

TEXTE

33/2010

Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte

Kurzfassung

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

Kurzfassung

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 den vollständigen Band und eine englische Kurzfassung.

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

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

Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte

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.

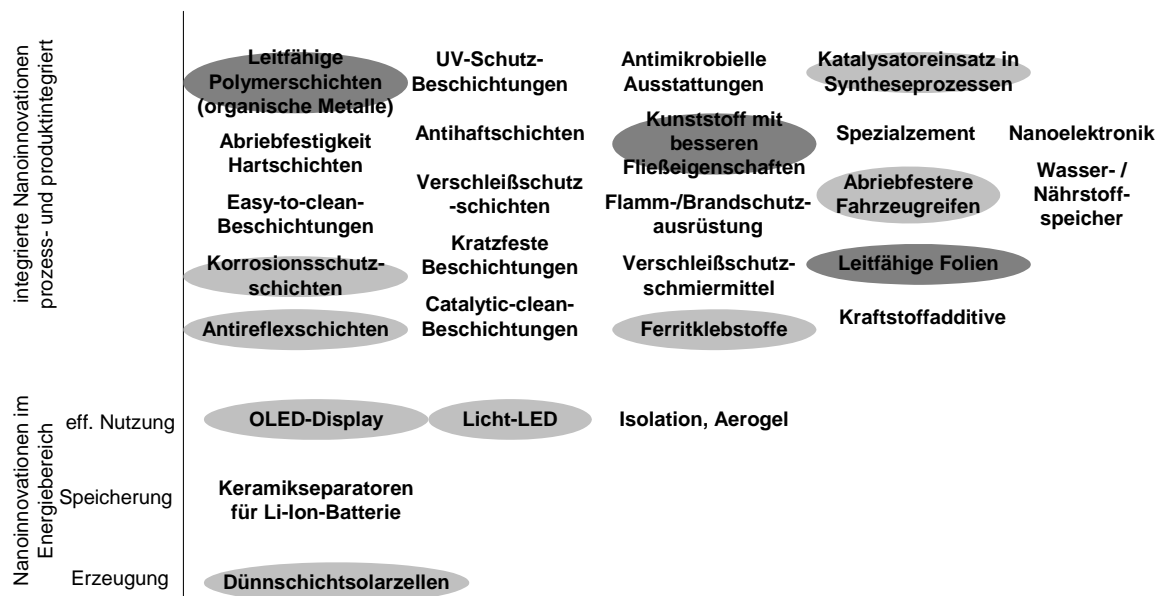
Das Vorhaben gliederte sich in vier Schritte und bediente sich dabei jeweils spezifischer Untersuchungsmethoden:

- 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.

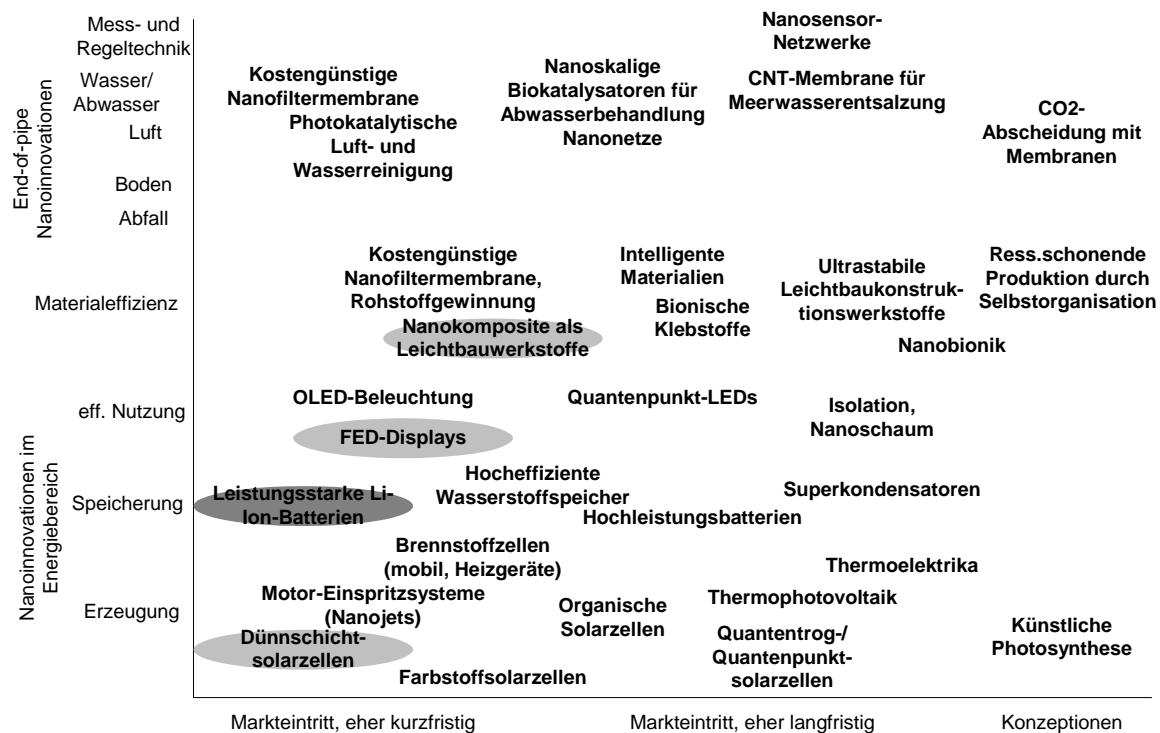
Neben den Anwendungspotenzialen im Bereich von End-of-pipe-Technologien wie Membranen (die Katalyse reicht jenseits der Abgasreinigung in vielen Bereichen ja schon weit in den integrierten Bereich hinein) verdeutlichen die folgenden Abbildungen, dass die überwiegenden und besonders weit reichenden Potenziale 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 1: Nanotechnikbasierte Produkte / Anwendungen am Markt ¹



¹ Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 2: Erwartbare nanotechnikbasierte Anwendungen²



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.

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

² Quelle: eigene Darstellung

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 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 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 Ökoprofilbetrachtungen 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 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.