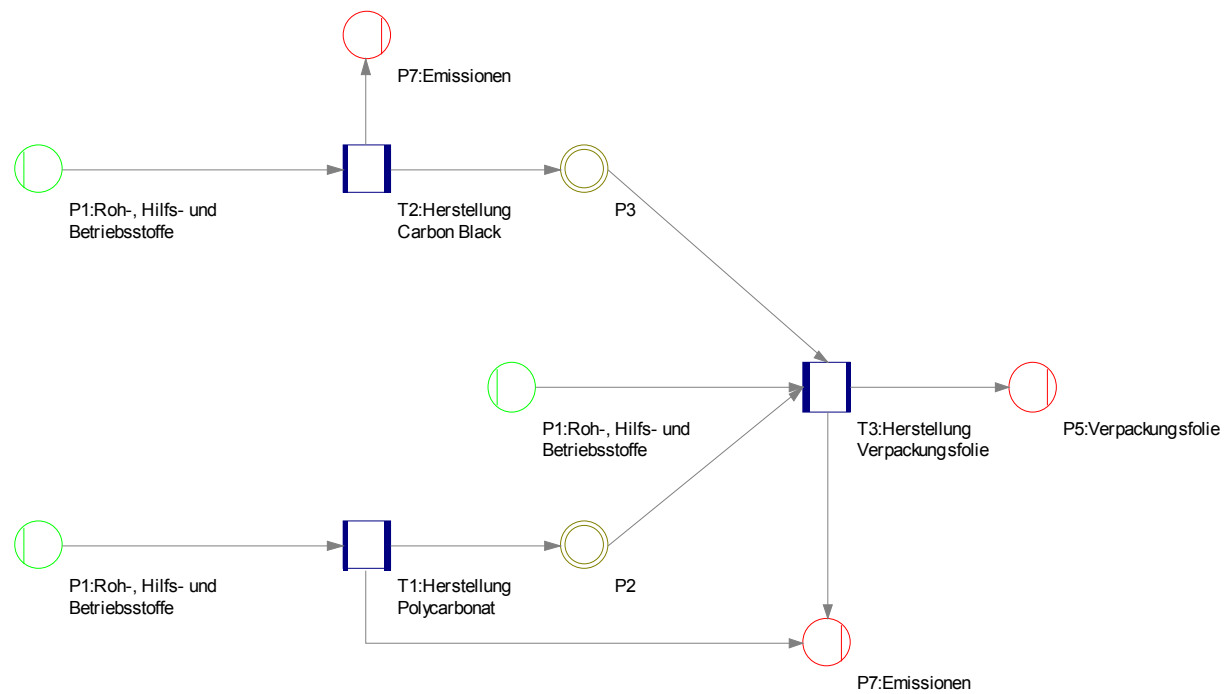
Abbildung 60: Fallstudie 1, Verfahren OM Nanofinish, horizontal, umfassender¹²⁸¹²⁸ Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 61: Fallstudie 2, Szenario Folie Alt mit Carbon Black¹²⁹



¹²⁹ Quelle: eigene Darstellung

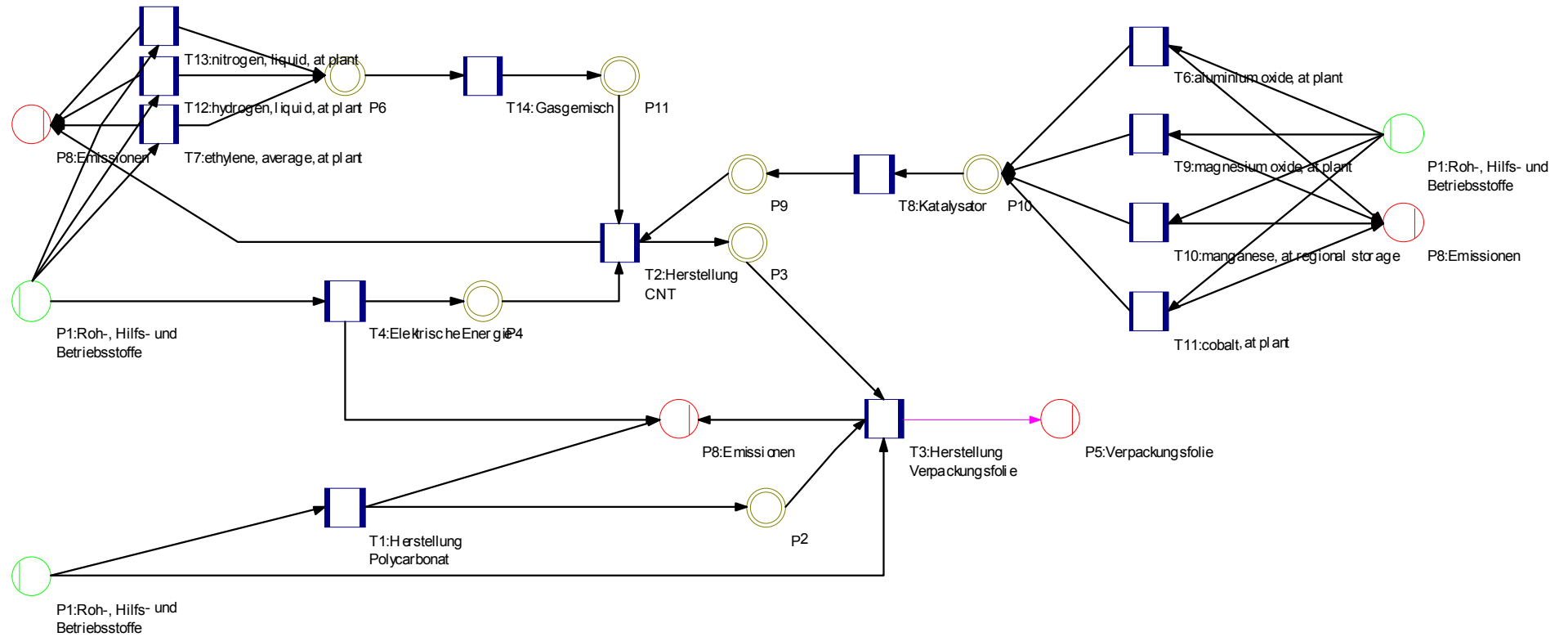
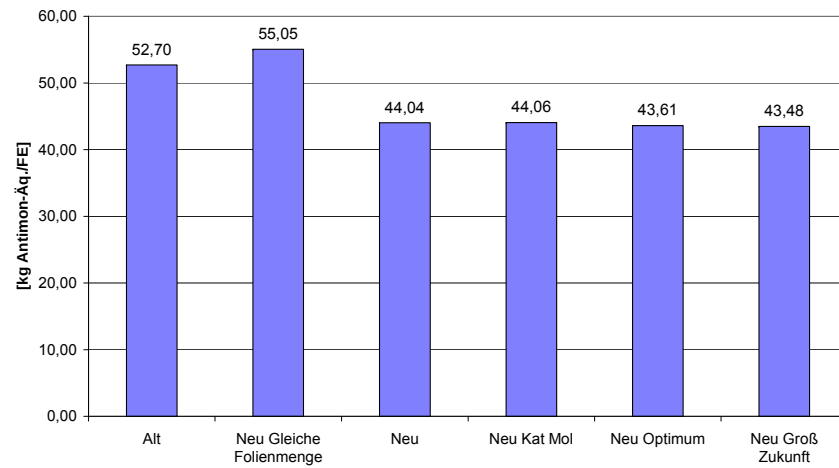
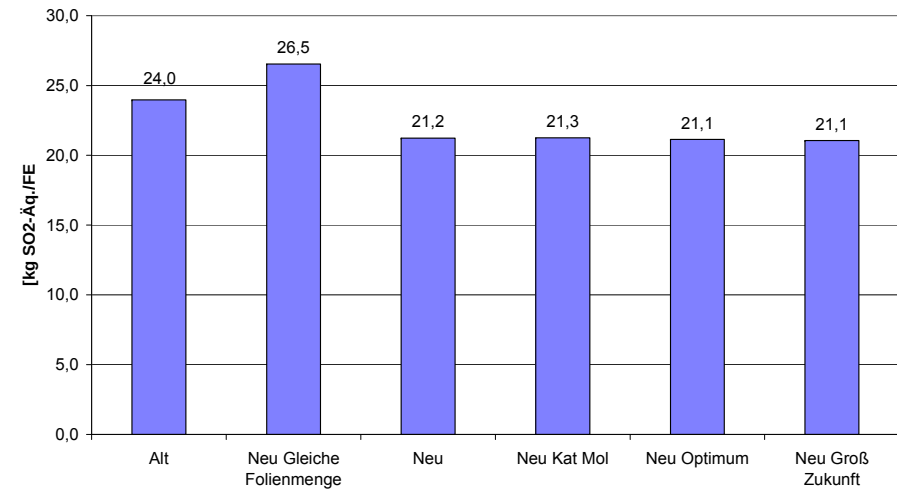
Abbildung 62: Fallstudie 2, Szenario Folie Neu mit MWCNT¹³⁰¹³⁰ Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 31: Fallstudie 2, Anteile der einzelnen Bilanzmodule am Treibhauspotenzial (CO₂-Äq./FE)¹³¹

	ALT	NEU	NEU Kat	NEU Optimum	NEU Zukunft Großanlage
Summe	7.501,27 kg CO ₂ -Äq.	6.565,71 kg CO ₂ -Äq.	6.566,30 kg CO ₂ -Äq.	6.541,66 kg CO ₂ -Äq.	6.524,98 kg CO ₂ -Äq.
Polycarbonat, Herstellung	6.643,92 kg CO ₂ -Äq.	6.050,45 kg CO ₂ -Äq.	6.050,45 kg CO ₂ -Äq.	6.050,45 kg CO ₂ -Äq.	6.050,45 kg CO ₂ -Äq.
Carbon Black, Herstellung	348,74 kg CO ₂ -Äq.				
Folien-Herstellung	508,61 kg CO ₂ -Äq.	406,89 kg CO ₂ -Äq.	406,89 kg CO ₂ -Äq.	406,89 kg CO ₂ -Äq.	406,89 kg CO ₂ -Äq.
MWCNT-Herstellung, Anteil Elektroenergie		25,02 kg CO ₂ -Äq.	25,02 kg CO ₂ -Äq.	25,02 kg CO ₂ -Äq.	8,34 kg CO ₂ -Äq.
MWCNT Gasanteil, Ethylen		60,66 kg CO ₂ -Äq.	60,66 kg CO ₂ -Äq.	43,80 kg CO ₂ -Äq.	43,80 kg CO ₂ -Äq.
MWCNT Gasanteil, Wasserstoff		5,48 kg CO ₂ -Äq.	5,48 kg CO ₂ -Äq.	3,96 kg CO ₂ -Äq.	3,96 kg CO ₂ -Äq.
MWCNT Gasanteil, Stickstoff		9,98 kg CO ₂ -Äq.	9,98 kg CO ₂ -Äq.	7,21 kg CO ₂ -Äq.	7,21 kg CO ₂ -Äq.
MWCNT Katalysatoranteil, Aluminiumoxid		0,19 kg CO ₂ -Äq.	0,19 kg CO ₂ -Äq.	0,11 kg CO ₂ -Äq.	0,11 kg CO ₂ -Äq.
MWCNT Katalysatoranteil, Magnesiumoxid		0,17 kg CO ₂ -Äq.	0,17 kg CO ₂ -Äq.	0,10 kg CO ₂ -Äq.	0,10 kg CO ₂ -Äq.
MWCNT Katalysatoranteil, Mangan		1,50 kg CO ₂ -Äq.	1,30 kg CO ₂ -Äq.	0,90 kg CO ₂ -Äq.	0,90 kg CO ₂ -Äq.
MWCNT Katalysatoranteil, Kobalt		5,37 kg CO ₂ -Äq.	4,74 kg CO ₂ -Äq.	3,22 kg CO ₂ -Äq.	3,22 kg CO ₂ -Äq.
MWCNT Katalysatoranteil, Molybdän			1,41 kg CO ₂ -Äq.		

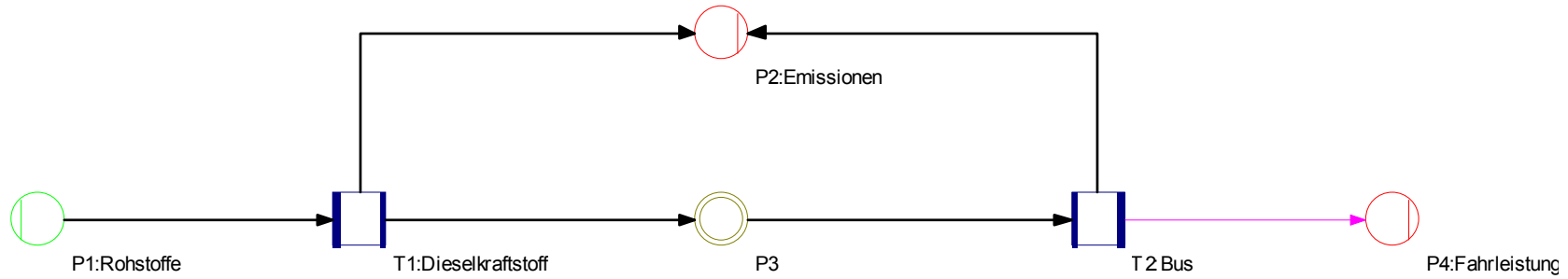
¹³¹ Quelle: eigene Berechnungen (Datenbasis: eigen, Ecoinvent 2007, Bayer 2008b)

Abbildung 63: Fallstudie 2, Abiotischer Ressourcenverbrauch¹³²Abbildung 64: Fallstudie 2, Versauerungspotenzial, generisch¹³³

¹³² Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Ecoinvent 2007, Bayer 2008b)

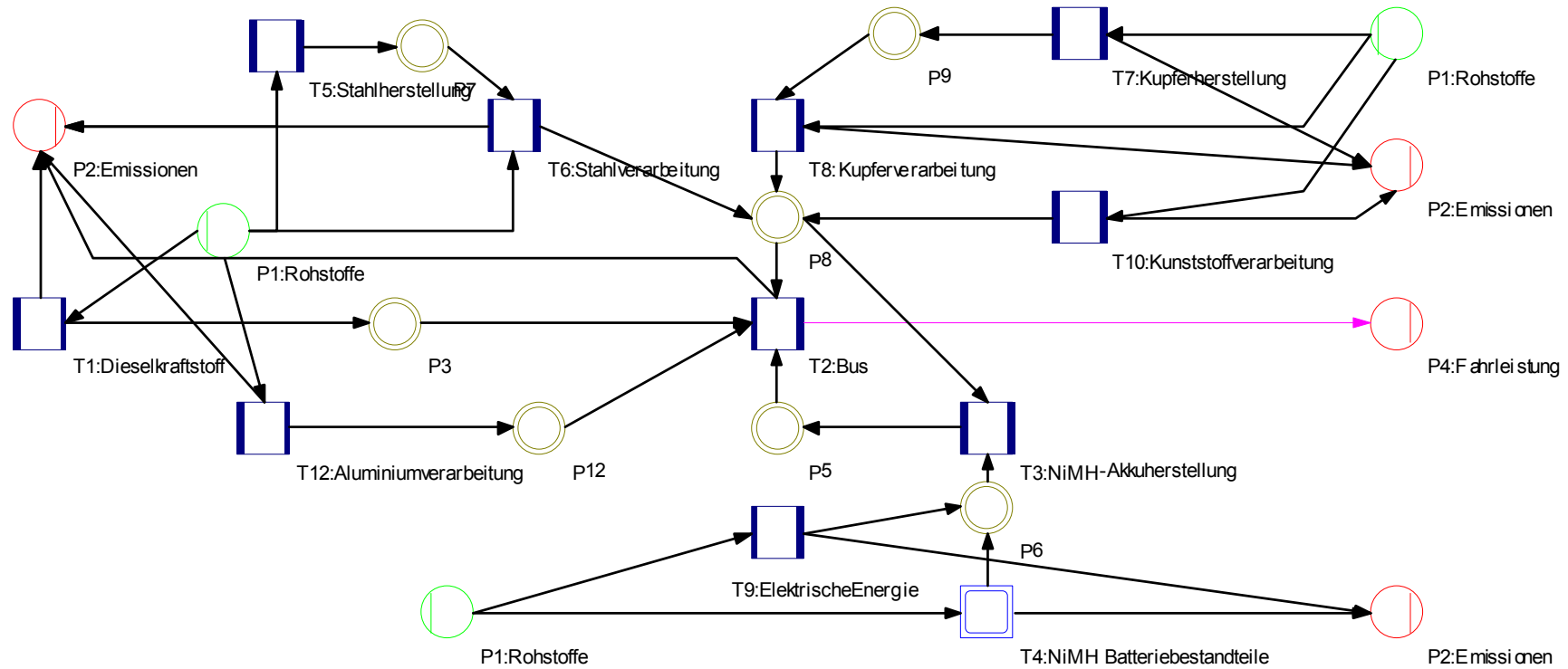
¹³³ Quelle: eigene Darstellung (Datenbasis: eigen, Ecoinvent 2007, Bayer 2008b)

Abbildung 65: Fallstudie 3, Variante V1 Stadtbus¹³⁴



¹³⁴ Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 66: Fallstudie 3, Variante V2a Hybridbus NiMH Subat¹³⁵



¹³⁵ Quelle: eigene Darstellung

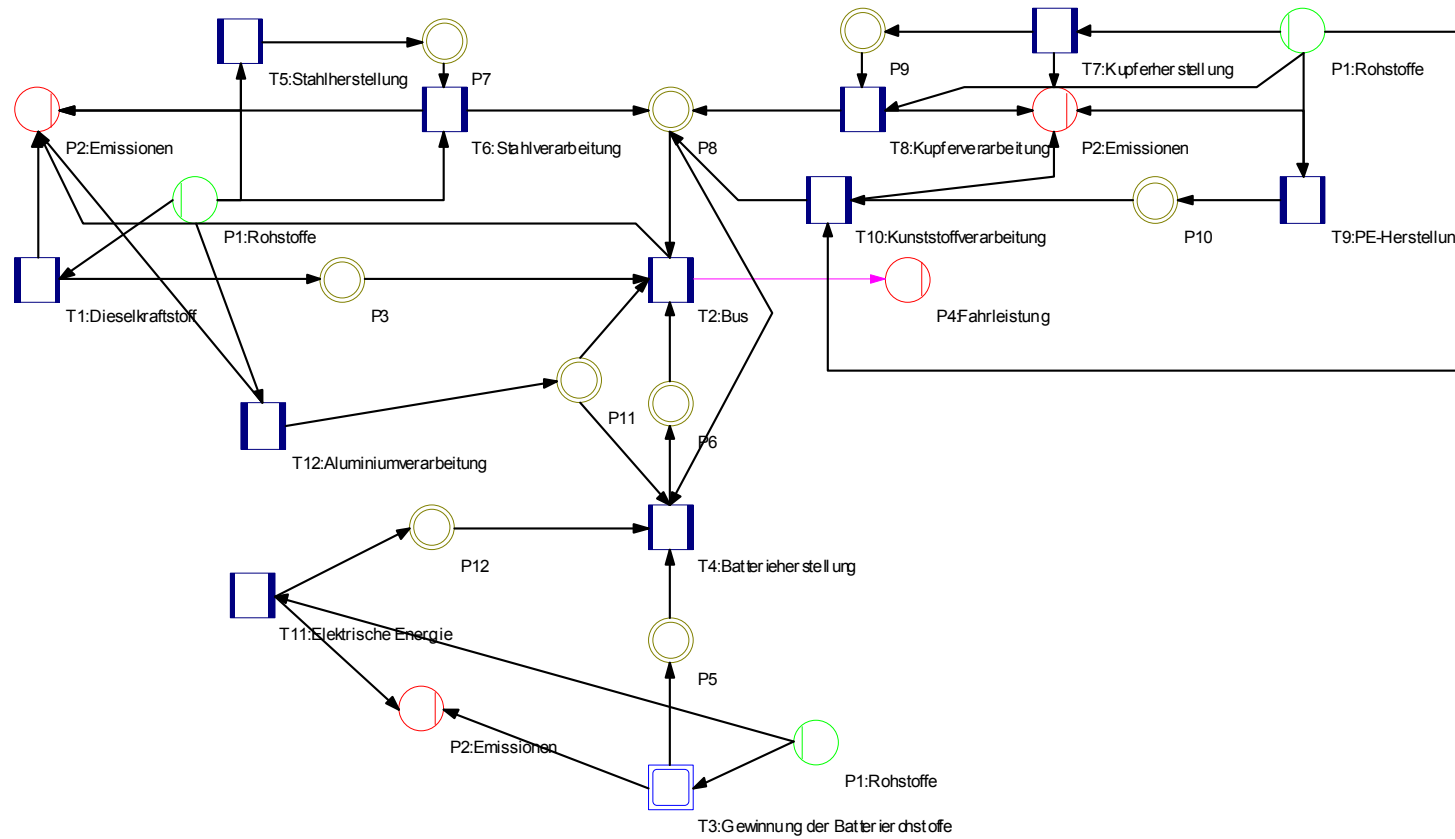
Abbildung 67: Fallstudie 3, Variante V4a Li-Ion Subat Zukunft¹³⁶¹³⁶ Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 32: Fallstudie 3, Zusammensetzung der NiMH Batterie, SUBAT-Projekt¹³⁷

	Substanz	Anteil in %
Elektroden	Nickel (Ni)	20.59
	Seltene Erden Metalle	10.07
	Nickelhydroxid (Ni(OH) ₂)	21.48
	Kobalt (Co)	4.85
Elektrolyt	Kaliumhydroxid (KOH)	3.35
	Natriumhydroxid (NaOH)	0.88
	Wasser (H ₂ O)	11.67
Separator	Polypropylen (PP)	2.57
Gehäuse	Polypropylen (PP)	4.53
	Polyethylen (PE)	4.53
Anderes	Kupfer (Cu)	1.20
	Anderes	6.29
	Stahl	7.99

¹³⁷ Quelle: SUBAT 2005

Tabelle 33: Fallstudie 3, Zusammensetzung der Li-Ion-Batterie, SUBAT-Projekt¹³⁸

	Substanz	Anteil in %
Elektroden	Kohlenstoff	14.96
	Lithiummetalle (Co/Ni/Mn) -oxide (LiMO ₂)	23.63
	Polyvinylidenfluorid (PVDF)	1.19
	Styrol-Butadien- Kautschuk	1.19
Elektrolyt	Propylencarbonat (PC)	3.15
	Ethylencarbonat (EC)	6.30
	Dimethylcarbonat (DMC)	3.15
	Lithiumhexafluorphosphat (LiPF ₆)	3.15
Separator	Polypropylen (PP) / Polyethylen (PE)	0.00
Gehäuse	Anderes (Polypropylen)	21.23
Anderes	Aluminium (Al)	12.60
	Kupfer (Cu)	9.45

¹³⁸ Quelle: SUBAT 2005

11.5 Anhang 5: Fragebogen für Nano-Unternehmen

I. Fragebogen für Nano-Unternehmen

Unsere Angaben erfolgen für die Firma/ den Betrieb/ den Betriebsteil:

im Bundesland: Postleitzahl:

Welche Stelle Ihres Hauses bearbeitet diesen Fragebogen?

Abteilung: Bearbeiter/in: Telefon:

Unsere Firma/ unser Betrieb/Betriebsteil zählt dem Schwerpunkt nach zu folgendem Wirtschaftszweig:

.....

Zutreffendes bitte ankreuzen (☑) bzw. ausfüllen (Bsp: sonstige: **Farben und Lacke**)!

Teil A: Unsere Aktivitäten im Bereich Nanotechnologie: Anwendungsfelder und Umweltrelevanz

1. Wir sind derzeit im Bereich Nanotechnologie aktiv (Produkte/Verfahren, Dienstleistungen, F&E):

☐ nein ☐ ja falls ja, seit:

2. [Falls „nein“ bei Frage 1]: Wir planen, zukünftig im Bereich Nanotechnologie aktiv zu werden:

☐ nein ☐ ja falls ja: ☐ kurzfristig ☐ mittelfristig ☐ langfristig

Achtung! Falls Sie zwar die Frage 1 mit „nein“, jedoch die Frage 2 mit „ja“ beantwortet haben sollten, so beantworten Sie bitte alle folgenden Fragen im Hinblick auf Ihre geplanten, zukünftigen Aktivitäten im Bereich Nanotechnologie!

3. Bezüglich unserer Tätigkeiten im Bereich Nanotechnologie verstehen wir uns als:

- | | |
|--|--|
| ☐ Hersteller von Nanomaterialien (Partikel, Composite, Oberflächen u. ä.) | ☐ Anbieter von Dienstleistungen, und zwar: |
| ☐ Anbieter von Produkten oder Verfahren, in denen Nanotechnologie eine funktionale Rolle spielt | ☐ Zulieferer für eine der zuvor genannten Aktivitäten |
| ☐ Anbieter von Produkten, die mit Hilfe von Nanotechnologie hergestellt werden | ☐ F&E-Einrichtung |
| ☐ Hersteller oder Anbieter von analytischen Geräten oder Zubehör | ☐ sonstiger Akteur, und zwar: |
| | |

4. Unsere drei bedeutendsten Leistungsangebote bzw. Produkte im Bereich Nanotechnologie sind gegenwärtig (in der Reihenfolge ihrer jeweiligen Bedeutung):

	F&E	Prototyp/ Testlauf	am Markt erhältlich
1.	☐	☐	☐
2.	☐	☐	☐
3.	☐	☐	☐

5. Unsere Nanotechnologie-Leistungen bzw. Nanotechnologie-Produkte sind folgenden Nanotechnologie-Bereichen zuzuordnen:

- | | |
|--|---|
| ☐ Nano-Materialien | ☐ Nano-Analytik/Nano-Instrumente |
| ☐ Nano-Chemie | ☐ Nano-Electro-Mechanical-Systems (NEMS) |
| ☐ Nano-Optik | ☐ sonstiger Nanotechnologie-Bereich, und zwar: |
| ☐ Nano-Elektronik | |
| ☐ Nano-Biotechnologie | |

6. Unsere Nanotechnologie-Leistungen bzw. -Produkte werden in folgenden Anwendungsbereichen eingesetzt:

- | | | |
|--|---|--|
| ☐ Chemische Industrie | ☐ Umwelttechnik | ☐ Bekleidungs-/Textil-industrie |
| ☐ Pharmazeutische Industrie | ☐ Energietechnik | ☐ Optische Technologien |
| ☐ Biotechnologie | ☐ Elektrotechnik | ☐ Architektur/Baugewerbe |
| ☐ Materialien/Werkstoffe | ☐ Informations-/Kommunikations-technik | ☐ sonstige: |
| ☐ Medizin/Life Science | ☐ Automobil-/Fahrzeugbau | |

7. Unsere Nanotechnologie-Leistungen bzw. Nanotechnologie-Produkte basieren auf folgenden Nanotechnologie-Funktionalitäten:

- | | |
|---|---|
| <p>☐ <u>Verbesserung von Werkstoffeigenschaften</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ☐ bessere mechanische Beanspruchbarkeit ☐ Gewichtsreduktion ☐ Volumenreduktion ☐ verbesserte thermische Eigenschaften ☐ verbesserte elektrische Eigenschaften ☐ verbesserte optische Eigenschaften ☐ Substitution toxischer Substanzen ☐ sonstige:..... <p>.....</p> <p>☐ <u>Ermöglichung oder Verbesserung katalytischer Prozesse</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ☐ durch Additive ☐ durch höhere Oberflächen-Volumen-Verhältnisse ☐ durch neue Materialien/Stoffe ☐ sonstige:..... <p>.....</p> <p>☐ <u>Ermöglichung oder Verbesserung von Filterprozessen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ☐ durch Additive ☐ durch höhere Oberflächen-Volumen-Verhältnisse ☐ durch neue Materialien/Stoffe ☐ sonstige:..... <p>.....</p> | <p>☐ <u>Oberflächenfunktionalisierung</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ☐ Kratzfestigkeit ☐ „easy-to-clean“/Lotuseffekt ☐ Korrosionsschutz ☐ Diffusionssperre ☐ nicht reflektierend ☐ flammhemmend ☐ Anti-Fingerprint ☐ anti-statisch ☐ anti-mikrobiell ☐ sonstige: <p>.....</p> <p>☐ <u>Ermöglichung oder Verbesserung von Energiespeicherprozessen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ☐ durch Additive ☐ durch höhere Oberflächen-Volumen-Verhältnisse ☐ durch neue Materialien/Stoffe ☐ sonstige:..... <p>.....</p> <p>☐ <u>Ermöglichung oder Verbesserung von analytischen Verfahren oder Geräten</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ☐ falls möglich, bitte spezifizieren: <p>.....</p> |
|---|---|

8. Unsere Nanotechnologie-Leistungen bzw. Nanotechnologie-Produkte tragen in folgender Weise zum Umwelt- und Ressourcenschutz bei (im Verhältnis zu ähnlichen, nicht auf Nanotechnologie basierenden Leistungen/Produkten):

Unsere Nanotechnologie-Leistungen und -Produkte führen zu ...

	trifft eher zu	trifft teilweise zu	trifft eher nicht zu
... umweltfreundlicher Energiegewinnung.	☐	☐	☐
... Energieeinsparung.	☐	☐	☐
... Materialeinsparung.	☐	☐	☐
... Vermeidung von Emissionen oder Abfall.	☐	☐	☐
... Verminderung von Emissionen oder Abfall.	☐	☐	☐
... Substitution toxischer Substanzen.	☐	☐	☐
... sonstige:.....	☐	☐	☐

9. Soweit mit unseren Nanotechnologie-Leistungen bzw. -Produkten positive Umwelt- und Ressourceneffekte verbunden sind, waren diese bei der ...

	ausschlaggebend	wichtig	positive Nebeneffekte	eher unwichtig
... Forschung und Entwicklung	☐	☐	☐	☐
... Produktion	☐	☐	☐	☐
... Vermarktung	☐	☐	☐	☐

10. Unsere Nanotechnologie-Leistungen bzw. Nanotechnologie-Produkte werden in folgenden umweltrelevanten Anwendungsbereichen eingesetzt:

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ☐ <u>Prozessintegrierter Umweltschutz</u> <ul style="list-style-type: none"> ☐ ressourcenschonende Produktionsverfahren (bspw. durch Antihafbeschichtungen) ☐ emissionsarme Prozesse (bspw. durch Katalysatoren) ☐ schadstoffarme Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe bzw. Substitution toxischer Substanzen ☐ sonstige:..... ☐ <u>Produktintegrierter Umweltschutz</u> <ul style="list-style-type: none"> ☐ recyclinggerechte Konstruktion und Werkstoffauswahl ☐ abfall-, schadstoff- und verbrauchsarme Produkte ☐ sonstige:..... ☐ <u>Energiebereich</u> <ul style="list-style-type: none"> ☐ Energiegewinnung (bspw. Farbstoffsolarzelle) ☐ Energiespeicherung (bspw. Lithium-Ionen-Batterie) ☐ Energieeffizienz (bspw. OLEDs) ☐ sonstige:..... ☐ <u>Luftreinhaltung</u> <ul style="list-style-type: none"> ☐ Abgasreinigung (bspw. PKW-Abgaskatalysatoren) ☐ sonstige:..... | <ul style="list-style-type: none"> ☐ <u>Wasser/Abwasser</u> <ul style="list-style-type: none"> ☐ Wasseraufbereitung (bspw. Fe₃O₄-Partikel zur Arsenbeseitigung) ☐ Abwasserbehandlung (bspw. Keramikmembranen, Filtersysteme) ☐ sonstige:..... ☐ <u>Bodensanierung</u> <ul style="list-style-type: none"> ☐ Altlastensanierung (bspw. Fe-Partikel zum Abbau von chlorierten organischen Verbindungen) ☐ sonstige:..... ☐ <u>Abfallwirtschaft</u> <ul style="list-style-type: none"> ☐ Recycling ☐ Abfallbehandlung, -beseitigung (bspw. hitzebeständige Beschichtungen) ☐ sonstige:..... ☐ <u>Monitoring und Analyse</u> <ul style="list-style-type: none"> ☐ Analytik (bspw. Nanosensoren) ☐ Prozessüberwachung (bspw. „Lab-on-a-chip“-Sensorsysteme) ☐ Prozesssteuerung ☐ sonstige:..... |
|--|---|

**Teil B: Märkte für unsere Nanotechnologie-Leistungen und -Produkte.
Angaben zu unserem Unternehmen**

11. Unser Umsatz mit Nanotechnologie-Leistungen bzw. Nanotechnologie-Produkten, die mit Hilfe von Nanotechnologien hergestellt wurden, verteilte sich im Jahr 2007 auf Kunden (ggf. geschätzt):

- | | |
|--|---|
| ☐ aus dem eigenen Bundesland: | ☐ aus den USA: |
| ☐ aus dem sonstigen Bundesgebiet: | ☐ aus Japan: |
| ☐ aus der EU (ohne D): | ☐ aus dem sonstigen Ausland: |

Bitte Länder nennen:.....,

12. Wir bezogen 2007 die von uns eingesetzten Nanotechnologie-Materialien bzw. Vorprodukte, die mit Hilfe der Nanotechnologie hergestellt werden (in % des Beschaffungswertes, ggf. geschätzt):

- | | |
|--|---|
| ☐ aus dem eigenen Bundesland: | ☐ aus den USA: |
| ☐ aus dem sonstigen Bundesgebiet: | ☐ aus Japan: |
| ☐ aus der EU (ohne D): | ☐ aus dem sonstigen Ausland: |

Bitte Länder nennen:.....,

13. Unsere stärksten Konkurrenten im Bereich Nanotechnologie kommen:

- | | |
|---|---|
| ☐ aus dem eigenen Bundesland | ☐ aus den USA |
| ☐ aus dem sonstigen Bundesgebiet | ☐ aus Japan |
| ☐ aus der EU (ohne D) | ☐ aus dem sonstigen Ausland: |

Bitte Länder nennen:.....,

14. Die größten Wettbewerbsvorteile unserer Konkurrenten im Bereich Nanotechnologie bestehen in:

- | | |
|---|--|
| ☐ größerer Nanotechnologie-Kompetenz | ☐ höherer Innovationsfähigkeit |
| ☐ technologisch hochwertigeren Produkten | ☐ besserem Zugang zu Finanzierungsmöglichkeiten |
| ☐ preisgünstigeren Produkten | ☐ besseren öffentlichen Förderungsmöglichkeiten |
| ☐ besserem Vertrieb | |
| ☐ stärkerer internationaler Kompetenz | ☐ sonstige: |

15. Wir betreiben Forschung und Entwicklung im Nanotechnologie-Bereich: ☐ ja ☐ nein

Falls ja, im Rahmen unserer F&E im Nanotechnologie-Bereich kooperieren wir mit:

Art von Kooperationspartnern	konkrete Benennung der Partner
☐ Abnehmern	
☐ Lieferanten	
☐ (Unternehmens)-Netzwerken	
☐ Kompetenzzentren, Technologiezentren	
☐ Hochschulen	
☐ Fachhochschulen	
☐ Außeruniversitären F&E-Einrichtungen	
☐ Technologietransferstellen	
☐ Sonstigen:	

16. Unsere Aktivitäten in Bezug auf Nanotechnologie-Innovationen in den letzten fünf Jahren (2003-2007) lassen sich messen an:

	[Anzahl]
☐ Patentanmeldungen beim Deutschen Patentamt	
☐ Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt	
☐ Patentanmeldungen bei sonstigen nationalen Patentämtern (Ausland)	
☐ Gebrauchsmusteranmeldungen	
☐ Vergebenen Lizenzen	
☐ Erworbenen Lizenzen	
☐ Sonstiges (bspw. wissenschaftliche Publikationen/Vorträge)	
.....	

17. Unser Unternehmen hatte 2007 (ggf. geschätzt):

	[insgesamt]	[davon im Nanotechnologie-Bereich]
☐ Beschäftigte	 (Anzahl)	%
☐ Umsatz (o. MwSt.)	 Mio. Euro	%
☐ Auslandsumsatz (o. MwSt.)	 Mio. Euro	%
☐ Aufwendungen für F&E	 Mio. Euro	%

18. Unserer Aktivitäten im Nanotechnologie-Bereich werden im Jahresdurchschnitt 2008-2010 im Vergleich zu 2007

	zunehmen	eher gleich bleiben	eher abnehmen
beim Umsatz	☐	☐	☐
bei den Beschäftigten	☐	☐	☐
bei den F&E-Aufwendungen	☐	☐	☐

Vielen Dank für Ihre Mithilfe!

12 Literatur

- AIRI/Nanotec IT (2006): Roadmaps at 2015 on Nanotechnology – Application in the Sectors of Materials, Health & Medical Systems, Energy. Synthesis Report, <http://www.nanoroadmap.it/> (18.03.2008).
- An, H.; Xue, B.; Li, D.; Li, H.; Meng, Q.; Guo, L.; Chen, L. (2006): Environmental friendly LiI/ethanol based gel electrolyte for dye-sensitized solar cells. *Electrochemistry Communications* 8(1), 170-172.
- Ankele, K. & Steinfeldt, M. (2002): Ökobilanzen. Der Umweltschutzberater. Loseblattsammlung. Deutscher Wirtschaftsdienst.
- Arpe, H.-J. (2007): Industrielle Organische Chemie. 6. Auflage, WILEY-VCH Verlag, Weinheim.
- Bachmann, G; Grimm, V.; Hoffknecht, A.; Luther, W.; Ploetz, Ch.; Reuscher, G.; Teichert, O.; Zweck, A. (2007): Nanotechnologien für den Umweltschutz. VDI-Technologiezentrum GmbH (Hrsg.), Band 71, Düsseldorf.
- Bakshi, B.R.; Lee, I.J.; Khanna, V.; Grubb, F.G.; Zhang, Y. (2007): Evaluating the Impacts of Nanomanufacturing via Thermodynamic and Life Cycle Analysis. Vortrag auf Interagency Workshop on the Environmental Implications of Nanotechnology, September 5-7, 2007, Washington DC.
- BASF (2005a): Label Eco-Efficiency Analysis - Ultradur® High Speed. Ludwigshafen.
- BASF (2005b): Ökoeffizienz-Manager. Berechnungstool für den Einsatz von Ultradur® High Speed. Ludwigshafen.
- BASF (2006): First BASF plastic with eco-efficiency label. Pressemitteilung vom 16.02.2006, Ludwigshafen.
- BASF (2007): Ultradur® High Speed. Produktbroschüre. Ludwigshafen.
- BASF (2008): Zitat von der Internetpräsentation des Unternehmens.
http://www.corporate.basf.com/de/innovationen/felder/nanotechnologie/nanotec.htm?id=V00-jR_ViD4gabcp.GO, 13.10.2008.
- Bayer (2007a): Baytubes C 150 P datasheet.
http://www.baytubes.de/downloads/datasheet_baytubes_c_150_p.pdf, (24.04.2008).
- Bayer (2007b): Baytubes C 150 HP datasheet.
http://www.baytubes.de/downloads/datasheet_baytubes_c_150_hp.pdf, (24.04.2008).

- Bayer (2007c): Pressemitteilung der Bayer MaterialScience AG vom 5. September 2007,
http://www.press.bayer.com/baynews/baynews.nsf/id/BFA9C053DB78E9B7C125734C0052EEBF?Open&ccm=010050&gcsId=dc6j1z5yh1lo28khlzc57lfb_2t6w (15.05.2008).
- Bayer (2008a): Abbildungen von der aktuellen Baytubes-Homepage der Bayer MaterialScience AG. <http://www.baytubes.com/> (15.05.2008).
- Bayer (2008b): Stoff- und Energiestromdatenerhebung (nicht veröffentlicht), Leverkusen.
- Battelle Memorial Institute and Foresight Nanotech Institute (2007): Productive Nanosystems. A Technology Roadmap,
www.e-drexler.com/d/07/00/Nanotech_Roadmap_2007_main.pdf (20.02.2008).
- Beard, M. C.; Knutsen, K. P.; Yu, P.; Luther, J. M.; Song, Q.; Metzger, W. K.; Ellingson, R. J.; Nozik, A. J. (2007): Multiple Exciton Generation in Colloidal Silicon Nanocrystals. *Nano Lett.*; 2007; 7(8) pp 2506 - 2512
- Berger, F.; Loeffler, J. (2005): SWOT Analysis. Concerning the Use of Nanomaterials in the Energy Sector. *Nanomaterial Roadmap 2015*, Karlsruhe.
- Berube, V.; Radtke, G.; Dresselhaus, M.; Chen, G. (2007): Size effects on the hydrogen storage properties of nanostructures metal hydrides: a review. *International Journal of Energy Research*, 31 (2007), 637-663.
- BINE Informationsdienst (2002): Antireflexglas für solare Anwendungen. Bonn.
- BMBF (Hrg.) (2006): Nano-Initiative – Aktionsplan 2010. Bonn, Berlin.
- BMBF (2007): Bericht zur technologischen Leistungsfähigkeit Deutschlands 2007. Berlin.
- BMBF (2006): Bericht zur technologischen Leistungsfähigkeit Deutschlands 2006. Berlin.
- Bosch, M. (2007): Test & Technik: Solaris Urbino 18 Hybrid. *Stadtbus.de Online-Busmagazin*
http://www.stadtbus2.de/magazin/m_tut_solaris-hybrid.htm (23.02.2008).
- Bosio, A.; Nicola, R.; Samantha M.; Vittorio C. (2006): Polycrystalline CdTe thin films for photovoltaic applications. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 52 (2006), 247-279.
- Breitkopf, M. (2008) Telefonische Mitteilung, Mitarbeiter des Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme, Dresden, 10.04.2008.

- BSI (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik) (2007): Nanotechnologie. Bonn, <http://www.bsi.de/literat/studien/nanotech/Nanotechnologie.pdf> (24.07.2008).
- Cabot (2008) Zitat von der Internetpräsentation des Unternehmens. „Thermal Wrap is at least 100% better than that of traditionally used insulation materials in building and construction such as mineral wool, fiberglass, perlite, gypsum and others.”, <http://www.cabot-corp.com/cws/businesses.nsf/CWSID/cwsBUS200807091651PM8363?OpenDocument&ctM=&ctPF=Aerogel&PF=Aerogel&Mkt=Daylighting>, 13.10.2008.
- Cheng, F. Y.; Chen, J. (2006): Storage of hydrogen and lithium in inorganic nanotubes and nanowires. *Journal of Materials Research*, 21 (2006), 2744-2757.
- Chemical Industry Vision2020 Technology Partnership (2003a): Chemical Industry R&D Roadmap for Nanomaterials By Design: From Fundamentals to Function. <http://www.chemicalvision2020.org/nanomaterialsroadmap.html> (20.03.2008).
- Chemical Industry Vision2020 Technology Partnership (2003b): Implementation Plan for Chemical Industry R&D Roadmap for Nanomaterials by Design, http://www.chemicalvision2020.org/pdfs/ChemInd_Nanotech_Impl_Plan_9May06.pdf (20.03.2008).
- Chemgapedia (o.J.): Polyanilin, <http://www.chemgapedia.de/vsengine/popup/vsc/de/glossar/p/po/polyanilin.glos.html> (16.04.2008).
- Chiang, Y.-M. (2007): The Enabling Role of Nanomaterials in Lithium Battery technology for Improved Energy Utilization and Conservation. Vortragspräsentation auf der “Pollution Prevention through Nanotechnology Conference”, September 26, 2007, Arlington.
- Cientifica Ltd (2007): Nanotech: Cleantech. Quantifying the Effect of Nanotechnologies on CO₂ Emissions, London.
- CML (2001): Dutch Handbook on LCA (CLM). <http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/lca2.html>, (16.04.2008).
- Colvin, V. (2006): Nanomaterials in the Environment. Vortrag auf Nanoforum-Workshop “Nano & the Environment”, 30 and 31 March 2006, Brüssel.
- Corberán, V. C. (2006): CONCORDE - Activities on Nano Metal Oxide Catalysts for Environmental Remediation. Vortrag auf Nanoforum-Workshop “Nano & the Environment”, 30 and 31 March 2006, Brüssel.

- Daimler (2007): Daimler kündigt neuen Mercedes-Benz Hybridbus an. Pressemitteilung vom 21. Mai 2007, Stuttgart, <http://www.daimler.com/dccom/0-5-7179-49-862463-1-0-0-0-0-0-8668-7165-0-0-0-0-0-0-0-0.html> (23.02.2008).
- Dicks, A. L. (2006): The role of carbon in fuel cells. *Journal of Power Sources*, 156 (2006), 128–141.
- DIN EN ISO 14040 (2006): Umweltmanagement - Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen. Berlin.
- Dyckerhoff (2008): Nanostrukturierte Steuerungskomponenten in Normzement für ultrahochfeste Betone. Wiesbaden, <http://www.dyckerhoff.de/online/download.jsp?idDocument=2334&instance=2> (20.05.2008).
- Ecoinvent (2007): Ecoinvent Ökobilanzdatenbank v2.01.
- Eckelman, M. J.; Zimmerman, J. B.; Anastas, P. T. (2008): Toward Green Nano. E-factor Analysis of Several Nanomaterial Syntheses. In: *Journal of Industrial Ecology*, Vol 12 (3), p.316-328.
- Eickenbusch, H.; Hoffknecht, A; Holtmannspötter, D. et al (2003): Ansätze zur technischen Nutzung der Selbstorganisation. Monitoring-Bericht. Düsseldorf: VDI-Technologiezentrum.
- EuroNanoForum (2007): EuroNanoForum 2007. Nanotechnology in Industrial Applications. Proceedings of the Forum, 19-21 June 2007, Düsseldorf.
- EPA (U.S.Environmental Protection Agency) (o.J.): National Center For Environmental Research, Research Projects: Nanotechnology: Life Cycle Assessment, http://es.epa.gov/ncer/nano/research/nano_lca.html (03.03.2008).
- EPA (U.S.Environmental Protection Agency) (2001a): Printed Wiring Board Surface Finishes Cleaner Technologies Substitutes Assessment. <http://www.epa.gov/opptintr/dfe/pubs/pwb/ctsasurf/pwb-pub.htm>, (25.05.2008).
- EPA (U.S.Environmental Protection Agency) (2001b): Alternative Technologies for Surface Finishing. Cleaner Technologies for Printed Wiring Board Manufacturers. http://www.epa.gov/opptintr/dfe/pubs/pwb/tech_rep/Surface_Finishing.pdf, (25.05.2008).
- EPA (U.S.Environmental Protection Agency) (2007): Proceedings of the Interagency Workshop on the Environmental Implications of Nanotechnology, September 5-7, 2007, Washington DC.

- Evonik (2008): Evonik Joint Venture nimmt in Korea zusätzliche Kapazitäten für Wasserstoffperoxid in Betrieb. Pressemitteilung der Evonik Industries vom 15.01.2008, Frankfurt.
- Fecht, H.-J.; Ilgner, J. Köhler, T., Mietke, S., Werner, M. (2003): Nanotechnology Market and Company Report – Finding Hidden Pearls. WMtech Center of Excellence Micro and Nanomaterials. Universität Ulm.
- Fiedeler, U. (2006): The Role of Nanotechnology in Chemical Substitution. Karlsruhe.
- Fleischer, T.; Grunwald, A. (2005): Die langfristige Perspektive im Blick. Forschungs- und Technologiepolitik. Politische Ökologie 23(2005)97-98, S. 69-71.
- Friedl, C. (2007): Tiefenreinigung für verseuchte Böden. In: Berliner Zeitung, 2./3.10.2007.
- Führ, M.; Hermann, A.; Merenyi, S.; Moch, K.; Möller, M. (2007): Rechtsgutachten Nano-Technologien – ReNaTe. UBA Texte-Band 10/07, Dessau.
- Gleich, A. von; Rubik, F. (1996): Umwelteinflüsse Neuer Werkstoffe. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Gleich, A. von; Steinfeldt, M.; Petschow, U. (2008): A suggested three-tiered approach to assessing the implications of nanotechnology and influencing its development. In: Journal of Cleaner Production, 16 (8), p.899-909.
- Gleiche, M., Hoffschulz, H., Lenhart, S. (2006): Nanotechnology in Consumer Products. Nanoforum Report, www.nanoforum.org.
- Grätzel, M. (2003): Dye-sensitized solar cells. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 4 (2003), 145–153.
- Grünweg, T. (2008): Auto voller Akkus. Spiegelonline, 18.10.2008, <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,584239,00.html>, 18.10.2008.
- Günes, S.; Neugebauer, H.; Sariciftci, N. S. (2007): Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells. Chem. Rev. 107 (2007), 1324-1338.
- Guston, D. H.; Sarewitz, D. (2001): Real-Time Technology Assessment. Technology in Society. 23 (4), 98-118.
- Gutsch, A. (2007): Keramikfolie mit Power. In: CHEManager, 22/2007.
- Healy, M. L.; Dahlben, L. J.; Isaacs, J. A. (2008): Environmental Assessment of Single-Walled Carbon Nanotube Processes. In: Journal of Industrial Ecology, Vol 12 (3), p.376-393.
- Hedderich, R. (2007): Energieversorgung sichern durch elektrochemische Energiespeicher – auch mit Nanomaterialien. Nanotechnik 01/07, 69-70, www.nanomat.de/publikationen/nano3.pdf (30.08.2007).

- Hessen Agentur GmbH (Hrsg.): (2005) Einsatz von Nanotechnologie in der hessischen Umwelttechnologie – Innovationspotenziale für Unternehmen. Wiesbaden.
- Helpman, G. (ed.) (1998): General Purpose Technologies and Economic Growth. MIT Press. Cambridge.
- House, E. (2007): Nano-Based Lithium-Ion batteries for Electric Vehicles. Vortragspräsentation auf der "Pollution Prevention through Nanotechnology Conference", September 26, 2007, Arlington.
- Hrubesh, L. W. (1998): Aerogel applications. Journal of Non-Crystalline Solids 225(1), 335-342.
- Hutchison J. (2006): Green Nanoscience: New Science for the Environment. Vortrag auf Safer Nano 2006, March 6, 2006, Portland.
- Hutchison, J. (2007): Toward Greener Production of Nanomaterials: Lessons from Functionalized Nanoparticle Synthesis. Vortrag auf Safer Nano 2007, March 12, Eugene.
- IFAM (o.J. a): Produktblatt Oberflächentechnik-ND-Plasmatechnik-PermaClean, Bremen, <http://www.ifam.fraunhofer.de/2804/fachinfo/infoblaetter/Produktblatt-2804-DE-Oberflächentechnik-ND-Plasmatechnik-PermaClean.pdf> (30.07.2007).
- IFAM (o.J. b): Produktblatt Oberflächentechnik-ND-Plasmatechnik- BestSKIN, Bremen, <http://www.ifam.fraunhofer.de/2804/fachinfo/infoblaetter/Produktblatt-2804-DE-Oberflächentechnik-ND-Plasmatechnik-BestSKIN.pdf> (30.07.2007).
- Inopor (o.J.): Diafiltration zur Gewinnung von modifiziertem Inulin mit inopor® - Nanofiltrationsmembranen. Anwendungsdarstellung, Hermsdorf, http://www.inopor.de/de/app4_d.html (25.09.2008)
- Institute of Nanotechnology (2007): Nanotechnology – Products and Processes for Environmental Benefit. Conference Handbook, 16.-17. Mai 2007, London.
- ItN (o.J.) Anwendungsbeispiel Giesserei, Saarbrücken, http://www.itn-nanovation.com/main.asp?page=produkte&subpage=BU1_Giesserei (05.07.2007).
- Karn, B. (2006): A Proactive Environmental Perspective on Nanotechnology. Vortrag auf Safer Nano 2006, March 6, 2006, Portland.
- Kazmerski, L. L. (2006): Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, 150 (2006), 105–135.

- Kempkens, W. (2008): Blitz-Kur für den Motor. Eine Nanobeschichtung von Rewitec schützt Antriebsaggregate und reduziert die Emissionen. In: Wirtschaftswoche vom 21.01.2008.
- Keßenich, E. (2006): Nanotechnology at BASF – Innovation and Sustainable Development with nanotechnology. Vortrag auf Nanoforum-Workshop “Nano & the Environment”, 30 and 31 March 2006, Brüssel.
- Khanna, V.; Bakshi, B. R.; Lee, J. (2008): Carbon Nanofiber Production : Life Cycle Energy Consumption and Environmental Impact. In: Journal of Industrial Ecology, Vol 12 (3), p.394-410.
- Kolb, St.; Kessler, A.; Lambauer, J. (2007): Auswirkungen der Nanotechnologie auf die Energiewirtschaft. et Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Heft 3 (2007) Jg. 57, S. 20 - 24, Hrsg. etv , Essen.
- Kühne, W.; Lehnberger, C. (2006): Oberflächen von Leiterplatten. Produktion von Leiterplatten und Systemen 9 / 2006,.1-4; http://www.fed.de/downloads/Oberflaechen_von_LP-plus1_.pdf, (25.05.2008).
- Kushnir, D.; Sandén, B. A. (2008): Energy Requirements of Carbon Nanoparticle Production. In: Journal of Industrial Ecology, Vol 12 (3), p.360-375.
- Lambauer, J.; Kolb, St.; Kessler, A. (2007): Impact of nanotechnology on the German energy sector (Poster abstract). In: Tagungsband des EuroNanoForums – Nanotechnology in Industrial Applications – European and International Forum on Nanotechnology vom 19. - 21. Juni 2007 in Düsseldorf, veranstaltet von Federal Ministry of Education and Research, Berlin.
- Lee, J. K. & Gould, G. L. (2007): Polydicyclopentadiene based aerogel: a new insulation material. Journal of Sol-Gel Science and Technology 44(1), 29-40.
- Legler, H.; Krawczyk, O.; Leidmann, M.; Rammer, C.; Löhlein, H.; Frietsch, R. (2007): Zur technologischen Leistungsfähigkeit der deutschen Umweltschutzwirtschaft im internationalen Vergleich. Studien zum deutschen Innovationssystem, Nr. 20-2007.
- Lekas, D. (2005a): Analysis of Nanotechnology from an Industrial Ecology Perspective Part I: Inventory & Evaluation of Life Cycle Assessments of Nanotechnologies. Download unter <http://www.nanotechproject.org/15/analysis-of-nanotechnology-from-an-industrial-ecology-perspective> (16.05.2007).
- Lekas, D. (2005b): Analysis of Nanotechnology from an Industrial Ecology Perspective. Part II: Substance Flow Analysis Study of Carbon Nanotubes. Download unter <http://www.nanotechproject.org/15/analysis-of-nanotechnology-from-an-industrial-ecology-perspective> (27.06.2006).

- Lloyd, S.; Lave, L. (2003): Life Cycle Economic and Environmental Implications of Using Nanocomposites in Automobiles. *Environmental Science & Technology*. 37(15), 3458-66.
- Lloyd, S.; Lave, L.; Matthews, H. S. (2005): Life Cycle Benefits of Using Nanotechnology to Stabilize Platinum-Group Metal Particles in Automotive Catalysts. *Environmental Science & Technology*. Published online January 15.
- Löfken, J. O. (2008): Sprit sparen mit Nanoteilchen. In: *Die Welt*. 03.01.2008.
- Luther, W.; Malanowski, N. (VDI)(2004) *Innovations- und Technikanalyse: Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt*. Düsseldorf, VDI Technologiezentrum GmbH.
- Mackenzie, K.; Schierz, A.; Georgi, A.; Kopinke, F.-D. (2008): Colloidal activated carbon and carbo-iron – novel materials for in-situ groundwater treatment. *Global NEST Journal*, 10 (1), 54-61.
- Mao, S. S.; Chen, X. B. (2007): Selected nanotechnologies for renewable energy applications. *International Journal of Energy Research*, 31 (2007), 619-636.
- Matheys, J.; Van Autenboer, W.; Van Mierlo, J. (2005): SUBAT: Sustainable Batteries. OverallAssessment. Final Public Report, Brussel, <http://www.battery-electric.com/subatdocs/WP5-006.pdf> (08.11.2007).
- Matheys, J.; Van Autenboer, W.; Timmermans, J.-M.; Van Mierlo, J.; Van den Bossche, P.; Maggetto, G. (2007): Influence of functional unit on the life cycle assessment of traction batteries. *International Journal of LCA*. May 2007, vol.12, n. 3, 191-196.
- Meijer, A.; Huijbregts, M. A. J.; Schermer, J. J.; Reijnders, L.. (2003): Life-cycle Assessment of Photovoltaic Modules: Comparison of mc-Si, InGaP and InGaP/mc-Si Solar Modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 11 (2003), 275–287.
- Mohr, N. J.; Schermer, J. J.; Huijbregts, M. A. J.; Meijer, A.; Reijnders, L. (2006): Life Cycle Assessment of Thin-film GaAs and GaInP/GaAs Solar Modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 15 (2007), 163–179.
- Möhrle, M. G.; Isenmann, R. (Hrsg.) (2008): *Technologie-Roadmapping. Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen*. Berlin et al. Springer.
- Möller, H.-J. (2005): Entwicklung der Rohstoffsituation in der Photovoltaik. In: Kausch, P.; Matschullat, J. (Hrsg.) (2005): *Rohstoffe der Zukunft: Neue Basisstoffe und neue Energien*. Frank & Timme, Berlin, 89-111.

- MONA (Merging Optics and Nanotechnologies) consortium (2007): A European roadmap for photonics and nanotechnologies. http://www.ist-mona.org/pdf/MONA_v14_final.pdf (13.03.2008).
- Ministry of Research, Science and Technology (2006): Roadmaps for Science : nanoscience + nanotechnologies. New Zealand, www.morst.govt.nz/Documents/work/roadmaps/MoRST-Nanotechnology-Roadmap.pdf (20.03.2008).
- Murdock, S. (2006): Nanobusiness Matters. Vortrag auf Safer Nano 2006, March 6, 2006, Portland.
- Nanoforum and the Institute für Environment and Sustainability (2006): Nano & the Environment. Workshop Report, 30 and 31 March 2006, Brüssel.
- Nanogate (o.J. a): Anwendungsbeispiel Druckmaschinenindustrie, Saarbrücken, <http://www.nanogate.de/de/produktveredelung/beispiele/industrial-systems/druckmaschinenindustrie.php> (24.07.2007).
- Nanogate (o.J. b): Anwendungsbeispiel Maschinenbau / Werkzeugbau, Saarbrücken, <http://www.nanogate.de/de/produktveredelung/beispiele/industrial-systems/maschinenbau-werkzeugbau.php>
- Ni, M.; Leung, M. K. H.; Leung, D. Y. C.; Sumathy, K. (2007): A review and recent developments in photocatalytic water-splitting using TiO₂ for hydrogen production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11 (2007), 401–425.
- Nasa (2005): Nanotechnology Program Content. www.ipt.arc.nasa.gov/Graphics/nanotech_nasamissions.pdf (20.03.2008).
- OECD/EUROSTAT (Hrsg.) (1999): The Environmental Goods and Services Industry: Manual for Data Collection and Analysis, OECD, Paris.
- Ormecon (o.J.): Organische Metalle – Leitfähige Polymere. Download unter <http://www2.ormecon.de/Environment/Factor10.html> (23.02.2007).
- Ormecon (2008): Stoff- und Energiestromdatenerhebung (nicht veröffentlicht), Ammersbek .
- Osterwalder, N, Capello, C, Hungerbühler, K, Stark, WJ (2006): Energy consumption during nanoparticle production: How economic is dry synthesis? Journal of nanoparticle Research. 8:1-9.
- Paschen, H.; Coenen, C.; Fleischer, T. et al. (2003): TA-Projekt Nanotechnologie. Arbeitsbericht Nr. 92. Berlin, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB).

- Petkewich, R. (2008): Toxic Socks. Silver nanoparticles intended to control odor release in the wash. Chemical & Engineering News, 07.04.2008, <http://pubs.acs.org/cen/news/86/i15/8615news1.html>, (05.09.2008)
- Polyone (2002): Bergadur® Polybutylenterephthalat (PBT). Produktprospekt der Fa. Polyone, http://www.polyone-bergmann.de/produkte/Bergadur_DE.pdf (07.05.2008).
- Pridöhl, M., Zimmermann G., Hartwig A., Lühring A. (2005): Kleben mit Magnetfeld. Automobil Produktion 02/2005, 78.
- Proll, G., Gauglitz G. (2006): Nanostructured Environmental Biochemical Sensor for Water Monitoring. Vortrag auf Nanoforum-Workshop "Nano & the Environment", 30 and 31 March 2006, Brüssel.
- Renfroe, B. (2006): Environmental Best Known Practices. Vortrag auf Safer Nano 2006, March 6, 2006, Portland.
- Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI), Stifterverband-Wissenschaftsstatistik, Lehrstuhl für Wirtschaftspolitik insbesondere Wettbewerbstheorie und -politik an der Ruhr-Universität Bochum und Ruhr-Forschungsinstitut für Innovations- und Strukturpolitik (2008): Innovationsbericht 2007. Zur Leistungsfähigkeit des Landes Nordrhein-Westfalen in Wissenschaft, Forschung und Technologie. Teil B: Schwerpunktbericht für das Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Technologie des Landes Nordrhein-Westfalen. Endbericht Dezember 2007.
- Rickerby, D. G. (2006): Development of Nanostructured Thin Film Sensors for Monitoring NO₂ and CO. Vortrag auf Nanoforum-Workshop "Nano & the Environment", 30 and 31 March 2006, Brüssel.
- Roco, 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, (19.03.2004).
- Rung, R. D. (2007): From Blue Sky to Green Dollars – Why Safer Nano is a Win-Win. Vortrag auf Safer Nano 2007, March 12, Eugene.
- Sanden, B. A.; Kushir, D. (2007): Energy balance of carbon nanoparticle applications: a technology assessment of production and use systems. Vortrag auf dem EuroNanoForum, 19-21 June 2007, Düsseldorf.
- Schischke, K.; Griese, H. (2004): Is small green? Life Cycle Aspects of Technology Trends in Microelectronics and Microsystems. Beitrag für die On-Line Conference InLCA/LCM, 11-24 July 2004,

- http://www.lcacenter.org/InLCA2004/papers/Schischke_K_paper.pdf, (25.05.2007).
- Schmidt, K. F. (2007a): Nanofrontiers. Vision for the Future of Nanotechnology. (Workshopreport), PEN 6, Washington, <http://www.nanotechproject.org/reports>, (16.03.2007).
- Schmidt, K. F. (2007): Green Nanotechnology: It's easier than you think. (Symposiumsreport), PEN 8, Washington, <http://www.nanotechproject.org/reports>, (16.03.2007).
- Schmidt, T. (2006): Antibeschlagsschichten für Automobil und Optik. Beitrag für OTTI – Fachforum Funktionale Oberflächenbeschichtungen im industriellen Einsatz.
- Schulz, R. (o.J.): Moderne Galvanikmethoden in der Leiterplattenfertigung. http://www.fed.de/downloads/schulz_galvanik.pdf, (25.03.2008).
- Skouloudis, A. N. (2006): Microsensor Network for Airquality Monitoring. Vortrag auf Nanoforum-Workshop "Nano & the Environment", 30 and 31 March 2006, Brüssel.
- Solaris (2008a): Technische Beschreibung / Konstruktion. <http://www1.solarisbus.pl/de/hybrid,konstruktion.html> (23.02.2008).
- Solaris (2008b): Der erste Hybridbus in Polen. Pressemitteilung vom 04.04.2008, <http://www1.solarisbus.pl/de/busmania,aktualnosci,0,367.html>, (08.04.2008).
- Sprenger, R.-U.; Rave, T.; Edler, D. (2003): Beschäftigungspotenziale einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung. Umweltbundesamt Forschungsbericht 200 14 152.
- Statistisches Bundesamt (2008):: Statistisches Unternehmensregister: Unternehmen nach Wirtschaftsgruppen und Sondergrößenklassen der sozialversicherungspflichtigen Beschäftigten im Berichtsjahr 2005. Registrierstand: 31.12.2007.
- Steinbeiss-Europa-Zentrum (2005): Nanomaterial Roadmap 2015. SWOT Analysis Concerning the Use of Nanomaterials in the Energy Sector, http://www.nanoroad.net/download/swot_e.pdf (14.03.2008).
- Steinbeiss-Europa-Zentrum and Forschungszentrum Karlsruhe (2006): Nanomaterial Roadmap 2015. Roadmap Report Concerning the Use of Nanomaterials in the Energy Sector, http://www.nanoroad.net/download/roadmap_e.pdf (14.03.2008).

- Steinbeiss-Europa-Zentrum and FFG (2005): Nanomaterial Roadmap 2015. SWOT Analysis Concerning the Use of Nanomaterials in the Automotive Sector, http://www.nanoroad.net/download/swot_ai.pdf (14.03.2008).
- Steinbeiss-Europa-Zentrum and FFG (2006): Nanomaterial Roadmap 2015. Roadmap Report Concerning the Use of Nanomaterials in the Automotive Sector, http://www.nanoroad.net/download/roadmap_ai.pdf (14.03.2008).
- Steinbeiss-Europa-Zentrum and Comite Richelieu (2005): Nanomaterial Roadmap 2015. SWOT Analysis Concerning the Use of Nanomaterials in the Aeronautics Sector, http://www.nanoroad.net/download/swot_as.pdf (14.03.2008).
- Steinbeiss-Europa-Zentrum and Comite Richelieu (2006): Nanomaterial Roadmap 2015. Roadmap Report Concerning the Use of Nanomaterials in the Aeronautics Sector, http://www.nanoroad.net/download/roadmap_as.pdf (14.03.2008).
- Steinfeldt, M.; Petschow, U.; Hirschl, B. (2003): Anwendungspotenziale nanotechnologiebasierter Materialien. Analyse ökologischer, sozialer und rechtlicher Aspekte, Schriftenreihe des IÖW 169/03, Berlin.
- Steinfeldt, M.; von Gleich, A.; Petschow, U.; Haum, R.; Chudoba, T.; Haubold, S. (2004): Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte. Schriftenreihe des IÖW 177/04. Berlin. Download unter http://www.bmbf.de/pub/nano_nachhaltigkeit_ioew_endbericht.pdf (15.05.2007).
- Steinfeldt, M.; Wagner, G. (2005): Entwicklung von kleinsten Teilchen. Farbe + Lack, Vol 111, S.152-157.
- Steinfeldt, M.; von Gleich, A.; Petschow, U.; Haum, R. (2007): Nanotechnologies, Hazards and Resource Efficiency. Springer Heidelberg.
- Steinfeldt, M. (2008): Nano(bio)technologie im interdisziplinären Diskurs – Erkenntnisse aus der prospektiven Technikbewertung von Nanotechnologien und Ansätze zu deren Gestaltung. In: Busch, R.J. (Hg.): Nano(bio)technologie im öffentlichen Diskurs. Herbert Utz Verlag München, S. 72-92.
- SUBAT (2005): SUBAT: Sustainable Batteries. Final Report. Brussel, <http://www.battery-electric.com/subatdocs/WP6-031.pdf> (08.11.2007).
- Suzuki, T. (2006): Flat panel displays for ubiquitous product applications and related impurity doping technologies. Journal of Applied Physics, 99 (2006), 111101-(1-15).

- Tarascon JM (2006a): Towards the Next Generation of Li-ion Batteries Based On Nanomaterials. Vortrag auf Nanoforum-Workshop "Nano & the Environment", 30 and 31 March 2006, Brüssel.
- Tarascon, JM. (2006b): Towards the Next Generation of Li-ion Batteries based on Nanomaterials. Vortragspräsentation auf dem Workshop JRS Ispra, April 3, 2006, Brüssel.
- The Institute of Nanotechnology (2006): Roadmaps at 2015 on Nanotechnology – Application in the Sectors of Materials, Health & Medical Systems, Energy. Road Maps for Nanotechnology in Energy, <http://www.nanoroadmap.it/> (18.03.2008).
- Timm (2007): Hybrid-Bus – Auf Linie gebracht. Artikel vom 13.04.2007, <http://www.sueddeutsche.de/automobil/artikel/933/109824/>, (12.11.2007).
- Ullmann's Encyklopädie der technischen Chemie (1985-1996) 5. Auflage, 37 Bände, Verlag Chemie, Weinheim.
- Umweltbundesamt (2006): Nanotechnik: Chancen und Risiken für Mensch und Umwelt. Berlin. <http://umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/nanotechnik.pdf> (16.03.2007).
- U.S. Department of Energy-Office of Energy Efficiency and Renewable Energy's (DOE-EERE) (2007): Nanomanufacturing for Energy Efficiency. Workshop report, June 5-6, 2007 Baltimore, Maryland, http://www.bcsmain.com/mlists/files/NanoWorkshop_report.pdf (12.03.2008).
- U.S.Environmental Protection Agency (2001): Printed Wiring Board Surface Finishes Cleaner Technologies Substitutes Assessment. <http://www.epa.gov/opptintr/dfe/pubs/pwb/ctsasurf/pwb-pub.htm>, (25.11.2008).
- U.S.Environmental Protection Agency (2001): Alternative Technologies for Surface Finishing. Cleaner Technologies for Printed Wiring Board Manufacturers. http://www.epa.gov/opptintr/dfe/pubs/pwb/tech_rep/Surface_Finishing.pdf, (25.03.2008).
- Van den Bossche, P.; Vergels, F.; Van Mierlo, J.; Matheys, J.; Van Autenboer, W. (2006): SUBAT: An assessment of sustainable battery technology. Journal of Power Sources, Volume 162, Issue 2, 22 November 2006, Pages 913-919.
- VDI TZ (Luther, W., N. Malanowski, G. Bachmann, A. Hoffknecht, D. Holtmannspötter, A. Zweck) (2004): Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt. Innovations- und Technikanalyse. VDI TZ. Düsseldorf.
- VDI/VDE - Innovation und Technik GmbH (VDI/VDE-IT) (2005): Roadmaps at 2015 on Nanotechnology – Application in the Sectors of Materials, Health & Medical

- Systems, Energy. Impact of Nanotechnology in Health and Medical Systems, <http://www.nanoroadmap.it/> (18.03.2008).
- Veltkamp, A. C.; de Wild-Scholten, M. J. (2006): Dye sensitised solar cells for large scale photovoltaics: the determination of environmental performances. Presented at the Renewable Energy 2006 9-13 October 2006, Makuhari Messe, Chiba, Japan.
- Volz, S. and Olson, W. (2004): Life Cycle Assessment and Evaluation of Environmental Impact of Carbon Nanofiber Reinforced Polymers. Submitted to the Journal of Industrial Ecology on August 2, 2004.
- Walsh, B. (2007): Environmentally Beneficial Nanotechnologies. Aylesbury.
- Wessling, B. (2001): *mstnews*, June 2001, 3/01, 41
- Wessling, B. (2004) Organische Metalle – eine Idee wird Realität. Vortrag CeNTech, Münster.
- Wigger, H. (2007): Nanotechnologische und bionische Ansätze im Anwendungsfeld Kleben und deren potenzielle Umweltentlastungseffekte. Studienarbeit im Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen (Diplom) an der Universität Bremen, Bremen.
- Wikipedia (2008): Darstellung von Stoffdaten der Elemente des Periodensystems, <http://de.wikipedia.org/wiki/Periodensystem>; Nickel: <http://de.wikipedia.org/wiki/Nickel>; Gold: <http://de.wikipedia.org/wiki/Gold>; Zinn: <http://de.wikipedia.org/wiki/Zinn>; Silber: <http://de.wikipedia.org/wiki/Silber>; Kupfer: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kupfer> (18.03.2008).
- Wild-Scholten, M. J. de/ Veltkamp, A. C. (2007): Environmental life cycle analysis of dye sensitized solar devices: current status and outlook. Conference paper presented at 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Milano, Italy, 3-7 September, 2007, <http://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-M--07-081>, (13.10.2008).
- Willems & van den Wildenberg (W&W) (2005): Roadmaps at 2015 on Nanotechnology – Application in the Sectors of Materials, Health & Medical Systems, Energy. Roadmap Report on Nanoporous materials, <http://www.nanoroadmap.it/> (18.03.2008).
- Wohlfahrt-Mehrens, M. (2007): Neue Energiespeicher für die Hybridtechnik. Nachrichten aus der GDCh-Energieinitiative, April 2007, 10-11, www.gdch.de/energie_i.pdf (30.08.2007).

- Wohlfahrt-Mehrens, M. (2008): Materialforschung und Entwicklung für die nächste Generation von Lithium-Batterien. Vortragspräsentation auf dem DECHEMA-Kolloquium Batterieentwicklung für Hybridfahrzeuge: Bedarf, Trends und Perspektiven. 24. Januar 2008, Frankfurt/M.
- Wu, F.; Xu, B. (2006): Progress on the application of carbon nanotubes in supercapacitors. *New Carbon Materials*, 21 (2006), 176-184.
- WWIC (Woodrow Wilson International Center für Scholars) (ed) (2007): Nanotechnology and Life Cycle Assessment. Synthesis of Results Obtained at a Workshop, Washington DC, 2-3 October 2006, Washington.
- WWIC (Woodrow Wilson International Center für Scholars) (2008): A Nanotechnology Consumer Products Inventory. Washington, <http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/> (25.09.2008).
- Zeysing (2005): Dispersion - the key tool for understanding, improving and using conductive polymers and organic metals; Vortragspräsentation.
- Zeysing (2007): Nanotechnologie: Kleine Strukturen – großes Risiko? Vortrag auf dem 6. Schwerpunkttreffen der Norddeutschen Initiative Nanomaterialien zum Thema „Chancen und Risiken der Nanotechnologie“, Neumünster, 12. Februar 2007.
- Zhou, B. (2007): Nano-Enabled Catalysts for the Commercially Viable Production of H₂O₂. Vortragspräsentation auf der "Pollution Prevention through Nanotechnology Conference", September 26, 2007, Arlington.