

Umweltentlastungen durch Nanotechnologie

Faktor 10 mit hohen Risiken?

Die Risiken von Nanotechnologie werden heute bereits breit diskutiert. Um eine Bewertung dieser Technologie vornehmen zu können, müssen diesen Risiken die Chancen einer Anwendung gegenübergestellt werden. Können nanotechnische Lösungen einen Beitrag zu einem nachhaltigeren Wirtschaften leisten?

Von Michael Steinfeldt und Ulrich Petschow

Nanotechnologie ist national und international ein wichtiger Förderschwerpunkt der Forschungs- und Technologiepolitik (1). Es ist zu erwarten, dass zahlreiche innovative Entwicklungen in den verschiedensten technologischen Bereichen, gesellschaftlichen Anwendungsfeldern und ökonomischen Branchen von ihnen ausgehen. Experten schreiben ihnen Potenziale zu weitreichenden Veränderungen zu, die letztlich fast alle gesellschaftlichen Bereiche erfassen können. Nanotechnologien werden als ein wesentliches Element für weitreichende Umweltentlastungen angesehen, dabei stehen im Wesentlichen Plausibilitätsüberlegungen im Vordergrund. Die sich daraus abzuleitende Frage lautet: Wie groß sind die möglichen Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte? Sind weitreichende Innovationssprünge mit entsprechenden Umweltentlastungen realistisch oder doch nur eher inkrementelle Verbesserungen?

Dieser Beitrag versucht die Beantwortung der oben genannten Fragestellung, indem erstens eine Typisierung von Umweltinnovationen eingeführt wird, zweitens Analyseergebnisse zu schon existierenden beziehungsweise in Zukunft erwartbaren nanotechnikbasierten Produkten und Anwendungen mit Umweltbezug dargestellt werden sowie drittens ein aktueller Überblick zur Quantifizierung von Umweltentlastungspotenzialen dieser sich entwickelnden Techniklinie gegeben wird.

Dabei geht es im Folgenden um die potenziellen Umweltentlastungseffekte, die potenziellen Risiken der Nanotechnologien werden hier nicht behandelt. Gute Überblicke zu den potenziellen Risiken finden sich beispielsweise in: Steinfeldt et al 2007; NanoKommission 2008, Royal Commission 2008.

Typisierung von Innovationen

Das zugrunde gelegte Verständnis von Umweltentlastungspotenzialen umfasst nicht nur die Umwelttechnik im engeren

Sinne, also sogenannte End-of-Pipe-Technologien, sondern insbesondere auch den prozess-, produktions- und produktintegrierten Umweltschutz. Damit geht es nicht zuletzt auch um die Input-Seite auf dem Weg zu einem nachhaltigen Wirtschaften, also die Verringerung und Veränderung der Quantitäten und Qualitäten der Stoff- und Energieströme, die in die Atmosphäre eintreten. Diese Typisierung von Umweltinnovationen lässt sich wie folgt noch verfeinern (Kemp 1997; Huber 2004). End-of-Pipe-Innovationen können unterteilt werden in:

- End-of-Pipe-Techniken, Luftreinhaltung,
- Entsorgung und Recycling,
- Abfall- und Abwasserbehandlung,
- Grundwasser- und Altlastensanierung.

Integrierte Innovationen können unterteilt werden in:

- produktintegrierte Innovationen,
- prozessintegrierte Innovationen,
- Energiebereich.

Eine solche Typisierung von Umweltinnovationen ist wichtig, weil mit den beiden Richtungen sehr unterschiedliche und jeweils spezifische Möglichkeiten verbunden sind. Zu berücksichtigen sind zudem Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik, welche für beide Innovationstypen von großer Bedeutung ist und organisationale, nichttechnische Umweltinnovationen wie betriebliche Umweltmanagementsysteme.

Nanotechnische Anwendungen

Die Analyse von bereits auf dem Markt befindlichen oder kurz vor der Vermarktung stehenden nanotechnischen Produkten und Prozessen mit Bezug auf Umweltschutz und Umweltentlastung ergab eine große Vielfalt an schon realisierten und potenziell erwartbaren Anwendungsbereichen. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens für das Umweltbundesamt, das im Herbst 2008 abgeschlossen wurde, wurde eine umfassende Internetrecherche, die Analyse von relevanten Internetportalen wie zum Beispiel nano-map.de sowie die Auswertung relevanter Tagungen und Workshops und der wissenschaftlichen Literatur durchgeführt.

Es konnten mehr als 200 Produkte beziehungsweise Anwendungen identifiziert werden, die zum Teil mit Umweltentlastungspotenzialen verbunden sind. Eine Einschätzung der Umweltrelevanz dieser Produkte oder Verfahren konnte dabei allein qualitativ vorgenommen werden. Diese qualitative Einschätzung wurde allerdings gestützt durch eigene Ökobilanzierungen in ausgewählten Fallbeispielen und einer entsprechenden Literaturauswertung. →

Im Bereich der klassischen Umweltschutztechnologien im Sinne einer End-of-Pipe-Strategie finden Nanotechnologien insbesondere bei Abgaskatalysatoren, fotokatalytischen Oberflächen sowie nanostrukturierten Membran- und Filtersystemen Anwendung. Die technische Entwicklung der Abgaskatalysatoren hin zu immer kleineren nanostrukturierten Partikeleinsätzen erhöht die Katalysatoreffizienz und senkt die spezifische Einsatzmenge an Edelmetallen (Steinfeldt et al 2003).

Im Bereich der integrierten Technologien sind eine Reihe von nanotechnischen Innovationen in den Bereichen Beschichtungen und Materialien mit erheblichen Umweltentlastungspotenzialen verbunden, bei gleichzeitiger Verbesserung der Funktionalitäten (siehe auch Tabelle 1). Zielrichtung ist dabei oft eine verbesserte Ressourcen- und/oder Energieeffizienz. Eine erhöhte Kratz- und Abriebfestigkeit durch Beschichtungen, Antihaftbeschichtungen und Hartstoffschichten bieten Potenzial für Effizienzsteigerungen in industriellen Anwendungen wie Kraftwerken, Druckereien, Gießereien, Bäckereien oder Lackierereien. Dadurch ist es möglich, den Werkzeugverschleiß zu minimieren, Standzeiten von Produktionswerkzeugen zu erhöhen, Trennvorgänge zu erleichtern sowie schmierstoffarme oder -freie Anwendungssysteme zu realisieren.

Abgesehen von der Erfassung des Status quo wurden erwartbare Entwicklungen im Bereich nanotechnologischer Produkte und Verfahren analysiert. Neben Expertengesprächen wurden auch technologische Roadmaps analysiert. Roadmaps dienen der Ermittlung, Beschreibung und auch der Verständigung über mögliche, erwartbare, wünschenswerte und geplante zukünftige Entwicklungen und deren Erreichung in einzelnen Technikfeldern, hier dem der Nanotechnologien (Möhrle/Isenmann 2008). Für die Frage nach der Umweltentlastung durch Nanotechnologien liegen allerdings noch keine Roadmaps vor. Da-

her wurden vorhandene Nanotechnologie-Roadmaps aus Europa, USA und Deutschland und ähnliche strategisch angelegte Publikationen gezielt auf Anwendungspotenziale im Umwelt- und Energiebereich analysiert und ausgewertet. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Abbildung 1 dargestellt. Dabei ist festzustellen, dass die größten analysierten Schnittmengen, also Nanotechnologien und Umwelt, im Energiebereich liegen. Darüber hinaus werden in den Roadmaps weitere relevante nanotechnologische Entwicklungen dargestellt, die auch den klassischen Umweltbereich betreffen beziehungsweise Licht- und Displayanwendungen sowie Sensoren zuzuordnen sind (Bachmann et al 2007). Neben der Weiterentwicklung hin zu kostengünstigeren Membranen bei der Abwasserreinigung werden neue Anwendungspotenziale bei der mobilen Trinkwasserreinigung durch Nanonetze sowie durch neuartige Filtermembranen für die Meerwasserentsalzung gesehen.

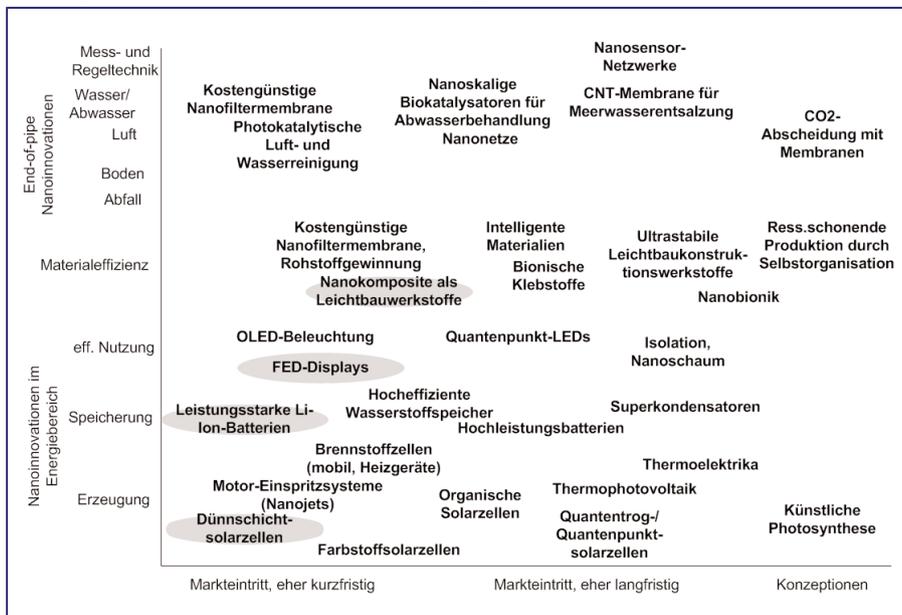
Quantifizierung von Umweltauswirkungen

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 zumeist in Anlehnung an die Ökobilanzmethode und deren Ergebnisse vermittelt Tabelle 1. Einschränkend muss aber betont werden, dass die dargestellten Arbeiten aus Datenmangel oft vereinfachende Annahmen getroffen haben beziehungsweise treffen mussten. Insbesondere für die Gebrauchsphase sowie für die Nachnutzungsphase, also Recycling und Entsorgung, existieren bisher von nanotechnischen Anwendungen und Materialien so gut wie keine Daten zu Umweltauswirkungen, sodass der Umweltnutzen bei einer umfassenden Ökobilanzierung sich durchaus relativieren könnte. Die aufgeführten Anwendungen sind außerdem in der Abbildung grau unterlegt.

Die Analysen verdeutlichen, dass der Einsatz von Nanotechnologien in einigen Bereichen deutliche Umweltentlastungspotenziale aufweist, wobei die Bandbreite sehr groß ist. Es existieren Produkte und Anwendungen mit deutlichen Entlastungswirkungen und solche, bei denen diese eher gering sind oder unter Berücksichtigung potenzieller Risiken eher von zusätzlichen Umweltbelastungen ausgegangen werden muss.

Neben diesen Arbeiten an konkreten Anwendungen beschäftigten sich bisher drei Arbeiten übergreifend mit dem Thema Kohlenstoffdioxid(CO₂)-

Abbildung 1: Erwartbare nanotechnikbasierte Anwendungen



Quelle: Steinfeldt et al 2009

Tabelle 1: Überblick über quantifizierende Studien zu nanotechnischen Innovationen

Untersuchungsgegenstand	Methode	Technischer Nutzen	Umweltnutzen	Quelle
End-of-Pipe Innovationen				
Nanoskalige Platingruppen-Metalle (PGM) in Autoabgas katalysatoren	Ökopprofil in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik	Reduzierung der PGM-Einsatzmenge um 50%	Überall reduzierte Umweltauswirkungen (10-40%)	Steinfeldt et al. 2003
Nanoskalige Platingruppen-Metalle in Autoabgaskatalysatoren	Ökologisch-ökonomische Lebenszyklusbeurteilung (EIO-LCA ¹)	Reduzierung der PGM-Einsatzmenge um 95%	Überall reduzierte Umweltauswirkungen	Lloyd et al. 2005
Vergleich von Kabinenluftfiltern mit und ohne Nanofaserbeschichtung für PKW	Ökobilanzielle Betrachtung	Reduzierung des Luftwiderstandes und der damit verbundenen Gebläseleistung	Ca. 8% geringerer Energiebedarf für das Gebläse, in Bezug auf das Gesamtsystem Umweltnutzen sehr gering	Martens et al. 2008
Produkt- und prozessintegrierte Innovationen				
Antireflexglas für Solarzellen im Vergleich zu traditionellem Glas	Messung der Effizienzsteigerung	Erhöhte solare Transmission	Bis zu 6% höhere Energieeffizienz	BINE 2002
Polypropylen-Nanokomposit in Automobilanwendungen im Vergleich zu Stahl und Aluminium	Ökologisch-ökonomische Lebenszyklusbeurteilung (EIO-LCA ¹)	Gewichtsreduktion abhängig vom Anteil an Nanokomposit	Überall reduzierte Umweltauswirkungen; große Energie- und Ressourceneinsparung	Lloyd and Lave 2003
Vergleich von konventioneller und nanotechnikbasierter Photovoltaik	Ökopprofil in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik		Verkürzte energetische Amortisationszeiten, Farbstoffsolarzelle aber mit geringerem Wirkungsgrad	Steinfeldt et al. 2003
Styrolsynthese auf Basis eines Kohlenstoffnanoröhren-Katalysators im Vergleich zum Katalysator auf Eisenoxidbasis	Ökopprofil in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik	Veränderung des Reaktionstyps, Reduzierung der Reaktions-temperatur, Veränderung des Reaktionsmediums	Knapp 50% geringerer Energiebedarf für die Styrolsynthese	Steinfeldt et al. 2004
Nanolack im Vergleich zu konventionellen Lacken	Ökopprofil in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik	Notwendige Schichtdicke geringer bei gleicher Funktionalität	5 - 8% erhöhte Ressourceneffizienz, 65% geringere VOC ² -Emissionen	Steinfeldt et al. 2004
Vergleich von konventionellen und nanotechnikbasierten Displays (OLED ³ and CNT-FED ⁴)	Ökopprofil in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik	Erhöhte Energieeffizienz, höhere Bildschirmauflösung, geringere Displaydicke	Erhöhte Energie- und Materialeffizienz; geringerer Materialinput für OLEDs, doppelt so hohe Energieeffizienz in der Nutzungsphase	Steinfeldt et al. 2004
Weißer LED ⁵ im Vergleich zu Glühlampe und Kompaktleuchtstofflampe	Ökopprofil in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik	Höhere Lebensdauer	Gegenüber Glühlampe energiezienter, gegenüber der Leuchtstofflampe erst bei Lichtausbeuten größer 65 lm/W	Steinfeldt et al. 2004
Vergleich von konventionellem und mit Nanopartikel verbessertem Ultradur-Kunststoff	BASF-Öko-Effizienzanalyse	Verbesserte Fließeigenschaften führen zu energieeffizienterer Verarbeitung im Spritzguss	Reduktion je nach Umweltwirkungskategorie zwischen 1,5% und 9%, beim Ozonabbau Verschlechterung	BASF AG 2005 Steinfeldt et al. 2009
Ferritklebstoff im Vergleich zu konventionellen Klebstoffen	Ökopprofil in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik	Energieeffizientere Klebstoffaushärtung durch Nutzung magnetischer Eigenschaften	12% (40%) höhere Energieeffizienz, abhängig von Füge-teilgrößen	Wigger 2007
Vergleich von konventionellen und nanotechnikbasierten Verfahren zur Herstellung lötfähiger Endoberflächen auf Leiterplatten	Ökobilanzieller Vergleich in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik	Notwendige Schichtdicke geringer bei gleicher Funktionalität	Gegenüber qualitativ vergleichbaren Verfahren je nach Umweltwirkungskategorie um Faktoren von 4 bis zu 390 besser	Steinfeldt et al. 2009
Vergleich von leitfähigen Folien auf Basis der Additive Carbon Black bzw. mehrwandige CNT	Ökobilanzieller Vergleich in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik	Notwendige Foliendicke geringer bei gleicher Funktionalität	Reduktion je nach Umweltwirkungskategorie zwischen 12,5% und 20%	Steinfeldt et al. 2009
Vergleich von Dieselbus mit neuen Systemen mit Hybridantrieb im ÖPNV (insb. Lithium-Ionen-Batterie)	Prospektiver ökobilanzieller Vergleich in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik	Verringerung des Dieselmotorkraftstoffverbrauchs durch Hybridantrieb	Reduktion der Umweltwirkungen von gut 20% bei der bilanzierten Zukunftsvariante (nanotechnikbasierte Li-Ionen-Batterie)	Steinfeldt et al. 2009
Vergleich von konventionellen und nanotechnik-basierten Einweg-Verpackungen	Ökobilanzieller Vergleich, insb. CO ₂ -Emissionen	Verbesserte Barriere-Eigenschaften insbesondere gegen Sauerstoff	Durch Nano-PET-Flasche gegenüber Aluminium 1/3 und Glas 60% weniger Treibhausgase	Möller et al. 2009

¹EIO-LCA: engl. Economic Input-Output Life Cycle Assessment²VOC: Flüchtige organische Verbindungen (engl. Volatile Organic Compound)³OLED: Organische Licht Emittierende Diode (engl. Organic Light Emitter Display)⁴CNT-FED: Feldemitterdisplay auf Basis von Kohlenstoffnanoröhren (engl. Carbon Nanotube-Field Emitter Display)⁵LED: Licht Emittierende Diode (engl. Light Emitter Display)

Quelle: Basiert auf Lekas (2005) und eigenen Recherchen

Minderungspotenziale durch Nanotechniken. Cientifica Ltd. untersuchte für Großbritannien die CO₂-Minderungspotenziale in den Bereichen Transport, Wärmedämmung sowie Dünnschichtsolarzellen, wobei die derzeitigen und kurzfristig bis zum Jahr 2010 realisierbaren Minderungspotenziale als sehr gering eingeschätzt werden (Cientifica Ltd. 2007). Die Minderungspotenziale bis 2010 liegen im Bereich Transport bei 2.600 Tonnen CO₂, durch Wärmedämmung bei 1.250 Tonnen CO₂. Dünnschichtsolarzellen werden bis zum Jahr 2010 noch keine Relevanz haben. Erst mittel- und langfristig wird die Realisierung signifikanter CO₂-Minderungen erwartet. Die ebenfalls auf Großbritannien gerichtete Studie von Oakdene Hollins Ltd. untersuchte die CO₂-Minderungspotenziale umfassender, indem 15 Bereiche genauer untersucht und für die fünf relevanten Bereiche Kraftstoffeffizienz, Wärmedämmung, Fotovoltaik, Energiespeicherung und Wasserstoffwirtschaft die CO₂-Einsparungspotenziale quantifiziert wurden (Walsh 2007). In der Größenordnung kommt diese Studie zu deutlich höheren Einsparpotenzialen als Cientifica. Die größten CO₂-Minderungspotenziale sind dabei langfristig, also im Zeitraum von 20 bis 40 Jahren, in den Bereichen Energiespeicherung durch Batterien für Hybridfahrzeuge sowie Wasserstoffwirtschaft zu sehen.

Das Stuttgarter Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung untersuchte Auswirkungen der Nanotechnologie auf die Energiewirtschaft in Bezug auf Energieeinsparpotenziale und den daraus resultierenden CO₂-Reduktionspotenzialen (Lambauer et al 2008). Untersucht wurden die Bereiche Beleuchtung, Haushalt, Industrie und Verkehr. Die durchgeführte Potenzialanalyse kommt für das Jahr 2030 gegenüber dem Basisjahr 2005 zu einem Reduktionspotenzial von fünf Prozent im Energieverbrauch und entsprechend zu einem Reduktionspotenzial von 7,1 Prozent der CO₂-Emissionen. Festzustellen ist dabei, dass selbst marktnahe Anwendungen lange Zeit benötigen, um signifikante Energieeinsparungen zu bewirken.

Resümee

Die Analyse von bereits auf dem Markt befindlichen oder in Zukunft erwartbaren nanotechnischen Produkten und Prozessen mit Bezug auf Umweltschutz und Umweltentlastung ergab eine große Vielfalt an schon realisierten und potenziell erwartbaren Anwendungsbereichen. Bezüglich der Umweltentlastungspotenziale verdeutlichen die vorliegenden Arbeiten, dass bisher eher inkrementelle Verbesserungen überwiegen, wie auch die nanotechnologischen Entwicklungen bisher ganz überwiegend inkrementelle Weiterentwicklungen darstellen. Einzelne Nanoinnovationen in spezifischen Anwendungsbereichen verfügen aber auch heute schon über große spezifische Umweltentlastungspotenziale, bei anderen Nanoinnovationen sind hingegen begrenzte Umweltentlastungen erwartbar.

Zusammenfassend ist damit festzuhalten, dass mit den Nanotechnologien weitgehende Umweltentlastungen möglich sind. Eine Generalisierung dieser Aussage ist allerdings nur begrenzt möglich, vielmehr müssen die jeweiligen Anwen-

dungsfelder nach ihren Entlastungspotenzialen differenziert und zugleich die potenziellen Risiken in den jeweiligen Anwendungsgebieten überprüft werden. Damit wird auch deutlich, dass es um eine Gestaltung der Technologieentwicklung geht, die den Aspekt Umweltentlastung in den Fokus stellt. Eine automatische Umweltentlastung durch den Einsatz von Nanotechnologien ist generell nicht gegeben.

Anmerkungen

- (1) Die Nanotechnologie befasst sich mit Strukturen, die in mindestens einer Dimension kleiner als 100 Nanometer sind. Die Nanotechnologie macht sich charakteristische Effekte und Phänomene zunutze, die im Übergangsbereich zwischen atomarer und mesoskopischer Ebene auftreten.

Literatur

- Bachmann, G. / Grimm, V. / Hoffknecht, A. / Luther, W. / Ploetz, Ch. / Reuschler, G. / Teichert, O. / Zweck, A.: Nanotechnologien für den Umweltschutz. Düsseldorf 2007.
- Cientifica Ltd: Nanotech: Cleantech. Quantifying the Effect of Nanotechnologies on CO₂ Emissions. London 2007.
- Huber, J.: New Technologies and Environmental Innovation. Celenham 2004.
- Kemp, R.: Environmental Policy and Technical Change. A Comparison of the Technological Impact of Policy Instruments. Cheltenham 1997.
- Lambauer, J. / Fahl, U. / Voß, A.: Auswirkungen der Nanotechnologie auf die Energiewirtschaft. Vortrag auf der Tagung NanoEnergie 2008. Hanau 2008. Internet: http://www.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/pb_pdf/NanoEnergie2008_Lambauer_IER.pdf (14.03.2009)
- Lekas, D.: Analysis of Nanotechnology from an Industrial Ecology Perspective Part I: Inventory & Evaluation of Life Cycle Assessments of Nanotechnologies. 2005. Internet: http://www.nanotechproject.org/file_download/files/Nanotech%20LCA%20Inventory_part1.pdf (14.03.2009)
- Möhrle, M.G. / Isenmann, R. (Hrsg.): Technologie-Roadmapping. Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen. Berlin 2008.
- NanoKommission: Verantwortlicher Umgang mit Nanotechnologien. Bericht der NanoKommission der Bundesregierung. Berlin 2008.
- Royal Commission on Environmental Pollution: Novel Materials in the Environment: The case of Nanotechnology. 2008. Internet: <http://www.rcep.org.uk/novelmaterials.htm> (14.03.2009)
- Steinfeldt, M. / von Gleich, A. / Petschow, U. / Pade, C. / Sprenger, R.U.: Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte. Dessau 2009, (im Erscheinen)
- Steinfeldt, M. / von Gleich, A. / Petschow, U. / Haum, R.: Nanotechnologies, Hazards and Resource Efficiency. Heidelberg 2007.
- Steinfeldt, M. / Petschow, U. / Hirsch, B.: Anwendungspotenziale nanotechnologiebasierter Materialien. Analyse ökologischer, sozialer und rechtlicher Aspekte. Schriftenreihe des IÖW 169/03, Berlin 2003.
- Walsh, B.: Environmentally Beneficial Nanotechnologies. Aylesbury 2007.

AUTOREN + KONTAKT

Michael Steinfeldt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Technikgestaltung und Technologieentwicklung der Universität Bremen.

Universität Bremen, Postfach 330440, 28334 Bremen.
Tel.: +49 421 2188766, E-Mail: mstein@uni-bremen.de,
Internet: www.tecdesign.uni-bremen.de

Ulrich Petschow ist Leiter des Forschungsfeldes Umweltökonomie und -politik am Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW).

IÖW, Potsdamer Str. 105, 10785 Berlin.
Tel.: +49 30 884594-0, E-Mail: Ulrich.Petschow@ioew.de,
Internet: www.ioew.de



(c) 2010 Authors; licensee IÖW and oekom verlag. This is an article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial No Derivates License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.