

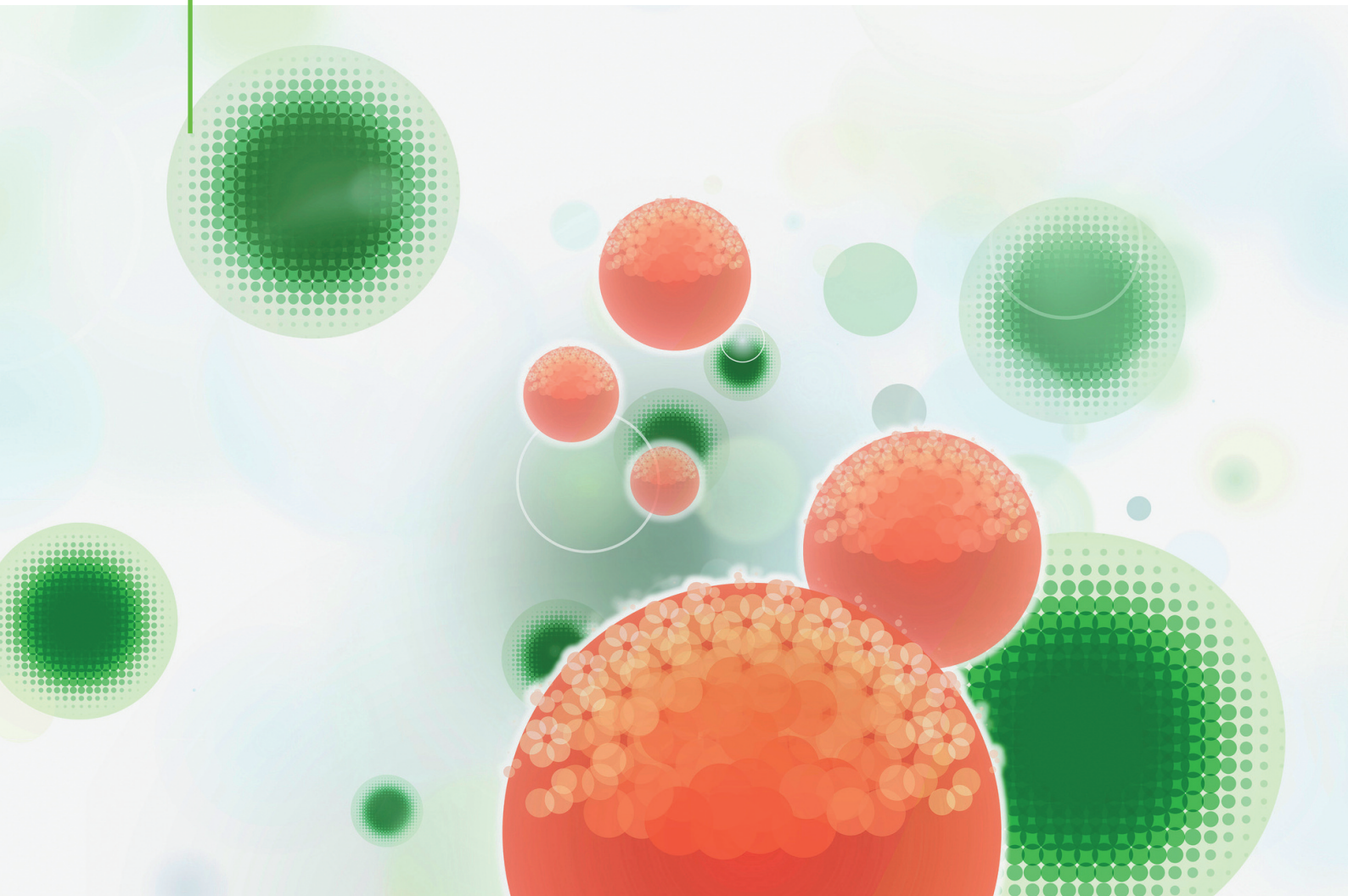


ISOE-Materialien Soziale Ökologie **39**

Anna Walz, Carolin Völker, Lea Klöppel

Nanotechnologie: eine Übersicht

Vorarbeiten zu einer sozial-ökologischen Risikoforschung



ISSN 1614-8193

Die Reihe „ISOE-Materialien Soziale Ökologie“ setzt die Reihe
„Materialien Soziale Ökologie (MSÖ)“ (ISSN: 1617-3120) fort.

Anna Walz, Carolin Völker, Lea Klöppel

Nanotechnologie: eine Übersicht

Vorarbeiten zu einer sozial-ökologischen Risikoforschung

Titelbild: © bittedankeschön – Fotolia.com

Herausgeber:

Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) GmbH

Hamburger Allee 45

60486 Frankfurt am Main

Frankfurt am Main, 2014

Zu diesem Text

Die Nanotechnologie gilt als eine der Schlüsseltechnologien der Zukunft: Die Verringerung der Teilchengröße in den nanoskaligen Bereich führt zu neuartigen physikalischen und chemischen Stoffeigenschaften, welche Innovationspotenzial in vielfältigen Anwendungsfeldern versprechen. Besonders in den letzten zwei Jahrzehnten hat die Nanotechnologie wirtschaftlich an Bedeutung gewonnen, da immer mehr nanotechnologische Entwicklungen kommerziell umgesetzt werden. Aufgrund des breiten Anwendungsspektrums und der Vielzahl unterschiedlicher Materialien ist bisher weder eine transparente Darstellung der tatsächlichen wirtschaftlichen Bedeutung noch eine adäquate Bewertung potenzieller Gesundheits- und Umweltrisiken, die aus den neuartigen nanospezifischen Eigenschaften hervorgehen könnten, möglich.

Das Papier gibt einen aktuellen Überblick über den Stand des Wissens zum Thema Nanotechnologie, wobei besonderer Fokus auf den Bereich Risiko, Toxikologie und Ökotoxikologie sowie Risikowahrnehmung und -kommunikation gelegt wird. Die Ergebnisse der Literaturstudie sollen künftig dazu dienen, zu prüfen, welchen Beitrag ein sozial-ökologischer Forschungsansatz zur nachhaltigen Entwicklung und Nutzung der Nanotechnologie leisten kann.

About this text

Nanotechnology is considered as one future key technology: The reduction of particle sizes into the nanoscale leads to novel physical and chemical properties promising innovation potential in numerous fields of applications. Especially in the last two decades, nanotechnology has gained in economic importance as more nanotechnological developments are transferred into marketable products. Due to the broad field of application and the variety of materials used, a transparent description of the actual economic significance and evaluation of possible health and environmental risks which may arise from novel nanospecific properties is not possible so far.

This article gives an overview of the state of knowledge concerning nanotechnology with focus on its risks, toxicology and ecotoxicology as well as risk perception and communication. The results of the literature survey may serve to assess how a social-ecological research approach can contribute to a sustainable use and development of nanotechnology.

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------|--|
| BAFU | Bundesamt für Umwelt, Fachbehörde für die Umwelt (Schweiz) |
| BAG | Bundesamt für Gesundheit (Schweiz) |
| BAM | Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung |
| BAuA | Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin |
| BfR | Bundesinstitut für Risikobewertung |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| BMU | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit |
| CLP | Classification, Labelling, Packaging |
| CNT | Carbon nanotubes |
| DFG | Deutsche Forschungsgemeinschaft |
| FRP | Forschungsrahmenprogramm |
| FuE | Forschung und Entwicklung |
| ICON | International Council on Nanotechnology (Internationaler Rat zur Nanotechnologie) |
| ISO | Internationale Standardisierungsorganisation |
| JRC | Joint Research Center |
| LCD | Flüssigkristallbildschirm |
| L(E)CX | X% lethal (effective) concentration (Konzentration einer Substanz, die bei X% der Versuchsorganismen den Tod (einen Effekt) auslöst) |
| LED | Licht-emittierende Diode (Leuchtdiode) |
| LUBW | Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg |
| OECD | Organisation for Economic Co-operation and Development (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) |
| OLED | organische Leuchtdiode |
| PEN | Project on Emerging Nanotechnologie |
| SCENIHR | Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks |
| SRU | Sachverständigenrat für Umweltfragen |
| REACH | Regulation concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (Verordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe) |
| UBA | Umweltbundesamt |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |
| WPMN | Working Party on Manufactured Nanomaterials (OECD-Arbeitsgruppe für Nanomaterialien) |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Schematische Darstellung der ISO-Definition von Nanoobjekten..... | 8 |
| Abbildung 2: Eingesetzte Nanomaterialien in Konsumprodukten | 14 |
| Abbildung 3: Freisetzung von Nanopartikeln aus Produkten und Anwendungen..... | 22 |
| Abbildung 4: Anzahl (öko-)toxikologischer In-vitro- und In-vivo-Studien zu Nanomaterialien..... | 24 |
| Abbildung 5: Im Rahmen der Risikobewertung arbeitsplatzrelevante Nanostoffgruppen | 26 |
| Abbildung 6: Klassifizierung verschiedener Nanomaterialien auf Basis mittlerer akuter L(E)C ₅₀ -Werte für verschiedene aquatische Organismengruppen | 28 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Beispiele für Nanomaterialien..... | 9 |
| Tabelle 2: Übersicht über globale und europäische Produktionsmengen zehn technisch hergestellter Nanomaterialien..... | 11 |
| Tabelle 3: Beispiele für bereits auf dem Markt erhältliche Nanoprodukte..... | 12 |

Inhalt

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Einleitung | 5 |
| 2 | Begriffliche Einordnung | 6 |
| | Schwierigkeiten in der Abgrenzung | 6 |
| | Nanospezifische Eigenschaften..... | 7 |
| 3 | Herstellung und Anwendungsbereiche von Nanomaterialien..... | 10 |
| | Medizin und Arzneimittel | 13 |
| | Konsumgüterbereich | 14 |
| | Automobilindustrie..... | 16 |
| | Bauindustrie | 16 |
| | Anwendungen im Umweltbereich | 17 |
| 4 | Risikoforschung: (Öko-)Toxikologie von Nanomaterialien..... | 19 |
| | Exposition..... | 20 |
| | Effekte..... | 23 |
| | Toxikologie von Nanomaterialien | 24 |
| | Ökotoxikologie von Nanomaterialien | 27 |
| | Ausblick..... | 30 |
| 5 | Risikowahrnehmung und -kommunikation..... | 31 |
| | Wahrnehmung von Nanotechnologien..... | 32 |
| | Gesellschaftlicher Dialog | 34 |
| 6 | Rechtlicher Rahmen | 36 |
| | Regelungen jenseits des Stoffrechts | 36 |
| | Stoffrecht | 36 |
| | Produktrecht..... | 37 |
| | Umweltrecht..... | 38 |
| 7 | Überblick über die bisherige Forschungsförderung | 39 |
| 8 | Zusammenfassender Ausblick: Hinweise für eine sozial-ökologische Risikoforschung..... | 41 |
| | Literaturverzeichnis..... | 44 |

1 Einleitung

Die Nanotechnologie gilt als eine der Schlüsseltechnologien der Zukunft mit hohem technischem und wirtschaftlichem Potenzial. Unter Nanotechnologie versteht man die Entwicklung und Anwendung von Materialien und Strukturen, die in mindestens einer Dimension eine Größe von ca. 1 bis 100 Nanometern haben (Nanomaterialien). Die Verringerung der Teilchengröße in den nanoskaligen Bereich führt zu veränderten physikalischen und chemischen Stoffeigenschaften wie einer erhöhten Reaktivität, Stabilität oder elektrischen Leitfähigkeit, welche für unterschiedlichste Anwendungen genutzt werden, um Produkteigenschaften zu verbessern oder neue Funktionen zu erreichen. Die Nanotechnologie findet beispielsweise Einsatz in Feldern der chemischen Industrie, dem Automobilbau, der Medizin/Pharmazie oder in Konsumgütern. Aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften können Nanomaterialien auch dazu verwendet werden, Produkte oder Herstellungsprozesse umweltfreundlicher zu gestalten. So versprechen Nanotechnologien/Nanoprodukte u.a. neue Möglichkeiten der Aufbereitung von Wasser zu Trinkwasserzwecken und der Reinigung von Abwasser sowie der Energie- und Ressourceneffizienz. Aufgrund der vielfältigen Anwendungsoptionen von Nanomaterialien nimmt die Herstellung und Verwendung synthetischer, also künstlich erzeugter Nanopartikel stetig zu.

Neben den bereits genannten Potenzialen können mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Nanoprodukten jedoch auch Risiken einhergehen, die einer Abklärung bedürfen. Im Vergleich zu anderen Stoffgruppen, wie z.B. pharmazeutischen und Pestizidrückständen, resultiert das Problem bei synthetischen Nanomaterialien nicht allein aus deren chemischen, sondern auch aus den physikalischen Eigenschaften, also der Größe, der Form und der Oberfläche. Aufgrund dieser Eigenschaften und der Vielfalt von Strukturen, Produkten und Anwendungsfeldern ist das Risikopotenzial von Nanomaterialien heterogen und schwer prognostizierbar.

Neuartige Risikostrukturen haben sich in den letzten Jahrzehnten mehrfach als große Herausforderungen für Politik und Wissenschaft erwiesen, etwa in der Nuklear- und später auch in der Gentechnologie. Diesmal hat die Politik früh die neue Aufgabe wahrgenommen; so hat das BMBF zahlreiche Aktivitäten in Deutschland gefördert. Dennoch fehlen immer noch standardisierte Messmethoden und allgemein anerkannte Richtlinien für Testverfahren. Da keine Meldepflicht für produzierte und in den Handel gebrachte Nanomaterialien gilt, ist trotz zahlreicher Forschungsprojekte das Nichtwissen über das tatsächliche Gefährdungspotenzial geblieben. Damit fehlen wichtige Voraussetzungen für eine Risikobewertung. Auch haben die Verbraucher keine Möglichkeit, (etwa über eine Kennzeichnungspflicht und deren transparente Dokumentation) zu erkennen, wo sie in ihrem Alltag überall mit Nanoprodukten in Kontakt kommen und wie sie diesen Kontakt minimieren können.

Insgesamt ist die Gesellschaft mit einem neuen Risiko konfrontiert, das sich aktuell noch nicht klar einordnen lässt. Vor diesem Hintergrund und dem Aspekt, dass es sich bei der Nanotechnologie um ein Querschnittsthema handelt, ist eine ganzheitli-

che Betrachtung dieser neuen Eingriffsdimension der Gesellschaft in die Natur erforderlich. Kaum diskutiert wird bisher, dass es sich hier um eine sozial-ökologische Problemlage handelt. Gesellschaftliche Bedürfnisse werden mittels neuartiger technologischer Möglichkeiten so befriedigt, dass unbeabsichtigte Wirkungen auf den Naturhaushalt die Folge sind, die wiederum Rückwirkungen auf die Gesellschaft haben können. Die gesellschaftliche als auch die ökologische Komponente des daraus entstehenden Risikos (bzw. des aktuell bestehenden Nichtwissens) lassen sich vor dem Hintergrund der Sozialen Ökologie zusammenführen und gemeinsam betrachten und diskutieren.

Ziel des Papiers ist es, in einem ersten Schritt einen aktuellen Überblick über den Stand des Wissens zum Thema Nanotechnologien/Nanoprodukte zu erarbeiten. Ein besonderer Fokus wird dabei auf den Stand der Forschung/Maßnahmen im Bereich Risiko, Toxikologie und Ökotoxikologie sowie auf den Bereich der Risikowahrnehmung und -kommunikation gelegt. Die Ergebnisse des Papiers sollen künftig dazu genutzt werden zu prüfen, welchen Beitrag ein sozial-ökologischer Forschungsansatz leisten kann und ob darüber, wie im vorherigen Absatz angedeutet, eine ganzheitliche Betrachtung erreicht wird.

2 Begriffliche Einordnung

Schwierigkeiten in der Abgrenzung

Der Begriff Nanomaterial ist bisher nicht einheitlich definiert. Dies liegt vor allem daran, dass die Nanotechnologie kein klar umgrenztes, sondern ein breites Technologiefeld mit sehr unterschiedlichen Anwendungsbereichen ist, wodurch eine Einigung auf eine gesetzliche Definition von Nanomaterialien erschwert wird (Paschen et al. 2004). Um Nanomaterialien jedoch regulieren und Kennzeichnungspflichten bei Produkten festlegen zu können, bedarf es einer Definition, was unter Nanomaterialien verstanden wird. Während international noch keine einheitliche, rechtlich bindende Definition existiert, gibt es von der EU-Kommission eine Empfehlung. Grundlage der Definition bilden Vorschläge der Internationalen Standardisierungsorganisation (ISO), des wissenschaftlichen Ausschusses „Neu auftretende und neu identifizierte Gesundheitsrisiken“ (SCENIHR) und des Joint Research Centers (JRC) (Greßler/Gazsó 2013). Die Definition wird zur Verwendung bei der Entwicklung von Politiken, Gesetzgebung und Forschungsprogrammen empfohlen und wurde bereits in einige spezifische verbindliche Definitionen von EU-Rechtsvorschriften integriert, die den Begriff der Nanomaterialien sektorspezifisch definieren.¹ Allerdings wurden an der Empfehlung zur Definition auch verschiedene Kritikpunkte geäußert. So wird u.a. das Fehlen messtechnischer Verfahren zur zukünftigen Prüfung der Einordnung kritisiert. Daher

¹ Zu nennen sind hier zum einen die seit Juli 2013 wirksame EU-Kosmetikverordnung und die seit September 2013 wirksame Biozidprodukte-Verordnung, sowie die ab Dezember 2014 in Kraft tretende EU-Verordnung zur Lebensmittelkennzeichnung.

soll die Definition im Dezember 2014 auf Basis aktueller technischer und wissenschaftlicher Erkenntnisse geprüft und gegebenenfalls überarbeitet werden.

Die Definitionsempfehlung der Europäischen Kommission zu Nanomaterialien lautet: Ein Nanomaterial ist ein natürliches, bei Prozessen anfallendes oder hergestelltes Material, das Partikel in ungebundenem Zustand, als Aggregat oder Agglomerat enthält, und bei dem mindestens 50 Prozent der Partikel in der Anzahlgrößenverteilung ein oder mehrere Außenmaße im Bereich von 1 nm bis 100 nm haben (EC 2011). Zusätzlich gelten auch Fullerene, Graphenflocken und einwandige Kohlenstoffröhrchen, die in einer oder mehreren Ausmaßen kleiner als 1 nm sind, als Nanomaterialien.²

Um auch nanostrukturierte Materialien in der Definition von Nanomaterialien zu berücksichtigen, wird als weiterer Parameter die Größe der inneren Struktur oder der Oberflächenstruktur herangezogen. Manche Materialien übersteigen mit ihrer Größe deutlich den Nanomaßstab, besitzen jedoch eine innere Struktur oder eine Oberflächenstruktur mit mindestens einer externen Dimension im Nanobereich (SRU 2011). Ein Beispiel dafür sind sogenannte Nanokomposite, das sind Verbundmaterialien, bei denen mindestens eine Komponente in Form von Nanopartikeln vorliegt. Für diese Materialien gibt es keine universell messbare Größenbegrenzung, sie lassen sich daher nur über die Messung der inneren Struktur erfassen (SRU 2011).

Auch wenn die Definitionen natürlich vorkommende und zufällig bei Prozessen anfallende Nanomaterialien mit einschließen, werden nur jene Verfahren und Prozesse als Nanotechnologien bezeichnet, bei denen die Herstellung und Manipulation von Materialien und Strukturen im Nanobereich nicht auf natürlichen Vorgängen im Nanomaßstab basieren. So würde beispielsweise die biotechnische Enzymproduktion mithilfe von Mikroorganismen nicht unter den Begriff Nanotechnologie fallen (Paschen et al. 2004). Dementsprechend konzentriert sich auch die aktuelle Forschung zu den Umweltauswirkungen von Nanomaterialien auf synthetisch hergestellte Nanomaterialien (Nowack/Bucheli 2007).

Nanospezifische Eigenschaften

Für die Einordnung von Nanomaterialien ist eine grundsätzliche Kategorisierung notwendig. Die internationale Organisation für Normung (ISO) und die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) differenzieren Nanomaterialien nach Nanoobjekten und nanostrukturierten Materialien (vgl. Abb. 1). Ein Nanoobjekt ist ein Material mit einem, zwei oder drei Außenmaß(en) im Nanomaßstab. Hierzu gehören Nanopartikel (in drei Dimensionen nanoskalig), Nanofasern (in zwei Dimensionen nanoskalig) und Nanoplättchen (in einer Dimension nanoskalig)

² Die Definition eröffnet weiterhin die Möglichkeit, einen Schwellenwert zwischen 1 Prozent und 50 Prozent für die Anzahlgrößenverteilung zu verwenden, wenn Umwelt-, Gesundheits-, Sicherheits- oder Wettbewerbsabwägungen dies rechtfertigen.

(ISO 2008). Bei nanostrukturierten Materialien handelt es sich um Materialien mit einer internen Nanostruktur oder einer Nanostruktur an der Oberfläche, bei denen also die Nanostruktur ein integraler Bestandteil eines größeren Objekts ist. Nanostrukturierte Materialien sind beispielsweise nanostrukturierte Pulver oder aus Nanoobjekten zusammengesetzte Nanokomposite.

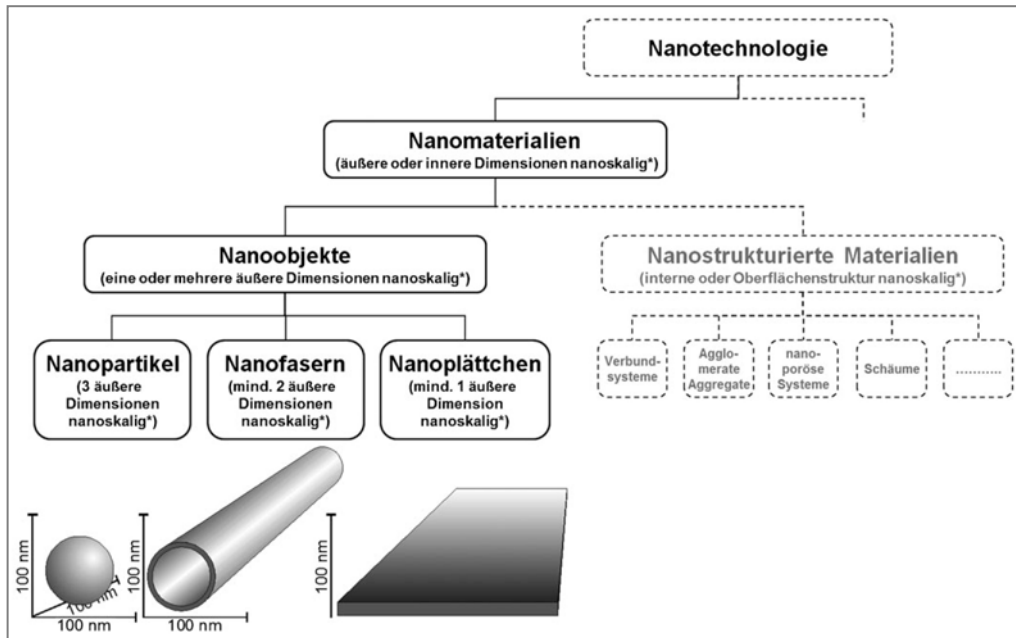


Abbildung 1: Schematische Darstellung der ISO-Definition von Nanoobjekten (Krug/Wick 2011: 3)

Im Vergleich zu ihrem makroskaligen Gegenstück besitzen Nanomaterialien eine im Verhältnis zum Volumen große Oberfläche, wodurch bestimmte chemische (z.B. Reaktionsfähigkeit, Löslichkeit, Struktur), physikalische (z.B. Leitfähigkeit) sowie biologische Eigenschaften (z.B. Membrangängigkeit, Diffusionseigenschaften) erzeugt werden (Luther 2007, Völker 2013c). Nanomaterialien werden meist nach ihrer chemischen Zusammensetzung in organische und anorganische Materialien klassifiziert (Ju-Nam/Lead 2008). Organische Materialien umfassen Kohlenstoff basierende Materialien wie Fullerene und Kohlenstoffnanoröhren (CNTs ‚carbon nanotubes‘, einwandig oder mehrwandig) (Handy et al. 2008). Anorganische Materialien können in Metalloxide (z.B. Kupfer, Zinkoxid, Eisenoxid, Titandioxid und Ceroxid) und Metalle (z.B. Silber, Gold und Eisen) und Halbleiter-Nanokristalle (Quantendots) unterteilt werden (vgl. Tab. 1) (Klaine et al. 2008).

Tabelle 1: Beispiele für Nanomaterialien (verändert nach SRU 2011: 65)

| | |
|--|--|
| Nanopartikel | |
| Nanopartikuläre Mineralien und Metalloxide | z.B. Siliziumdioxid (SiO ₂), Titandioxid (TiO ₂), Zinkoxid, Ceroxid, Aluminiumoxid (Tonerde, Al ₂ O ₃) |
| Nanopartikuläre Metalle | z.B. Eisen, Silber, Gold |
| Quantenpunkte (Quantum-Dots) | Nano-Kristallite, meist aus Halbleitermaterial, bei denen die Elektronen in ihrer Beweglichkeit in allen drei Raumrichtungen so weit eingeschränkt sind, dass ihre Energie nicht mehr kontinuierliche, sondern nur noch diskrete Werte annehmen kann |
| Fullerene | Käfigartige (fußballförmige) Moleküle aus mindestens 20 Kohlenstoffatomen, z.B. C-60 Fulleren |
| Dendrimere | Dreidimensionale, kugelförmige, symmetrisch verzweigte Makromoleküle, stufenweise aus einzelnen Molekülen aufgebaut |
| Nanofasern | z.B. Kohlenstoffnanoröhren (CNT) |
| Nanoplättchen, Schichtstrukturen | z.B. Nanoton (Silikat-Schichten im Nanometerbereich – Montmorillonite) |
| Porenstrukturen | z.B. Zeolithe, Membrane, Aerogele (hochporöse Festkörper aus unterschiedlichen Materialien z.B. Polymere) |
| Komplexe Strukturen | z.B. Micellen (aus Tensiden aufgebaute Strukturen) oder Liposomen (aus einer Doppellage amphiphiler Moleküle aufgebaute kugelförmige Aggregate) |

Grundsätzlich können Nanomaterialien durch zwei verschiedene Verfahren hergestellt werden. Bei dem sogenannten Top-down-Verfahren werden die sehr kleinen Strukturen aus größeren Materialbausteinen durch Ätzen, Mahlen und sonstige Bearbeitung hergestellt. Bei Bottom-up-Verfahren werden Nanomaterialien gezielt aus Atomen und Molekülen aufgebaut. Dabei wird unterschieden zwischen ‚self assembly‘, bei dem sich die Atome und Moleküle nach ihren natürlichen Eigenschaften selbständig positionieren, und ‚positional assembly‘, bei dem dies durch äußere Einwirkung beeinflusst wird (BAFU/BAG 2007, Ju-Nam/Lead 2008). Viele der Top-down-Verfahren verursachen eine relativ breite Partikelgrößenverteilung in den Endprodukten (Raab et al. 2008).

Aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche neigen einzeln hergestellte Primärpartikel dazu, sich schnell zu größeren Einheiten zusammenzulagern. Je nach Art des Zusammenschlusses unterscheidet man Aggregate oder Agglomerate. Agglomerate sind Verbände aus Primärteilchen, Aggregaten oder einer Mischung aus beiden, mit losem Zusammenhalt. Aggregate hingegen sind aus fest verbundenen oder verschmolzenen Primärteilchen gebildet, deren gesamte Oberfläche kleiner als die Summe der Oberfläche der einzelnen Teilchen ist (Lövestam et al. 2010). Viele Anwendungen erfordern allerdings Nanopartikel-Dispersionen, die in unterschiedlichen Medien stabil sind. Um eine Aggregation zu verhindern, können die Oberflächen von Nanomaterialien beschichtet werden. Diese Oberflächenbeschichtungen oder Coatings (z.B. organische Polymere, Citrat) stabilisieren Nanopartikel-Dispersionen entweder elektrostatisch (Nanopartikel mit gleicher Oberflächenladung stoßen sich gegenseitig ab) oder ste-

risch (relativ lange oberflächengebundene Polymermoleküle bilden eine Barriere zwischen den Nanopartikeln) (Ju-Nam/Lead 2008). Zusätzlich können oberflächengebundene Moleküle gezielt weitere Eigenschaften der Nanopartikel modifizieren und sie mit neuen Funktionen ausstatten; man spricht von *Oberflächenfunktionalisierungen* oder *funktionalisierten Nanopartikeln*. Das Coating eines Nanomaterials ist daher neben chemischer Zusammensetzung, Größe und Form ein weiterer wichtiger Faktor, der die Eigenschaften des Materials entscheidend mitbestimmt.

3 Herstellung und Anwendungsbereiche von Nanomaterialien

Besonders in den letzten zwei Jahrzehnten hat die wirtschaftliche Relevanz der Nanotechnologie zugenommen, da immer mehr Nanomaterialien aus der Forschung in die Produktion und kommerzielle Anwendung übergehen. Für viele der Nanomaterialien bieten sich aufgrund ihrer Eigenschaften verschiedenste Anwendungsmöglichkeiten. Aus diesem Grund wird von der Nanotechnologie häufig als Schlüssel- oder Zukunftstechnologie gesprochen (z.B. EU 2013). Der konkrete ökonomische Wert von Nanotechnologien lässt sich nur schwer beziffern und es bestehen große Unsicherheiten darüber, in welchem Maße Nanomaterialien eingesetzt werden. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass Hersteller und Anwender keine Daten zu produzierten und eingesetzten Nanomaterialien darlegen müssen, weshalb wenig Markttransparenz vorhanden ist (SRU 2011). Abschätzungen zum Weltmarktvolumen von Nanomaterialien erstrecken sich über eine Spanne von ca. zwei bis 15 Milliarden US-Dollar (Möller et al. 2013).

Im Hinblick auf Produktionsmengen liegen für die meisten der Nanomaterialien nur wenige und zum Teil widersprüchliche Angaben vor. Dieser Mangel an Informationen stellt ein Hindernis bei der Beurteilung möglicher Risiken für die Umwelt dar. Darüber hinaus beziehen sich vorhandene Daten meist auf die Produktionskapazitäten und nicht auf die tatsächlichen Produktionsmengen. Erschwert wird die Quantifizierung der Herstellung und Anwendung auch durch die nach wie vor nicht eindeutige definitorische Abgrenzbarkeit. Eine umfassende Schätzung über globale und europäische Produktionsmengen von zehn ausgewählten Nanomaterialien geben Piccinno et al. 2012, basierend auf einer Befragung von Unternehmen, die Nanomaterialien herstellen und verwenden.³ Nach diesen Daten zeigt sich, dass einige Nanomaterialien in nur geringem Umfang produziert werden (z.B. Silber, Fullerene, Quantenpunkte), während andere Materialien in beträchtlich höherem Umfang hergestellt werden (z.B. Titandioxid, Siliziumdioxid) (vgl. Tab. 2). Das am meisten produzierte Nanomaterial ist Titandioxid. Die Daten für Siliziumdioxid erstrecken sich über eine weite

³ Die Unternehmen wurden bezüglich ihrer Einschätzung zum weltweiten oder regionalen Markt von Nanomaterialien befragt und nicht zu ihrer unternehmensspezifischen Produktion.

Spanne, was auf nach wie vor bestehende Probleme bezüglich der Definition dieses Materials zurückgeführt werden kann (Piccinno et al. 2012). Für die Zukunft ist damit zu rechnen, dass angesichts der hohen Forschungsinvestitionen und der dynamischen technologischen Entwicklung sowohl die Menge an als auch die Arten von Nanomaterialien zunehmen werden (SRU 2011).

Tabelle 2: Übersicht über globale und europäische Produktionsmengen zehn technisch hergestellter Nanomaterialien (Schätzung auf Basis einer Umfrage unter nanotechnologieassoziierten Unternehmen – Piccinno et al. 2012). Angegeben ist jeweils der Median in t/Jahr sowie das 25/75-Perzentil in Klammern.

| Nanomaterial | Global [t/Jahr] | | Europa [t/Jahr] | |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Median | 25-75-Perzentil | Median | 25-75-Perzentil |
| TiO ₂ | 3000 | (550–5500) | 550 | (55–3000) |
| ZnO | 550 | (55–550) | 55 | (5,5–28000) |
| SiO ₂ | 5500 | (55–55000) | 5500 | (55–55000) |
| FeO _x | 55 | (5,5–5500) | 550 | (30–5500) |
| AlO _x | 55 | (55–5500) | 550 | (0,55–500) |
| CeO _x | 55 | (5,5–550) | 55 | (0,55–2800) |
| CNT | 300 | (55–550) | 550 | (180–550) |
| Fullerene | 0,6 | (0,6–5,5) | 0,6 | (0,6–5,5) |
| Ag | 55 | (5,5–550) | 5,5 | (0,6–55) |
| Quantenpunkte (QDs) | 0,6 | (0,6–5,5) | 0,6 | (0,6–5,5) |

Aufgrund ihres vielfältigen Potenzials finden Nanomaterialien inzwischen in vielen Produkten und Feldern Gebrauch. Triebkräfte für den Einsatz von Nanoprodukten sind neben klassischen Treibern wie der Erschließung neuer Anwendungsbereiche und der Einsparung von Kosten inzwischen auch Gesichtspunkte wie Materialeinsparung und Energieeffizienz (Möller et al. 2014). In Deutschland verwenden derzeit etwa 2250 Einrichtungen nach eigenen Angaben in unterschiedlichen Bereichen ihrer Wertschöpfungskette Nanotechnologien (BMBF 2014b). Standardmäßig werden Nanomaterialien bereits in der Pharma- und Medizintechnik, der Energie- und Umwelttechnik, der Informations- und Kommunikationstechnik, dem Textil- und Bausektor sowie auch im Bereich der Konsumgüter verwendet. Aufgrund der stetig steigenden Zahl an Nanomaterialien und der gleichzeitig nicht vorhandenen einheitlichen Kennzeichnungspflicht ist es kaum möglich, einen umfassenden Überblick über alle nanotechnologiebasierten Verbraucherprodukte zu geben. Eine öffentlich einsehbare Online-Inventur nanotechnologischer Verbraucherprodukte wird durch das Projekt „Project on Emerging Nanotechnologies“ (PEN) zur Verfügung gestellt. Innerhalb dieser ist die Anzahl nanotechnologischer Verbraucherprodukte von 54 gekennzeichneten Produkten im Jahr 2005 auf 1628 Produkte im Jahr 2013 gestiegen (PEN 2013). Im Folgenden werden einige der wichtigsten Anwendungsfelder von Nanomaterialien zusammengestellt (vgl. auch Tab. 3). Der Schwerpunkt liegt hierbei auf bereits realisierten Anwendungen und Verfahren. Innovative Lösungsansätze, die sich noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium befinden, werden nur am Rande angeführt.

Tabelle 3: Beispiele für bereits auf dem Markt erhältliche Nanoprodukte (verändert nach SRU 2011)

| Nanotechnologisches Produkt | Verwendetes Nanomaterial | Zweck der Anwendung |
|---|---|--|
| Medizin und Arzneimittel | | |
| Medikamente | nanoskalige Liposomen, gecoatetes hochdisperses Siliziumdioxid | verbesserter Wirkstofftransport, Wirkstoffdepot |
| Implantate | nanostruk. Titanoberflächen Nanofasern | für biokompatible Implantate, für Implantationsmaterialien zur Regeneration von Knochen und Knorpeln |
| Wundheilung | Polymerfasern mit Nanofasern | selbsthaftendes Nahtmaterial |
| Bauindustrie | | |
| Beton und Mörtel | Siliziumdioxid-Nanopartikel | Erhöhung der Tragfähigkeit, Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit |
| Dachziegel | Titandioxid- Nanopartikel | selbstreinigender Effekt – Abbau organischer Ablagerungen |
| Fenstergläser, Gebäudefassaden | Titandioxid-Nanopartikel | photokatalytische (selbstreinigende und anti-bakterielle) Beschichtungen |
| Automobilindustrie | | |
| Gläser und Außenspiegel | superhydrophiles Titandioxid | verhindert das Beschlagen |
| Autoreifen | Industrieruß (carbon black) | Füllmaterial, um den Abrieb zu verbessern |
| Lacke | Keramik-Nanopartikel | Erhöhung der Kratzfestigkeit |
| Autoabgaskatalysatoren | Metall-Nanopartikel | Verbesserung der Abluftreinigung |
| Anwendungen im Umweltbereich | | |
| keramische Filter nanoporöse Membranen | nanoporiges Titandioxid | zur Abwasserreinigung und Trinkwasseraufbereitung |
| | nanoskaliges Eisenoxid | Beseitigung von Grundwasser- und Bodenkontaminationen |
| Silizium-Solarzellen | nanostrukturierte Antireflexschichten | höhere Lichtausbeute |
| Elektronik/Optik | | |
| Leuchtdioden (LED) | Nanoschichten | Verringerung des Stromverbrauchs |
| Datenkommunikation | photonische Kristalle | energieeffizientere Datenübertragung |
| Chemie | | |
| Klebstoffe (schaltbar) | Kern-/Schale-Nanopartikel | Energieeinsparung und verbesserte Rezyklierbarkeit |
| Kunststoffgehäuse und -kabel | katalytische Nanopartikel | flammhemmende Wirkung |
| Konsumgüterbereich | | |
| Kosmetische Produkte: Sonnenschutzcremes Zahncremes Hautpflegecremes | Titandioxid-Nanopartikel, Kalziumperoxid nanoskalig, Fullerene | transparenter UV-Schutz, als Bleichmittel, Anti-Aging Effekt |
| Lebensmittel | Öl-in-Wasser-Nanoemulsionen auf Basis Micellen/Liposomen amorphes Siliziumdioxid | zur Verkapselung von Nährstoffen zur Erhöhung der Bioverfügbarkeit, als Trennmittel, Fließ- und Rieselhilfe in pulvrigen Lebensmitteln |

| | | |
|---|--|---|
| Lebensmittelverpackung | Aluminiumoxid, Siliziumdioxid amorpher Kohlenstoff, Siliziumdioxid | Verbundfolien mit verbesserten Barriereigenschaften, als Gas-, Wasser- und UV-Barriere für PET-Flaschen |
| Tennisschläger, Fahrradlenker, Golfschläger, Eishockeyschläger | Kohlenstoffnanoröhren | Verbesserung der Materialeigenschaften, bessere Haltbarkeit |
| Sprays zur Oberflächenbehandlung, u.a. zur Glas-, Textil- und Lederpflege | hauptsächlich Mischung von Nanopartikeln aus Keramik, Glas, Silber und Diamant | Imprägnierung gegen Schmutz, Wasser und Öl |
| Bettwäsche, Socken, Wischtücher | Silber-Nanopartikel | antibakterielle Ausrüstung |

Medizin und Arzneimittel

In der Medizin spielen nanotechnologische Produkte bereits eine erhebliche wirtschaftliche Rolle und die Einsatzgebiete von Nanopartikeln in der Medizin sind vielfältig.⁴ In der pharmazeutischen Anwendung schon länger etabliert sind Verfahren zur Optimierung der Aufnahme und Bioverfügbarkeit von Wirkstoffen (BMBF 2013). So bewirken erste nanobasierte Wirkstofftransportsysteme (Drug Delivery Systems) eine zielgenauere Medikamentenabgabe im Körper.⁵ Die Wirkstoffe werden hierbei mit einer Nanokomponente (z.B. nanoskalige Liposomen) verbunden. Durch die Anlagerung der Nanokomponente ausschließlich an das kranke Gewebe kann der Wirkstoff dort optimal angereichert werden. Durch diesen gezielten Wirkstofftransport können mögliche Nebenwirkungen verringert bzw. die Dosis des Wirkstoffs minimiert werden.

Im Anwendungsfeld Körperersatzgewebe und Implantate verbessern nanostrukturierte Oberflächen die Biokompatibilität und die Zellanwachsung. In der Medizintechnik umfasst die Anwendung von Nanotechnologien unter anderem in-vivo-Beschichtungen, Knochen- und Zahnersatz, Krebsbehandlung mittels Erhitzung von Nanopartikeln, Operationshilfsmittel und Gewebezüchtung (Jordan et al. 2007). Des Weiteren wird durch den Einsatz nanotechnologischer Verfahren in der Diagnostik eine optimierte Gesundheitsvorsorge durch Früherkennung von Krankheiten, wie z.B. Krebs, erwartet (Baumgartner/Jäckli 2007, LUBW 2011).

Durch die Verwendung nanotechnologischer Produkte können verschiedene Problemstellungen im Gesundheitsbereich adressiert werden. Allerdings resultieren aus der zunehmenden Anwendung auch Fragen bezüglich der Sicherheit sowie der Regulierung und Standardisierung. So überlappen bei nanotechnologischen Verfahren häufig die Grenzen der klassischen Regulierungsbereiche von Pharmaka, Medizintechnik

⁴ Eine detaillierte Auflistung der Anwendungen in der Nanomedizin kann der Übersichtsstudie von Etheridge et al. 2013 entnommen werden.

⁵ Weitere Informationen zu Nano-Delivery-Systemen in pharmazeutischen Anwendungen gibt u.a. das Projekt CONANO (COMparative Challenge of NANomaterials)

oder Nahrungsergänzungsmitteln. Gerade bei Kombinationsprodukten, wie beispielsweise Implantaten, bedürfen die anzuwendenden Regulierungen noch genauerer Definition (BMBF 2013).

Konsumgüterbereich

Auch in Verbraucherprodukten in den Bereichen Nahrungsmittel und Verpackung, Kosmetika, Textilien, Haushalts- und Reinigungsmittel sowie Sport und Freizeit findet die Nanotechnologie immer breiteren Eingang. Die Verwendung von Nanomaterialien in Verbraucherprodukten ist unter Sicherheits- und Verbraucherschutzaspekten von besonderer Bedeutung, da hier eine direkte Exposition der Bevölkerung möglich ist. Den derzeit umfassendsten Überblick über nanotechnologische Produkte gibt die Datenbank des Woodrow Wilson Centers.⁶ Darin sind mittlerweile 1.300 Konsumgüterartikel identifiziert, wobei von den eingesetzten Nanomaterialien eindeutig das Nanosilber dominiert (vgl. auch Abb. 2).

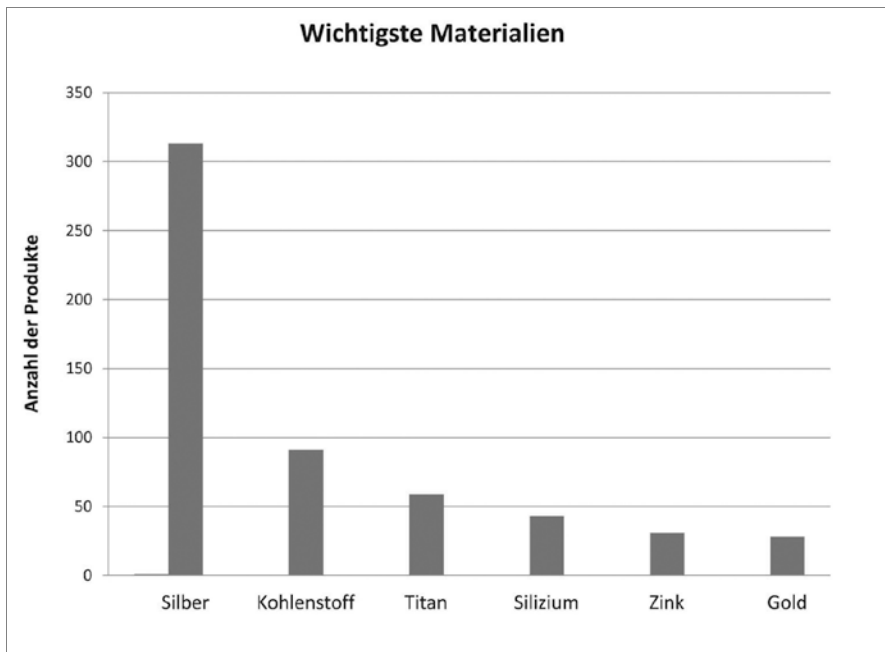


Abbildung 2: Eingesetzte Nanomaterialien in Konsumprodukten (Möller et al. 2013: 30)

Im Lebensmittelbereich werden Nanomaterialien in Lebensmitteln selbst sowie während deren Produktion oder in ihren Verpackungsmaterialien verwendet. In Lebensmitteln selbst können Nanomaterialien eingesetzt werden, um neue Funktionalitäten zu erreichen oder die Bioverfügbarkeit von Biowirkstoffen zu verbessern. In Lebensmittelverpackungen, einigen Nahrungsergänzungsmitteln sowie als Hilfsstoff finden Nanomaterialien bereits Verwendung. So wird Siliziumdioxid (Nano-Kieselsäure) als

⁶ www.nanotechproject.org

Rieselhilfe oder Verdickungsmittel in Lebensmitteln genutzt.⁷ Aktuell entwickelt die Lebensmittelindustrie funktionelle Lebensmittel, in denen Vitamine, Omega-3-Fettsäuren, Phytosterole und Aromen in Nanokapseln aus organischen Materialien, etwa in Liposomen, eingeschlossen werden, um sie dann im Körper gezielt an den Wirkort zu transportieren (SRU 2011). Bei Lebensmittelverpackungen wird durch optimierte Materialeigenschaften ein großes Innovationspotenzial angenommen und die Verwendung von Nanotechnologie-Produkten ist in diesem Bereich schon gebräuchlich. Silberdotierte Lebensmittelverpackungen verbessern durch ihre antibakterielle Wirkung die Haltbarkeit der Produkte (BAFU/BAG 2007). In Zukunft sollen intelligente Verpackungsmaterialien entwickelt werden, die anzeigen, wenn das Haltbarkeitsdatum erreicht oder die Kühlkette nicht durchgängig eingehalten wurde (SRU 2011).

Im Kosmetikbereich sind Titandioxid-Nanopartikel als UV-Schutzfilter schon seit langem Bestandteil in Sonnencremes. Daneben spielt auch im kosmetischen Bereich die Verbesserung des Transports von hydrophoben Wirk- und Nährstoffen durch die Haut mittels geeigneter Trägersysteme (z.B. Liposomen, Lipid-Nanopartikel) eine wichtige Rolle. Darüber hinaus werden in kosmetischen Produkten noch weitere Nanomaterialien, wie Fullerene, Aluminium Nanopartikel und Pigmente verwendet (SRU 2011).

Im Textilsektor werden Nanotechnologien vor allem zur Herstellung von wasser- oder schmutzabweisenden und antibakteriellen Textilien verwendet. Die Nanomaterialien können auf unterschiedliche Art und Weise in die Textilien eingearbeitet sein, was Einfluss auf die Freisetzung der Nanomaterialien aus den Textilien hat.⁸ Konkrete Anwendungsbeispiele in Textilien sind die Verwendung von Silber-Nanopartikeln zur Reduktion der Geruchsentwicklung in Socken, Schuheinlagen oder Unterwäsche und von Siliziumdioxid und Fluorcarbonen zum Schmutz- und Wasserabweisen (SRU 2011).

Auch im Sport- und Freizeitbereich finden sich verschiedene Produkte mit nanotechnologischen Komponenten, wie beispielsweise mit Kohlennanostoffröhrchen verstärkte Tennis- und Hockeyschläger, verbesserte Skiwachsrezepturen oder nanobeschichtete Golfbälle (Baumgartner/Jäckli 2007).

Im Haushalts- und Reinigungsmittelbereich stehen nur wenige Informationen zu konkreten Produkten und Inhaltsstoffen zur Verfügung. Gebräuchliche Anwendungen nanoskaliger Partikel sind hydrophobe Versiegelungen, Reinigungsmittel und Imprägnierungen für Holz, Stein, Glas und Metall. Daneben kommen beispielsweise Silber- oder Titanoxid-Nanopartikel in Luftreinigungssprays zum Einsatz (BAFU/BAG 2007).

⁷ Ob die Kieselsäure dabei allerdings tatsächlich als Nanomaterial eingesetzt wird, ist bislang nicht abschließend geklärt, da die Größenverteilung sehr breit ist, sodass nur ein kleiner Teil unter 100 nm groß ist (Dekkers et al. 2011).

⁸ Bei einer Untersuchung von Geranio et al. 2009 gelangten 35 Prozent des in silberhaltigen Socken gebundenen Silbers in das Waschwasser.

Automobilindustrie

Eine Vielzahl an Innovationen in der Automobilindustrie ist auf nanotechnologische Entwicklungen zurückzuführen. So werden schon heute zahlreiche Automobilkomponenten durch nanotechnologische Verfahren optimiert. Einer der ersten Anwendungsbereiche waren kratzfeste Fahrzeuglackierungen. Abgasreinigungskatalysatoren verwenden seit über 30 Jahren Nanotechnologien und werden dahingehend weiterentwickelt, die eingesetzten teuren Edelmetallpartikel zu ersetzen. Hinzu kommen vor allem bei Dieselfahrzeugen nanoporöse Partikelfilter, sowie nanostrukturierte Hartschichten bei Dieseleinspritzpumpen für einen erhöhten Einspritz-Druck. Damit sollen Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch und ein höheres Reduktionspotenzial für Schadstoffbelastungen erreicht werden. Bei der Herstellung von Autoreifen werden seit einigen Jahren Carbon Black (nanoskaliger Industrie-Ruß) eingesetzt, um die Straßenhaftung und Laufleistung zu verbessern (Luther 2007). Eine weitere Anwendung sind die so genannten Antibeschlagbeschichtungen von Scheiben, die mittels Titandioxid-Nanopartikeln realisiert werden. Verschiedene neue Nanokompositmaterialien werden im Karosserie- und Motorenbau zur Reduktion des Gewichtes eingesetzt (Luther 2007, LUBW 2011, BMBF 2013). Weiterhin zu nennen sind nanoimprägnierte Sitzpolster und LED- und OLED-basierte Beleuchtungssysteme. Displays aus organischen Leuchtdioden (OLED) zeichnen sich durch deutlich geringeren Energieverbrauch und Materialeinsatz bei der Herstellung als herkömmliche LCD-Displays (Liquid Crystal Displays) aus.

Zukünftige Innovationen sehen selbstheilende Lacke und Beschichtungen auf der Basis von Nanostrukturen sowie die intelligente Regelung des Licht- und Wärmeeinfalls im Auto vor. Ein weiterer Fokus zukünftiger Entwicklungen liegt im Bereich der Automobilelektronik und hier vor allem auf nanoelektronischen Systemen/Bauteilen für die Elektromobilität (BMBF 2013). Der umfassende Einsatz von Elektroautos wird momentan noch von nicht ausreichend vorhandenen leistungsstarken und wieder aufladbaren Batterien eingeschränkt. Besonders Lithiumbatterien können von einer Vielzahl potenzieller nanostrukturierter Elektrodenmaterialien profitieren, wodurch ein erheblicher Umweltentlastungseffekt erhofft wird (Sartorius 2010).

Bauindustrie

In der Bauindustrie ermöglichen nanobasierte Verfahren und Produkte Optimierungspotenziale in Bezug auf Funktionalität, Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz. Nanobeschichtungen werden vor allem für Anwendungen im Bereich Selbstreinigung, Verschmutzungsschutz, Korrosionsbeständigkeit, Antifouling sowie Kratz- und UV-Schutz eingesetzt. So werden beispielsweise Siliziumdioxid-Nanopartikel zur Optimierung von Beton-/Mörteleigenschaften verwendet. Durch die Einbringung der Nanopartikel können die Tragfähigkeit und Festigkeit sowie die Korrosionsbeständigkeit des Betons wesentlich gesteigert werden. Andere nanotechnologische Produkte werden in der Oberflächenfunktionalisierung von Außenfassaden und Dächern eingesetzt. Durch dünne nanotechnologische Beschichtungen werden Fassadenflächen vor

Verunreinigung mit Schmutz, biologischen Anhaftungen und Korrosion geschützt. Selbstreinigende Dachziegel oder Glas bauen organische Ablagerungen durch Titan-dioxid-Nanopartikel ab, welche durch UV-Licht angeregt wird (BAFU/BAG 2007, LUBW 2011). Daneben ermöglichen neuartige Dämmstoffe und schaltbare Verglasungen Energieeinsparungen in der Gebäudetechnik. Glasfenster mit durchsichtigen Siliziumdioxid-Nanopartikeln werden bei Erhitzung zu einem undurchsichtigen und festen Feuerschild. Besonders leichtes und effektives Isolationsmaterial wird aus Siliziumdioxid-Gels gewonnen, da diese hervorragend für Wärmestrahlung und Licht durchlässig sind, aber gleichzeitig sehr gut gegen Wärmeleitung und Konvektion isolieren. Aufgrund ihrer nahezu glasklaren Transparenz können diese neben durchsichtigen Außenfassaden auch bei Fensterscheiben zum Einsatz kommen. Allerdings werden derartige Siliziumdioxid-Gels bedingt durch den noch relativ hohen Preis bisher nur geringfügig eingesetzt (Luther 2007, BAFU/BAG 2007).

Durch nanooptimierte Asphaltmischungen lassen sich die mechanische Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit von Straßenbelägen, auch vor dem Hintergrund spezifischer klimatischer Anforderungen, signifikant erhöhen. Dies kann die Kosten für Bau, Erhaltung und Nutzung reduzieren. Gleichzeitig kann die Lärmbelastung durch den funktionsoptimierten Asphalt um etwa sechs Dezibel reduziert werden, was wirkungsvoller als eine vier m hohe Lärmschutzwand ist (BMBF 2013).

Anwendungen im Umweltbereich

Erste nanotechnologische Anwendungen mit möglichen Umweltentlastungseffekten lassen sich in unterschiedlichsten Bereichen identifizieren; viele dieser Anwendungen befinden sich allerdings noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium und kommen bislang nicht in der breiten Praxis vor. Haupteinsatzfelder umfassen die Bereiche Wasser/Abwasser, Energieerzeugung, -speicherung und -nutzung, Klimaschutz, Luftreinhaltung und Umweltsensorik. Der konkrete Beitrag von Nanomaterialien zu Umweltentlastungseffekten in den einzelnen Feldern ist jedoch oftmals schwer zu beziffern, denn meist umfassen sie nur einen Teil des Gesamtsystems und sind nicht allein ausschlaggebend (LUBW 2011). Daneben gibt es zahlreiche Entwicklungen der Nanotechnologie in Anwendungsfeldern, die außerhalb des klassischen Umweltsektors liegen, aber mit potenziellen Umweltentlastungseffekten verbunden sind (vgl. Kapitel zur Bauindustrie, Automobilindustrie). So kann beispielsweise die Widerstandsfähigkeit von Materialien gegenüber mechanischer Belastung erhöht und somit die Lebensdauer eines Produktes verbessert werden, wodurch der Ressourcenverbrauch reduziert wird (LUBW 2011, Greßler/Nentwich 2011).

Konkrete Anwendungen finden sich vor allem im Bereich Wasser/Abwasser und speziell bei der Aufbereitungs- und Sanierungstechnologie, wo nanoskalige Filtersysteme bereits in der Praxis Verwendung finden. Nanoporöse Membranen werden in der Wasseraufbereitung als Alternative zu herkömmlichen Verfahren wie Flockung oder Sandfiltration zur Entfernung natürlicher organischer Stoffe eingesetzt. Darüber hin-

aus können Nanofiltrationsverfahren zur Aufbereitung von Produktions- und Deponeabwässern und zur Wasserentsalzung genutzt werden (LUBW 2011, SRU 2011). Zur Beseitigung von Grundwasser- und Bodenkontaminationen kann durch nanopartikuläre Katalysatoren der Schadstoffabbau angeregt werden. Dabei werden Eisen-Nanopartikel als Suspension direkt in den kontaminierten Grundwasserkörper injiziert. Die geringe Partikelgröße des Nano-Eisens ermöglicht die Verteilung im Grundwasserkörper. Probleme bestehen derzeit noch hinsichtlich der Langzeitreaktivität des Nano-Eisens sowie der Immobilisierung der Nano-Eisenpartikel im Untergrund (Heubach et al. 2009, SRU 2011).

Im Bereich Energie und Klimaschutz befinden sich viele nanotechnologische Ansätze noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Besonders in der photovoltaischen Energieerzeugung wird ein großes Potenzial der Nanotechnologie in Bezug auf die Haltbarkeit, die Effizienzsteigerung und die Kosten erwartet. Weiterhin können Windkraftanlagen z.B. durch den Einsatz von Polymerkompositionen (z.B. CNT) zur Herstellung leichterer Rotorblätter effizienter gebaut werden (LUBW 2011).

In der Landwirtschaft wird die Nanotechnologie zum gezielten und bedarfsgerechten Einsatz von Pestiziden und Düngemitteln eingesetzt, um dadurch den Verbrauch und somit die Belastung des Bodens zu reduzieren (Bachmann et al. 2007, Möller et al. 2013).

Ob die Verwendung von Nanomaterialien Umweltentlastungspotenziale ermöglicht und damit einen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung leistet, ist nicht unumstritten und wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Kritisiert wird, dass für viele Produkte keine umfassenden Lebenszyklus-Analysen oder Ökobilanzen vorliegen, um die Umweltwirkungen des gesamten Lebenszyklus des Produktes beurteilen zu können (Greßler/Nentwich 2011). Für verschiedene nanotechnische Anwendungen und Produkte sind in den letzten Jahren Untersuchungen zu Auswirkungen auf Rohstoff- und Energiebedarf erfolgt.⁹ Möller et al. 2014 zeigen in ihrer Untersuchung zu den Auswirkungen ausgewählter nanotechnologischer Produkte, dass „Innovationen im Bereich der Nanotechnik grundsätzlich signifikante Einsparungen im Bereich der Rohstoff- und Energieaufwendung haben können“. Allerdings sind die „genannten Potenziale (...) jedoch z.T. an Randbedingungen geknüpft, deren Eintreten in der Praxis sich noch bewahrheiten muss“ (Möller et al. 2014: 90). Andere Autoren wie Greßler/Nentwich 2011 verweisen darauf, dass einige durchgeführte Lebenszyklus-Analysen belegen, dass für die Herstellung bestimmter nanotechnische Produkte oftmals viel Energie, Wasser und umweltproblematische Chemikalien benötigt werden. Die verschiedenen Studien und auch andere Autoren (von Gleich et al. 2007, SRU 2011) betonen, dass eine Analyse des gesamten Lebenszyklus von der Herstellung der Ausgangsmaterialien bis hin zur Entsorgung unbedingt notwendig ist, um die Folgen

⁹ Zu nennen sind hier u.a. EC 2009, Kuhlbusch/Nickel 2010, Martens et al. 2010, BMU 2011, Möller et al. 2011, Möller et al. 2014.

nanotechnischer Produkte auf den Energie- und Ressourcenbedarf sowie mögliche Rebound-Effekte umfassend ermitteln zu können.

4 Risikoforschung: (Öko-)Toxikologie¹⁰ von Nanomaterialien

Die Anwendung der Nanotechnologie in einer zunehmenden Zahl von Produkten hat zu Fragen der Sicherheit und Unbedenklichkeit der eingesetzten Materialien auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt geführt (Boxall et al. 2007). Diese Bedenken bestehen vornehmlich aufgrund der neuartigen chemischen, physikalischen und biologischen Charakteristika von Nanomaterialien – dieselben Eigenschaften, aufgrund derer der Nanotechnologie ein hohes Anwendungspotenzial in vielen industriellen Bereichen zugesprochen wird (Fiorino 2010). Generell wird angenommen, dass Nanomaterialien aufgrund ihrer vergrößerten reaktiven Oberfläche eine höhere Toxizität als ihre gröberskaligen Ausgangsmaterialien (Bulkform) aufweisen und dass die Toxizität mit abnehmender Partikelgröße zunimmt. Gesundheitsrisiken werden außerdem mit der Partikelform in Verbindung gebracht; hier wird häufig auf die morphologische Ähnlichkeit bestimmter Nanomaterialien mit Asbestfasern hingewiesen, für die eine krebserzeugende Wirkung bekannt ist. Aufgabe der Risikoforschung ist es, mögliche Gefahren der Nanotechnologie für Mensch und Umwelt frühzeitig zu erkennen, zu bewerten bzw. zu vermeiden (Vorsorgeprinzip).

In der (Öko-)Toxikologie wird unter dem Risikobegriff die „Dosis [(oder Konzentration) eines Stoffes], bei der Effekte auftreten oder nicht mehr auftreten“ verstanden (SRU 2011: 39). Die Bewertung des Risikos aus (öko-)toxikologischer Sicht erfolgt aus der Beurteilung zweier Kriterien: Expositions- (Dosis bzw. Umweltkonzentration) und Effektseite. Die Abschätzung der Umweltexposition erfolgt auf Basis modellierter Umweltkonzentrationen oder anhand repräsentativer Messwerte. Da für neu auftretende Stoffe normalerweise keine gemessenen Umweltkonzentrationen vorliegen, wird die Exposition auf Basis von Produktionsvolumina, Emissionsszenarien und dem Schicksal der Substanz in der Umwelt (physikalisch-chemische Eigenschaften, Verteilungskoeffizienten) abgeschätzt (ECB 2003). Die Bewertung der (öko-)toxikologischen Effekte erfolgt anhand von Tierversuchsmodellen, aus welchen (öko-)toxikologische Kenngrößen abgeleitet werden. Aufbauend auf den Expositions- und Effektdaten wird anschließend das Risiko einer Substanz für den Menschen und die Umwelt bewertet.

In Europa fallen Nanomaterialien prinzipiell in den Geltungsbereich der EU-Chemikalienverordnung REACH, im Rahmen derer Nanomaterialien bisher allerdings nicht als eigenständige Substanzen betrachtet werden, da sie die gleiche chemische Zusammensetzung wie ihre Bulkform besitzen (vgl. Kap. 6). Inwiefern Nanomaterialien innerhalb des existierenden Rahmens für das Risikomanagement behandelt wer-

¹⁰ Der Begriff Toxikologie schließt die Humantoxikologie ein.

den können, ist Thema des wissenschaftlichen Ausschusses „Neu auftretende und neu identifizierte Gesundheitsrisiken“ (SCENIHR) der europäischen Kommission. Obwohl Nanomaterialien nicht per se als gefährlich eingestuft werden, empfiehlt SCENIHR, dass das Risiko der Vielzahl existierender Nanomaterialien von Fall zu Fall überprüft werden sollte (EC 2013). Problematisch ist, dass die existierenden Verordnungen und Prüfrichtlinien zur Risikobewertung von Chemikalien (z.B. standardisiert durch die OECD) ursprünglich für lösliche Stoffe entwickelt wurden; die Bewertung von Nanomaterialien erfordert allerdings die Betrachtung weiterer (nanospezifischer) Merkmale (z.B. Größe, Form, Oberflächeneigenschaften), die in den Richtlinien bislang nicht berücksichtigt werden.

Mit dem Ziel, nach international harmonisierten, wissenschaftlich anspruchsvollen Standards mögliche Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanomaterialien zu erfassen und zu verhindern, gründete die OECD im Jahre 2006 die „*Working Party on Manufactured Nanomaterials*“ (WPMN) (BMBF 2011a). Im Rahmen des WPMN Sponsoringprogramms entwickelt die OECD Ansätze zur Testung und Bewertung der Sicherheit von Nanomaterialien, die bereits erhältlich sind oder kurz vor der Marktreife stehen. Im Rahmen der Untersuchungen sollen physikalisch-chemische Eigenschaften, Umweltschädigungen, Akkumulation, die Ökotoxikologie und Säugertoxikologie getestet werden. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die existierenden Methoden zur Testung traditioneller Chemikalien generell auch für Nanomaterialien anwendbar sind, die chemischen und physikalischen Besonderheiten von Nanomaterialien allerdings speziell bei der Probenvorbereitung und Dosierung nicht adäquat berücksichtigen (OECD 2012b). In dieser Hinsicht fordert die OECD mehr empirische Daten aus (öko-)toxikologischen Studien und weist darauf hin, dass die Versuche im Moment noch nicht hoch standardisiert sein können und als experimentell betrachtet werden sollten (OECD 2012a). Letztlich sollen standardisierte, an nanospezifische Eigenschaften angepasste Testrichtlinien entstehen, anhand derer das Risiko synthetischer Nanomaterialien umfassend bewertet werden kann.

Exposition

Durch die Anwendung der Nanotechnologie besteht die Möglichkeit, dass Nanomaterialien im Laufe ihrer Herstellung, Anwendung oder am Ende ihres Lebensweges freigesetzt werden und mit den Umweltmedien (Luft, Wasser, Boden) und so auch mit Menschen und Biota in Kontakt kommen können. Allerdings erlauben die bisher vorliegenden Kenntnisse über das Schicksal und Verhalten von Nanomaterialien in natürlichen Ökosystemen derzeit noch keine verlässlichen Abschätzungen über Umweltkonzentrationen. Erschwert wird die Beurteilung der Expositionseite zusätzlich durch die nur auf Schätzungen beruhenden Angaben zu Produktionsmengen von Nanomaterialien sowie das Fehlen einer einheitlichen Kennzeichnungspflicht für nanotechnologiebasierte Produkte (vgl. Kapitel 6).

Eine Exposition mit möglichem Einfluss auf die menschliche Gesundheit kann sowohl bei der Herstellung und Verarbeitung von Nanomaterialien erfolgen (Exposition am Arbeitsplatz) als auch bei der Verwendung von Produkten wie Lebensmittel oder Kosmetika (Verbraucherexposition) (UBA et al. 2007). Die Exposition der Umwelt erfolgt ebenfalls durch die Produktion und Weiterverarbeitung von Nanomaterialien sowie durch die Verwendung nanohaltiger Produkte, die zur Emission von Nanomaterialien in das Abwassersystem und anschließenden Freisetzung in Oberflächengewässer führen können. So werden beispielsweise Silbernanopartikel nachweislich aus kommerziell erhältlichen Textilien ausgewaschen (Geranio et al. 2009). Im Abfluss von Häuserfassaden wurden nanoskalige Titandioxidpartikel nachgewiesen, welche ein Bestandteil kommerziell erhältlicher Fassadenfarben sind (Kägi et al. 2008). Treibstoffe und Katalysatoren, die Nanomaterialien enthalten, können durch Autoabgase zu direkten Emissionen in die Luft führen (Boxall et al. 2007). Eine absichtliche Freisetzung von Nanomaterialien in Böden, Oberflächen- sowie Grundwasser erfolgt bei der Sanierung schadstoffbelasteter Standorte (vgl. Kapitel 3) (Boxall et al. 2007, Nowack/Bucheli 2007). Generell besteht das höchste Emissionsrisiko bei jenen Nanomaterialien, die frei vorliegen, also nicht fest in eine Produktmatrix integriert sind (TA-Swiss 2013).

In der Umwelt sind Nanomaterialien zahlreichen Umwandlungsprozessen ausgesetzt. Verschiedene Umweltfaktoren können beispielsweise zum Abbau des Coatings oberflächenfunktionalisierter Nanopartikel führen, was möglicherweise die Aggregation der Partikel im Umweltmedium begünstigt (Abb. 3). Ebenso können natürlich in der Umwelt auftretende Stoffe (z.B. Huminsäuren) an die Oberfläche freigesetzter Nanomaterialien adsorbieren und damit deren Aggregation verhindern. Die Zusammensetzung des jeweiligen Nanomaterials und die vorherrschenden Umweltbedingungen haben somit Einfluss auf das weitere Schicksal und den Transport des Materials in der Umwelt. Neben den physikochemischen können sich auch die (öko-)toxikologischen Eigenschaften eines in der Umwelt transformierten Nanomaterials stark von denen des ursprünglich freigesetzten Nanomaterials unterscheiden (TA-Swiss 2013).

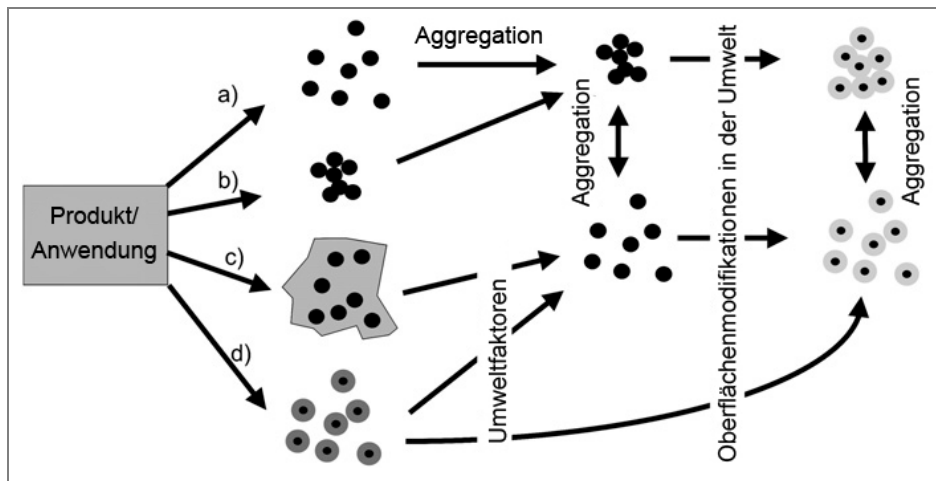


Abbildung 3: Freisetzung von Nanopartikeln aus Produkten und Anwendungen (Nowack/Bucheli 2007): a) freie Nanopartikel, b) Nanopartikel-Aggregate, c) matrixgebundene Nanopartikel, d) oberflächenfunktionalisierte Nanopartikel. Umweltfaktoren führen zur Bildung freier Nanopartikel, welche Aggregationsreaktionen eingehen können. Oberflächenmodifikationen beeinflussen ebenfalls das Aggregationsverhalten der Nanopartikel.

Soll in Feldstudien untersucht werden, in welcher Konzentration Nanomaterialien in der Umwelt vorliegen, treten mehrere Schwierigkeiten auf: Die herkömmlichen Analytikmethoden erlauben lediglich Aussagen darüber, in welcher Konzentration das jeweilige Material in einer Umweltprobe vorliegt, erfassen allerdings keine weiteren Charakteristika der während des Lebenszyklus eines Nanomaterials entstehenden Transformationsprodukte. So lässt sich nur durch die Kombination verschiedener Methoden feststellen, in welchem Umfang beispielsweise die chemische Ausprägungsform (z.B. nanopartikuläre Form, mikropartikuläre Form, ionische Form etc.) eines Metalls zur gemessenen Metallkonzentration in einer Umweltprobe beiträgt. Bisher fehlen adäquate analytische Methoden, die synthetisch hergestellte Nanomaterialien trotz niedriger Partikelkonzentrationen sowie störender Matrixeffekte detektieren und charakterisieren können (Gottschalk/Nowack 2011). Kann die Konzentration einer Substanz sowie ihrer Transformationsprodukte in den unterschiedlichen Umweltmedien nicht erfasst werden, so kann weder ihr Umweltverhalten in Feldstudien untersucht noch eine Aussage zu dem tatsächlich von ihr ausgehenden Risiko gemacht werden.

Trotz der vielen Unsicherheiten über tatsächliche Produktionsmengen, Emissionen, Umweltverhalten und fehlender präziser analytischer Methoden, existieren einige Modelle zur Abschätzung möglicher Umweltkonzentrationen von Nanomaterialien in den Kompartimenten Wasser, Boden und Luft sowie in Abläufen von Abwasserbehandlungsanlagen und im Klärschlamm.¹¹ Allerdings unterscheiden sich die vorher-

¹¹ Eine detaillierte Auflistung über modellierte Umweltkonzentrationen in den verschiedenen Umweltkompartimenten kann der Übersichtsstudie von Gottschalk et al. (2013) entnommen werden.

gesagten Umweltkonzentrationen teilweise erheblich, je nachdem ob beispielsweise in der Umwelt auftretende Umwandlungsprozesse mit in die Modelle einbezogen werden (Gottschalk et al. 2013). Auch zur Belastung der Raumluft am Arbeitsplatz existieren einige Studien, in welchen Messungen während verschiedener Produktions-, Verpackungs- und Reinigungsprozesse vorgenommen wurden.¹² Allerdings sind auch diese Studien aufgrund der unterschiedlichen experimentellen Methoden schwer untereinander vergleichbar, sodass momentan keine sichere Abschätzung der Exposition am Arbeitsplatz möglich ist (Brouwer 2010). Außerdem decken die Modelle und Messtechniken lediglich quantitative Aussagen zur Umweltkonzentration von Nanomaterialien ab; Charakteristika wie Größe, Form oder Oberflächenchemie werden nicht berücksichtigt. Gerade diese Faktoren zeigen aber Einfluss auf die (öko-)toxikologischen Effekte eines Nanomaterials, was eine Integration dieser Parameter in zukünftige Modelle erfordert (Gottschalk et al. 2013).

Effekte

Innerhalb der Risikoforschung lag der Fokus bei der Beurteilung möglicher Effekte von Nanomaterialien zunächst mehr auf deren Toxikologie und Gesundheitsfolgen, während ökotoxikologische Aspekte seltener betrachtet wurden. Zudem konzentrieren sich die Toxizitätsstudien auf Testsysteme *in vitro*, d.h. die Untersuchung von Effekten auf Bakterien und Zellen außerhalb des Organismus. In-vitro-Studien erlauben die direkte Beobachtung von Effekten und Toxizitätsmechanismen unter kontrollierten Bedingungen, haben aber den Nachteil, dass Ergebnisse nur eingeschränkt auf den ganzen Organismus (*in vivo*) übertragen werden können. Zwar gibt die stetig zunehmende Zahl von In-vitro-Studien einige Hinweise über mögliche Toxizitätsmechanismen von Nanomaterialien, doch existieren nach wie vor verhältnismäßig wenige Studien, in welchen physiologisch relevante Endpunkte *in vivo* betrachtet werden (Abb. 4) (Haynes 2010).

¹² Eine Zusammenfassung experimenteller Studien zur Exposition am Arbeitsplatz kann der Übersicht von Brouwer (2010) entnommen werden.

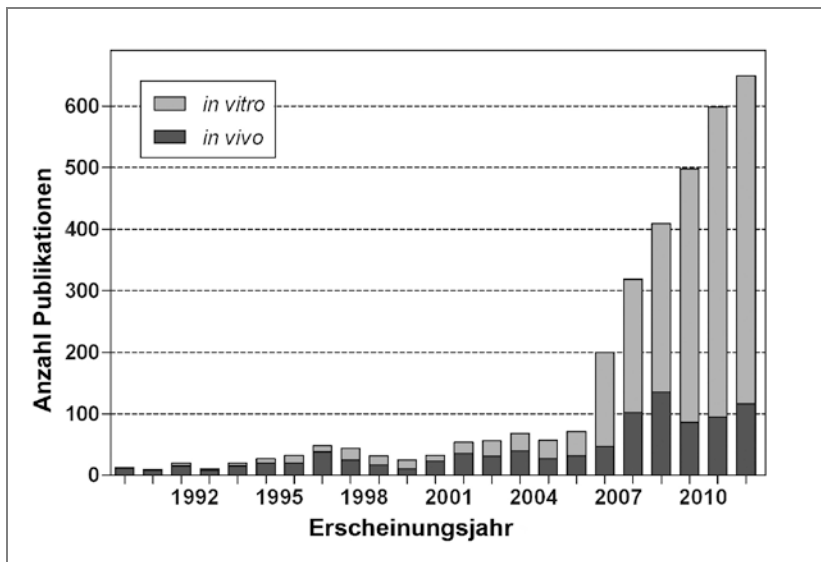


Abbildung 4: Anzahl (öko-)toxikologischer In-vitro- und In-vivo-Studien zu Nanomaterialien, publiziert im Zeitraum zwischen 1990 und 2012 (weltweit). Die Daten wurden dem International Council on Nanotechnology (ICON 2013) entnommen.

Da bisher keine einheitlichen Richtlinien für die (öko-)toxikologische Testung von Nanomaterialien existieren, ist die Interpretation von Effektstudien entsprechend schwierig. Aufgrund der Vielzahl der Nanomaterialien und der von Studie zu Studie variierenden experimentellen Bedingungen sind die Ergebnisse zwischen den Studien daher nicht immer konsistent. Problematisch ist auch die oft nur limitiert vorhandene Dokumentation der physikochemischen Eigenschaften (z.B. Größe, Form, Aggregation) des getesteten Materials, was die Interpretation der (öko-)toxikologischen Effekte zusätzlich erschwert.

Toxikologie von Nanomaterialien

Bedeutend für die toxikologischen Effekte von Nanomaterialien ist zunächst deren Aufnahme in den Organismus, das heißt, die Bioverfügbarkeit und die Resorption in Organe und Zellen. Mögliche Aufnahmepfade von Nanomaterialien in den menschlichen Körper sind der Magen-Darm-Trakt, die Haut und die Atemwege, wobei der Aufnahme durch Inhalation die größte Bedeutung zugemessen wird. Eine intakte Haut dient nach derzeitigem Forschungsstand als effektive Barriere gegen die Aufnahme von Nanomaterialien; nicht abschließend geklärt ist, in welchem Ausmaß eine Aufnahme bei verletzter Haut (z.B. Sonnenbrand) erfolgt (Poland et al. 2013). Nach oraler Aufnahme von Nanomaterialien stellt die intakte Darmschleimhaut eine ähnlich effektive Barriere dar, sodass nur ein geringer Teil der Dosis die Darmbarriere überwindet und in den Körper aufgenommen wird (Schober et al. 2012).

Bei der Toxikologie synthetisch hergestellter Nanomaterialien werden häufig Analogieschlüsse zu den Auswirkungen anderer partikelförmiger Luftverunreinigungen, wie z.B. Asbest, Kohlenstaub oder die durch fossile Brennstoffe verursachte Luftver-

schmutzung, gezogen (Stone et al. 2010). Dies ist naheliegend, da ultrafeine Teilchen (Feinstaub), wie sie bei Verbrennungsvorgängen entstehen, einen Korngrößendurchmesser von bis zu 100 nm besitzen (Neuberger 2007) und somit nanoskalig sind. Studien haben gezeigt, dass die Inhalation dieser ultrafeinen Partikel nicht nur negative Auswirkungen auf die respiratorischen Systeme zeigt, sondern auch systemische Effekte hervorzurufen scheint, wie z.B. ein steigendes Risiko von Herz-Kreislauf-Erkrankungen (Vermylen et al. 2005). In Tierversuchen wurde nachgewiesen, dass die Toxizität derartiger Teilchen zunimmt, wenn bei gleichbleibender Gesamtmasse der Teilchendurchmesser abnimmt. Außerdem stellte sich heraus, dass bestimmte toxische Effekte erst unterhalb eines bestimmten Teilchendurchmessers auftreten und dabei weitgehend unabhängig von der chemischen Struktur des jeweiligen Teilchens sind. Weiterhin ist für ultrafeine Teilchen bekannt, dass sie biologische Membranen leichter überwinden können als größere Partikel (Neuberger 2007).

Diese Ergebnisse lassen auch auf eine inhalative Toxizität synthetisch hergestellter Nanomaterialien schließen (Moshhammer/Wallner 2007), welche in Tierversuchen (zumeist Inhalationsstudien mit Nagetieren) untersucht wurde. In diesen Studien konnten beispielsweise toxikologische Effekte, wie Entzündungsprozesse, nach Exposition gegenüber Kohlenstoffnanoröhrchen und nanoskaligem Titandioxid nachgewiesen werden (Larsen et al. 2010, Kwon et al. 2009, Sager/Castranova 2009, Lam et al. 2004, Warheit et al. 2004, Ferin et al. 1990, Oberdörster/Yu 1990). Zusätzlich zeigen Studien mit Nagetieren, dass Nanomaterialien bei einer Aufnahme über die Lunge in den Blutkreislauf gelangen und sich in Organen wie Leber, Niere und Milz anreichern (Schober et al. 2012). Darüber hinaus existieren Hinweise, dass Nanomaterialien möglicherweise entlang den Nerven ins Gehirn gelangen, damit also die Blut-Hirn-Schranke (und möglicherweise weitere Blut-Gewebe-Schranken) überwinden können (Kim et al. 2006, Oberdörster et al. 2004, Koziara et al. 2003). Diese Ergebnisse sind nicht nur aus toxikologischer Sicht interessant, sondern könnten für medizinische Zwecke zur Entwicklung von Medikamenten, die beispielsweise die Blut-Hirn-Schranke umgehen, genutzt werden (Hagens et al. 2007).

Welche Effekte synthetisch hergestellte Nanomaterialien auf die bzw. in der Zelle haben, wird in isolierten Testsystemen *in vitro* untersucht. Bei diesen Studien ist festzuhalten, dass sie schwer auf den gesamten Organismus übertragen werden können, sondern vielmehr zur Aufklärung möglicher Toxizitätsmechanismen durch die gezielte Untersuchung bestimmter zellulärer Prozesse dienen. So zeigen In-vitro-Studien mit Säugerzelllinien, dass synthetische Nanomaterialien in der Lage sind, die Zellmembran zu überwinden und in Zellen einzudringen (Carlson et al. 2008, Tran et al. 2005). In der Zelle verursachen Nanomaterialien Entzündungsprozesse, gentoxische Effekte und sind verantwortlich für die Entstehung von Sauerstoffradikalen, welche zu weiteren Schädigungen der Zelle führen können (Foldbjerg et al. 2011, Barillet et al. 2010, Bhattacharya et al. 2009). Diese Schädigungen, vermittelt durch die hohe Reaktivität von Nanopartikeln, werden als Hauptgrund für die von Nanopartikeln ausgehenden cytotoxischen Effekte gesehen (Völker et al. 2013b).

Zusammenfassend lassen die Ergebnisse aus toxikologischen Studien derzeit keine generellen Schlussfolgerungen über Aufnahme, Verteilung und Effekte von Nanomaterialien auf den Menschen zu (Schober et al. 2012). Neben fehlenden systematischen Studien und der geringen Übertragbarkeit der Ergebnisse aufgrund der Vielzahl existierender Nanomaterialien werden in den Versuchen außerdem zumeist keine realistischen Expositionsszenarien dargestellt. So übersteigen die in den Versuchen gewählten Expositionsdosen die tatsächlich in der Umwelt auftretenden Konzentrationen von Nanomaterialien oft um ein Vielfaches, sodass ausgehend von diesen Studien momentan kein akutes Risiko von Nanomaterialien auf die menschliche Gesundheit anzunehmen ist. Nicht ausgeschlossen werden kann, dass eine für die menschliche Gesundheit relevante Exposition am Arbeitsplatz bei der Herstellung und/oder Weiterverarbeitung synthetischer Nanomaterialien auftritt, die insbesondere dann toxikologisch von Bedeutung ist, wenn nanopartikelhaltige Aerosole durch den Umgang mit Nanomaterialien in ungebundener, staubender Form entstehen (Schober et al. 2012). Trotz der breiten Streuung möglicher toxischer Effekte und der vielfältigen Freisetzungsmöglichkeiten können Nanomaterialien im Rahmen der Risikobewertung am Arbeitsplatz mittlerweile in vier risikorelevante Stoffgruppen unterteilt werden (Abb. 5).

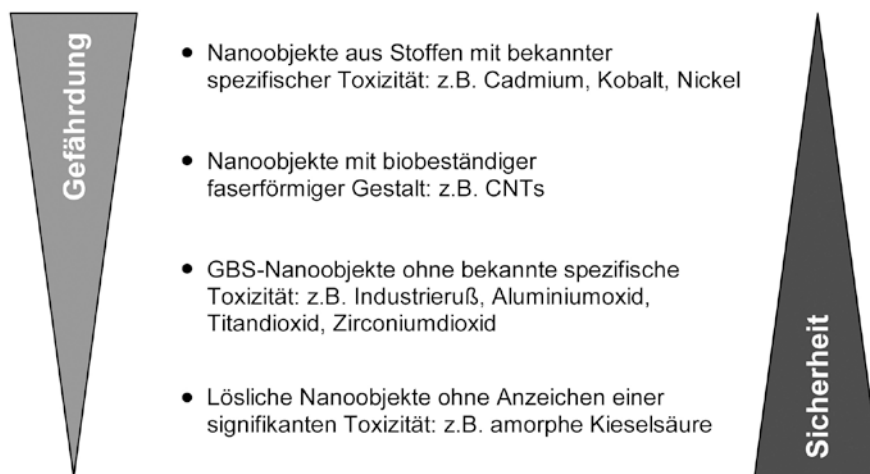


Abbildung 5: Im Rahmen der Risikobewertung arbeitsplatzrelevante Nanostoffgruppen (Schober et al. 2012). CNTs: Carbon nanotubes (Kohlenstoffnanoröhren), GBS: Granuläre biobeständige Stäube

Generell wird ein sicherer Umgang mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz derzeit durch die Vorschriften zur Chemikaliensicherheit gewährleistet. Lückenhaft sind allerdings zumeist Informationen über die Partikelgestalt, aus welcher sich gesundheitliche Risiken ergeben können, weshalb die morphologische Charakterisierung der Nanomaterialien im Rahmen eines vorsorgenden Risikomanagements essentiell ist (Schober et al. 2012).

Ökotoxikologie von Nanomaterialien

Innerhalb der letzten zehn Jahre wurden in einer steigenden Zahl ökotoxikologischer Studien vermehrt Effekte von Nanomaterialien auf die Umwelt untersucht, wobei der Großteil der Studien zu aquatischen Organismen vorliegt. In diesen Studien wurden überwiegend akute Effekte in Kurzzeittests (d.h. Tests mit einer Versuchsdauer von weniger als 96 Stunden) auf Grünalgen, Krebstieren und Fischen erfasst. Unsicherheiten existieren bezüglich chronischer Effekte von Nanomaterialien genauso wie bei der Akkumulation über die Nahrungskette (Klaine et al. 2012).

Die Bioverfügbarkeit und Aufnahme von Nanomaterialien durch aquatische Organismen hängt von mehreren Faktoren, wie z.B. partikelspezifischen Eigenschaften, Konzentration, Expositionsweg sowie Biologie und Ökologie des exponierten Organismus ab (Fabrega et al. 2011). Filtrierende Organismen (z.B. Wasserflöhe, Muscheln) sind aufgrund ihrer Ernährungsweise besonders frei in der Wasserphase vorkommenden Nanopartikeln ausgesetzt. So konnten in Laborstudien Silbernanopartikel beispielsweise an den Kiemen und im Darm von Wasserflöhen nachgewiesen werden (Völker et al. 2013a, Zhao/Wang 2010). Nanopartikel, die im Gewässer größere Aggregate bilden, tendieren zur Sedimentation und werden aus der Wasserphase eliminiert. Folglich sind diese Materialien weniger verfügbar für Organismen der freien Wasserphase, können aber für Effekte auf Sedimentbewohner verantwortlich sein (Behra et al. 2013). Beispielsweise konnten Khan et al. (2012) zeigen, dass Silbernanopartikel-Aggregate mit einer Partikelgröße von über 100 nm von der Wattschnecke *Peringia ulvae* aufgenommen werden. Momentan existieren allerdings keine Studien, in denen die Bioverfügbarkeit und die Aufnahme unterschiedlich großer Nanopartikel-Aggregate systematisch untersucht werden.

Anhand der vorliegenden akuten ökotoxikologischen Studien ist mittlerweile eine grobe Klassifizierung einiger Nanomaterialien nach ihrer Toxizität möglich. Nach den in Abbildung 6 dargestellten mittleren ökotoxikologischen Kenngrößen¹³ einiger Nanomaterialien für die am häufigsten untersuchten Organismengruppen (Algen, Krebstiere, Fische) existieren erhebliche Unterschiede in deren Toxizität, was verdeutlicht, dass Nanomaterialien nicht als *per se* gefährlich eingestuft werden können. Während Titandioxid beispielsweise eine eher moderate Toxizität aufweist, sind Silbernanopartikel nach den vorliegenden Studien als extrem toxisch für aquatische Organismen zu klassifizieren. Diese Kenngrößen geben allerdings nicht zwangsläufig einen Hinweis auf die chronische Toxizität der Materialien; so konnte beispielsweise in einer Langzeitstudie mit dem Wasserfloh *Daphnia magna* gezeigt werden, dass eine verlängerte Expositionszeit die Toxizität von Titandioxidnanopartikeln drastisch erhöht (Jacobasch et al. 2014).

¹³ L(E)C₅₀, mittlere letale (effektive) Konzentration; entspricht der Konzentration einer Substanz, die bei 50 Prozent der Versuchsorganismen den Tod (einen Effekt) auslöst.

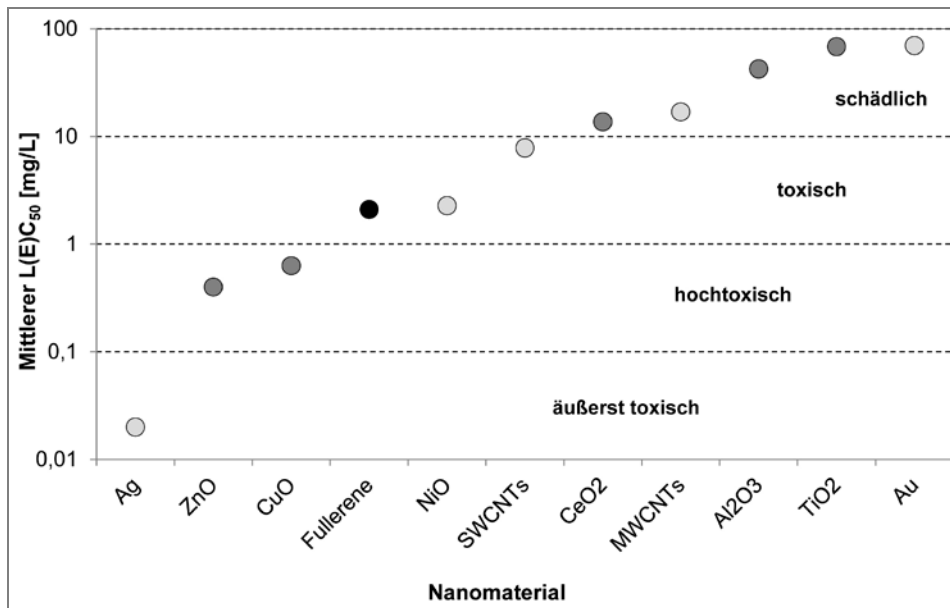


Abbildung 6: Klassifizierung verschiedener Nanomaterialien auf Basis mittlerer akuter L(E)C₅₀-Werte für verschiedene aquatische Organismengruppen (Krebstiere – hellgrau, Algen – dunkelgrau, und Fische – schwarz). Die Klassifizierung erfolgte nach Kahru/Dubourguier 2010 und Blaise et al. 2008. (Publikationen richten sich nach Klassifikationsschema der EU-Richtlinie 93/67/EEC, CEC 1996.) Dargestellt sind jeweils die mittleren L(E)C₅₀-Werte der empfindlichsten Organismengruppe aus unterschiedlichen Publikationen¹⁴: <math><0,1\text{ mg/L}</math> = äußerst toxisch für aquatische Organismen; $0,1-1\text{ mg/L}$ = hochtoxisch für aquatische Organismen; $1-10\text{ mg/L}$ = toxisch für aquatische Organismen; $10-100\text{ mg/L}$ = schädlich für aquatische Organismen; $>100\text{ mg/L}$ = nicht toxisch für aquatische Organismen. Ag: Silber, ZnO: Zinkoxid, CuO: Kupferoxid, NiO: Nickeloxid, SWCNTs: single walled carbon nanotubes (einwandige Kohlenstoffnanoröhren), CeO₂: Cerdioxid, MWCNTs: multi walled carbon nanotubes (mehrwandige Kohlenstoffnanoröhren), Al₂O₃: Aluminiumoxid, TiO₂: Titandioxid, Au: Gold

Obwohl Nanomaterialien ein höheres toxisches Potenzial als ihre mikroskaligen Ausgangsstoffe besitzen (Kahru/Dubourguier 2010), variiert die Toxizität je nach chemischer Zusammensetzung des Materials. Bisher ist unklar, welche Faktoren genau das toxische Potenzial von Nanomaterialien determinieren. Die chemische Stabilität, z.B. Oxidations- und Reduktionsreaktionen auf Nanopartikeloberflächen, welche zur Bildung von Sauerstoffradikalen oder zur Ionenfreisetzung führen können, stellt sicher-

¹⁴ Völker et al. 2013a, Asghari et al. 2012, Han et al. 2012, Hoheisel et al. 2012, Poynton et al. 2012, Wang et al. 2012, Dabrunz et al. 2011, Gaiser et al. 2011, García et al. 2011, Giebner 2011, Gong et al. 2011, Kim et al. 2011, Sadiq et al. 2011, Xiong et al. 2011, Zhao/Wang 2011, Allen et al. 2010, Blinova et al. 2010, Choi et al. 2010, Hartmann et al. 2010, Kim et al. 2010, Laban et al. 2010, Li et al. 2010, Zhu et al. 2010, Aruoja et al. 2009, Chae et al. 2009, Gao et al. 2009, Ispas et al. 2009, Strigul et al. 2009, Van Hoecke et al. 2009, Wiench et al. 2009, Zhu et al. 2009, Asharani et al. 2008, Griffith et al. 2008, Heinlaan et al. 2008, Navarro et al. 2008, Zhu et al. 2008, Franklin et al. 2007, Roberts et al. 2007, Usenko et al. 2007, Warheit et al. 2007, Hund-Rinke/Simon 2006, Lovern/Klaper 2006, Oberdörster et al. 2006

lich eine Hauptquelle der Toxizität dar (Auffan et al. 2009). Die Ergebnisse aus In vitro-Studien deuten darauf hin, dass Nanomaterialien mit einer stark oxidierenden oder reduzierenden Kapazität eine höhere Cytotoxizität aufweisen, während chemisch stabile Nanopartikel weniger cytotoxisch erscheinen (Auffan et al. 2009). Die Ergebnisse aus aquatischen Studien zeigen ebenfalls, dass die höchste Toxizität für Nanomaterialien beobachtet wird, welche in wässrigen Medien löslich sind und daher Ionen freisetzen (z.B. Silber, Zinkoxid, Kupferoxid). Chemisch inerte Materialien (z.B. Aluminiumoxid, Titandioxid, Gold) zeigen eine wesentlich geringere akute Toxizität. Nicht abschließend geklärt ist, welchen Anteil freigesetzte Ionen an der Höhe des toxischen Effekts haben; neben der Biologie des Testorganismus hängt dies auch stark vom jeweiligen Material und den Testbedingungen ab (OECD 2012a).

Weitere Bedenken über Umweltauswirkungen von Nanomaterialien stellen mögliche Wechselwirkungen mit anderen Umweltkomponenten dar. Zusätzlich zu abiotischen Faktoren, die das Aggregationsverhalten beeinflussen, besteht Sorge, dass Nanomaterialien das Schicksal und die Bioverfügbarkeit anderer Kontaminanten in natürlichen Ökosystemen beeinflussen könnten (Baun et al. 2008a). Aufgrund ihrer großen Oberfläche zeigen Nanomaterialien eine hohe Sorptionsfähigkeit und könnten daher als „Schadstoffträger“ die Bioverfügbarkeit adsorbierter Kontaminanten erhöhen und damit ihre Toxizität (Baun et al. 2008b, Sun et al. 2007, Yang et al. 2010). Umgekehrt könnte die Adsorption von begleitend vorkommenden Kontaminanten auch deren Bioverfügbarkeit und damit die Toxizität herabsetzen (Nowack/Bucheli 2007, Yang et al. 2012).

Zusammenfassend sind jedoch auch die Studien im Bereich der Ökotoxikologie von Nanomaterialien teilweise nur begrenzt aussagekräftig und vergleichbar. Dies hängt unter anderem mit dem bereits oben erwähnten Fehlen einheitlicher Prüfrichtlinien oder der unzureichenden Partikelcharakterisierung zusammen. Darüber hinaus ist anzumerken, dass die meisten Nanomaterialien (noch) nicht in ökotoxikologisch bedenklichen Konzentrationen in der Umwelt vorliegen bzw. nicht einmal in bedeutendem Umfang produziert werden, sodass die meisten ökotoxikologischen Studien zwar generelle Hinweise auf die Toxizität der Materialien geben, bisher allerdings keine umweltrelevanten Szenarien abbilden.

Über die für ökotoxikologische Studien geeignetsten experimentellen Bedingungen herrscht momentan kein Konsens, da diese sich je nach der zu bearbeitenden Fragestellung unterscheiden.¹⁵ In den Studien wird zumeist versucht, die Bildung von Aggregaten und Transformationsprodukten im Expositionsmedium zu vermeiden und homogene stabile Nanopartikeldispersionen zu gewährleisten, damit spezifische wissenschaftliche Fragestellungen bearbeitet werden können, wie z.B. die Abhängigkeit der Toxizität von der Partikelgröße. Andererseits erfordern umweltrelevante Expositionsszenarien durchaus die Bildung von Aggregaten und Transformationsproduk-

¹⁵ In den Übersichtsstudien von Crane et al. (2008) und Handy et al. (2012) sind verschiedene Methoden und ihre Vor- und Nachteile für die ökotoxikologische Testung zusammengefasst.

ten, da diese mutmaßlich eher in der Umwelt vorkommen als Nanopartikel in ihrer Primärform.

Ausblick

Aufgrund der hohen Anzahl an Nanomaterialien sowie deren vielfältigen Eigenschaften, die darüber hinaus stark von externen Faktoren abhängig sind, kann keine allgemeingültige Aussage im Sinne eines nanospezifischen (öko-)toxikologischen Risikos getroffen werden. Dies bestätigt auch der SCENIHR: Die Hypothese, dass kleinere Materialien stets reaktiver und somit auch toxischer sind, kann anhand derzeit vorliegender Publikationen nicht belegt werden (De Jong 2013). Daraus ergibt sich, dass für jedes Nanomaterial eine spezifische Risikobeurteilung vorzunehmen ist. Diese Risikobeurteilung sollte entsprechend dem Verständnis des Risikobegriffs nicht allein auf mögliche toxische Effekte ausgerichtet sein, sondern auch die Exposition verteilt über den gesamten Lebenszyklus mit einbeziehen. Hierbei sollte auch berücksichtigt werden, dass die allgemeinen und somit auch die toxizitätsrelevanten Eigenschaften der Nanomaterialien stark von externen Faktoren abhängig und somit in der Umwelt sehr variabel sind.

Für zukünftige Studien im Bereich der Nanorisikoforschung wird auf methodischer Ebene zweierlei vorgeschlagen (Krug/Wick 2011): Erstens müssen die Nanomaterialien, die untersucht werden sollen, ausreichend charakterisiert werden (z.B. in Bezug auf chemische Zusammensetzung, Reinheit, Partikelgröße oder spezifische Oberfläche) sowie diese Charakterisierung in jede Studie integriert werden. Zweitens müssen genügend Informationen über die ausgewählten Testmethoden beschafft und in der Studie mitgeliefert werden, um die Validität und Eignung derselben sicherzustellen und nachweisen zu können. Nur so können die Studien international verglichen, zuverlässig diskutiert und als Grundlage für stichfeste Argumente für oder gegen die Unbedenklichkeit bestimmter Nanomaterialien genutzt werden.

Weitere prioritäre Themen im Bereich der Nanorisikoforschung, die in verschiedenen Veröffentlichungen genannt werden, fasst das Zentrum für Technologiefolgen-Ab-schätzung TA-Swiss (2013: 79f.) wie folgt zusammen:

Untersuchungen zur Gesundheit (Toxikologie und Exposition):

- Studien zur chronischen Toxizität nach inhalativer Aufnahme in realistischem Konzentrationsbereich
- Untersuchungen zur Aufnahme (Atemwege, Haut, Magen-Darm-Trakt), dem Transport und der Verteilung von Nanoobjekten im Organismus (z.B. Überschreiten von Blut-Hirn-Schranke, Plazentaschranke u.a.m.)
- Identifikation kritischer Parameter für toxische Effekte (Größe, chemische Zusammensetzung, Oberflächen-, Morphologieeffekte etc.)
- Entwicklung von Methoden/Messtechnik zur Erfassung der Art und Konzentration von Nanopartikeln am Arbeitsplatz, des Migrationsverhaltens aus Produkten sowie der realen Erscheinungsform im Körper (isolierte Nanoobjekte, Agglomerate)

- Entwicklung und Bewertung toxikologischer Prüfmethode hinsichtlich ihrer Eignung für die Erkennung unterschiedlicher spezifischer Wirkungen im Körper unter konkreten Praxisbedingungen, z.B. am Arbeitsplatz
- Entwicklung und Validierung von schnellen Screening-Möglichkeiten zur Untersuchung akuter toxikologischer Effekte bereits in der Entwicklungsphase
- Entwicklung von Methoden zur reproduzierbaren Aerosolherstellung im Nanobereich für toxikologische Studien

Untersuchungen zur Ökotoxikologie und Exposition:

- Untersuchungen zum Verhalten und Verbleib von Nanomaterialien am Ende des Lebenszyklus (Recycling, Entsorgung)
- Entwicklung von robusten und sensitiven Nachweismethoden für Nanomaterialien in Umweltmedien inkl. Aspekte der Qualitätssicherung und internationalen Standardisierung
- Untersuchungen zu chronischen Wirkungen auf aquatische und terrestrische Organismen
- Untersuchung zur Aufnahme von persistenten Nanoobjekten durch lebende Organismen/Mikroorganismen (in vivo und in vitro) sowie zur Toxikokinetik, Deposition und Akkumulation von persistenten Nanoobjekten
- Bestimmung der Agglomeration/Segregation von spezifischen Nanoobjekten (Stabilität des Nanoobjekts), Generalisierung der Resultate, um ein Standardmodell für Agglomeration/Segregation zu entwickeln

5 Risikowahrnehmung und -kommunikation

Neben der Risikoforschung nimmt die Risikowahrnehmung und -kommunikation eine relevante Rolle im Diskurs über Nanomaterialien ein. Die Bundesoberbehörden bezeichnen sie als eine „Säule der Aktivitäten zur Sicherheit in der Nanotechnologie“ (UBA et al. 2013: 32). Auch die Europäische Kommission verweist auf die gesellschaftlichen Aspekte der Nanotechnologie und fordert zum Dialog mit Stakeholdern¹⁶ und Bürgern auf, um Transparenz zu gewährleisten und zu Bewusstsein und Vertrauen in der Öffentlichkeit beizutragen (Europäische Kommission 2004). Ziel ist es, die Kommunikation zwischen Wissenschaftlern, Produzenten, Interessenvertretern, Politikern, NGOs und Verbrauchern durch vielfältige Dialogangebote zu gestalten (UBA et al. 2013).

Anhand von Ergebnissen aus Medienanalysen, repräsentativen Umfragen, Fallstudien und vorhandenen Dialogangeboten soll folgend der aktuelle Stand zur Wahrnehmung sowie zum gesellschaftlichen Dialog zur Nanotechnologie dargestellt werden.

¹⁶ Grundsätzlich zählen auch BürgerInnen zu Stakeholdern. Im Folgenden wird jedoch aufgrund der in der Literatur geführten Diskussion unterschieden zwischen Stakeholdern (wie u.a. Wissenschaftler, Produzenten, Politiker, Verbraucherverbände) und Bürgern.

Wahrnehmung von Nanotechnologien

In der öffentlich geführten Debatte über Chancen und Risiken der Nanotechnologie werden die Medien als ein wichtiger Akteur gesehen, da davon auszugehen ist, dass die mediale Darstellung die Wahrnehmung der Bevölkerung erheblich beeinflusst. Daher hat das BfR sowohl für die Jahre 2000–2007, als auch für 2008–2012 eine Analyse der Medienberichterstattung durchführen lassen (Zimmer et al. 2008a, BfR 2013a).

In der Medienanalyse kommen BfR (2013a) zu dem Ergebnis, dass die Anzahl der veröffentlichten Artikel im Vergleich zum Zeitraum von 2000–2007 gesunken ist. Ein Großteil der Artikel zu Nanotechnologien wurde im Wissenschaftsressort veröffentlicht. Neben Anwendungsbereichen wie Rüstung, Luft und Raumfahrt und Energiewirtschaft, stehen vor allem Anwendungsmöglichkeiten in der Gesundheitsversorgung, speziell in der Tumor- bzw. Krebstherapie und anderen Therapien im Fokus. Verbrauchernahe Anwendungsbereiche wurden nur als Unterthemen behandelt. Insgesamt ist die Berichterstattung über Nanotechnologie überwiegend positiv und der Nutzen der Nanotechnologie steht deutlich im Vordergrund. Artikel, die potenzielle Risiken der Nanotechnologie thematisieren, finden sich kaum (ca. 12%).

Die positive Medienberichterstattung spiegelt sich auch in der Wahrnehmung der Nanotechnologie bei Verbrauchern und Verbraucherinnen wider (UBA 2013). Im Projekt NanoView des BfR wurden sämtliche Studien, die seit 2000 im internationalen Raum zur Wahrnehmung von Nanotechnologien durchgeführt wurden, zusammengeführt und verglichen. Im Fokus des Vergleichs dieser Studien stand ausschließlich die Wahrnehmung der Bevölkerung; weitere Akteure wurden nicht berücksichtigt (BfR 2013a). Zur Messung der Wahrnehmung von Nanomaterialien untersuchten die Studien nicht nur die Wahrnehmung der positiven und negativen Auswirkungen (*risk-benefit trade off – Verhältnis aus Risiko und Nutzen*), sondern darüber hinaus auch die Bekanntheit, den Wissensstand sowie die Einstellung. Einige jüngere Studien untersuchten ferner die Kauf- oder Zahlungsbereitschaft für konkrete Nanoanwendungen wie z.B. Nano-Lebensmittel (BfR 2013b).

Bezüglich des Verhältnisses aus Risiko und Nutzen wurde bei der Bevölkerung folgendes festgestellt: Wird die Bevölkerung nach ihrer Einstellung zur Nanotechnologie befragt, ohne dass zuvor Informationen über diese gegeben wurden, so werden in überwiegendem Maße (41%) positive und deutlich weniger (10%) negative Beurteilungen gegeben. Ein beträchtlicher Teil (40%) äußert Unsicherheit. Insgesamt weist die Einstellung zu Nanotechnologien verglichen mit der Haltung gegenüber anderen Technologien wie Gentechnik oder tierisches Klonen eine eher positive Ausprägung auf (BfR 2013b).

Was die Bekanntheit und den Wissensstand angeht, konnte festgestellt werden, dass derzeit zwei Drittel der Bevölkerung vieler europäischer Länder sowie der Vereinigten Staaten bereits von der Nanotechnologie gehört haben. Der Bekanntheitsgrad der Nanotechnologie in der deutschen Bevölkerung ist hierbei vergleichsweise hoch und

wird nur von den skandinavischen Ländern und der Schweiz übertroffen. Weiterhin stellte sich heraus, dass das eigene Wissen zur Nanotechnologie mitunter unterschätzt wird: Innerhalb der Gruppe derjenigen, die bereits von der Nanotechnologie gehört haben, hält eine Mehrheit ihren Wissensstand zwar für niedrig, jedoch kann ein Drittel dieser Gruppe den Begriff der Nanotechnologie recht zutreffend definieren sowie Anwendungsfelder nennen (BfR 2013b).

Im Zusammenhang mit der Kauf- oder Zahlungsbereitschaft für konkrete Nanoanwendungen zeigte sich, dass die Akzeptanz von Nanotechnologien und somit auch die Kauf- oder Zahlungsbereitschaft vom jeweiligen Anwendungsbereich abhängig ist. So ist die Akzeptanz körperferner Einsatzbereiche (z.B. Freizeitgeräte) höher als bei körpernahen Anwendungen (z.B. Lebensmittel). Eine Ausnahme stellen hierbei medizinische Anwendungen dar, da ihnen häufig ein hoher Nutzen beigemessen wird. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass das wahrgenommene Verhältnis aus Risiko und Nutzen einen maßgeblichen Einfluss auf die Kaufbereitschaft von Nanoprodukten hat, ohne dass jedoch allein anhand des wahrgenommenen Nutzens die Kaufbereitschaft vorhergesagt werden kann (BfR 2013b).

Um den aktuellen Stand der Wahrnehmung von Nanotechnologien in Deutschland zu erfassen, wurde 2012 innerhalb des Projekts NanoView durch das BfR neben dem internationalen Studienvergleich eine repräsentative Bevölkerungsbefragung durchgeführt. Hierbei wurden die bereits angeführten Größen zur Messung der Wahrnehmung untersucht, weshalb die Ergebnisse mit denen der Vorgängerbefragung von 2007 verglichen werden können (BfR 2013b). Die Wahrnehmung des Verhältnisses von Risiko und Nutzen hat sich leicht zugunsten einer kritischeren Wahrnehmung verändert. Wurden die Risiken im Jahre 2007 von 33 Prozent der Bevölkerung dem Nutzen gegenüber als dominant empfunden, so lag der Anteil 2012 bei 35 Prozent (BfR 2013b). Bezüglich der Entwicklung des Bekanntheitsgrades gegenüber 2007 kann keine eindeutige Aussage getroffen werden. Zwar ist der Anteil der Unwissenden von 33 Prozent auf 41 Prozent gestiegen, jedoch wird dieser Trend dadurch ausgeglichen, dass der Anteil derjenigen, die bereits von Nanotechnologien gehört haben, jedoch keine weiteren Angaben machen können, von 15 Prozent auf ca. fünf Prozent gesunken ist: Fasst man diese Gruppe zusammen, so hat sich der Anteil der nichts oder wenig Wissenden nur geringfügig von 48 Prozent auf 46 Prozent verringert. Bezüglich der Akzeptanz und der Kauf- oder Zahlungsbereitschaft konnte die Abhängigkeit vom jeweiligen Anwendungsbereich bestätigt werden. Eine besonders hohe Akzeptanz und Kaufbereitschaft zeigte sich bei medizinischen und bei umweltbezogenen Anwendungen: Von über 75 Prozent der Befragten wird der Einsatz von Nanomaterialien im medizinischen und 83 Prozent im umweltbezogenen Bereich voll und ganz oder eher befürwortet. Die Anwendung von Nanomaterialien bei Produkten außerhalb des Körpers wie bei Kleidung wird von 60 Prozent voll und ganz oder eher befürwortet. Der Einsatz in körpernahen Produkten hingegen wird kritisch gesehen: Bei Hautcremes wird er nur von 43 Prozent, bei Lebensmitteln sogar nur von 23 Prozent befürwortet. Entsprechend liegt die Kaufbereitschaft für Kleidung mit

Nanomaterialien mit 75 Prozent höher als bei Nano-Kosmetika (36%) und Nano-Lebensmitteln (20%) (BfR 2013b).

Gesellschaftlicher Dialog

Der aktuelle Aktionsplan für Nanotechnologie der Europäischen Kommission sowie der nationale Aktionsplan weisen für ein verantwortungsvolles Risikomanagement auf die Notwendigkeit einer fundierten Risikokommunikation hin. In diesem Zusammenhang werden Dialogverfahren als wichtiges Mittel zur Förderung einer informierten öffentlichen Debatte erachtet (Haslinger 2013, UBA 2013). Diese integrieren verschiedene gesellschaftliche Akteure und reichen vom Informationsangebot über Kommunikationsprozesse bis hin zu Entscheidungsprozessen (Haslinger 2013).

In Deutschland haben Bestrebungen, einen Fachdialog über die Nanotechnologie zu fördern, vergleichsweise früh eingesetzt und es hat sich eine differenzierte Stakeholder-Debatte entwickelt. An dem Prozess beteiligt sind die Bundesministerien und ihre wissenschaftlichen Behörden, die BAuA und das UBA sowie die Industrie, Nichtregierungsorganisationen (NGOs) und verschiedene Landesregierungen (SRU 2011). Folgend sollen exemplarisch eine Auswahl an wichtigen Dialogaktivitäten aufgezeigt werden.

Zu nennen ist insbesondere der vom BMU in Zusammenarbeit mit den Ressortforschungseinrichtungen initiierte NanoDialog, bei dem inzwischen in der vierten Phase Akteure aus Forschung, Wirtschaft, NGOs sowie Behörden und Ministerien Fragestellungen zu Chancen und Risiken der Nanotechnologien diskutieren sowie Lösungsansätze erarbeiten. Parallel zum NanoDialog hat der Verband der chemischen Industrie eine VCI-Dialogstaffel zum Arbeitsschutz, Verbraucherschutz und Umweltschutz der Nanotechnologie initiiert. Daneben hat die DECHEMA Fachtagungen und BASF ein Dialogforum für Stakeholder aus Wissenschaft, Behörden und NGOs organisiert. Auch auf Ebene der Bundesländer (Hessen, Baden-Württemberg, Sachsen, Bayern, Rheinland-Pfalz) fanden verschiedene Stakeholder-Dialoge statt (BMU 2010). Ein zentrales Dialoginstrument stellt neben den genannten Formaten die von der Bundesregierung etablierte Nanokommission mit ihren fünf Themengruppen und insgesamt 28 Dialogtreffen dar.

Mit dem NanoDialog und anderen Beteiligungsinstrumenten wurde nach Ansicht verschiedener Autoren (SRU 2011, Haslinger 2013) eine Grundlage für die gesellschaftliche Auseinandersetzung mit der Nanotechnologie geschaffen. Allerdings zielt die Mehrheit der bisherigen Prozesse auf nur eine bestimmte Gruppe von Fachleuten aus Wirtschaft, Wissenschaft, Behörden sowie Umwelt- und Verbraucherverbänden ab. Partizipative Dialoge mit Bürgern finden dementsprechend weniger häufig statt als Stakeholder-Dialoge. Bürger sind häufiger die Zielgruppe von Informationskampagnen oder anderen Instrumenten des Wissenstransfers. Beispiel für Bürgerdialoge sind die innerhalb des BMBF-Projekts organisierten NanoCare Dialog-Veranstaltungen, in denen interessierte Bürgerinnen und Bürger über Diskussionen mit Exper-

ten aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft Informationen zum Umgang mit Nanomaterialien erhalten (Grobe 2010). Weitere Beispiele stellen zum einen die BfR-Verbraucherkonferenz Nanotechnologie dar, die im November 2006 durchgeführt wurde (Zimmer et al. 2008b). Bei dieser entwickelte eine Gruppe aus VerbraucherInnen Fragen zur Nanotechnologie, welche Sachverständigen in einer öffentlichen Anhörung vorgestellt wurden (Zimmer et al. 2008a). Zum anderen sind die vom BMBF initiierten Bürgerdialoge über Zukunftstechnologien zu nennen (BMBF 2011b)¹⁷ sowie der im Sommer 2010 durchgeführte Bürger-Dialog im Rahmen des Duisburger Umweltmarktes (Grobe 2010).

Ein Beispiel für ein Instrument zum Wissenstransfer zur genaueren Risikowahrnehmung und evtl. auch zur Erhöhung der Akzeptanz stellt der nanoTruck dar. Ein Ausstellungs- und Kommunikationszentrum in einem Truck, das 2004 startete und bis heute zweimal in unterschiedlich konzeptionierten und jeweils erweiterten Kampagnen neu aufgelegt (2008/2011) wurde (BfR 2013b). Daneben gibt es verschiedene Internetplattformen/Datenbanken (z.B. DaNa, hessische Informationsplattform Nano-Sicherheit), die Wissen für unterschiedliche Zielgruppen bereitstellen. Die Datenbanken können dazu genutzt werden, herauszufinden, in welchen Produkten Nanomaterialien enthalten sind (z.B. BUND-Datenbank, DaNa, Datenbank der BG BAU). Eine weitere Internetplattform hat das Projekt „Risikokonflikte visualisiert – Entwicklung und Erprobung von internetbasierten Argumentationslandkarten“¹⁸ aufgebaut: Mittels Risikokartierung soll ein Zugang zu den Argumenten, den unterschiedlichen Positionen beteiligter Akteure, den Streitfragen und den Stoffen in der Diskussion um Risiken von Nanomaterialien ermöglicht werden. Die interaktiven Spiele, teilweise auf Schülerinnen und Schüler ausgerichtet, sind als Lernspiele konzipiert. Schließlich gibt es im Bereich Mobile die App „nanotörn“¹⁹, die Alltagsbeispiele zeigt, in denen Nanotechnologien angewendet werden, indem das Handy als eine Art Mikroskop verwendet wird und dadurch unsichtbare Nanostrukturen sichtbar macht, zu denen weiterhin erklärende Texte angeboten werden.

Zur Erhöhung der Transparenz und zur Förderung der Akzeptanz in der Öffentlichkeit kommt der Kommunikation der mit Nanotechnologien verbundenen Risiken eine wichtige Bedeutung zu. Die diskutierte Literatur verdeutlicht, dass die bisherigen Kommunikationsangebote und -konzepte im Rahmen der öffentlichen Diskussion um Nanotechnologien eine gesellschaftliche Auseinandersetzung mit dem Thema ermöglichen. Gleichzeitig wird darauf hingewiesen, dass vorhandenen Kommunikationsformate weitergeführt und neue aufgegriffen werden sollten, die noch breitere Anwendung in der Praxis finden.

¹⁷ Eine detaillierte Übersicht über Dialoge zur Nanotechnologie in Deutschland kann dem Abschlussbericht der Nanokommission entnommen werden (Grobe 2010).

¹⁸ <http://riskcart.wzu.uni-augsburg.de/>

¹⁹ <http://www.uni-kiel.de/aktuell/pm/2012/2012-174-nano-app.shtml>

6 Rechtlicher Rahmen

Der rechtliche Rahmen entlang des Lebenszyklus von Nanomaterialien berührt verschiedene stoffrechtliche und produktrechtliche Vorschriften, rechtliche Regelungen zum Schutz der Umwelt sowie weitere Rechtsbereiche. Bei der Fülle der möglichen zu untersuchenden Rechtsvorschriften werden im Folgenden nur Anregungen aus der bisherigen Debatte zu Nanomaterialien relevante Instrumente kurz skizziert.

Regelungen jenseits des Stoffrechts

Da für Nanomaterialien als Stoffe an sich ein dichtes Netz an Regelungen vorhanden ist, wurde zunächst davon ausgegangen, dass die bestehenden Gesetze und Verordnungen keiner Veränderung bedürfen. Auch wenn es sich bei Nanomaterialien zwar per Definition um Stoffe handelt, sollten sie jedoch aufgrund ihrer veränderten Eigenschaften und nanospezifischen Besonderheiten gesondert reguliert werden (SRU 2011).

Stoffrecht

Grundsätzlich bietet für die meisten Autoren (z.B. SRU 2011, Möller et al. 2013, Eisenberger et al. 2013) das Stoffrecht mit seinen Instrumenten einen geeigneten Rahmen, um Nanomaterialien zu regulieren. Mit der Einführung der EU-Chemikalienverordnung REACH (EG Nr. 1907/2006) wird der Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt beim Umgang mit chemischen Stoffen sichergestellt. Die Verordnung dient der Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe. Alle Stoffe und Substanzen, die in Mengen über 1 t pro Jahr produziert werden, werden durch die Verordnung registriert und toxikologisch sowie ökotoxikologisch bewertet. Nanomaterialien als Stoffe werden von der REACH-Verordnung wie alle anderen chemischen Stoffe prinzipiell erfasst. Allerdings werden Nanomaterialien trotz ihrer veränderten Eigenschaften nicht als eigenständige Substanzen betrachtet, da sie die gleiche chemische Zusammensetzung wie ihre Bulkform besitzen. Dies wirft Regelungslücken vor allem im Bereich der Registrierungspflicht auf. So müssen für Nanomaterialien keine eigenen Daten vorgelegt werden, weshalb auch Testmethoden nicht die Besonderheiten der Nanomaterialien berücksichtigen (SRU 2011). Für Autoren wie Möller et al. erscheinen die zur Verfügung stehenden Instrumente generell geeignet und es bedarf nicht der Schaffung eines völlig neuen gesetzlichen Rahmens zur Regulierung von Nanomaterialien. Trotzdem müssen Nanomaterialien aufgrund ihrer veränderten Eigenschaften und abweichenden Risiken unabhängig von ihrer Bulkform betrachtet werden und die bestehenden Regelungen zur Registrierung, Bewertung und Zulassung sollten in der REACH-Verordnung nanospezifisch angepasst bzw. ergänzt werden (Möller et al. 2013).

Ergänzt wird die REACH-Verordnung durch die europäische GHS Verordnung (EG Nr. 1272/2008), genannt CLP-Verordnung (Classification, Labelling and Packaging) zur

Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung chemischer Stoffe und Mischungen. Durch die Verordnung werden alle Stoffe in der Form, in der sie vermarktet werden, bewertet und eingestuft, wodurch auch Nanomaterialien berücksichtigt werden. Allerdings sind auch hier keine Vorgaben für die Kennzeichnung von Nanomaterialien vorhanden. Hinzu kommt, dass die Vorgaben der Verordnung häufig aufgrund fehlender Informationen zu Gesundheits- und Umweltgefahren von Nanomaterialien nicht umgesetzt werden können. Diese Vorgaben müssen, sofern nicht schon vorhanden oder durch die REACH-Verordnung festgestellt, im Rahmen der CLP-Verordnung nicht explizit ermittelt werden (SRU 2011, VDI 2013).

Produktrecht

Wie in Kapitel 4 dargestellt, finden Nanomaterialien bereits in zahlreichen Produkten Anwendung. Für die Regulierung dieser Produkte und der darin vorhandenen Stoffe gibt es verschiedene Instrumente. Der Revisionsprozess zur Anpassung einzelner Regelungsbereiche an Nanomaterialien ist bei den produktrechtlichen Vorschriften bereits angestoßen und es werden zunehmend Kennzeichnungsvorschriften erlassen. Seit Juli 2013 besteht bei kosmetischen Mitteln eine Kennzeichnungspflicht (EU-Kosmetikverordnung Nr. 1223/2009) (EU 2009). So dürfen kosmetische Mittel nur dann auf den Markt gebracht werden, wenn alle Bestandteile, die in Form von Nanomaterialien enthalten sind, eindeutig in der Liste der Bestandteile aufgeführt werden. Ebenso muss das Wort „Nano“ in Klammern nach dem Namen des Bestandteils vermerkt sein (Art. 19 Kosmetik-Verordnung). Daneben resultieren aus der Verordnung bestimmte Informationspflichten für Hersteller, Importeure und Händler kosmetischer Produkte. Diese müssen sechs Monate vor dem Inverkehrbringen von nanohaltigen Produkten verschiedene Angaben zu den Produkten der Kommission mitteilen (Art. 16 Abs. 3 EU-Kosmetik-Verordnung). Auf Grundlage der Daten fertigt die Kommission einen Katalog aller Nanomaterialien in kosmetischen Mitteln an, der in regelmäßigen Abständen aktualisiert und der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt wird (Art. 16 Abs. 10a EU-Kosmetik-Verordnung).

Seit September 2013 liegt weiterhin eine Deklarationspflicht nanohaltiger Biozid-Produkte (Biozidprodukte-Verordnung Nr. 528/2012) vor (EU 2012, EC 2013). Die Regulierung schreibt vor, Biozidprodukte und mit Bioziden behandelte Waren mit dem Zusatz „Nano“ zu kennzeichnen. Dass nicht nur die Wirkstoffe, sondern auch die Biozidprodukte einer Zulassung bedürfen, erhöht den Schutz und schafft eine gewisse Markttransparenz (SRU 2011).

Des Weiteren müssen nach der EU-Verordnung zur Lebensmittelkennzeichnung (Nr. 1169/2011) ab Dezember 2014 Nanomaterialien, die in Lebensmitteln verwendet werden, mit dem Zusatz „Nano“ gekennzeichnet werden (EU 2011). In einer Vielzahl von weiteren konsumentennahen Konsumgüterbereichen, wie z.B. Kleidung existieren bislang keine Deklarations- und Kennzeichnungsvorschriften für Nanomaterialien. Aufgrund dieser nach wie vor bestehenden Intransparenz wird die Einführung eines

Nanoproduktregisters diskutiert. Dies würde auch eine Meldepflicht für Betriebe, welche Nanomaterialien herstellen, weiterverarbeiten oder verwenden, beinhalten (Möller et al. 2013).

Umweltrecht

Die derzeit geltenden rechtlichen Regelungen im Umweltbereich berücksichtigen Nanomaterialien nicht in angemessener Form und es sind daher bislang keine auf die Regulierung von Nanomaterialien abgestimmten Maßnahmen verankert. So ist häufig bei dem Verbot oder der Erlaubnis einer Freisetzung von Stoffen oder der Festlegung von Grenzwerten nicht klar, ob diese auch für das jeweilige Nanomaterial gelten. Nanomaterialien können entweder bei der Produktion bzw. Weiterverarbeitung in die Atmosphäre freigesetzt werden oder sie werden zusammen mit den Produkten, in denen sie enthalten sind, entsorgt und durchlaufen in ihrer Nachgebrauchsphase eine oder mehrere Stationen der Abfall- bzw. Abwasserbehandlung. Mit Blick auf mögliche Anpassungen im Umweltrecht werden daher Fragen zu Umweltqualitäts- oder Emissionsstandards, zum Umweltmonitoring oder zur Einstufungen in Abfallkategorien diskutiert. Im Bereich des Immissionsrechtes existieren derzeit keine Grenzwerte für die Freisetzung von Nanomaterialien in die Atmosphäre und der immissionschutzrechtliche Genehmigungsvorbehalt gilt nicht per se für die Produktion von Nanomaterialien. Ebenso sind im Wasserecht keine konkreten Grenzwerte für das Einleiten von Nanomaterialien ins Gewässer verankert und vorhandene Qualitätsnormen für Schadstoffe berücksichtigen keine nanospezifischen Charakteristika. Des Weiteren besteht in diesem Bereich Bedarf, vorhandene Technologien zur Begrenzung des Eintrags von Nanomaterialien ins Gewässer dahin gehend zu prüfen, ob diese in ihrer jetzigen Form ausreichend sind (SRU 2011).

Über das Verhalten von Nanomaterialien im Abfallpfad ist derzeit nur wenig bekannt, weshalb es auch keine besonderen Instrumente für nanomaterialhaltigen Abfall gibt und dieser nach den gleichen Regeln wie anderer Abfall zu beseitigen ist. Im Hinblick auf die bei Nanomaterialien veränderten Eigenschaften wird jedoch diskutiert, ob durch die vorhandenen Instrumente eine mögliche Belastung der Umwelt durch Nanomaterialien über den Abfallpfad ausreichend verhindert werden kann. Insgesamt ist die Komplexität der Wege und Stationen, über die Nanomaterial enthaltende Produkte entsorgt werden, sehr hoch und es liegen daher bisher kaum Daten zum Verhalten und Verbleib von Nanomaterialien in den Prozessen der Abfall- und Abwasserbehandlung vor. Auch Fragen zu Abwasserbehandlungstechniken und deren Effizienz zur Reduzierung von Nanomaterialien wurden bislang nicht ausreichend berücksichtigt (SRU 2011, Möller et al. 2013). Aus den genannten Gründen sieht der SRU grundsätzlich einen Forschungs- und Prüfungsbedarf im Umweltrecht gegeben (SRU 2011).

7 Überblick über die bisherige Forschungsförderung

Die Nanotechnologie gilt als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts und als eine wichtige Querschnittstechnologie. Methoden und Zugänge verschiedener Wissenschaften sind an der Nanotechnologie beteiligt. Insofern ist die Nanotechnologie interdisziplinär (Blümel 2011). Zudem bestehen große Erwartungen an das langfristige Marktpotenzial von Nanotechnologien: „Die technologische Leistungsfähigkeit und die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft werden maßgeblich von der Nanotechnologie geprägt“ (BMBF 2011a: Vorwort). Diese Erwartungen rechtfertigen hohe Ausgaben für Forschung und Entwicklung (FuE). Weltweit nehmen die Investitionen im FuE-Bereich zu. In Deutschland wurden 2010 Bundesfördermitteln in der Höhe von 400 Mio. EUR für die Erforschung und Entwicklung der Nanotechnologie verwendet (BMBF 2011a). Damit liegt Deutschland weltweit an vierter Stelle hinter den USA, Russland und Japan (Deutscher Bundestag 2011).

Um die Forschung zur Nanotechnologie zu fördern, gibt es sowohl auf nationaler als auch auf Ebene der EU verschiedene Förderstrukturen. Die Forschungsmittel aus dem Budget der EU werden in einem zeitlich fest umrissenen Rahmen vergeben, dem Forschungsrahmenprogramm (FRP). Dieses fasst sämtliche Maßnahmen auf dem Gebiet der Forschung, technologischen Entwicklung und Demonstration (FTE) zusammen (BMBF 2007). Im Rahmen des sechsten FRP (2002–2007) wurde die Forschung zu Nanotechnologien erstmals als eigener thematischer Schwerpunkt („priority thematic area“) gefördert, indem die Themengebiete „Werkstoffe“ und „Produktion“ durch die Themenbereiche „Nanotechnologien“ und „Nanowissenschaften“ ergänzt wurden. Daran, dass mehr als ein Drittel der Projekte in diesem Schwerpunkt im Bereich der Wirtschaft anzusiedeln sind, lässt sich die industrielle Relevanz dieses Forschungsgebietes ablesen (BMBF 2007).

Im siebten FRP (2007–2013) stellte der Forschungsbereich „Nanowissenschaften, Nanotechnologien, Werkstoffe und neue Produktionstechnologien“ einen von zehn thematischen Hauptbereichen dar, aus denen sich das größte von fünf sogenannten spezifischen Programmen zusammensetzt, welches ein Drittel des Gesamtbudgets ausmacht (Europäische Kommission 2007). Dabei wurden nicht nur jene Forschungsvorhaben gefördert, welche auf die erkenntnisorientierte Erforschung von Nanophänomenen oder die anwendungsorientierte Entwicklung von Nanotechnologien abzielen (Grundlagen- und Innovationsforschung). In zunehmendem Maße wurde auch jene Forschung gefördert, die auf die Sicherheit der Nanotechnologie hinarbeitete und eine verbesserte Kommunikation über Chancen und Risiken der Nanotechnologie mit der Öffentlichkeit anstrebte (BMBF 2007). Auch Forschungsprojekte, die sich eingehend mit den „sozialen und ökologischen Auswirkungen und Potenziale[n] der Nanotechnologie“ (BMBF 2007: 7) beschäftigen, konnten nunmehr gefördert werden (BMBF 2007).

Anstelle eines achten FRP im Sinne einer Fortsetzung des siebten FRP läuft seit Anfang 2014 das Rahmenprogramm „Horizont 2020“²⁰ (BMBF 2014a). Neben den Schwerpunkten „Führende Rolle in der Industrie“ und „Wissenschaftsexzellenz“, werden weiterhin Projekte im Schwerpunkt „Gesellschaftliche Herausforderungen“ gefördert (BMBF 2014a). Der Fokus der Förderungsmöglichkeiten liegt im Rahmenprogramm „Horizont 2020“ etwas weniger stark auf der Grundlagen- und Innovationsforschung als in den vorherigen FRP, da der Anspruch besteht, dass die drei an sich voneinander getrennten Schwerpunkte sich gegenseitig verstärken (BMBF 2014a).

Seit August 2006 verfolgt die Bundesregierung mit der sogenannten Hightech-Strategie 2020 erstmals eine nationale Strategie, mit der Wissenschaft, Forschung und Innovation gezielt und ressortübergreifend gefördert werden sollen (BMBF 2012a). Mit dem „Nano-Initiative – Aktionsplan 2010“ von 2006 sollte erreicht werden, dass die Nanotechnologie erfolgreich genutzt wird, was bedeutet, dass sowohl Chancen für Innovationen, Forschung und Entwicklung wahrgenommen als auch Mensch und Umwelt geschützt werden (Förderberatung des Bundes o.J.). Dazu wurde ein Maßnahmenkatalog aufgestellt, dessen Maßnahmen in verschiedene Bereiche gegliedert wurden.²¹ Die Forschungsprojekte, die im Rahmen dieser Forschungsstrategie durchgeführt wurden, wurden durch drei Bundesoberbehörden – die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), das Umweltbundesamt (UBA) und das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) – koordiniert und teils durch ebendiese, teils durch externe Forschungsnehmer ausgeführt (UBA et al. 2013). Bei der Auswahl der Projekte wurden jene bevorzugt, die gleichermaßen von Relevanz für Arbeits-, Verbraucher- und Umweltschutz sind (BMBF 2011a).

Nach Ablauf des Aktionsplans 2010 folgt der Aktionsplan Nanotechnologie 2015. Übergeordnetes Ziel ist es, die Nanotechnologie zu nutzen, ohne Mensch und Umwelt zu gefährden (BMBF 2012b). Im Bereich der Forschungsförderung („Forschung fördern – Wissens- und Technologietransfer intensivieren“) sollen Forschung, Entwicklung sowie weiterhin der Transfer wissenschaftlicher Erkenntnisse in die wirtschaftliche Nutzung gefördert werden, um dadurch die Spitzenstellung Deutschlands im Bereich der Schlüsseltechnologien weiter zu stärken (BMBF 2011a). Daneben will die Bundesregierung im Bereich „Risiken der Nanotechnologie erkennen – für einen sicheren und verantwortlichen Umgang“ weiterhin eine „umwelt- und gesundheitsverträgliche sowie nachhaltige Entwicklung der Nanotechnologie“ fördern (BMBF 2011a). Eine weitere Möglichkeit zur Förderung auf Bundesebene liefert die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) (DFG 2010). Das Schwerpunktprogramm „Biological Responses to Nanoscale Particles (Bio-Nano-Responses)“ beschäftigt sich in über 40 Forschungsprojekten mit den Forschungsfeldern „Herstellung und Charakterisierung

²⁰ Eine Übersicht über die verschiedenen Forschungsaktivitäten innerhalb der Forschungsrahmenprogramme wird im European NanoSafety Cluster Compendium 2013 gegeben (Riediker 2013).

²¹ 1. Zukunftsfelder erschließen – Branchen heranführen, 2. Rahmenbedingungen verbessern, 3. Verantwortungsvoll handeln, 4. Öffentlichkeit informieren, 5. Zukünftigen Forschungsbedarf identifizieren (BMBF 2006: 5)

von Nanopartikeln“, „Der Übergang von Nanopartikeln in die biologische Umwelt und ihre Interaktionen mit dieser“ und „Der Einfluss von Nanopartikeln auf grundlegende biologische Funktionen“ (Universität Duisburg-Essen 2008).

8 Zusammenfassender Ausblick: Hinweise für eine sozial-ökologische Risikoforschung

Der Begriff der Nanotechnologie hat sich als Oberbegriff für verschiedene Wissenschafts- und Technikrichtungen und für eine Vielfalt an nicht homogenen Materialien, die physikalisch und strukturell sehr unterschiedlich sind und als gemeinsamen Nenner lediglich in ein bis drei Dimensionen eine Größe von 1-100 nm haben, etabliert. Dies hat zur Folge, dass die Nanotechnologie insgesamt als ein Forschungsfeld mit unscharfen Rändern charakterisiert werden kann. Das gegenwärtige und insbesondere das zukünftige Anwendungsspektrum von Nanomaterialien ist enorm vielseitig. So werden Nanomaterialien aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften auch dazu eingesetzt, Produkte umweltfreundlicher zu gestalten und damit einen Beitrag zum Umweltschutz zu leisten. Die Bandbreite des Einsatzes reicht von rollwiderstandsoptimierten Reifen über hocheffiziente Dämmstoffe bis hin zur Wasseraufbereitung durch nanoporöse Membranen und zur Grundwassersanierung. Vieles befindet sich gerade im Bereich der Energie- und Umwelttechnik noch im Stadium der Forschung und Entwicklung. Für die Zukunft werden vor allem Anwendungen in den Feldern regenerative Energiebereitstellung, Wärmedämmung, Stromspeicher neue Werk- und Baustoffe und industrielle Produktionsprozesse als vielversprechend erachtet, um Entlastungseffekte für die Umwelt zu erzielen. Allerdings stehen diesen Potenzialen auch Bedenken im Hinblick auf Umweltbelastungen und andere Nachhaltigkeitsaspekte entlang des Lebenszyklus der Nanomaterialien gegenüber. Insbesondere der zum Teil hohe Energie- und Ressourcenbedarf bei der Herstellung von Nanomaterialien kann zu Reboundeffekten führen, die die Umweltentlastung kompensieren oder gar negative Effekte bewirken. Auch gibt es bisher nur zu einigen nanotechnischen Produkten umfassende Analysen der tatsächlichen Umweltwirkungen entlang des gesamten Lebensweges. Daher sind allgemeine Aussagen zu Entlastungseffekten und Nachhaltigkeitsaspekten, die für unterschiedliche Bereiche und für verschiedene Produkte zutreffend sind, schwierig. Insbesondere zur Nachgebrauchsphase von Nanomaterialien liegen bislang nur wenige Daten zum Entsorgungsweg und zum Verhalten von Nanopartikeln im Abwasser und in Kläranlagen vor. Aus diesem Grund besteht Bedarf nach weiteren Lebenszyklus-Analysen, die nicht nur auf den Produktionsprozess begrenzt sind, sondern auch die Nutzung der Produkte und deren Entsorgung berücksichtigen.

Die Ausführungen zur Risikoforschung zeigen deutlich, dass auch in diesem Bereich derzeit noch erhebliche Wissenslücken v.a. bezüglich der Wirkungen unter realen Umweltbedingungen sowie im Hinblick auf Langzeitwirkungen bestehen. In Bezug auf regulatorische Voraussetzungen für eine fundierte Risikobewertung sind derzeit

weder eine einheitliche Kennzeichnungspflicht noch standardisierte Messmethoden und Prüfrichtlinien vorhanden. Aufgrund des Fehlens einheitlicher Methoden sind Studien zur Exposition sowie zu Effekten von Nanomaterialien bisher nur schwer untereinander vergleichbar.

Damit bleiben derzeit wenigstens folgende Fragen offen: Wie groß ist das gesundheitliche Risiko für Menschen, die in der Produktion mit Nanomaterialien umgehen? Wie groß ist es für Menschen, die den vielfältigen Anwendungen ausgesetzt sind? Ist das Risiko in der Abfallphase dem in der Produktion vergleichbar? Weiterhin ist bisher nicht abschätzbar, wieweit Einträge von Nanomaterialien in die Gewässer nicht nur deren Lebensgemeinschaften negativ beeinflussen, sondern auch zum Ausfall wichtiger Ökosystemleistungen führen.

Es ist zu beachten, dass Erkenntnisse über ein Nanomaterial nicht undifferenziert auf ein anderes übertragen werden können und das Risiko von Fall zu Fall überprüft werden muss. Derzeit kommen Nanomaterialien zum Einsatz, ohne dass eine abschließende, vorsorgliche Absicherung des Risikos basierend auf wissenschaftlichen Fakten erfolgt ist. Für eine adäquate Bewertung des Risikos synthetischer Nanomaterialien müssen vorhandene Prüfrichtlinien und Methoden unter Berücksichtigung nanospezifischer Eigenschaften angepasst werden. Diese Anpassung erfordert das Schließen vorhandener Wissenslücken hinsichtlich der nanospezifischen Effekte auf (öko-)toxikologische Parameter, was momentan im Rahmen einer von der OECD gegründeten Arbeitsgruppe erfolgt. Dabei wird bisher das Problem, ob von Aussagen auf der Ebene einzelner Testorganismen auch Aussagen auf der Ebene der Ökosystemfunktionen erzielt werden können, nur unzureichend thematisiert. Auch wird nicht gefragt, was hier Funktionsstörungen bedeuten, z.B. hinsichtlich der notwendigen Versorgung der Gesellschaft mit Ökosystemleistungen.

Um die Transparenz der Nanotechnologie zu erhöhen und die Akzeptanz in der Öffentlichkeit zu fördern, kommt der Wahrnehmung und Kommunikation von Risiken eine wichtige Bedeutung zu. Die diskutierte Literatur zeigt, dass das Wissen der BürgerInnen zu Nanotechnologie wächst und dass derzeit eher eine positive Haltung gegenüber Nanotechnologien vorherrscht. Dabei hängt die Einstellung in der Bevölkerung wesentlich von der Nähe des Anwendungsbereichs zum Menschen ab. Speziell Nanomaterialien in Lebensmitteln werden von der Mehrheit der Bevölkerung kritisch gesehen. Die bisherigen Kommunikationsangebote und -konzepte im Rahmen der öffentlichen Diskussion um Nanotechnologien werden als sehr gute Grundlage für die gesellschaftliche Auseinandersetzung mit der Nanotechnologie erachtet. Verschiedene Autoren verweisen darauf, dass es für die Zukunft wichtig ist, vorhandene Kommunikationsformate weiterzuführen und gleichzeitig neue aufzugreifen und diese noch breiter in der Praxis anzuwenden.

Aufgrund der zahlreichen noch unerforschten Wirkungen und Risiken plädieren Experten für eine verbindliche Einigung im zukünftigen Umgang mit Nanomaterialien, die sich auch in der Regulation des rechtlichen Rahmens widerspiegelt. Selbst wenn der bestehende Rechtsrahmen Nanomaterialien als Stoffe grundsätzlich reguliert,

werden ihre spezifischen Eigenschaften und eventuell damit verbundene Risiken nicht adäquat berücksichtigt. Eine Anpassung bestehender Rechtsvorschriften an nanospezifische Regelungen würde grundsätzlich durch eine einheitliche Definition von Nanomaterialien erleichtert werden. Unsere Recherchen haben ergeben, dass Experten und Wissenschaftler empfehlen, die europäische Chemikaliengesetzgebung dahingehend zu verändern, dass Nanomaterialien als eigenständige Substanzen und nicht entsprechend ihrer Bulkform registriert werden. Im Bereich des Produktrechts finden Nanomaterialien mit den Novellierungen in den Feldern Kosmetika, Biozide und Lebensmittel Berücksichtigung. In der Literatur wird darauf hingewiesen, dass Deklarations- und Kennzeichnungsvorschriften auch für weitere konsumentennahe Konsumgüterbereiche vorgenommen werden sollten, sodass für KonsumentInnen ersichtlich ist, welche Produkte Nanomaterialien enthalten.

Der hier vorliegende Überblick macht deutlich, dass in den letzten Jahren trotz aller Forschungsanstrengungen das Nichtwissen erheblich ist. Es fehlt eine statistisch fundierte Übersicht, sowohl über die Menge und Qualitäten der eingesetzten Nanomaterialien als auch über die Produkte, die nanotechnologisch ausgerüstet sind. Ebenso wie den KonsumentInnen eine griffige Kennzeichnung der Produkte fehlt, hat auch der Staat kein ausreichendes Wissen darüber, wo ein Regulierungsbedarf erforderlich sein könnte.

Im bisherigen Diskurs wird nicht thematisiert, dass Nanomaterialien gesellschaftliche Naturverhältnisse transformieren. Beispielsweise wird durch die Nanofiltration ein verbesserter Rückhalt von Schadstoffen und Krankheitserregern möglich, wobei jedoch zugleich Umweltprobleme zweiter Ordnung entstehen, z.B. aufgrund des erhöhten Energiebedarfs und der Herausforderung, Filtrationsrückstände zu „entsorgen“. Durch den Eintrag von Nanomaterialien in die Umwelt verändern sich aber auch zahlreiche Wirkungsbeziehungen zwischen Gesellschaft und Natur, wenn etwa in Folge des Ausfalls von Organismengruppen Ökosystemleistungen zusammenbrechen.

Je nachdem, welche Sachverhalte bearbeitet werden, sollte der Allgemeinbegriff der Nanotechnologie in spezifische und handhabbare Aspekte heruntergebrochen werden, die für ein spezifisches Nanomaterial in einer bestimmten Anwendung von Bedeutung sind. Ebenso kann aufgrund der Vielfältigkeit des Nano-Bereichs kein abschließendes für alle Materialien, Bereiche und Einsatzgebiete gültiges Fazit getroffen werden, sondern es bedarf stets einer Differenzierung. Dieser kann durch die Abgrenzung auf einen bestimmten Bereich/Sachverhalt am besten Rechnung getragen werden.

Literaturverzeichnis

- Allen, H. Joel/Christopher A. Impellitteri/Dana A. Macke/J. Lee Heckman/Helen C. Poynton/James M. Lazorchak/Shekar Govindaswamy/Deborah L. Roose/Mallikarjuna N. Nadagouda (2010): Effects from filtration, capping agents, and presence/absence of food on the toxicity of silver nanoparticles to *Daphnia magna*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29: 2742–2750
- Aruoja, Villem/Henri-Charles Dubourguier/Kaja Kasemets/Anne Kahru (2009): Toxicity of nanoparticles of CuO, ZnO and TiO₂ to microalgae *Pseudokirchneriella subcapitata*. *Science of the Total Environment*, 407: 1461–1468
- Asghari, Saba/Seyed Ali Johari/Ji Hyun Lee/Yong Seok Kim/Yong Bae Jeon/Hyun Jung Choi/Min Chaul Moon/Il Je Yu (2012): Toxicity of various silver nanoparticles compared to silver ions in *Daphnia magna*. *Journal of Nanobiotechnology*, 10: 14
- Asharani, P.V./Yi Lian Wu/Zhiyuan Gong/Suresh Valiyaveetil (2008): Toxicity of silver nanoparticles in zebrafish models. *Nanotechnology*, 19: 255102
- Auffan, Mélanie/Jérôme Rose/Mark R. Wiesner/Jean-Yves Bottero (2009): Chemical stability of metallic nanoparticles: A parameter controlling their potential cellular toxicity *in vitro*. *Environmental Pollution*, 157: 1127–1133
- Bachmann, Gerd/Vera Grimm/Andreas Hoffknecht/Wolfgang Luther/Christiane Ploetz/Günther Reuscher/Olaf Teichert/Axel Zweck (2007): Nanotechnologie für den Umweltschutz. VDI-Technologiezentrum (Hg.), Schriftenreihe Zukünftige Technologien Consulting Nr. 71, Düsseldorf
- BAFU – Bundesamt für Umwelt/BAG – Bundesamt für Gesundheit (2007): Synthetische Nanomaterialien. Risikobeurteilung und Risikomangement. Grundlagenbericht zum Aktionsplan. Nr. 21
- Barillet, Sabrina/Angélique Simon-Deckers/Nathalie Herlin-Boime/Martine Mayne-L'Hermite/Cécile Reynaud/Doris Cassio/Barbara Gouget/Marie Carrière (2010): Toxicological consequences of TiO₂, SiC nanoparticles and multi-walled carbon nanotubes exposure in several mammalian cell types: an *in vitro* study. *Journal of Nanoparticle Research*, 12: 61–73
- Baumgartner, Walter/Barbara Jäckli (2007): Nanotechnologie in der Medizin. In: Andre Gzásó/Sabine Greßler/Fritz Schiemer (Hg.): Nano. Chancen und Risiken aktueller Technologien. Wien/New York: Springer
- Baun, Anders/Nanna B. Hartmann/Khara D. Grieger/K. Ole Kusk (2008a): Ecotoxicity of engineered nanoparticles to aquatic invertebrates: A brief review and recommendations for future toxicity testing. *Ecotoxicology*, 17: 387–395
- Baun, Anders/Sara N. Sørensen/R. F. Rasmussen/Nanna B. Hartmann/Christian B. Koch (2008b): Toxicity and bioaccumulation of xenobiotic organic compounds in the presence of aqueous suspensions of aggregates of nano-C₆₀. *Aquatic Toxicology*, 86: 379–387
- Behra, Renata/Laura Sigg/Martin J. D. Clift/Fabian Herzog/Matteo Minghetti/Blair Johnston/Alke Petri-Fink/Barbara Rothen-Rutishauser (2013): Bioavailability of

- silver nanoparticles and ions: From a chemical and biochemical perspective. *Journal of The Royal Society Interface*, 10: 20130396
- BfR – Bundesinstitut für Risikobewertung (2013a): NanoMedia. Analyse der Medienberichterstattung zum Thema Nanotechnologie 2008–2012. Abschlussbericht. Berlin. Online verfügbar unter: <http://www.bfr.bund.de/cm/350/nanomedia-analyse-der-medienberichterstattung-zum-thema-nanotechnologie-2008-2012.pdf> (13.02.2014).
- BfR – Bundesinstitut für Risikobewertung (2013b): Nanoview – Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung der Nanotechnologien und zielgruppenspezifische Risikokommunikationsstrategien. Abschlussbericht. Berlin. Online verfügbar unter: <http://www.bfr.bund.de/cm/350/nanoview-einflussfaktoren-auf-die-wahrnehmung-der-nanotechnologien-und-zielgruppenspezifische-risikokommunikationsstrategien.pdf> (13.02.2014)
- Bhattacharya, Kunal/Maria Davoren/Jens Boertz/Roel P. F. Schins/Eik Hoffmann/Elke Dopp (2009): Titanium dioxide nanoparticles induce oxidative stress and DNA-adduct formation but not DNA-breakage in human lung cells. *Particle and Fibre Toxicology*, 6
- Blaise, Christian/François Gagné/Jean Féraud/Philippe Eullaffroy (2008): Ecotoxicity of selected nano-materials to aquatic organisms. *Environmental Toxicology* 23: 591–598
- Blinova, Irina/Angela Ivask/Margit Heinlaan/Monika Mortimer/Anne Kahru (2010): Ecotoxicity of nanoparticles of CuO and ZnO in natural water. *Environmental Pollution*, 158: 41–47
- Blümel, Clemens (2011): Dynamiken förderpolitischen Wandels in der Nanotechnologie. In: Christian Kehrt/Peter Schüssler/Marc-Denis Weitze (2011): *Neue Technologien in der Gesellschaft. Akteure, Erwartungen, Kontroversen und Konjunkturen*. Bielefeld: Transcript Verlag
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2014a): Programmaufbau von Horizont 2020. Online verfügbar unter: <http://www.horizont2020.de/einstieg-programmaufbau.htm> (11.02.2014)
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2014b): Kompetenzatlas Nanotechnologie in Deutschland. Online verfügbar unter: www.nano-map.de (11.02.2014)
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.) (2013): nano. DE-Report 2013. Status quo der Nanotechnologie in Deutschland. Online verfügbar unter: http://www.bmbf.de/pub/nano.DE-Report_2013_bf.pdf (11.02.2014)
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.) (2012a): Bericht der Bundesregierung. Zukunftsprojekte der Hightech-Strategie (HTS-Aktionsplan). Online verfügbar unter: <http://www.bmbf.de/pub/HTS-Aktionsplan.pdf> (11.02.2014)
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.) (2012b): Die Ziele – globale Herausforderungen lösen. Online verfügbar unter: <http://www.hightech-strategie.de/de/13.php> (11.02.2014)

- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.) (2011a): Aktionsplan Nanotechnologie 2015. Bonn/Berlin. Online verfügbar unter: http://www.bmbf.de/pub/aktionsplan_nanotechnologie.pdf (11.02.2014).
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.) (2011b): Bürgerdialog Zukunftstechnologien. Berlin. Online verfügbar unter: <http://www.buergerdialog-bmbf.de/> (15.02.2011)
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.) (2007): Das 7. EU-Forschungsrahmenprogramm. Bonn/Berlin. Online verfügbar unter: http://www.bmbf.de/pub/siebte_forschungsrahmenprogramm.pdf (11.02.2014)
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.) (2006): Nano-Initiative – Aktionsplan 2010. Bonn/Berlin. Online verfügbar unter: http://www.bmbf.de/pub/nano_initiative_aktionsplan_2010.pdf (11.02.2014)
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.) (2011): Abschlussbericht der Themengruppe 2 der NanoKommission. Leitfaden zur Erhebung und Gegenüberstellung von Nutzen- und Risikoaspekten von Nanoprodukten. 2. Dialogphase 2009–2010. Online verfügbar unter: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nano_abschlussbericht2_bf.pdf (11.02.2014)
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.) (2010): Verantwortlicher Umgang mit Nanotechnologien. Bericht und Empfehlungen der Nano-Kommission 2011. Berlin. Online verfügbar unter: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nano_schlussbericht_2011_bf.pdf (06.03.2014)
- Boxall, Alistair B. A./Qasim Chaudhry/Chris Sinclair/Alan Jones/Robert Aitken/Bruce Jefferson/Chris Watts (2007): Current and future predicted environmental exposure to engineered nanoparticles. Central Science Laboratory, Department of the Environment and Rural Affairs. London
- Brouwer, Derk (2010): Exposure to manufactured nanoparticles in different workplaces. *Toxicology*, 269: 120–127
- Carlson, Cataleya/Saber M. Hussain/Amanda M. Schrand/Laura K. Braydich-Stolle/Krista L. Hess/Richard L. Jones/John J. Schlager (2008): Unique cellular interaction of silver nanoparticles: Size-dependent generation of reactive oxygen species. *Journal of Physical Chemistry B*, 112: 13608–13619
- CEC – Commission of the European Communities (1996): technical guidance document in support of commission directive 93/67/EEC on risk assessment for new notified substances. Part II, Environmental Risk Assessment. Office for official publications of the European Communities. Luxembourg
- Chae, Yun Ju/Chi Hoa Pham/Jinwon Lee/Eunjoo Bae/Jongheop Yi/Man Bock Gu (2009): Evaluation of the toxic impact of silver nanoparticles on Japanese medaka (*Oryzias latipes*). *Aquatic Toxicology*, 94: 320–327
- Choi, Ji Eun/Soohee Kim/Jin Hee Ahn/Pilju Youn/Jin Seok Kang/Kwangsik Park/Jongheop Yi/Doug-Young Ryu (2010): Induction of oxidative stress and apoptosis by silver nanoparticles in the liver of adult zebrafish. *Aquatic Toxicology*, 100: 151–159

- Crane, Mark/Richard D. Handy/John Garrod/Richard Owen (2008): Ecotoxicity test methods and environmental hazard assessment for engineered nanoparticles. *Ecotoxicology*, 17: 421–437
- Dabrunz, André/Lars Duester/Carsten Prasse/Frank Seitz/Ricki Rosenfeldt/Carsten Schilde/Gabriele E. Schaumann/Ralf Schulz (2011): Biological surface coating and molting inhibition as mechanisms of TiO₂ nanoparticle toxicity in *Daphnia magna*. *Plos One*, 6: e20112
- De Jong, Wim H. (2013): SCENIHR Opinions on Nanotechnology and Nanomaterials. Präsentation vom 30.01.2013. Online verfügbar unter: http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/chemicals/files/reach/docs/events/nano-rev-ws-jong_en.pdf (17.11.2014)
- Dekkers, Susan/Petra Krystek/Ruud J. B. Peters/Daniëlle P. K. Lankveld/Bas G. H. Bokkers/Paula H. van Hoeven-Arentzen/Hans Bouwmeester/Agnes G. Oomen (2011): Presence and risks of nanosilica in food products. *Nanotoxicology*, 5: 393–405
- Deutscher Bundestag (2011): Antrag. Aktionsplan 2015 gezielt weiterentwickeln. Online verfügbar unter: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/17/071/1707184.pdf> (11.02.2014).
- DFG – Deutsche Forschungsgemeinschaft (2010): Wer wir sind. Online verfügbar unter: http://www.dfg.de/dfg_profil/aufgaben/wer_wir_sind/index.html (11.02.2014)
- EC – European Commission (2013): Nanomaterials. Online verfügbar unter: <http://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/> (21.08.2014)
- EC – European Commission (2011): Commission Recommendation of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial Text with EEA relevance. Online verfügbar unter: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32011H0696:EN> (28.11.2013)
- EC – European Commission (2009): Commission recommendation on a code of conduct for responsible nanosciences and nanotechnologies research & Council conclusions on responsible nanosciences and nanotechnologies research. Online verfügbar unter: http://ec.europa.eu/research/science-society/document_library/pdf_06/nanocode-apr09_en.pdf (28.11.2013)
- ECB – European Chemicals Bureau (2003): Technical Guidance Document on Risk Assessment Part II. Institute for Health and Consumer Protection. European Commission Joint Research Centre. Ispra, Italy: 1–203
- Eisenberger, Iris/Sabine Greßler/Michael Nentwich (2013): Zur freiwilligen und verpflichtenden Nano-Kennzeichnung von verbrauchernahen Produkten. Nano trust dossier Nr. 31–2. Online verfügbar unter: http://epub.oeaw.ac.at/Oxc1aa500e_0x002e3b93.pdf (11.02.2014)
- Etheridge, Michael L./Stephen A. Campbell/Arthur G. Erdman/Christy L. Haynes/Susan M. Wolf/Jeffrey McCullough (2013): The big picture on nanomedicine: the state of investigational and approved nanomedicine products. *Nanomedicine*, NBM 9:1–14

- EU – Europäische Union (2013): EU-Forschungsprojekte. Feature Stories – Nanogeräte für eine „More-than-Moore“-Welt. Online verfügbar unter: http://cordis.europa.eu/result/brief/rcn/11809_de.html (26.02.2014).
- EU – Europäische Union (2012): Verordnung (EU) Nr. 528/2012 des EU-Parlaments und des Rates vom 22. Mai 2012 über die Bereitstellung auf dem Markt und die Verwendung von Biozidprodukten. Amtsblatt der EU L 167/1
- EU – Europäische Union (2011): Verordnung (EU) Nr. 1169/2011 des EU-Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2011 betreffend die Information der Verbraucher über Lebensmittel. Amtsblatt der EU L 304/18
- EU – Europäische Union (2009): Verordnung (EG) Nr. 1223/2009 des EU-Parlaments und des Rates vom 30. November 2009 über kosmetische Mittel. Amtsblatt der EU L 342/59
- Europäische Kommission (2007): RP7 in Kürze. Wie man sich am 7. Rahmenprogramm für Forschung der EU beteiligen kann. Luxemburg. Online verfügbar unter: http://ec.europa.eu/research/fp7/pdf/fp7-inbrief_de.pdf (11.02.2014)
- Europäische Kommission (2004): Auf dem Weg zu einer europäischen Strategie für Nanotechnologie. Brüssel. Online verfügbar unter: <http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/66637841DE6.pdf> (31.03.2014)
- Fabrega, Julia/Samuel N. Luoma/Charles R. Tyler/Tamara S. Galloway/Jamie R. Lead (2011): Silver nanoparticles: Behaviour and effects in the aquatic environment. *Environment International*, 37: 517–531
- Ferin, Juraj/Günter Oberdörster/David Penney/Sidney Soderholm/Robert Gelein/Heidi Piper (1990): Increased pulmonary toxicity of ultrafine particles? I. Particle clearance, translocation, morphology. *Journal of Aerosol Science*, 21: 381–384
- Fiorino, Daniel J. (2010): Voluntary initiatives, regulation, and nanotechnology oversight: Charting a path. Project on Emerging Nanotechnologies, Report PEN 19
- Foldbjerg, Rasmus/Duy Anh Dang/Herman Autrup (2011): Cytotoxicity and genotoxicity of silver nanoparticles in the human lung cancer cell line, A549. *Archives of Toxicology*, 85: 743–750
- Förderberatung „Forschung und Innovation“ des Bundes (Hg.) (o.J.): Rahmenprogramm Forschung für nachhaltige Entwicklungen. Online verfügbar unter: <http://www.foerderinfo.bund.de/de/386.php> (11.02.2014).
- Franklin, Natasha M./Nicola J. Rogers/Simon C. Apte/Graeme E. Batley/Gerald E. Gadd/Philip S. Casey (2007): Comparative toxicity of nanoparticulate ZnO, bulk ZnO, and ZnCl₂ to a freshwater microalga (*Pseudokirchneriella subcapitata*): The importance of particle solubility. *Environmental Science and Technology*, 41: 8484–8490
- Gaiser, Birgit K./Anamika Biswas/Philipp Rosenkranz/Mark A. Jepson/Jamie R. Lead/Vicki Stone/Charles R. Tyler/Teresa F. Fernandes (2011): Effects of silver and cerium dioxide micro- and nano-sized particles on *Daphnia magna*. *Journal of Environmental Monitoring*, 13: 1227–1235
- Gao, Jie/Sejin Youn/Anna Hovsepian/Verónica L. Llana/Yu Wang/Gabriel Bitton/Jean-Claude J. Bonzongo (2009): Dispersion and toxicity of selected manufac-

- tered nanomaterials in natural river water samples: Effects of water chemical composition. *Environmental Science and Technology*, 43: 3322–3328
- García, Ana/Roser Espinosa/Lucía Delgado/Eudald Casals/Edgar González/Víctor Puentes/Carlos Barata/Xavier Font/Antoni Sánchez (2011): Acute toxicity of cerium oxide, titanium oxide and iron oxide nanoparticles using standardized tests. *Desalination*, 269: 136–141
- Geranio, Luca/Manfred Heuberger/Bernd Nowack (2009): The behavior of silver nanotextiles during washing. *Environmental Science and Technology*, 43: 8113–8118
- Giebner, Sabrina (2011): Ökotoxikologische Wirkung von nanoskaligem Titandioxid auf aquatische Invertebraten. Diplomarbeit im Fachbereich Biowissenschaften. Goethe-Universität Frankfurt am Main
- Gong, Ning/Kuishuang Shao/Wei Feng/Zhengzhi Lin/Changhua Liang/Yeqing Sun (2011): Biototoxicity of nickel oxide nanoparticles and bio-remediation by microalgae *Chlorella vulgaris*. *Chemosphere*, 83: 510–516
- Gottschalk, Fadri/Bernd Nowack (2011): The release of engineered nanomaterials to the environment. *Journal of Environmental Monitoring*, 13: 1145–1155
- Gottschalk, Fadri/Tian Yin Sun/Bernd Nowack (2013): Environmental concentrations of engineered nanomaterials: Review of modeling and analytical studies. *Environmental Pollution*, 181: 287–300
- Greßler, Sabine/André Gzásó (2013): Definition des Begriffs „Nanomaterial“. Nano trust dossiers Nr. 39. Online verfügbar unter: http://epub.oeaw.ac.at/Oxc1aa500e_0x002df14b.pdf (23.08.2014)
- Greßler, Sabine/Michael Nentwich (2011): Nano und Umwelt – Teil I: Entlastungspotenziale und Nachhaltigkeitseffekte. Nano trust dossier Nr. 26. Online verfügbar unter: http://epub.oeaw.ac.at/Oxc1aa500e_0x0029f3d1.pdf (23.08.2014)
- Griffitt, Robert J./Jing Luo/Jie Gao/Jean-Claude Bonzongo/David S. Barber (2008): Effects of particle composition and species on toxicity of metallic nanomaterials in aquatic organisms. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27: 1972–1978
- Grobe, Antje (2010): Verantwortlicher Umgang mit Nanotechnologien – Bericht und Empfehlungen der NanoKommission 2011. Online verfügbar unter: http://nano.dguv.de/fileadmin/userupload/documents/textfiles/Grundlagen/nanosc hlussbericht 2011_bf.pdf (23.08.2014)
- Hagens, Werner I./Agnes G. Oomen/Wim H. de Jong/Flemming R. Cassee/Adrienne J. A. M. Sips (2007): What do we (need to) know about the kinetic properties of nanoparticles in the body? *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 49: 217–229
- Han, Zhaoxiang/Jiaying Li/Wei Bao/Jiahong Wang (2012): Enhanced toxicity of atrazine to *Daphnia magna* in the presence of nano-CeO₂. *Chinese Journal of Geochemistry*, 31: 297–302
- Handy, Richard D./Nico van den Brink/Mark Chappell/Martin Mühling/Renata Behra/Maria Dušinská/Peter Simpson/Jukka Ahtainen/Awadhesh N. Jha/Jennifer Seiter/Anthony Bednar/Alan Kennedy/Teresa F. Fernandes/Michael Riediker (2012): Practical considerations for conducting ecotoxicity test methods with manufactured nanomaterials: What have we learnt so far? *Ecotoxicology*, 21: 933–972

- Handy, Richard D./Richard Owen/Eugenia Valsami-Jones (2008): The ecotoxicology of nanoparticles and nanomaterials: Current status, knowledge gaps, challenges, and future needs. *Ecotoxicology*, 17: 315–325
- Hartmann, Nanna/Frank von der Kammer/Thilo Hofmann/Mohammed Baalousha/Stephanie Ottofuelling/Anders Baun (2010): Algal testing of titanium dioxide nanoparticles – testing considerations, inhibitory effects and modification of cadmium bioavailability. *Toxicology*, 269: 190–197
- Haslinger, Julia (2013): Nano-Governance durch Dialoge. Nano trust dossier Nr. 38. Online verfügbar unter: <http://epub.oeaw.ac.at/?arp=0x002de3f4> (13.11.2014)
- Haynes, Christy L. (2010): The emerging field of nanotoxicology. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 398: 587–588
- Heinlaan, Margit/Angela Ivask/Irina Blinova/Henri-Charles Dubourguier/Anne Kahru (2008): Toxicity of nanosized and bulk ZnO, CuO and TiO₂ to bacteria *Vibrio fischeri* and crustaceans *Daphnia magna* and *Thamnocephalus platyurus*. *Chemosphere*, 71: 1308–1316
- Heubach, Daniel/Severin Beucker/Claus Lang-Goetz (2009): Einsatz von Nanotechnologie in der hessischen Umwelttechnologie. Innovationspotenziale für Unternehmen. Online verfügbar unter: http://www.google.de/url?sa=t&trct=j&fq=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCMQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.hessen-nanotech.de%2Fmm%2FNanoUmwelt_Einsatz_Nanotechnologie_Umwelttechnologie_Innovationspotenziale_Unternehmen.pdf&ei=Vp1oVOaVAcSnyg0AqYC4Dw&usg=AFQjCNGllzth08LKW43ABHIQhQinp4j2Q&bvm=bv.79142246,d.bGQ (13.11.2014)
- Hoheisel, Sarah M./Steve Diamond/David Mount (2012): Comparison of nanosilver and ionic silver toxicity in *Daphnia magna* and *Pimephales promelas*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 31: 2557–2563
<http://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/> (21.08.2014).
- Hund-Rinke, Kerstin/Markus Simon (2006): Ecotoxic effect of photocatalytic active nanoparticles TiO₂ on algae and daphnids. *Environmental Science and Pollution Research*, 13: 225–232
- ICON (2013): International Council on Nanotechnology. <http://icon.rice.edu/> (29.08.2014)
- ISO – International Organization for Standardization (2008): Nanotechnologies terminology, definitions for nano-objects – nanoparticle, nanofibre and nanoplate. ISO TS 27687. Geneva, Switzerland
- Ispas, Cristina/Daniel Andreescu/Avni Patel/Dan V. Goia/Silvana Andreescu/Kenneth N. Wallace (2009): Toxicity and developmental defects of different sizes and shape nickel nanoparticles in zebrafish. *Environmental Science and Technology*, 43: 6349–6356
- Jacobasch, Claudia/Carolin Völker/Sabrina Giebner/Johannes Völker/Heiko Alsenz/Theodoros Potouridis/Heike Heidenreich/Gernot Kayser/Jörg Oehlmann/Matthias Oetken (2014): Long-term effects of nanoscaled titanium dioxide on the cladoceran *Daphnia magna* over six generations. *Environmental Pollution*, 186: 180–186

- Jordan, A./K. Maier-Hauff/P. Wust/B. Rau/M. Johannsen (2007): Thermotheapie mit magnetischen Nanopartikeln. *Der Onkologe*, 13: 894–902
- Ju-Nam, Yon/Jamie R. Lead (2008): Manufactured nanoparticles: an overview of their chemistry, interactions and potential environmental implications. *Science of the Total Environment*, 400: 396–414
- Kägi, Ralf/Andrea Ulrich/Brian Sinnet/Roger Vonbank/Adrian Wichser/Steffen Zuleeg/Hans Simmler/Samuel Brunner/Heinz Vonmont/Michael Burkhardt/Markus Boller (2008): Synthetic TiO₂ nanoparticle emission from exterior facades into the aquatic environment. *Environmental Pollution*, 158: 2900–2905
- Kahru, Anne/Henri-Charles Dubourguier (2010): From ecotoxicology to nanoecotoxicology. *Toxicology*, 269: 105–119
- Khan, Farhan R./Superb K. Misra/Javier Garcia-Alonso/Brian D. Smith/Stanislav Strekopytov/Philip S. Rainbow/Samuel N. Luoma/Eugenia Valsami-Jones (2012): Bioaccumulation dynamics and modeling in an estuarine invertebrate following aqueous exposure to nanosized and dissolved silver. *Environmental Science and Technology*, 46: 7621–7628
- Kim, Jiwon/Sooyeon Kim/Sungkyu Lee (2011): Differentiation of the toxicities of silver nanoparticles and silver ions to the Japanese medaka (*Oryzias latipes*) and the cladoceran *Daphnia magna*. *Nanotoxicology*, 5: 208–214
- Kim, Jung S./Tae-Jong Yoon/Kyeong N. Yu/Byung G. Kim/Sung J. Park/Hyun W. Kim/Kee H. Lee/Seung B. Park/Jin-Kyu Lee/Myung H. Cho (2006): Toxicity and tissue distribution of magnetic nanoparticles in mice. *Toxicological Sciences*, 89: 338–347
- Kim, Ki T./Stephen J. Klaine/Sije Lin/Pu C. Ke/Sang D. Kim (2010): Acute toxicity of a mixture of copper and single-walled carbon nanotubes to *Daphnia magna*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29: 122–126
- Klaine, Stephen J./Albert A. Koelmans/Nina Horne/Stephen Carley/Richard D. Handy/Larry Kapustka/Bernd Nowack/Frank von der Kammer (2012): Paradigms to assess the environmental impact of manufactured nanomaterials. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 31: 3–14
- Klaine, Stephen J./Pedro J. J. Alvarez/Graeme E. Batley/Teresa F. Fernandes/Richard D. Handy/Delina Y. Lyon/Shaily Mahendra/Michael J. McLaughlin/Jamie R. Lead (2008): Nanomaterials in the environment: Behavior, fate, bioavailability, and effects. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27: 1825–1851
- Koziara, Joanna M./Paul R. Lockman/David D. Allen/Russell J. Mumper (2003): *In situ* blood-brain barrier transport of nanoparticles. *Pharmaceutical Research*, 20: 1772–1778
- Krug, Harald F./Peter Wick (2011): Nanotoxikologie – eine interdisziplinäre Herausforderung. *Angewandte Chemie*, 123, 1294–1314. Online verfügbar unter: <http://wcms.uzi.uni-halle.de/download.php?down=19095&telem=2454011> (27.02.2014)
- Kuhlbusch, Thomas/Carmen Nickel (2010): Emission von Nanopartikeln aus ausgewählten Produkten in ihrem Lebenszyklus. Online verfügbar unter:

<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4028.pdf> (27.04.2014)

- Kwon, Jung-Taek, Dae-Seong Kim/Arash Minai-Tehrani/Soon-Kyung Hwang/Seung-Hee Chang/Eun-Sun Lee/Cheng-Xiong Xu/Hwang Tae Lim/Ji-Eun Kim/Byung-Il Yoon/Gil-Hwan An/Kee-Ho Lee/Jin-Kyu Lee/Myung-Haing Cho (2009): Inhaled fluorescent magnetic nanoparticles induced extramedullary hematopoiesis in the spleen of mice. *Journal of Occupational Health*, 51: 423–431
- Laban, Geoff/Loring F. Nies/Ronald F. Turco/John W. Bickham/Maria S. Sepúlveda (2010): The effects of silver nanoparticles on fathead minnow (*Pimephales promelas*) embryos. *Ecotoxicology*, 19: 185–195
- Lam, Chiu-Wing/John T. James/Richard McCluskey/Robert L. Hunter (2004): Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation. *Toxicological Sciences*, 77: 126–134
- Larsen, Søren T./Martin Roursgaard/Keld A. Jensen/Gunnar D. Nielsen (2010): Nano titanium dioxide particles promote allergic sensitization and lung inflammation in mice. *Basic and Clinical Pharmacology and Toxicology*, 106: 114–117
- Li, Ting/Brian Albee/Matti Alemayehu/Rocio Diaz/Leigha Ingham/Shawn Kamal/Maritz Rodriguez/Sandra W. Bishnoi (2010): Comparative toxicity study of Ag, Au, and Ag-Au bimetallic nanoparticles on *Daphnia magna*. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 398: 689–700
- Lovern, Sarah B./Rebecca Klaper (2006): *Daphnia magna* mortality when exposed to titanium dioxide and fullerene (C₆₀) nanoparticles. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25: 1132–1137
- Lövestam, Göran/Hubert Rauscher/Gert Roebben/Birgit Sokull Klüttgen/Neill Gibson/Jean-Phillipe Putaud/Hermann Stamm (2010): Considerations on an Definition of Nanomaterial for Regulatory Purposes. JRC Reference Report. Online verfügbar unter: http://ec.europa.eu/dgs/jrc/downloads/jrcreference_report_201007_nanomaterials.pdf (11.02.2014)
- LUBW – Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2011): Nanomaterialien: Anwendungen im Umweltbereich. Online verfügbar unter: <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/74003/> (13.09.2014)
- Luther, Wolfgang (2007): Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt. In: Andre Gzásó/Sabine Greßler/Fritz Schiemer (Hg.): Nano. Chancen und Risiken aktueller Technologien. Wien/New York: Springer
- Martens, Sonja/Bernd Eggers/Thorsten Evertz (2010): Untersuchung des Einsatzes von Nanomaterialien im Umweltschutz. Online verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/43778_0.pdf?ei=-i1RVKGPfYbmyQP0-ILwDQ&tusg=AFQjCNECGTOCV-7YFE20Nf8QgGntu216mw&tbm=bv.78597519,d.bGQ (11.04.2014)
- Möller, Martin/Andreas Hermann/Christoph Pistner/Rita Groß/Peter Küppers/Katja Moch/Siddharth Prakash/Angelika Spith-Achnich (2011): Analyse und strategisches Management der Nachhaltigkeitspotenziale von Nanoprodukten. Nachhalt-

- tigkeitsCheck von Nanoprodukten. Online verfügbar unter:
<http://www.oeko.de/oekodoc/1719/2011-341-de.pdf> (11.02.2014)
- Möller, Martin/Andreas Hermann/Rita Groß/Mark-Oliver Diesner/Peter Küppers/
 Wolfgang Luther/Norbert Malanowski/David Haus/Axel Zweck (2013): Nanomaterialien: Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH
- Möller, Martin/Mark-Oliver Diesner/Andreas Manhart/Peter Küppers/Angelika Spieth-Achtnich/Christoph Pistner (2014): Untersuchung der Auswirkungen ausgewählter nanotechnischer Produkte auf den Rohstoff- und Energiebedarf. Online verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_21_2014_untersuchung_der_auswirkungen_ausgewaehlter_nanotechnischer_produkte_auf_den_rohstoff.pdf (11.02.2014)
- Moshhammer, Hanns/Peter Wallner (2007): Gesundheitsrisiken durch Nanopartikel? In: Andre Gzásó/Sabine Greßler/Fritz Schiemer (Hg.): Nano. Chancen und Risiken aktueller Technologien. Wien/New York, 165–180
- Navarro, Enrique/Flavio Piccapietra/Bettina Wagner/Fabio Marconi/Ralf Kaegi/Niksa Odzak/Laura Sigg/Renata Behra (2008): Toxicity of silver nanoparticles to *Chlamydomonas reinhardtii*. Environmental Science and Technology, 42: 8959–8964
- Neuberger, M. (2007): Umweltepidemiologie und Toxikologie von Nanopartikeln (Ultrafeinstaub) und Feinstaub. In: Andre Gzásó/Sabine Greßler/Fritz Schiemer (Hg.): Nano. Chancen und Risiken aktueller Technologien. Wien/New York, 181–197
- Nowack, Bernd/Thomas D. Bucheli (2007): Occurrence, behavior and effects of nanoparticles in the environment. Environmental Pollution, 150: 5–22
- Oberdörster, Eva/Shiqian Zhu/T. Michelle Blickley/Patricia McClellan-Green/Mary L. Haasch (2006): Ecotoxicology of carbon-based engineered nanoparticles: Effects of fullerene (C₆₀) on aquatic organisms. Carbon, 44: 1112–1120
- Oberdörster, Günter/Chia-Ping Yu (1990): The carcinogenic potential of inhaled diesel exhaust: A particle effect? Journal of Aerosol Science, 21: 397–401
- Oberdörster, Günter/Zachary Sharp/Viorel Atudorei/Alison Elder/Robert Gelein/Wolfgang Kreyling/Christopher Cox (2004): Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. Inhalation Toxicology, 16: 437–445
- OECD (2012a): Guidance on sample preparation and dosimetry for the safety testing of manufactured nanomaterials. Series on the safety of manufactured nanomaterials No. 36. ENV/JM/MONO(2012)40. Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris
- OECD (2012b): OECD brochure: Overview - Six years of OECD work on the safety of manufactured nanomaterials. Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris
- Paschen, Herbert/Christopher Coenen/Torsten Fleischer/Reinhard Grünwald/Dagmar Oertel/Christoph Revermann (2004): Nanotechnologie. Forschung, Entwicklung, Anwendung. Online verfügbar unter: http://books.google.de/books?id=kxu7H0PhcIC&printsec=frontcover&hl=de&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=snippet&q=definition&f=false (11.02.2014)

- PEN (2013): The Project on Emerging Nanotechnologies. Online verfügbar unter: <http://www.nanotechproject.org/> (11.09.2014)
- Piccinno, Fabiano/Fadri Gottschalk/Stefan Seeger/Bernd Nowack (2012): Industrial production quantities and uses of ten engineered nanomaterials in Europe and the world. *Journal of Nanoparticle Research*, 14: 1109
- Poland, Craig A./Sheona A. K. Read/Julia Varet/Gillian Carse/Frans M. Christensen/Steve M. Hankin (2013): Dermal absorption of nanomaterials. Part of the „Better control of nano“ initiative 2012–2015. Environmental Project No. 1504. Danish Ministry of the Environment, Environmental Protection Agency
- Poynton, Helen C./James M. Lazorchak/Christopher A. Impellitteri/Bonnie J. Blalock/Kim Rogers/H. Joel Allen/Alexandre Loguinov/J. Lee Heckman/Shekar Govindasmawly (2012): Toxicogenomic responses of nanotoxicity in *Daphnia magna* exposed to silver nitrate and coated silver nanoparticles. *Environmental Science and Technology*, 46: 6288–6296
- Raab, Christina/Myrtil Simkó/Ulrich Fiedeler/Michael Nentwich/André Gzásó (2008): Herstellungsverfahren von Nanopartikeln und Nanomaterialien. Nano Trust-Dossier 006/08. Online verfügbar unter: <http://epub.oeaw.ac.at/ita/nanotrustedossiers/dossier006.pdf> (23.11.2010)
- Riediker, Michael (2013): Compendium of Projects in the European NanoSafety Cluster. 2013 Edition. Lausanne. Online verfügbar unter: http://www.nanosafetycluster.eu/uploads/files/pdf/2013_NSC_Compendium.pdf (15.04.2014)
- Roberts, Aaron P./Andrew S. Mount/Brandon Seda/Justin Souther/Rui Qiao/Sijie Lin/Pu C. Ke/Apparao M. Rao/Stephen J. Klaine (2007): *In vivo* biomodification of lipid-coated carbon nanotubes by *Daphnia magna*. *Environmental Science and Technology*, 41: 3025–3029
- Sadiq, I. Mohammed/Sunandan Pakrashi/N. Chandrasekaran/Amitava Mukherjee (2011): Studies on toxicity of aluminum oxide (Al₂O₃) nanoparticles to microalgae species: *Scenedesmus* sp. and *Chlorella* sp. *Journal of Nanoparticle Research*, 13: 3287–3299
- Sager, Tina M./Vincent Castranova (2009): Surface area of particle administered versus mass in determining the pulmonary toxicity of ultrafine and fine carbon black: Comparison to ultrafine titanium dioxide. *Particle and Fibre Toxicology*, 6: 15
- Sartorius, J. (2010): Green Nano: Challenges of Sustainability.10. Chemical Nanotechnology Talks in Frankfurt. *Hessen Nanotech News*, 32 (3): 7–8
- Schober, Wolfgang/Richard Winterhalter/Martina Kohlhuber/Hermann Fromme (2012): Nanomaterialien am Arbeitsplatz. Exposition, gesundheitliche Risiken und Präventionsmaßnahmen. Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL), Arbeitsschutz und Produktsicherheit 5
- SRU – Sonderrat für Umweltfragen (2011): Vorsorgestrategien für Nano-Materialien. Sondergutachten. Berlin. Online verfügbar unter: http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2011_09_SG_Vorsorgestrategien%20f%C3%BCr%20Nanomaterialien.pdf?__blob=publicationFile (11.02.2014)

- Stone, Vicki/Bernd Nowack/Anders Baun/Nico van den Brink/Frank von der Kammer/Maria Dusinska/Richard Handy/Steven Hankin/Martin Hassellöv/Erik Joner/Teresa F. Fernandes (2010): Nanomaterials for environmental studies: Classification, reference material issues, and strategies for physico-chemical characterisation. *Science of the Total Environment*, 408: 1745–1754
- Strigul, Nikolay/Liana Vaccari/Catherine Galdun/Mahmoud Wazne/Xuyang Liu/Christos Christodoulatos/Kristin Jasinkiewicz (2009): Acute toxicity of boron, titanium dioxide, and aluminum nanoparticles to *Daphnia magna* and *Vibrio fischeri*. *Desalination*, 248: 771–782
- Sun, Hongwen/Xuezhi Zhang/Qian Niu/Yongsheng Chen/John C. Crittenden (2007): Enhanced accumulation of arsenate in carp in the presence of titanium dioxide nanoparticles. *Water, Air, and Soil Pollution*, 178: 245–254
- TA-Swiss (Hg.) (2013): Nanomaterialien. Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit. Zürich. Online verfügbar unter: http://www.vdf.ethz.ch/service/3559/3560_Nanomaterialien_OA.pdf (11.02.2014)
- Tran, C. Lang/Ken Donaldson/Vicki Stone/Teresa Fernandez/Alex Ford/Nick Cristofoli/John G. Ayres/Markus Steiner/J. Hurley/Robert J. Aitken (2005): A scoping study to identify hazard data needs for addressing the risks presented by nanoparticles and nanotubes. Project Report. Institute of Occupational Medicine. Edinburgh
- UBA (2013): Nanomaterialien und REACH. Hintergrundpapier zur Position der deutschen Bundesbehörden. Umweltbundesamt. Dessau
- UBA/BfR/BAuA (2007): Nanotechnologie: Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanomaterialien. Forschungsstrategie. Online verfügbar unter: http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nano_forschungsstrategie.pdf (.02.2014).
- UBA/BfR/BAuA/BAM/PTB (2013): Nanotechnologie - Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanomaterialien (2007–2011). 1. Bilanz zur gemeinsamen Forschungsstrategie der Ressortforschungseinrichtungen des Bundes. Online verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/515/publikationen/ntf_ostra_barrierefrei_fin_0.pdf (11.02.2014)
- Universität Duisburg-Essen (2008): DFG Schwerpunktprogramm SPP 1313. Die biologische Wirkung von Nanopartikeln. Online verfügbar unter: http://www.spp1313.de/website/program/general/programm_82/de/de_programm_univer_1.php (11.02.2014)
- Usenko, Crystal Y./Stacey L. Harper/Robert L. Tanguay (2007): *In vivo* evaluation of carbon fullerene toxicity using embryonic zebrafish. *Carbon*, 45: 1891–1898
- Van Hoecke, Karen/Joris T. K. Quik/Joanna Mankiewicz-Boczek/Karel A. C. De/Andreas Elsaesser/Paul Van der Meeren/Clifford Barnes/George McKerr/C. Vyvyan Howard/Dik Van De Meent/Konrad Rydzynski/Kenneth A. Dawson/Anna Salvati/Anna Lesniak/Iseult Lynch/Geert Silversmit/Björn De Samber/Laszlo Vincze/Colin R. Janssen (2009): Fate and effects of CeO₂ nanoparticles in aquatic ecotoxicity tests. *Environmental Science and Technology*, 43: 4537–4546
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure (2013): Zukunft der Nanotechnik – Chancen erkennen, Technologie nutzen, Wettbewerbsfähigkeit stärken. Online verfügbar un-

ter: <https://www.vdi.de/artikel/vdi-veroeffentlicht-positionspapier-zur-nanotechnologie/> (13.11.2014)

- Vermeylen, Jos/Abderrahim Nemmar/Benoit Nemery/Marc F. Hoylaerts (2005): Ambient air pollution and acute myocardial infarction. *Journal of Thrombosis and Haemostasis*, 3: 1955–1961
- Völker, Carolin (2013c): Ecotoxicological Analysis of Silver Nanoparticles: A Contribution to the Risk Assessment of Nanomaterials. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften vorgelegt beim Fachbereich Biowissenschaften der Johann Wolfgang Goethe-Universität. Frankfurt am Main
- Völker, Carolin/Cathinka Boedicker/Jan Daubenthaler/Matthias Oetken/Jörg Oehlmann (2013a): Comparative toxicity assessment of nanosilver on three *Daphnia* species in acute, chronic and multigeneration experiments. *Plos One*, 8: e75026
- Völker, Carolin/Matthias Oetken/Jörg Oehlmann (2013b): The biological effects and possible modes of action of nanosilver. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 223: 81–106
- von Gleich, Armin/Ulrich Petschow/Michael Steinfeldt (2007): Nachhaltigkeitspotenziale und Risiken von Nanotechnologien – Erkenntnisse und Ansätze zur Gestaltung. In: Andre Gzásó/Sabine Greßler/Fritz Schiemer (Hg.): Nano. Chancen und Risiken aktueller Technologien. Wien/New York: Springer
- Wang, Zhuang/Jingwen Chen/Xuehua Li/Jianping Shao/Willie J. G. M. Peijnenburg (2012): Aquatic toxicity of nanosilver colloids to different trophic organisms: Contributions of particles and free silver ion. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 31: 2408–2413
- Warheit, David B./Brett R. Laurence/Kenneth L. Reed/David H. Roach/Gillian A. M. Reynolds/Tom R. Webb (2004): Comparative pulmonary toxicity assessment of single-wall carbon nanotubes in rats. *Toxicological Sciences*, 77: 117–125
- Warheit, David B./Robert A. Hoke/Carol Finlay/E. Maria Donner/Kenneth L. Reed/Christie M. Sayes (2007): Development of a base set of toxicity tests using ultrafine TiO₂ particles as a component of nanoparticle risk management. *Toxicology Letters*, 171: 99–110
- Wiench, Karin/Wendel Wohlleben/Volker Hisgen/Kristin Radke/Edward Salinas/Sabine Zok/Robert Landsiedel (2009): Acute and chronic effects of nano- and non-nano-scale TiO₂ and ZnO particles on mobility and reproduction of the freshwater invertebrate *Daphnia magna*. *Chemosphere*, 76: 1356–1365
- Xiong, Daowen/Tao Fang/Linpeng Yu/Xiaofeng Sima/Wentao Zhu (2011): Effects of nano-scale TiO₂, ZnO and their bulk counterparts on zebrafish: Acute toxicity, oxidative stress and oxidative damage. *Science of the Total Environment*, 409: 1444–1452
- Yang, Kun/Lizhong Zhu/Baoshan Xing (2010): Sorption of phenanthrene by nanosized alumina coated with sequentially extracted humic acids. *Environmental Science and Pollution Research*, 17: 410–419
- Yang, Wei-Wan/Ai-Jun Miao/Liu-Yan Yang (2012): Cd²⁺ toxicity to a green alga *Chlamydomonas reinhardtii* as influenced by its adsorption on TiO₂ engineered nanoparticles. *Plos One*, 7: e32300

- Zhao, Chun-Mei/Wen-Xiong Wang (2010): Biokinetic uptake and efflux of silver nanoparticles in *Daphnia magna*. *Environmental Science and Technology*, 44: 7699–7704
- Zhao, Chun-Mei/Wen-Xiong Wang (2011): Comparison of acute and chronic toxicity of silver nanoparticles and silver nitrate to *Daphnia magna*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 30: 885–892
- Zhu, Xiaoshan/Lin Zhu/Yongsheng Chen/Shengyan Tian (2009): Acute toxicities of six manufactured nanomaterial suspensions to *Daphnia magna*. *Journal of Nanoparticle Research*, 11: 67–75
- Zhu, Xiaoshan/Lin Zhu/Zhenghua Duan/Ruiqi Qi/Yan Li/Yupeng Lang (2008): Comparative toxicity of several metal oxide nanoparticle aqueous suspensions to zebrafish (*Danio rerio*) early developmental stage. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 43: 278–284
- Zhu, Xiaoshan/Yung Chang/Yongsheng Chen (2010): Toxicity and bioaccumulation of TiO₂ nanoparticle aggregates in *Daphnia magna*. *Chemosphere*, 78: 209–215
- Zimmer, René/Rolf Hertel/Gaby-Fleur Böhl (Hg.) (2008a): Risikowahrnehmung beim Thema Nanotechnologie – Analyse der Medienberichterstattung. Berlin. Online verfügbar unter: http://www.bfr.bund.de/cm/350/risikowahrnehmung_beim_thema_nanotechnologie.pdf (13.02.2014).
- Zimmer, René/Rolf Hertel/Gaby-Fleur Böhl (Hg.) (2008b): BfR-Verbraucherkonferenz Nanotechnologie. Modellprojekt zur Erfassung der Risikowahrnehmung bei Verbrauchern. Berlin. Online verfügbar unter: http://www.bfr.bund.de/cm/350/bfr_verbraucherkonferenz_nanotechnologie.pdf (21.03.2014)