

*Martin Möller, Andreas Hermann, Rita Groß,  
Mark-Oliver Diesner, Peter Küppers, Wolfgang Luther,  
Norbert Malanowski, David Haus, Axel Zweck*

# **Nanomaterialien: Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit**



**TA-SWISS 60/2013**

*Martin Möller, Andreas Hermann, Rita Groß,  
Mark-Oliver Diesner, Peter Küppers, Wolfgang Luther,  
Norbert Malanowski, David Haus, Axel Zweck*

# **Nanomaterialien: Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit**

### **Bibliografische Information Der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Diese Studie wurde unterstützt vom Bundesamt für Umwelt (BAFU).

### **Öko-Institut e.V.**

Martin Möller (Projektleitung)

Andreas Hermann

Rita Groß

Dr. Mark-Oliver Diesner

Peter Küppers

unter Mitarbeit von David Haus

In Kooperation mit:

### **Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH**

Prof. Dr. Dr. Axel Zweck

Dr. Wolfgang Luther

Dr. Norbert Malanowski

Coverabbildungen:

© iStockphoto.com - Andrey Prokhorov (linkes Bild)

© darknightsky - Fotolia.com (rechtes Bild)

© **2013 vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich**

ISBN 978-3-7281-3559-9 (Printausgabe)

Download open access:

ISBN 978-3-7281-3560-5 / DOI 10.3218/3560-5

[www.vdf.ethz.ch](http://www.vdf.ethz.ch)

[verlag@vdf.ethz.ch](mailto:verlag@vdf.ethz.ch)

# Inhalt

Tabellenverzeichnis .....	V
Abbildungsverzeichnis .....	VII
Executive Summary .....	IX
Résumé .....	XIII
Riassunto .....	XIX
Zusammenfassung .....	XXIII
Danksagung .....	XXVII
<b>1 Hintergrund und Einführung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Zielsetzung und Forschungsfragen .....</b>	<b>5</b>
<b>3 Überblick zum Aufbau der Studie .....</b>	<b>9</b>
<b>4 Definition des Untersuchungsgegenstandes .....</b>	<b>11</b>
<b>5 Marktübersicht .....</b>	<b>15</b>
5.1 Übersicht zu Produkten und Anwendungen von Nanomaterialien .....	16
5.2 Übersicht zur Herstellung und Verbreitung von Nanomaterialien .....	40
5.3 Zwischenfazit .....	58
<b>6 Überblick über die aktuelle Forschungslandschaft zur Risikobewertung .....</b>	<b>61</b>
6.1 Überblick über die Forschungslandschaft in der Schweiz .....	63
6.2 Europäische und internationale Forschungsrahmen- programme und OECD-Aktivitäten .....	74
6.3 Fragestellungen und weiterer Forschungsbedarf .....	77
6.4 Zwischenfazit .....	80

<b>7</b>	<b>Produkte und Anwendungen mit hohem Nachhaltigkeitspotenzial .....</b>	<b>83</b>
7.1	Charakterisierung von Anwendungen mit grosser wirtschaftlicher Bedeutung bzw. hohem Marktpotenzial .....	83
7.2	Vorgehensweise zur Quantifizierung der Nachhaltigkeitsaspekte.....	94
7.3	Quantitative Abschätzung der Umweltentlastungspotenziale für ein konkretes Fallbeispiel .....	101
7.4	Zwischenfazit .....	109
<b>8</b>	<b>Auswirkungen von Nanomaterialien auf Umwelt und Gesundheit.....</b>	<b>113</b>
8.1	Identifizierung von Nanomaterialien mit Schädigungspotenzial für Umwelt und Gesundheit .....	113
8.2	Transformationseffekte und Langzeitwirkungen von Nanomaterialien (AP 5) .....	162
8.3	Zwischenfazit .....	170
<b>9</b>	<b>Betrachtung der End-of-Life-Aspekte .....</b>	<b>175</b>
9.1	Auswahl der betrachteten Nanomaterialien und Produkte .....	175
9.2	Exposition von Mensch und Umwelt entlang der Entsorgungswege ausgewählter Produkte.....	176
9.3	Behandlungsanlagen für Abwässer und Abfälle .....	185
9.4	Zwischenfazit .....	193
<b>10</b>	<b>Evaluierung der öffentlichen Debatte und Charakterisierung der Stakeholder.....</b>	<b>195</b>
10.1	Sichtbare Stakeholder in der öffentlichen Debatte .....	196
10.2	Positionen in der öffentlichen Debatte .....	198
10.3	Zwischenfazit .....	214
<b>11</b>	<b>Nanotechnologie als ethische Herausforderung .....</b>	<b>217</b>
11.1	Grundströmungen in der Risikoethik.....	218
11.2	Analyse der ethischen Debatte in der Schweiz .....	237

11.3	Vergleich der Debatte um Nanomaterialien mit der Gentechnikdebatte.....	245
11.4	Schlussfolgerungen .....	249
<b>12</b>	<b>Darstellung und Bewertung des bestehenden Rechtsrahmens in der Schweiz .....</b>	<b>251</b>
12.1	Informationen über Nanomaterialien im Chemikalienrecht.....	256
12.2	Informationen über Nanomaterialien in Verbraucherprodukten .....	267
12.3	Schlussfolgerungen .....	279
<b>13</b>	<b>Interdisziplinäre Gesamtbewertung .....</b>	<b>281</b>
13.1	Zusammenfassung der Resultate nach Analyseaspekten .....	281
13.2	Zusammenfassung der Resultate für besonders relevante Nanomaterialien .....	290
13.3	Gesamtfazit.....	296
<b>14</b>	<b>Empfehlungen .....</b>	<b>299</b>
14.1	Wissenschaftliche Grundlagen konsolidieren.....	300
14.2	Ordnungsrecht zum Schutz der Arbeitnehmer/innen und der Bevölkerung anpassen .....	304
14.3	Flankierende freiwillige Instrumente, Forschungsschwerpunkte und öffentliche Dialoge.....	309
14.4	Zusammenfassung der Empfehlungen.....	313
<b>15</b>	<b>Referenzen .....</b>	<b>317</b>
<b>16</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>345</b>
16.1	Übersicht Schweizer Unternehmen mit Aktivitäten im Bereich Nanomaterialien.....	345
16.2	Übersicht der Positionen der Stakeholder .....	355
16.3	Übersicht der Positionen der Parteien .....	382
	<b>Verzeichnis der Projektbeteiligten .....</b>	<b>385</b>
	<b>Mitglieder der Begleitgruppe .....</b>	<b>386</b>





# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Durch Nanomaterialien beeinflussbare Materialeigenschaften und Anwendungsbeispiele (Quelle: BMBF 2009) .....	17
Tabelle 2	Übersicht zu Anwendungen von Nanomaterialien im Konsumgüterbereich, die in der Schweiz hergestellt bzw. vertrieben werden (ohne Anspruch auf Vollständigkeit; Quelle: Literatur- und Internetrecherche) .....	26
Tabelle 3	Übersicht zu generellen Anwendungsmöglichkeiten von Nanomaterialien im Konsumgüterbereich .....	31
Tabelle 4	Beispielhafte Übersicht zu Anwendungen und Entwicklungen der Nanotechnologie im Bereich der Umwelttechnik (Quelle: BMBF 2011).....	35
Tabelle 5	Beispielhafte Übersicht zu branchenspezifischen Anwendungen und Entwicklungen der Nanotechnologie mit erwarteten Vorteilen/Potenzialen im Hinblick auf Umweltentlastungseffekte (Quelle: VDI TZ) .....	37
Tabelle 6	Nanotechnologierelevante Einträge in der Datenbank «Wer liefert was?» (www.wlw.ch).....	42
Tabelle 7	Kommerziell verfügbare Nanomaterialien (Quellen: Nanowerk Nanomaterial Datenbank, <a href="http://www.nanowerk.com/phpscripts/n_dbsearch.php">http://www.nanowerk.com/phpscripts/n_dbsearch.php</a> ; BMBF 2009).....	47
Tabelle 8	Übersicht zu Abschätzungen von Marktvolumina von Nanomaterialien (Quelle: BMBF 2011).....	50
Tabelle 9	Übersicht zu Abschätzungen von Produktionsvolumina verschiedener Nanomaterialien .....	53
Tabelle 10	Ergebnisse einer OECD-Erhebung zu Herstellern und Produktionsvolumina von Nanomaterialien. Daten aus der tschechischen Republik wurden aufgrund mangelnder Vergleichbarkeit nicht berücksichtigt (Quelle: OECD 2011) .....	57

Tabelle 11	Übersicht zu den Steering Groups (SG) der OECD WPNM (Quelle: BMBF 2011).....	76
Tabelle 12	Charakterisierung ausgewählter methodische Ansätze zur Nachhaltigkeitsanalyse in Hinblick auf ihre Stärken und Limitationen bzw. Grenzen .....	99
Tabelle 13	Modellierungsannahmen und Datenbasis für den Vergleich von Nanozellulose mit Glasfasern .....	106
Tabelle 14	Zusammenfassung der Einschätzungen zu ausgewählten Nachhaltigkeitsaspekten für verschiedene Nanoprodukte.....	110
Tabelle 15	Mengenabhängige Informationsanforderungen bei der Neustoffanmeldung.....	259
Tabelle 16	Verbraucherproduktbereiche, in denen keine Kennzeichnungs- und Deklarationspflichten für enthaltene Nanomaterialien bestehen .....	274
Tabelle 17	Interdisziplinäres Stoffprofil für Siliziumdioxid.....	290
Tabelle 18	Interdisziplinäres Stoffprofil für Titandioxid .....	291
Tabelle 19	Interdisziplinäres Stoffprofil für Zinkoxid .....	292
Tabelle 20	Interdisziplinäres Stoffprofil für Kohlenstoffnanoröhren (CNT) .....	293
Tabelle 21	Interdisziplinäres Stoffprofil für Nanosilber .....	294
Tabelle 22	Zusammenfassung der Empfehlungen mit Angabe der verantwortlichen Akteure und anzustrebenden Umsetzungszeiträume .....	313
Tabelle 23	Übersicht Schweizer Unternehmen mit Aktivitäten im Bereich Nanomaterialien.....	345

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Übersicht zur begrifflichen Zuordnung verschiedener Typen von Nanomaterialien nach ISO.....	12
Abbildung 2	Anteil der von Schweizer Handelsketten vertriebenen Nanoprodukte nach Art der Nanomaterial-Anwendung.....	25
Abbildung 3	Zuordnung identifizierter Nanoprodukte zu Produktkategorien (Quelle: Nano-Konsumgüter-Datenbank des Woodrow Wilson Centers, <a href="http://www.nanotech-project.org">www.nanotech-project.org</a> , Datenabfrage März 2011).....	29
Abbildung 4	Eingesetzte Nanomaterialien in Produkten, die in der Nano-Konsumgüter-Datenbank des Woodrow Wilson Centers verzeichnet sind (Quelle: <a href="http://www.nanotech-project.org">www.nanotech-project.org</a> , Datenabfrage März 2011).....	30
Abbildung 5	Anwendungsfelder nanomaterialbasierter Entwicklungen und Produkte Schweizer Unternehmen (Quelle: Eigene Erhebung VDI TZ, n=60, Mehrfachnennungen möglich).....	44
Abbildung 6	Anzahl und die Schnittmengen der in den jeweiligen Quellen erwähnten als Nanomaterial verfügbaren chemischen Substanzen. (Quelle: EPA 2009).....	46
Abbildung 7	Marktanteile unterschiedlicher Materialklassen am Weltmarkt für Nanopulver (Quelle: Abercade Research Company).....	51
Abbildung 8	Überblick über den Lebenszyklus eines Produktes (Quelle: DIN EN ISO 14040:2009:11).....	95
Abbildung 9	CO <sub>2</sub> -Emissionen der Herstellung von Nanozellulose (MFC) im Vergleich zur Herstellung von Glasfasern (Angaben in kg CO <sub>2</sub> e).....	107
Abbildung 10	Kategorisierung synthetischer Nanomaterialien (engineered nanomaterials «ENM») (Quelle: Nowack et al. 2012, eigene Übersetzung aus dem Englischen).....	165

Abbildung 11	Sonnencremes: Abfallanfall und Entsorgungswege während der Nutzung und am Ende des Produktlebenszyklus.....	177
Abbildung 12	Textilien: Abfallanfall und Entsorgungswege während der Nutzung und am Ende des Produktlebenszyklus.....	179
Abbildung 13	Farben und Lacke: Abfallanfall und Entsorgungswege bei der Nutzung.....	181
Abbildung 14	Farben und Lacke: Abfälle und ihre Entsorgungswege am Ende des Lebenszyklus.....	184
Abbildung 15	Entsorgungswege der Klärschlämme.....	186
Abbildung 16	Kehrichtverbrennungsanlagen: Anfallende Abfälle und ihre Entsorgungswege.....	189
Abbildung 17	Schredderanlagen: anfallende Fraktionen und Abfälle sowie ihre Entsorgungswege (Ableitungen von Abwässern bei den einzelnen Stationen sind nicht dargestellt).....	192
Abbildung 18	Bekanntheitsgrad der Nanotechnologie (Quelle: EC 2010).....	206
Abbildung 19	Gespräch über Nanotechnologie (Quelle: EC 2010).....	207
Abbildung 20	Förderung der Nanotechnologie (Quelle: EC 2010).....	208
Abbildung 21	Nanotechnologie förderlich für Wirtschaft (Quelle: EC 2010).....	209
Abbildung 22	Unbehagen bei Nanotechnologie (Quelle: EC 2010).....	210
Abbildung 23	Nanotechnologie und Umweltbelastung (Quelle: EC 2010).....	211
Abbildung 24	Nanotechnologie und Gesundheit (Quelle: EC 2010).....	212

# Executive Summary

In many sectors of industry, nanomaterials open up new kinds of possibilities for novel products and processes. Their use, however, also gives rise to some irrational fear, especially since there are scarcely any comprehensive studies on the positive and negative effects on health and the environment. This is the starting point of the present interdisciplinary TA-SWISS study investigating the entire life cycle of the analysed nanomaterials, thereby taking into account not only human and environmental toxicology, but also aspects such as global warming, resource conservation and practical utility.

## An Intransparent Market

Compared to other countries such as the United States with a production volume estimated at up to 40,000 tonnes per year, Switzerland is not producing large quantities of primary nanomaterials on an industrial scale. Instead, the processing of nanomaterials for specific applications such as coatings, consumer products, or pharmaceuticals is predominant (with a volume of at least 2,500 tonnes). Nevertheless, nanomaterials in Switzerland have found their way into people's daily life, in particular as UV protection in paints and coatings (zinc oxide), in sunscreens (titanium dioxide), as an anti-microbial additive in textiles and food packaging (nanosilver), as a filler in car tyres to provide lower rolling resistance, as well as anti-caking agent E551 in food (silicon dioxide), or in tennis rackets and bicycle frames (carbon nanotubes (CNTs)).

It is usually not evident to the consumer, however, which products contain nanomaterials. On the one hand, not every product bearing the sales-effective catchword «nano» actually contains «nano», on the other hand, products actually containing nanomaterials are often not labelled at all or only very inconsistently. Although a proposal establishing a definition was published by the EU in October 2011, there are still considerable differences in the understanding of «nano» in practice.

**Policy Recommendation: Precautionary Principle and Labelling**

Given this lack of transparency, TA-SWISS recommends adaptations to the regulatory framework with particular reference to the precautionary principle: Among other things, the introduction of a nanoproduct register is thus recommended to enable the competent authorities to obtain a comprehensive overview of nanoproducts already on the market.

In addition, lawmakers may provide for specific labelling requirements for particularly «consumer-related» product groups such as textiles, in order to allow freedom of choice in consumer purchase decisions; including an appropriate definition of nanomaterials and standardized methods for their characterization.

**Policy Recommendation: Ongoing Development of the Legal Framework, Taking into Account the Need for EU compatibility**

The effectiveness of today's regulatory regimes and relevant international instruments of the trade system need to be assessed and if necessary adapted. As a matter of principle, it is also important to ensure compatibility with existing EU-level standards in this field. In certain cases, it might, however, become necessary from a precautionary point of view to go beyond EU law. This includes, for example, a reduction of the qualifying quantities set out in the Chemicals Ordinance (ChemO), in order to ensure that manufacturers of substances and preparations provide sufficient relevant information on the substances used for nanomaterials.

**The Positive Sides**

The fact that the use of nanomaterials in some products on the market significantly contributes towards environmental relief is one important reason why a coherent and transparent labelling of modern nanomaterials makes sense, i.e. for quick-hardening concretes, food packaging or composite material for aircraft construction. Nanomaterials in these applications not only offer consumers a higher practical utility, but also significantly help to reduce emissions of greenhouse gases (for quick-hardening concrete, perspective up to about 2.7 million tons of CO<sub>2</sub> per year) and to conserve resources.

**Policy Recommendation: Promotion of Low-Risk Nanoproducts by the Definition of Key Research Areas Relating to Climate Protection**

Low-risk products (such as nanoporous insulation materials, nanocellulose-based composites, as well as ingredients used in cancer therapies) having great potential for environmental relief and/or offering benefits to society should be promoted systematically. To this end, appropriate focal areas should be defined in public research, exploring concrete solutions addressing health issues and climate change (such as prioritization of new developments for the production and intermediate storage of electricity from renewable energy sources). This endeavour, however, must not be detrimental to the necessary extension of risk research.

**Yet, Some Risks Remain Unknown**

The interdisciplinary substance profiles that have been drawn up to date indicate that there are relevant risks especially relating to the environmental impact. Substances such as zinc oxide are to be critically assessed due to their toxicity effects in ecosystems, whereas nanosilver may be ecologically critical because of the risk of resistance formation among bacteria.

Despite the fact that the general level of knowledge on the acute effects of nanomaterials on health and the environment has improved in recent years, critical gaps in knowledge persist with regard to their effects under real environmental conditions, as well as in view of their long-term effects (such as an accumulation of titanium dioxide nanoparticles from sunscreens in the food chain). For individual areas of application, there is furthermore the risk that broad sections of the population have to face an uncontrolled exposure to abrasive material (e.g. scheduled use of CNT in car tyres).

Hence there are reasonable grounds for concern about the possibility that the ecotoxicological risks may also have impacts on human health (such as resistance formation due to nanosilver, genotoxic effects of diverse nanoparticles, inhalation of CNT from car tyre abrasion).

**Policy Recommendation: Consolidation of the Scientific Knowledge Base**

Within the scope of efforts to ensure the safe handling of nanoparticles, the scientific foundations regarding the effects on health and on the environment need to be consolidated. It is particularly important to examine the behaviour of nanoparticles in cells and tissues by means of systematic long-term studies, as well as their behaviour and fate in waste incineration, shredding and wastewater treatment plants (including the management of flue gas cleaning residues and sewage sludge).

**Policy Recommendation: Restriction on Problematic Applications**

Policymakers should always bear in mind that it is not recommendable to encourage every development path and approach relating to nanoproducts to the same extent. It may be necessary to restrict certain products or applications (such as the nonspecific usage of silver nanoparticles in consumer products) on toxicological or ethical grounds; this applies in particular if there is plausible evidence of unacceptable risks.

**Policy Recommendation: Accompanying Instruments and Dialogues**

A consistent application and further development of existing voluntary tools (such as precautionary matrix, taking into account opportunity aspects as well) should be promoted through appropriate mechanisms. Eventually, it is inevitable to initiate a public debate on the opportunities and risks presented by the priority areas of application for nanomaterials.



## Résumé

Les nanomatériaux ouvrent de nouvelles perspectives en faveur de produits et processus inédits dans un grand nombre de secteurs industriels. Leur usage suscite toutefois des inquiétudes diffuses, d'autant plus qu'une faible quantité d'études complètes ont été menées jusqu'à présent considérant les impacts positifs et négatifs sur la santé et l'environnement. Ce constat constitue le point de départ de la présente étude interdisciplinaire de TA-SWISS qui considère le cycle de vie total des nanomatériaux examinés et analyse à ce propos différents aspects, tels que l'effet de serre, la préservation des ressources et l'utilité d'usage, au-delà de la toxicologie humaine et de l'écotoxicologie.

### Un marché opaque

Au regard des autres pays tels que les États-Unis, qui présentent une production annuelle estimée allant jusqu'à 40 000 tonnes, la Suisse, quant à elle, ne fabrique pas de nanomatériaux primaires à grande échelle industrielle. Au lieu de cela prédomine le traitement des nanomatériaux destinés à des domaines d'application spécifiques comme les revêtements, les biens de consommation ou les médicaments (volume d'au moins 2500 tonnes). Toutefois, les nanomatériaux ont également fait leur entrée dans le quotidien de la Suisse, notamment sous les formes suivantes: protection contre les rayons ultraviolets dans les peintures et vernis (oxyde de zinc) et dans les protecteurs solaires (dioxyde de titane), additif antimicrobien dans les textiles et les emballages de produits alimentaires (nano-argent), charge destinée à la réduction de la résistance au roulement pour les pneus des voitures et antiagglomérant E551 dans les produits alimentaires (dioxyde de silicium) ou dans les raquettes de tennis et les cadres de vélo (nanotubes de carbone).

Cependant les consommateurs ne parviennent pas à distinguer, la plupart du temps, les produits qui contiennent des nanomatériaux. D'une part, la mention clé d'un point de vue commercial «nano» est également inscrite sur certains produits qui ne contiennent pas de nanomatériau et, de l'autre, les produits qui en contiennent réellement ne sont pas étiquetés en tant que tels ou bien le sont de manière très hétérogène. Bien qu'une proposition de définition ait été publiée par l'UE en octobre 2011, les avis divergent toujours de façon considérable quant à la compréhension du terme «nano» d'un point de vue pratique.

**Recommandation destinée au monde politique: le principe de précaution et l'obligation d'étiquetage**

Un tel manque de transparence pousse TA-SWISS à recommander différentes adaptations des réglementations en prenant tout particulièrement en considération le principe de précaution. Ainsi, il est notamment recommandé d'introduire un registre des nanoproducts afin de fournir aux autorités un aperçu global des nanoproducts qui se trouvent sur le marché.

À titre complémentaire, le législateur est susceptible de prévoir des obligations d'étiquetage spécifiques pour des groupes de produits particulièrement «proches des consommateurs» comme les textiles afin d'offrir une liberté de choix aux consommateurs lorsqu'ils effectuent leurs achats. Ce point comprend également une proposition de définition appropriée des nanomatériaux et des méthodes normalisées relatives à leur caractérisation.

**Recommandation destinée au monde politique: l'amélioration du cadre juridique en fonction de la compatibilité avec les règles européennes**

La validité des réglementations actuelles et les instruments internationaux du régime du commerce doivent faire l'objet d'une vérification et, éventuellement, d'une amélioration. Par ailleurs, il est essentiel de garantir en général leur compatibilité avec les normes en vigueur à l'échelle européenne dans ce domaine. Toutefois, il peut se révéler nécessaire de dépasser le cadre du droit européen à titre ponctuel selon le principe de précaution. Ce point comprend, par exemple, un abaissement des seuils quantitatifs fixés par l'ordonnance sur les produits chimiques (OChim) afin d'assurer que les fabricants de substances et de préparations rassemblent suffisamment d'informations pertinentes sur les substances relatives aux nanomatériaux.

## Les aspects positifs

Un étiquetage homogène et transparent des nanomatériaux modernes se révèle d'autant plus judicieux que leur usage relatif à certains produits disponibles sur le marché contribue de façon essentielle à la protection de l'environnement. Les bétons à prise rapide, les emballages de produits alimentaires ou les matériaux composites destinés à la construction aéronautique constituent plusieurs exemples qui illustrent un tel constat. Pour ces applications, non seulement les nanomatériaux offrent aux consommateurs une utilité d'usage supérieure, mais ils contribuent également de façon considérable à réduire les émissions de gaz à effet de serre nuisibles à l'environnement (par exemple jusqu'à 2,7 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> à terme pour les bétons à prise dure) et à préserver les ressources.

### **Recommandation destinée au monde politique: promotion des nanoproducts à bas risques par une priorisation de la recherche en matière de lutte contre le réchauffement climatique**

Les produits à bas risques (par exemple les matériaux isolants nanoporeux à base de nanocellulose et les substances actives destinées au traitement du cancer) présentant un potentiel important en termes de protection de l'environnement et une utilité considérable pour la société doivent être encouragés de façon systématique. Pour ce faire, il est recommandé de fixer des priorités appropriées en matière de recherche nationale afin de proposer des solutions concrètes en faveur des aspects sanitaires et de la lutte contre le réchauffement climatique (par exemple la détermination de priorités pour les innovations destinées à la production et au stockage intermédiaire d'électricité issue de sources d'énergie renouvelables). Une telle opération ne doit toutefois pas être mise en œuvre au détriment du développement nécessaire de la recherche en matière de risques.

## Tous les risques ne sont pas encore clairement définis

Les profils de substances interdisciplinaires créés révèlent l'existence de risques importants, principalement en matière d'impacts sur l'environnement. À titre d'exemple, l'oxyde de zinc doit faire l'objet d'une évaluation critique en raison de

ses effets toxiques sur les écosystèmes. Il en va de même pour le nano-argent qui, lui, présente un risque de formation de résistances aux bactéries.

À ce point s'ajoute le fait que les connaissances relatives aux impacts imminents des nanomatériaux sur l'environnement et sur la santé ont certes fait l'objet d'une amélioration ces dernières années, mais le savoir concernant les effets pris en considération dans des conditions environnementales réelles et sur le long terme (par exemple par un enrichissement éventuel de nanoparticules de dioxyde de titane à partir de protecteurs solaires dans la chaîne alimentaire) présente toujours des lacunes importantes. Par ailleurs, le risque d'une exposition incontrôlée de larges couches de la population aux matériaux abrasifs existe dans certains domaines d'application (par exemple l'usage prévu des nanotubes de carbone pour les pneus de voitures).

C'est la raison pour laquelle le fait que les risques écotoxicologiques entraînent également des répercussions sur la santé humaine (par exemple la formation de résistances pour le nano-argent, l'effet génotoxique de différentes nanoparticules et l'inhalation de nanotubes de carbone issus de l'abrasion des pneus de voiture) constitue un motif d'inquiétude à juste titre.

### **Recommandation destinée au monde politique: la consolidation des bases de connaissances scientifiques**

Dans le but d'améliorer la sécurité concernant les nanoparticules, il est nécessaire de consolider les bases scientifiques relatives aux impacts sur la santé et sur l'environnement. Il est particulièrement important d'examiner le comportement des nanoparticules dans les cellules et les tissus au moyen d'études systématiques à long terme, ainsi que leur comportement et leur maintien dans les installations d'incinération des ordures ménagères et de broyage et dans les stations d'épuration des eaux (y compris l'élimination des résidus de l'épuration des fumées et des boues d'épuration).

**Recommandation destinée au monde politique: la restriction des applications problématiques**

Le monde politique doit généralement surveiller que les évolutions relatives aux produits contenant des nanomatériaux ne soient pas toutes préconisées de façon identique. Ainsi, il peut se révéler nécessaire, tant d'un point de vue toxicologique qu'éthique, de limiter certains produits et domaines d'application (par exemple l'usage non spécifique de nanoparticules d'argent dans les biens de consommation). Cette recommandation est notamment valable si ces produits et domaines d'application présentent des éléments plausibles indiquant des risques inacceptables.

**Recommandation destinée au monde politique: les instruments d'accompagnement et la recherche du dialogue**

Plusieurs mécanismes appropriés doivent permettre d'encourager une application et une amélioration cohérentes des instruments volontaires existants (par exemple la grille de précaution, également étendue à l'étude des aspects relatifs aux opportunités). Pour terminer, il est inévitable de rechercher un débat public sur les opportunités et les risques concernant les champs d'application prioritaires des nanomatériaux.



## Riassunto

I nanomateriali aprono la strada alla creazione di prodotti e processi innovativi in numerosi settori industriali. Tuttavia, il loro utilizzo suscita una forte apprensione tra la popolazione, anche perché non esistono finora studi sufficienti sui potenziali effetti positivi e negativi per la salute e l'ambiente. Tale constatazione rappresenta il punto di partenza del presente studio interdisciplinare realizzato da TA-SWISS che si propone di analizzare l'intero ciclo di vita dei nanomateriali presi in esame, concentrando l'attenzione non solo sulla tossicologia umana e ambientale, ma anche su aspetti quali l'effetto serra, la tutela delle risorse e i vantaggi offerti dall'applicazione dei nanomateriali.

### Un mercato ambiguo

La Svizzera non vanta una produzione di nanomateriali primari su scala industriale e si distingue pertanto da altri paesi, quali gli Stati Uniti, in cui si registra invece una produzione annuale che raggiunge le 40 000 tonnellate. A prevalere, con un volume di almeno 2500 tonnellate, è invece la lavorazione dei nanomateriali per specifici campi d'applicazione, quali i rivestimenti, i beni di consumo o i farmaci. Tuttavia i nanomateriali hanno fatto il loro ingresso anche nella vita quotidiana degli svizzeri e sono oggi presenti soprattutto come protettori dai raggi UV in colori e vernici (ossido di zinco) e nelle creme solari (biossido di titanio), come antibatterico in tessuti e confezioni per alimenti (nano argento), come materiale riempitivo nei pneumatici per ridurre l'attrito, come antiagglomerante E551 negli alimenti (diossido di silicio), nelle racchette da tennis e nei telai delle biciclette (nanotubo di carbonio CNT).

Eppure, sulla base delle informazioni fornite, i consumatori spesso non sono in grado di riconoscere quali prodotti contengono dei nanomateriali. Ciò è dovuto al fatto che, da una parte, non tutti i prodotti abilmente pubblicizzati come «nano» effettivamente contengono nanomateriali. Dall'altra è però anche vero che quei prodotti realmente contenenti dei nanomateriali spesso non sono caratterizzati come tali o, se lo sono, la presenza di nanoparticelle non è segnalata in modo uniforme. Sebbene nel 2011 l'UE abbia pubblicato una proposta di definizione dei nanomateriali», nella pratica esistono ancora enormi differenze su cosa si intenda con il termine «nanomateriale».

**Raccomandazione ai politici: principio di precauzione e obbligo di etichettatura**

In considerazione della poca trasparenza riscontrata nel settore, TA-SWISS suggerisce l'adeguamento delle ordinanze in materia, tenendo conto in particolare del principio di precauzione. Tra le diverse misure è contemplata l'introduzione di un registro dei nanoprodotto, ai fini di fornire agli enti competenti una panoramica completa dei prodotti presenti sul mercato contenenti nanomateriali.

Inoltre, il legislatore può introdurre l'obbligo di etichettatura per quei gruppi di prodotti direttamente rivolti ai consumatori, come i prodotti tessili, offrendo così ai destinatari la libertà di scelta al momento dell'acquisto. Ciò include anche una definizione mirata del termine «nanomateriali», nonché un metodo di caratterizzazione uniforme degli stessi.

**Raccomandazione ai politici: ampliamento del quadro normativo tenendo conto della compatibilità europea**

È necessario verificare, ed eventualmente ampliare, l'efficacia dei regolamenti attuali e dei rispettivi strumenti internazionali nell'ambito dell'ordinamento commerciale. È inoltre importante garantire che le norme vigenti in tale settore siano fondamentalmente compatibili con quanto previsto a livello europeo. Tuttavia, al fine di applicare il principio di precauzione, alcuni aspetti specifici potrebbero richiedere di andare oltre il diritto europeo. Ciò riguarda, per esempio, l'abbassamento dei quantitativi soglia previsti dall'ordinanza sui prodotti chimici (OPChim) per garantire che i produttori di sostanze e preparati raccolgano informazioni sufficienti sulle sostanze contenenti nanomateriali.

**I lati positivi**

Una caratterizzazione uniforme e trasparente dei moderni nanomateriali è giustificata anche dal fatto che alcuni prodotti diffusi sul mercato contribuiscono notevolmente a proteggere l'ambiente. È il caso, per esempio, del cemento ad asciugatura rapida, delle confezioni per alimenti o dei materiali compositi per l'industria aeronautica. Nei suddetti settori i nanomateriali non solo offrono ai consumatori maggiori vantaggi di utilizzo, ma contribuiscono inoltre a ridurre notevolmente le emissioni di gas serra (con il cemento ad asciugatura rapida, per



esempio, si risparmiano in prospettiva fino a 2,7 milioni di tonnellate di CO<sub>2</sub> all'anno) e a tutelare le risorse ambientali.

### **Raccomandazione ai politici: promozione dei nanoprodotti a basso rischio mediante l'avanzamento della ricerca sulla protezione del clima**

I prodotti a basso rischio utili per l'ambiente e la società (per es. i rivestimenti nanoporosi, i materiali composti a base di nanocellulosa e alcune sostanze impiegate nella cura del cancro) dovrebbero essere supportati. A tal fine dovrebbero essere tracciate a livello nazionale delle linee di ricerca mirate a individuare soluzioni concrete per il settore della sanità e della protezione del clima (come per es. dare la precedenza a nuove soluzioni per la produzione e l'immagazzinamento dell'energia prodotta da fonti rinnovabili). Tuttavia, ciò non deve compromettere la crescita assolutamente necessaria della ricerca sui fattori di rischio.

### **Non tutti i rischi sono conosciuti**

I profili dei materiali creati con approccio interdisciplinare rivelano la presenza di rischi sostanziali soprattutto per l'ambiente. Da valutare criticamente sono, per esempio, l'ossido di zinco a causa degli effetti tossici sugli ecosistemi, e il nano argento per l'eventuale sviluppo di resistenza da parte dei batteri.

Inoltre non bisogna dimenticare che, sebbene oggi si sappia molto di più sugli effetti dei nanomateriali sull'ambiente e la salute dell'uomo, esistono tuttavia ancora profonde lacune sugli effetti di tali materiali in condizioni ambientali reali e sulle loro ripercussioni a lungo termine (cosa accade, per esempio, quando le nanoparticelle di biossido di titanio entrano nella catena alimentare attraverso le creme solari?). In alcuni settori di applicazione esiste inoltre il rischio di un'esposizione non controllata di gruppi di persone ai nanomateriali attraverso il rilascio di residui di abrasione (per es. nel caso del nanotubo di carbonio, il cui utilizzo è previsto nei pneumatici).

È pertanto urgente approfondire questi aspetti in quanto i rischi eco-tossicologici possono rappresentare un pericolo serio per la salute dell'uomo (si pensi alla resistenza dei batteri al nano argento, all'effetto genotossico di diverse nanoparticelle, all'inalazione di nanotubi di carbonio sottoforma di residui rilasciati dall'abrasione dei pneumatici).

**Raccomandazione ai politici: consolidamento delle conoscenze scientifiche**

Le iniziative volte a rendere più sicuro l'uso delle nanoparticelle devono includere il consolidamento delle conoscenze scientifiche sugli effetti di tali materiali per la salute umana e l'ambiente. È di particolare importanza analizzare il comportamento delle nanoparticelle in cellule e tessuti mediante studi sistematici a lungo termine, così come l'analisi del loro comportamento e destino negli impianti di termovalorizzazione, triturazione e depurazione delle acque reflue (incluso lo smaltimento dei residui derivanti dalla depurazione dei gas di scarico e dei fanghi da depurazione).

**Raccomandazione ai politici: limitazione delle applicazioni problematiche**

I politici devono tenere presente che non tutte le direzioni e i percorsi di sviluppo dei nanoprodotto meritano di essere promossi allo stesso modo. Da un punto di vista etico o tossicologico può rivelarsi pertanto necessario imporre delle limitazioni a determinati prodotti o applicazioni, come nel caso dell'impiego aspecifico delle nanoparticelle di argento nei beni di consumo. Tale condotta va seguita soprattutto quando è comprovata l'esistenza di fattori di rischio inaccettabili.

**Raccomandazione ai politici: strumenti supplementari e dialogo**

Riteniamo necessario che gli strumenti preesistenti realizzati su base volontaria vengano promossi attraverso meccanismi appropriati, al fine di incentivarne la diffusione e lo sviluppo. Si pensi per esempio alla griglia di precauzione per i nanomateriali di sintesi che potrebbe essere ampliata di una sezione contenente le possibilità offerte dai nanomateriali. Infine è indispensabile sollecitare il dibattito pubblico affinché vengano discussi apertamente i rischi e le opportunità che scaturiscono dall'applicazione dei nanomateriali nei settori prioritari.

# Zusammenfassung

Nanomaterialien eröffnen Möglichkeiten für neuartige Produkte und Verfahren in vielen Industriebereichen. Ihr Einsatz löst aber auch diffuse Ängste aus, zumal es bisher kaum umfassende Studien über die positiven und negativen Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt gibt. Dies ist der Ausgangspunkt der vorliegenden interdisziplinären TA-SWISS-Studie, welche den gesamten Lebenszyklus der untersuchten Nanomaterialien betrachtet und dabei neben Human- und Ökotoxikologie auch Aspekte wie Treibhauseffekt, Ressourcenschonung und Gebrauchsnutzen analysiert.

## Ein undurchsichtiger Markt

Im Vergleich zu anderen Ländern wie den USA, mit einer geschätzten Jahresproduktion von bis zu 40 000 Tonnen, werden in der Schweiz keine primären Nanomaterialien im grossvolumigen Industriemassstab hergestellt. Stattdessen überwiegt (mit einem Volumen von mindestens 2500 Tonnen) die Verarbeitung von Nanomaterialien für spezifische Anwendungsbereiche wie z. B. Beschichtungen, Konsumgüter oder Pharmaka. Dennoch haben auch in der Schweiz Nanomaterialien im Alltag Einzug gehalten, insbesondere als UV-Schutz in Farben und Lacken (Zinkoxid), in Sonnenschutzmitteln (Titandioxid), als antimikrobieller Zusatz in Textilien und Lebensmittelverpackungen (Nanosilber), in Autoreifen als Füllstoff zur Reduktion des Rollwiderstandes sowie als Rieselhilfe E551 in Lebensmitteln (Siliziumdioxid) oder in Tennisschlägern und Velorahmen (Carbon Nanotubes (CNT)).

Für die Konsument/innen ist jedoch meist nicht ersichtlich, welche Produkte Nanomaterialien enthalten. Einerseits ist nicht überall, wo als verkaufswirksames Schlagwort «nano» draufsteht, auch «nano» drin, andererseits werden Produkte, die tatsächlich Nanomaterialien enthalten, oft nicht oder sehr uneinheitlich gekennzeichnet. Obwohl im Oktober 2011 von der EU ein Vorschlag für eine Definition veröffentlicht wurde, bestehen in der Praxis nach wie vor erhebliche Unterschiede im Verständnis von «nano».

**Empfehlung an die Politik: Vorsorgeprinzip und Kennzeichnungspflicht**

Angesichts dieser Intransparenz empfiehlt TA-SWISS Anpassungen im Ordnungsrecht unter besonderer Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips: So wird u. a. die Einführung eines Nanoproduktregisters empfohlen, um den Behörden einen umfassenden Überblick über die auf dem Markt befindlichen Nanoprodukte zu ermöglichen.

In Ergänzung dazu kann der Gesetzgeber spezifische Kennzeichnungspflichten in besonders «konsumentennahen» Produktgruppen wie Textilien vorsehen, um die Wahlfreiheit der Konsumentinnen und Konsumenten bei deren Kauf zu ermöglichen; dazu gehört auch eine zweckmässige Definition von Nanomaterialien und standardisierter Methoden zu deren Charakterisierung.

**Empfehlung an die Politik: Weiterentwicklung des Rechtsrahmens unter Berücksichtigung der EU-Kompatibilität**

Die Wirksamkeit heutiger Regelungssätze und entsprechende internationale Instrumente der Handelsordnung sind zu überprüfen und allenfalls weiterzuentwickeln. Wichtig ist es zudem, die Kompatibilität mit auf EU-Ebene gültigen Normen in diesem Bereich grundsätzlich zu gewährleisten. Dennoch kann es erforderlich sein, aus Vorsorgegesichtspunkten punktuell über das EU-Recht hinauszugehen. Dazu gehört beispielsweise eine Absenkung der Mengenschwellen der Chemikalienverordnung (ChemV), um sicherzustellen, dass die Hersteller für Stoffe und Zubereitungen ausreichend relevante Stoffinformationen für Nanomaterialien erheben.

**Die guten Seiten**

Eine einheitliche und transparente Kennzeichnung moderner Nanomaterialien ist umso sinnvoller, als dass ihr Einsatz bei einigen auf dem Markt erhältlichen Produkten ganz wesentlich zur Umweltentlastung beiträgt. Beispiele sind schnellhärtende Betone, Lebensmittelverpackungen oder Verbundwerkstoffe für den Flugzeugbau. In diesen Anwendungen bieten Nanomaterialien Konsument/innen nicht nur einen höheren Gebrauchsnutzen, sondern tragen auch erheblich dazu bei, den Ausstoss von schädlichen Treibhausgasen zu verringern (z. B. bei schnellhärtenden Betonen perspektivisch bis zu rund 2,7 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr) und Ressourcen zu schonen.

**Empfehlung an die Politik: Förderung risikoarmer Nanoprodukte durch Forschungsschwerpunkte zum Klimaschutz**

Risikoarme Produkte (z. B. nanoporöse Dämmstoffe, Verbundwerkstoffe auf Basis von Nanozellulose sowie Wirkstoffe zur Krebsmedikation) mit hohem Umweltentlastungspotenzial bzw. Nutzen für die Gesellschaft sollten systematisch gefördert werden. Dazu sollten in der staatlichen Forschung entsprechende Schwerpunkte gesetzt werden hinsichtlich konkreter Lösungsbeiträge für Gesundheitsaspekte und für den Klimaschutz (z. B. Priorisierung von Neuentwicklungen zur Erzeugung und Zwischenspeicherung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen). Dies darf jedoch nicht zulasten der erforderlichen Ausweitung der Risikoforschung gehen.

**Noch sind nicht alle Risiken klar**

Die erstellten interdisziplinären Stoffprofile zeigen, dass vor allem bei den Umweltauswirkungen relevante Risiken bestehen. Kritisch zu bewerten sind z. B. Zinkoxid aufgrund toxischer Effekte in Ökosystemen sowie Nanosilber wegen der Gefahr möglicher Resistenzenbildung bei Bakterien.

Dazu kommt, dass sich der Wissensstand zu den akuten Auswirkungen von Nanomaterialien auf Umwelt und Gesundheit in den letzten Jahren zwar insgesamt verbessert hat, jedoch weiterhin kritische Wissenslücken bezüglich der Wirkungen unter realen Umweltbedingungen sowie in Hinblick auf Langzeitwirkungen existieren (z. B. durch eine mögliche Anreicherung von Titandioxid-Nanopartikeln aus Sonnenschutzmitteln in der Nahrungskette). Zudem besteht bei einzelnen Einsatzbereichen (z. B. geplanter Einsatz von CNT in Autoreifen) das Risiko einer unkontrollierten Exposition breiter Bevölkerungsschichten durch Abriebmaterial.

Es besteht deshalb durchaus Grund zur Besorgnis, dass die ökotoxikologischen Risiken auch Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit mit sich bringen (z. B. Resistenzenbildung bei Nanosilber, gentoxische Wirkung verschiedener Nanopartikel, Einatmung von CNT aus Autoreifenabrieb).

**Empfehlung an die Politik: Konsolidierung der wissenschaftlichen Wissensgrundlagen**

Im Bemühen um einen sicheren Umgang mit Nanopartikeln müssen die wissenschaftlichen Grundlagen bezüglich der Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt konsolidiert werden. Besonders wichtig ist es, das Verhalten von Nanopartikeln in Zellen und Geweben mittels systematischer Langzeitstudien sowie Verhalten und Verbleib in Kehrlichtverbrennungs-, Schredder- und Abwasserreinigungsanlagen (einschliesslich der Entsorgung von Rauchgasreinigungsrückständen bzw. Klärschlämmen) zu untersuchen.

**Empfehlung an die Politik: Einschränkung problematischer Anwendungen**

Die Politik sollte grundsätzlich im Auge behalten, dass nicht alle Entwicklungsrichtungen und -pfade nanomaterialhaltiger Produkte gleichermassen zu befürworten sind. So kann es aus toxikologischen bzw. ethischen Gesichtspunkten geboten sein, bestimmte Produkte bzw. Anwendungsbereiche einzuschränken (z. B. für Silber-Nanopartikel der unspezifische Einsatz in Konsumgütern); dies gilt insbesondere dann, wenn plausible Anhaltspunkte für unzumutbare Risiken vorliegen.

**Empfehlung an die Politik: Flankierende Instrumente und Dialoge**

Durch angemessene Mechanismen soll eine konsequente Anwendung und Weiterentwicklung bestehender freiwilliger Instrumente (z. B. Vorsorgeraster, dort auch Erweiterung um die Betrachtung von Chancenaspekten) gefördert werden. Unumgänglich ist es schliesslich, die öffentliche Debatte zu den Chancen und Risiken prioritärer Anwendungsfelder von Nanomaterialien zu suchen.

## Danksagung

Das Autorenteam bedankt sich bei den Mitgliedern der Projekt-Begleitgruppe, die durch ihre kritische und konstruktive Begutachtung der Arbeiten und hilfreichen Kommentare wesentlich zum Gelingen der vorliegenden Studie beigetragen haben: Peter Gehr (Präsident der Begleitgruppe), Ueli Aebi, Livia Bergamin, Thomas Cottier, Ernst Furrer, Philipp Hübner, Georg Karlaganis, Huma Khamis, Katja Knauer, Karl Knop, Franziska Meister, Bernd Nowack, Michael Riediker, Kristin Schirmer, Kaspar Schmid, Claudia Som, Christoph Studer und Ariane Willemsen.

Ebenso danken wir Sergio Bellucci und Emiliano Feresin vom Schweizerischen Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzung (TA-SWISS) für die kooperative Projektleitung und dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) für die Unterstützung des Projektes.

Weiterhin geht der Dank an die zahlreichen Expertinnen und Experten, die im Rahmen der Recherchen kontaktiert wurden und ebenfalls wertvolle Hinweise und Ergänzungen zu der vorliegenden Arbeit beigesteuert haben.

Ein besonderer Dank geht an Christine D'Anna-Huber für kommunikative Unterstützung sowie die Schlussredaktion des Manuskripts.





# 1 Hintergrund und Einführung

Nanostrukturierte Materialien und Nanopartikel sind in vielen industriellen Anwendungsfeldern der Schlüssel für hochleistungsfähige Werkstoffe und innovative Produktentwicklungen. Nanomaterialien besitzen im Vergleich zu gröber strukturierten Materialien z. T. drastisch veränderte Eigenschaften, die sowohl physikalische und chemische Stoffcharakteristika als auch die Interaktionen mit biologischen Systemen betreffen. Als Beispiel seien die je nach Partikelgrösse abstimmbaren Fluoreszenzeigenschaften von Halbleiterquantenpunkten (z. B. Cadmiumtellurid) oder die ungewöhnlich hohe mechanische Festigkeit von Kohlenstoffnanoröhren bei leichterem Gewicht genannt. In der Chemie bewirkt die grosse spezifische Oberfläche nanopartikulärer Materialien eine erhöhte Reaktivität, etwa bei katalytischen Stoffumsetzungen. In der Medizintechnik werden Nanopartikel beispielsweise für sogenannte Drug-Carrier genutzt, die Wirkstoffe gezielt an den Krankheitsherd transportieren und dadurch wesentlich schonendere Therapieformen mit weniger Nebenwirkungen z. B. für die Behandlung von Krebs ermöglichen können. Die Autoindustrie verwendet Nanopartikel für kratzfeste Lacke, Reifen mit verbesserten Eigenschaften und geringerem Rollwiderstand oder stabilere Leichtbauwerkstoffe. In der Kosmetikbranche werden nanostrukturierte Metalloxide für transparente Sonnenschutzcremes oder spezielle Farbeffekte eingesetzt.

Neben den genannten Applikationen existieren weitere Anwendungsbereiche bzw. Entwicklungsrichtungen der Nanotechnologien, bei denen erhebliche Lösungsbeiträge für die in den industrialisierten Ländern gesetzten Klimaschutzziele erwartet werden können. Dazu gehören in erster Linie Anwendungen in den Bereichen regenerative Energiebereitstellung, Wärmedämmung, Stromspeicher, neue Werk- und Baustoffe und industrielle Produktionsprozesse. Bei all diesen Technologiebereichen bestehen bereits vielversprechende nanotechnologische Produkte bzw. Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen. Im Bereich der Wärmedämmung sind mit den Aerogelen bereits hocheffiziente nanoporöse Dämmmaterialien erhältlich, die nachträglich eingebaut werden und damit insbesondere die Altbausanierung erleichtern können. Darüber hinaus wird auf Lithium-Ionen-Akkus hingewiesen, die als nanotechnologische Energiespeicher für regenerativ erzeugten Strom diskutiert werden.

Wie aufgezeigt wurde, ist das Anwendungsspektrum von Nanomaterialien bereits sehr vielseitig, doch wie bei jeder neuen Technologie sind auch deren mögliche Risiken und unerwünschte Nebenwirkungen in Betracht zu ziehen und gegenüber den Nutzenpotenzialen abzuwägen. Aufgrund ihrer Kleinheit können Nanopartikel biologische Barrieren wie Zellwände, ja ganze Zellen und Gewebe durchdringen, die für grössere Objekte nicht passierbar sind. Es gibt Anhaltspunkte dafür, dass diese besonderen Eigenschaften von Nanomaterialien, die auf der einen Seite die Basis für eine Vielzahl technologischer Innovationen und damit auch für Umweltentlastungspotenziale sind, auf der anderen Seite auch Gefährdungspotenziale für Mensch und Umwelt beinhalten können, falls sie unkontrolliert in den menschlichen Körper oder in die Umwelt gelangen. So ist beispielsweise aus toxikologischen Untersuchungen bekannt, dass bestimmte eingeatmete Partikel in der Lunge Entzündungsreaktionen auslösen können. Zudem können Nanopartikel aufgrund ihrer geringen Abmessungen durch das Lungengewebe auch in den Blutkreislauf gelangen, sich in anderen Organen anreichern, biologische Funktionen beeinflussen und möglicherweise Krankheiten (z. B. Herz-Kreislauf-Erkrankungen) auslösen.

Es ist unbestritten, dass in den vergangenen Jahren in zahlreichen Forschungsprojekten sowohl in der Schweiz als auch im internationalen Umfeld wichtige Fragen zur Toxikologie von Nanomaterialien erörtert wurden und damit ein wesentlicher Beitrag zur Versachlichung der Debatte um den verantwortungsvollen Einsatz von Nanomaterialien geleistet wurde. Trotz dieser zum Teil erheblichen Anstrengungen bestehen weiterhin wichtige Wissenslücken. Dazu gehören insbesondere Fragen zu den Langzeitwirkungen von Nanomaterialien auf Mensch und Umwelt, die nach wie vor weitgehend unbeantwortet sind. Aber auch jenseits der Debatte um die Risiken sind die möglichen Vorteile von nanotechnologischen Anwendungen für Mensch und Umwelt noch nicht hinreichend konkretisiert bzw. quantifiziert worden.

Das Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzung TA-SWISS befasst sich schon seit längerer Zeit mit der Beurteilung von Chancen und Risiken der Nanotechnologie. Im Jahr 2003 publizierte TA-SWISS die interdisziplinäre Studie «Nanotechnologie in der Medizin», und 2006 führte das Zentrum publifocus Diskussionsrunden durch zum Thema «Nanotechnologie und ihre Bedeutung für Gesundheit und Umwelt». Aus diesen moderierten Diskussionen ging hervor, wie Laien mit dem für sie wenig bekannten Phänomen umgehen: Sie verglichen mögliche negative Effekte der Nanotechnologie mit den Auswirkungen von Asbest oder Feinstaub und illustrierten die Chancen mit Beispielen aus der

Informations- und Computertechnologie. Im Jahr 2009 veröffentlichte TA-SWISS die interdisziplinäre Studie «Nanotechnologie im Bereich der Lebensmittel». Die Resultate dieser Studie haben damals zu einer interessanten Diskussion über Nanomaterialien und deren positive Effekte auf die Umwelt geführt. Dies als Folge des Ergebnisses der Studie, dass mit Nanomaterialien ausgestattete Getränkeflaschen aus Kunststoff eine vergleichsweise gute Ökobilanz aufweisen, weil es die Nano-Dämmschicht ermöglicht, leichtere Flaschen zu verwenden. Allerdings gab es offene Fragen in Bezug auf die Entsorgung entsprechender Verpackungsmaterialien. Diese Erkenntnisse aus früheren Projekten und die Tatsache, dass es noch keine umfassende Studie über die Auswirkungen von Nanomaterialien auf die Umwelt und die Gesundheit gibt, haben TA-SWISS dazu bewogen, im Rahmen einer Technologiefolgenabschätzung die Chancen und Risiken auf diesem sich rasch entwickelnden und herausfordernden Gebiet in der vorliegenden Studie vertieft und interdisziplinär zu analysieren.



## 2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Vor diesem Hintergrund besteht das Ziel der vorliegenden Studie darin, die möglichen Auswirkungen derzeit relevanter Nanomaterialien auf Umwelt und Gesundheit mit einem interdisziplinären Ansatz abzuschätzen und Chancen und Risiken aufzuzeigen, die von diesen Nanomaterialien ausgehen. In der ersten Phase der Studie sollen in einer breit angelegten Marktanalyse wichtige heutige und zukünftige Produkte sowie Anwendungen, die Nanomaterialien enthalten, erfasst und ein umfassender Überblick über die aktuelle Forschung in den Bereichen Umwelt, Gesundheit und Sicherheit von Nanomaterialien gegeben werden. Auf Basis dieser Grundlagen werden in einer zweiten Phase des Projektes Nanomaterialien identifiziert, die für Umwelt und Gesundheit relevant sind und die laut Marktprognosen weite Verbreitung finden. Für diese Nanomaterialien wird eine integrierte Gesamtbeurteilung der Chancen und Risiken vorgenommen. Die interdisziplinäre Bewertung analysiert auch die ethische Debatte über die Akzeptanz der Risiken, berücksichtigt die Anliegen der verschiedenen Akteure und beleuchtet den aktuellen gesetzlichen Rahmen sowohl in der Schweiz als auch auf europäischer Ebene. Aus der Gesamtbeurteilung werden zum Abschluss der Studie spezifische Empfehlungen für weitergehende regulierungsbezogene Entwicklungen abgeleitet, die speziell auf die Schweiz zugeschnitten sind und sich an ihre gesetzlichen Instanzen und politischen Entscheidungsträger richten sowie an die Nanoproduktentwickler und -hersteller. Im Einzelnen sollen innerhalb der Studie folgende Fragestellungen behandelt werden:

Welche Nanomaterialien existieren derzeit auf dem Markt und haben das Potenzial einer weiten (Markt-)Verbreitung in der Zukunft, z. B. durch hohe Marktanteile entsprechender Produkte?

Welche Produkte/Anwendungen, die Nanomaterialien enthalten, können positive Effekte in der Umwelt bewirken? Welche dieser Produkte/Anwendungen haben das grösste Erfolgspotenzial? Lassen sich die Umweltauswirkungen und der Energiebedarf entlang des Lebenswegs der Produkte bestimmen (oder in anderen Worten gefragt, sind diese Produkte nachhaltig)?

Welche Nanomaterialien können via Wasser, Boden und Luft mit Umwelt und Menschen in Berührung kommen? Welche Nanomaterialien sind relevant für

Umwelt und Gesundheit? Lässt sich ihre Exposition, Ökotoxizität und Toxizität mit Sicherheit abschätzen?

Was weiss man über potenzielle Transformationsprozesse synthetischer Nanomaterialien? Was sind die möglichen toxischen Langzeiteffekte von Nanomaterialien auf Flora, Fauna, Landwirtschaft und menschlicher Gesundheit? Welche Arten von Studien/Ansätzen sind notwendig zur Analyse der Langzeiteffekte von Nanomaterialien? Ist es möglich, die Untersuchungszeiträume zu komprimieren/verkürzen, um korrekte Ergebnisse über zukünftige Effekte zu erhalten und die richtigen Gegenstrategien zu erstellen?

Lässt sich aus aktuellen Forschungsergebnissen schliessen, dass die Charakterisierung und Detektierung von Nanomaterialien in realen Freilandstudien immer einfacher wird?

Was passiert mit inkorporierten Nanopartikeln bei den derzeit gängigen Entsorgungsverfahren? Welche möglichen Konsequenzen hat das unspezifische Recycling von Produkten, die Nanomaterialien enthalten?

Welche Stakeholder/Akteure gibt es und welche Rolle spielen sie im Diskurs über Nanomaterialien und Umwelt? Besteht die potenzielle Gefahr einer öffentlichen Ablehnung dieses Technologiefeldes?

Welches sind die wichtigsten ethischen Aspekte im Zusammenhang mit Nanomaterialien und Umwelt? Sind einige dieser Aspekte spezifisch für Nanomaterialien und daher neu in ethischen Debatten? Gibt es Verbindungen zu zurückliegenden oder laufenden ethischen Debatten im Rahmen von anderen technologischen Feldern?

Wie ist der aktuelle Stand in der ethischen Debatte zu den Risiken von Nanopartikeln? Ist das Vorsorgeprinzip nach wie vor der richtige Ansatz oder werden weitere/andere Instrumentarien benötigt? Welche Implikationen sollten daraus in Hinblick auf das Risikomanagement folgen (z. B. Moratorium, weiche/harte Anwendung des Vorsorgeprinzips, ...)? Kann die Gesellschaft ein so komplexes und kompliziertes Thema überhaupt mit so einfachen Massnahmen wie Zustimmung/Moratorium bewältigen?

Sollte die Implementierung von Nanomaterialien ins EU-Chemikaliengesetz REACH (Registrierung, Bewertung und Zulassung chemischer Stoffe) und in andere bereits existierende Verordnungen fortgesetzt werden oder sollte ein völlig neuer gesetzlicher Rahmen geschaffen werden? Wie soll mit Nanomaterialien umgegangen werden, die bereits auf dem Markt sind?

Mit der Analyse dieser Forschungsfragen möchte die vorliegende Studie das gegenwärtig verfügbare Wissen in Hinblick auf die Chancen und Risiken des

Einsatzes von Nanomaterialien zusammenstellen. Im Vordergrund steht dabei die Identifizierung von Nanomaterialien, die für Umwelt und Gesundheit besonders relevant sind. Aufbauend auf dieser Wissensbasis werden konkrete Empfehlungen abgeleitet, die sich v. a. auf weitergehende regulatorische Entwicklungen beziehen, die aber auch in Bezug auf das ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Potenzial der Nanotechnologie abzuwägen sind.

Zielgruppe für die Empfehlungen der Studie sind gesetzliche Instanzen und Entscheidungsträger in der Schweiz, insbesondere aus der Politik. Darüber hinaus werden auch Empfehlungen für Entwickler und Hersteller von Nanoprodukten gegeben.





### 3 Überblick zum Aufbau der Studie

Um die einzelnen Forschungsfragen im Rahmen der skizzierten Zielsetzung auf wissenschaftlich fundierter Basis zu analysieren und so weit wie möglich zu beantworten, besteht die vorliegende Studie im Wesentlichen aus drei grossen Modulen, die sich jeweils aus verschiedenen Analyseperspektiven zusammensetzen. Die Module sind so angelegt, dass nach breit abgestützten Recherchen zur Markt- und Forschungslandschaft eine Fokussierung vorgenommen wurde, wobei in einem interdisziplinären Ansatz die zuvor identifizierten Produkte und Anwendungen unter verschiedenen Blickwinkeln betrachtet und diejenigen «herausgefiltert» werden, die für Umwelt und Gesundheit besonders relevant sind. Diese interdisziplinäre Bewertung mündet schlussendlich in spezifische Empfehlungen als Aktionsgrundlage für einen nachhaltigen Umgang mit diesen Produkten und Anwendungen.

#### *Modul I: Erstellung der Grundlagen (Informationspool)*

- Marktübersicht der relevanten Nanomaterialien sowie nanotechnologischer Produkte und Anwendungen (vgl. Kapitel 5),
- Überblick über die aktuelle Risikoforschung in Hinblick auf Nanomaterialien (vgl. Kapitel 6).

#### *Modul II: Interdisziplinäre Bewertung (Fokussierung)*

- Identifizierung von Produkten und Anwendungen mit besonders grossen Chancen für eine nachhaltige Entwicklung (vgl. Kapitel 7),
- Analyse der Exposition und des toxikologischen Gefährdungspotenzials von besonders marktrelevanten Nanomaterialien; neben akuten Wirkungen wird auch der aktuelle Kenntnisstand in Hinblick auf Transformationsprozesse und Langzeitwirkungen in der Umwelt analysiert (vgl. Kapitel 8),
- Betrachtung des Verhaltens und Verbleibs der verwendeten Nanomaterialien bei den Behandlungsprozessen am Ende ihres Lebensweges (vgl. Kapitel 9),

- Evaluierung der öffentlichen Debatte um die Risiken des Einsatzes von Nanomaterialien sowie Identifizierung der wichtigsten Stakeholder und ihrer jeweiligen Rolle und Anliegen (vgl. Kapitel 10),
- Analyse der ethischen Fragestellungen, die für die Definition und Akzeptanz der Risiken sowie deren Management relevant sind; dabei auch Diskussion der möglichen Instrumentenwahl auf Grundlage des Vorsorgeprinzips (vgl. Kapitel 11),
- Darstellung des aktuellen Rechtsrahmens für Nanomaterialien in der Schweiz und auf europäischer Ebene nach geltendem Recht (*de lege lata*) und Rechtsänderungen zur Anpassung an nanospezifische Probleme (*de lege ferenda*) (vgl. Kapitel 12).

### *Modul III: Gesamtbeurteilung und Empfehlungen (Aktionsgrundlage)*

- Interdisziplinäre Gesamtbeurteilung der Chancen und Risiken, welche Nanomaterialien für Umwelt und Gesundheit bergen (vgl. Kapitel 13),
- Formulierung von Empfehlungen für speziell auf die Schweiz zugeschnittene Weiterentwicklungen des regulatorischen Rahmens sowie des verantwortungsvollen Umgangs mit Nanomaterialien in Unternehmen (vgl. Kapitel 14).

**Leserinnen und Lesern mit wenig Zeit wird empfohlen, die Lektüre zunächst bei Kapitel 13 zu beginnen und nur bei Bedarf auf die z. T. umfangreichen Hintergrundkapitel der Module I und II zurückzugreifen.**

## 4 Definition des Untersuchungsgegenstandes

Für die Erstellung des Informationspools war es zunächst erforderlich, die Begrifflichkeiten und die Definition des Untersuchungsgegenstandes näher zu betrachten.

Bei Nanomaterialien handelt es sich grundsätzlich um chemische Stoffe bzw. Stoffgemische mit definierten Struktureinheiten im nanoskaligen Bereich, d. h. in einer Größenordnung von ungefähr 1 bis 100 nm. Nanomaterialien lassen sich prinzipiell aus allen festphasigen Stoffen herstellen. In der wissenschaftlichen Fachszene ist allerdings noch nicht abschliessend geklärt, was genau unter dem Begriff Nanomaterialien definitorisch zu fassen ist. Im Kontext der Sicherheitsdebatte und der Forderungen vonseiten der Politik und Verbraucherschutzverbänden nach adäquaten Massnahmen des Risikomanagements im Umgang mit Nanomaterialien besteht ein grosser Bedarf zur Etablierung eindeutiger und regulatorisch handbarer Definitionen. Die internationale Standardisierungsorganisation ISO befasst sich seit dem Jahr 2005 im Rahmen des technischen Ausschusses TC 229 mit Definitions- und Standardisierungsfragen der Nanotechnologie. In diesem Zusammenhang sind verschiedene Definitionsansätze und Standards veröffentlicht worden. So ist der Grössenbereich von Nanomaterialien auf ca. 1 bis 100 nm festgelegt worden.<sup>1</sup> Die Grössengrenzen sind dabei allerdings weder nach unten noch nach oben restriktiv zu sehen, sodass auch Substanzen von weniger als einem nm wie z. B. Fullerene ebenso zu den Nanomaterialien gezählt werden können, wie Materialien oberhalb 100 nm, die aber spezifische Eigenschaftsänderungen aufgrund der reduzierten Strukturgrösse aufweisen. Für die Einordnung von Nanomaterialien ist eine grundsätzliche Kategorisierung in einzelne Nanoobjekte (Nanopartikel, Nanoplättchen, Nanofasern und -röhren) und nanostrukturierte Materialien vorzunehmen. Nach ISO-Standard ISO/TS 80004-4:2011 definiert sich ein nanostrukturiertes Material als ein Material, das nanoskalige Regionen (bzw. Nanoobjekte) enthält und Eigenschaften aufweist, die auf die Nanoskaligkeit zurückzuführen sind. Zu den nano-

---

<sup>1</sup> ISO/TR 11360:2010 Nanotechnologies – Methodology for the classification and categorization of nanomaterials, Internationale Standardisierungsorganisation ISO ().

strukturierten Materialien zählen beispielsweise aus Nanoobjekten zusammengesetzte Nanokomposite oder nanostrukturierte Pulver.

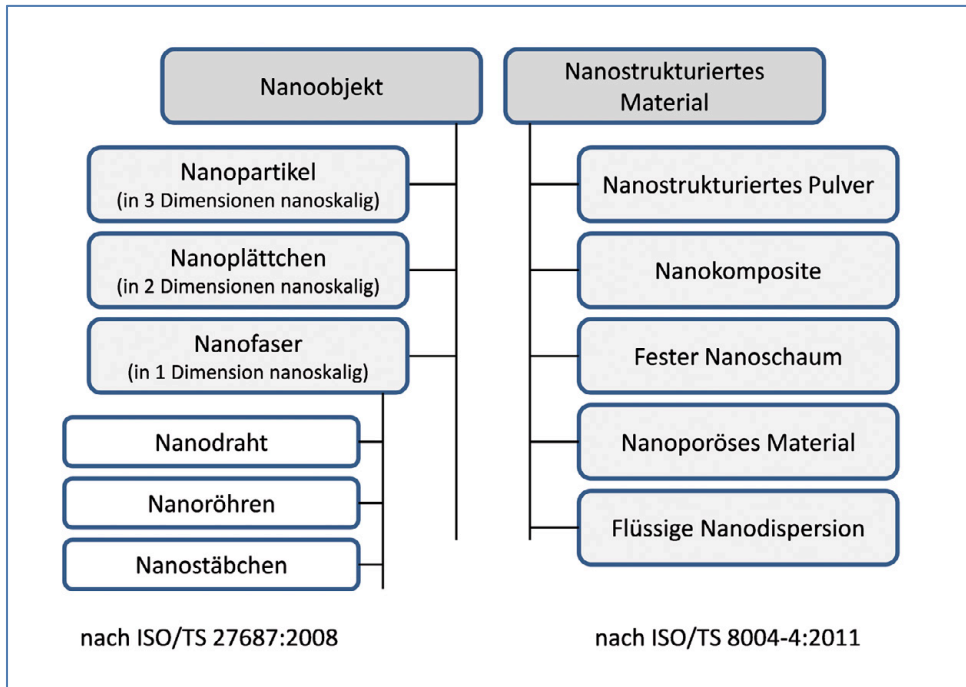


Abbildung 1 Übersicht zur begrifflichen Zuordnung verschiedener Typen von Nanomaterialien nach ISO

Während einzelne Nanoobjekte zwar relativ eindeutig definiert werden können, aber in der industriellen Praxis kaum eine Rolle spielen, ist die Einordnung nanostrukturierter Materialien wesentlich schwieriger. Bei kommerziell verfügbaren Nanomaterialien machen einzelne Nanoobjekte in der Regel nur einen relativ kleinen Anteil bezogen auf die Gesamtzahl an Teilchen bzw. bezogen auf die Masse aus. In der Fachszene ist derzeit noch umstritten, ab welchem Anteil an Nanoobjekten ein Stoff als Nanomaterial zu bezeichnen ist. Die Vorschläge der chemischen Industrie unterscheiden sich z. T. erheblich von den Auffassungen der Verbraucherschutzverbände oder der wissenschaftlichen Fachszene. So hat der Verband der europäischen chemischen Industrie CEFIC eine Grenze von zehn Gewichtsprozent Anteil an Nanoobjekten zur Einordnung als Nanomaterial

vorgeschlagen, während der wissenschaftliche Ausschuss «Neu auftretende und neu identifizierte Gesundheitsrisiken» (SCENIHR) der Europäischen Kommission als Mengenschwelle einen Anteil von  $> 0,15$  Prozent an Nanoobjekten bezogen auf die Anzahlgrößenverteilung des Materials postuliert hat (SCENIHR 2010). Unter Berücksichtigung der verschiedenen Standpunkte hat die EU-Kommission im Oktober 2011 eine Empfehlung für eine Definition von Nanomaterialien veröffentlicht, gemäss der ein Nanomaterial beschrieben wird als «ein natürliches, bei Prozessen anfallendes oder hergestelltes Material, das Partikel in ungebundenem Zustand, als Aggregat oder als Agglomerat enthält, und bei dem mindestens 50 Prozent der Partikel in der Anzahlgrößenverteilung ein oder mehrere Ausmassen im Bereich von 1 nm bis 100 nm haben».<sup>2</sup>

Dieser Definitionsansatz kann als ein Kompromiss zwischen den Positionen der chemischen Industrie und der wissenschaftlichen Fachszene aufgefasst werden. Dennoch gibt es Kritikpunkte an der gewählten Definition, wie z. B., dass die Festlegung der Grenze willkürlich und nicht auf Basis wissenschaftlicher Fakten getroffen worden ist und keinerlei Rückschlüsse auf mögliche Risikoeffekte durch das Material zulässt. In speziellen Fällen sieht der EU-Vorschlag vor, den Grenzwert der Anzahlgrößenverteilung auf einen Wert zwischen 1 und 50 Prozent herabzusetzen, sofern Belange des Umwelt- und Gesundheitsschutzes dies erforderlich machen.

Neben der eigentlichen Definitionsproblematik ist dabei auch der Mangel an messtechnischen Verfahren zu berücksichtigen, mit denen sich Nanoobjekte mit hinreichender Präzision und Genauigkeit in Stoffgemischen und Materialkompositen erfassen lassen. Als messtechnisch leichter handhabbares Kriterium wurde daher auch die volumenspezifische Oberfläche mit einem Schwellenwert von mehr als  $60 \text{ m}^2/\text{cm}^3$  zur Bestimmung von nanostrukturierten Materialien vorgeschlagen. Es ist festzuhalten, dass die volumenspezifische Oberfläche zudem einen wesentlichen Parameter hinsichtlich der nanospezifischen Eigenschaften eines Nanomaterials darstellt.

Seitens der Industrie besteht ein Kritikpunkt an der EU-Empfehlung darin, dass unter die Definition möglicherweise eine Vielzahl lange zugelassener Materialien fallen, für die ein zusätzlicher Nutzen der Klassifikation als Nanomaterial in

---

<sup>2</sup> EU-Kommission: Commission Recommendation of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial, Euro-Lex L 275 Volume 54, 20. Oktober 2011.

Bezug auf Sicherheitsaspekte nicht ersichtlich ist. Weiterhin ist noch offen, nach welchen Messverfahren die Einordnung künftig geprüft werden soll. Je nach Verfahren sind hierbei sehr unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten, sodass eine exakte Festlegung von Messverfahren und -bedingungen von essenzieller Bedeutung ist. Erschwerend für eine eindeutige Abgrenzbarkeit ist auch die Tatsache, dass der Anteil von Nanoobjekten eines Materials sich z. B. durch Agglomeration und Deagglomeration im Zeitverlauf ändern kann. Verbindlichen Rechtscharakter wird die Empfehlung der EU-Kommission erst erhalten, wenn dieser oder ein angepasster Wortlaut in den entsprechenden Neufassungen relevanter Richtlinien übernommen wird. Für die Bereiche der Biozide ist dies bereits erfolgt,<sup>3</sup> in anderen Regelungsbereichen aber noch offen. Auch der Bericht des Bundesrates vom 25. April 2012 zum Aktionsplan «Synthetische Nanomaterialien» und den Stand von Umsetzung, Wirkung und Regulierungsbedarf verweist auf die EU-Definitionsempfehlung. Bis zum Jahr 2014 soll diese anhand des aktuellen technischen und wissenschaftlichen Fortschritts überprüft werden.

Es wird in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass die in der vorliegenden Studie verwendeten Quellen sich noch nicht auf die neue EU-Definitionsempfehlung beziehen. Dies betrifft speziell den Bezug zur Anzahlgrößenverteilung der Nanopartikel, der in den ausgewerteten Studien in der Regel nicht berücksichtigt ist. Hinsichtlich des Grössenbereiches von ca. 1 bis 100 nm kann hingegen von einer weitgehend einheitlichen Sichtweise innerhalb der ausgewerteten Studien ausgegangen werden.

---

<sup>3</sup> Die Biozidverordnung wird die bislang geltende Biozid-Richtlinie ablösen. Verordnung (EU) Nr. 528/2012 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Mai 2012 über die Bereitstellung auf dem Markt und die Verwendung von Biozidprodukten, Abl. der EU L 167 vom 27.6.2012, S. 1.

## 5 Marktübersicht

Ziel der vorliegenden Marktübersicht ist es, eine Informationsbasis zu schaffen, um einen Überblick zu erhalten über

- grundsätzliche Funktionalitäten und Anwendungsmöglichkeiten von Nanomaterialien in Industrie- und Konsumgütern,
- Nanoprodukte im Konsumgüterbereich in der Schweiz und international,
- Nanoprodukte mit umwelt- und ressourcenschonendem Potenzial,
- Herstellung und Verbreitung von Nanomaterialien in der Schweiz und international,
- Unternehmen in der Schweiz, die mit der Herstellung und Verarbeitung von Nanomaterialien befasst sind,
- Abschätzungen zu weltweiten Produktions- und Marktvolumina kommerziell verfügbarer Nanomaterialien.

Die zugrunde liegende Analyse setzt sowohl auf der Wertschöpfungsstufe der Endanwendungen (vgl. Kapitel 5.1) als auch auf der Stufe der Nanomaterialien als Ausgangsprodukte (vgl. Kapitel 5.2) an. Im ersten Schritt werden dabei eine Übersicht zu grundsätzlichen Funktionalitäten von Nanomaterialien und daraus resultierenden Anwendungsmöglichkeiten und Produktoptionen gegeben. Ein besonderes Augenmerk liegt auf Konsumentenprodukten, da Fragen der Sicherheit von Nanoprodukten in diesen Anwendungsbereichen aufgrund des unmittelbaren Kontaktes mit Verbraucherinnen und Verbrauchern von hoher Priorität sind. Die Analyse von Nanoprodukten im Konsumentenbereich fokussiert zunächst auf den Schweizer Markt. Als Grundlage dienten einschlägige Produktregister und -datenbanken sowie eigene Recherchen u. a. von Produktbeschreibungen, Zulassungen beim Eidgenössischen Institut für Geistiges Eigentum etc. Durch das Einbeziehen weiterer Quellen und Studien (s. Kapitel 15) wurde das Anwendungsspektrum von Nanoprodukten über den Schweizer Markt hinaus analysiert und eine internationale Perspektive aufgezeigt. Ein weiterer Aspekt der Untersuchungen betrifft Anwendungen von Nanomaterialien, die mit potenziellen Entlastungseffekten für die Umwelt verbunden sind. Entsprechende Beispiele sowohl für bereits auf dem Markt erhältliche Produkte als auch für noch in Ent-

wicklung befindliche Anwendungen sind für verschiedene industrielle Sektoren tabellarisch zusammengestellt worden.

Darüber hinaus umfasst die Analyse auch Forschungsdatenbanken (Schweiz, Deutschland, EU), um Rückschlüsse auf Produkte zu ziehen, die sich derzeit in der Forschungspipeline befinden, aber im Sinne des Untersuchungsgegenstandes der Studie beim Markteintritt in absehbarer Zeit einen positiven Einfluss auf Umwelt und Gesundheit haben könnten oder bei denen der Einsatz von Nanomaterialien möglicherweise auch mit Risiken verbunden ist.

Der zweite Teil der Analyse fokussiert auf die Wertschöpfungsstufe der Nanomaterialien als Grundstoffe in der kommerziellen Verarbeitungskette. Hierbei wurde die Herstellung und Verbreitung von Nanomaterialien in der Schweiz sowie auf internationaler Ebene untersucht. Im Rahmen der Marktübersicht sind Nanomaterialhersteller in der Schweiz identifiziert sowie hinsichtlich der Art der hergestellten Nanomaterialien und der jeweiligen Anwendungen charakterisiert worden. Um eine internationale Perspektive aufzuzeigen, folgt im nächsten Schritt eine generelle Analyse zu Nanomaterialien, die in kommerziellen Mengen auf dem Weltmarkt hergestellt und vertrieben werden. Auf der Basis einschlägiger Marktanalysen und Studien werden Abschätzungen zu Markt- und Produktionsvolumina relevanter Nanomaterialien zusammengetragen.

## **5.1 Übersicht zu Produkten und Anwendungen von Nanomaterialien**

Der kommerzielle Einsatz von Nanomaterialien hat in den letzten Jahren in vielen Produkten und Anwendungsfeldern wie der Pharma- und Medizintechnik, der Energie- und Umwelttechnik, der Informations- und Kommunikationstechnik, dem Maschinen- und Fahrzeugbau, dem Textil- und Bausektor sowie auch dem Bereich der Konsumgüter stark an Bedeutung gewonnen. Durch Nanostrukturierung lassen sich die Funktionalität und Eigenschaften nahezu sämtlicher Werkstoffklassen gezielt beeinflussen und optimieren. Die Vielfalt der erzielbaren Effekte und Eigenschaftsverbesserungen durch die Anwendung von Nanomaterialien ist kaum darstellbar. In der folgenden Tabelle sind einige der wichtigsten Beispiele für verschiedene Applikationsbereiche zusammengestellt.



*Tabelle 1 Durch Nanomaterialien beeinflussbare Materialeigenschaften und Anwendungsbeispiele (Quelle: BMBF 2009)*

Funktionalität	Anwendungsbeispiele
<p><b>Optisch</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Farbeffekte</li> <li>• Selektive Lichtleitung</li> <li>• Antireflexion</li> <li>• IR-Reflexion/-Absorption</li> <li>• Licht-/Stromkonversion (Fotovoltaik)</li> <li>• Licht-/Wärmeconversion (Solarthermie)</li> <li>• Fotochromie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transparente, hochwirksame <b>UV-Schutzmittel</b> auf Basis von ZnO- oder TiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln für Sonnenschutzcremes, Textilien oder Holzoberflächen.</li> <li>• <b>Antireflexschichten</b> auf Basis nanoporöser Siliziumdioxid-schichten für Solarzellen und Architekturglas.</li> <li>• <b>Changierende Farbeffekte</b> in Abhängigkeit des Betrachtungswinkels auf Basis von nanobeschichteten SiO<sub>2</sub>-Plättchen für Lacke und Kosmetika (Interferenzpigmente) bzw. durch optische Gitterstrukturen (Interferenzschichten).</li> <li>• Transparente nanoskalige IR-Absorber als <b>Hitzeschutz</b> für Plexiglasüberdachungen und Wintergärten.</li> <li>• Transparente nanoskalige Silber-IR-Reflexionsschichten in <b>Wärmeschutzverglasungen</b>.</li> <li>• Fotochrome Schichten auf Basis von Wolframtrioxid für <b>abtönbare Fenster</b></li> <li>• Photonische Kristalle zur selektiven Lichtleitung in der <b>optischen Datenübertragung</b> auf Basis regelmässig angeordneter Nanocluster.</li> <li>• Fotovoltaische <b>Lichtkonversion</b> durch optimal eingestellte Bandlücken (Stapelzellen), Quantenpunkte, Farbstoffe und organische Halbleiter.</li> <li>• Nanostrukturierte <b>Absorberschichten</b> zur Maximierung des Energieeintrages von der Solarthermie.</li> </ul>
<p><b>Mechanisch</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zugfestigkeit</li> <li>• Kratzfestigkeit</li> <li>• Härte</li> <li>• Reissfestigkeit</li> <li>• Schlagzähigkeit</li> <li>• Gasdichtigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Verschleissminderung</b> mechanisch hoch belasteter Komponenten und Werkzeuge durch diamantähnliche oder keramische Nanoschichten.</li> <li>• <b>Kratzfeste Beschichtungen</b> durch Einarbeitung anorganischer Nanopartikel in Klarlacke oder transparente Plasma-beschichtungen von Kunststoffoptiken.</li> <li>• <b>Leichtbauwerkstoffe</b> mit verbesserten mechanischen Eigenschaften auf Basis nanopartikel/-faserverstärkter Composite, nanostrukturierter Metall-Matrix-Kompositen, organisch-anorganischen Hybridmaterialien oder ultrahochfester Betone.</li> <li>• <b>Verbesserte Zug- und Bruchfestigkeit</b> durch Compoundierung von Kohlenstoffnanoröhren in Werkstoffmatrizes z. B. zur Verstärkung von Sportgeräten (Tennis-/Golf-/Eishockeyschläger, Fahrradrahmen).</li> <li>• <b>Gasdichte Folien</b> für Verpackungen im Lebensmittelbereich durch schichtförmige Nano-Silikate in Polymerkompositen.</li> </ul>

Funktionalität	Anwendungsbeispiele
<b>Elektronisch</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leitfähigkeit</li> <li>• Dielektrische Schichten</li> <li>• Supraleitung</li> <li>• Thermoelektrizität</li> <li>• Magnetoelektronik</li> <li>• Elektrochemische Energiespeicherung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Elektrisch leitfähige Polymere</b> durch Einarbeitung von Kohlenstoffnanoröhren in die Polymermatrix für antistatische Anwendungen und elektromagnetische Abschirmung.</li> <li>• <b>Verbesserte Hochtemperatur-Supraleiter</b> durch nanoskalige Substrukturen für erhöhte Stromtragfähigkeit sowie kostengünstige Sol-Gel-Materialien zur Schichterzeugung.</li> <li>• <b>Effizientere Thermoelektrika</b> zur Stromumwandlung von Wärme durch nanostrukturierte Halbleiterverbindungen.</li> <li>• Nanoporöse Schichten mit niedriger Dielektrizitätskonstante («low-k») zur <b>besseren elektrischen Isolierung</b> benachbarter Leiterbahnen in miniaturisierten Elektronik-Schaltkreisen ermöglichen höhere Schaltgeschwindigkeiten.</li> </ul>
<b>Chemisch</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Superhydrophilie</li> <li>• Superhydrophobie</li> <li>• Korrosionsschutz</li> <li>• Katalyse</li> <li>• Flammenschutz</li> <li>• Brandschutz</li> <li>• Adsorptionsfähigkeit</li> <li>• Adhäsionskraft</li> <li>• Lösungsvermögen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Antibeschlagschichten</b> durch superhydrophile Titandioxid-Nanobeschichtungen für Gläser und Aussenspiegel im Kraftfahrzeug.</li> <li>• <b>Schmutzabweisende Beschichtungen</b> u. a. durch Nanopartikel modifizierte Fluor-Siloxan-/Silan-Beschichtungsmittel für Textilien, Einrichtungsgegenstände und Fassadenoberflächen.</li> <li>• <b>Brandschutzfenster</b> auf Basis transparenter, nanopartikulärer Brandschutzgele und Schichten, die bei Hitze einwirkend ultrafeine Gasbläschen mit stark hitzeisolierender Wirkung bilden.</li> <li>• <b>Flammhemmende Wirkung</b> bei Kunststoffgehäusen und -kabeln durch Einbau katalytischer Nanopartikel in die Polymermatrix, die durch beschleunigte Bildung nicht brennbarer Verkokungsrückstände ein Ausbreiten von Flammen verhindern.</li> <li>• <b>Antifingerprintschichten</b> für Edelstahl- und Metalloberflächen auf Basis dünner Glasbeschichtungen.</li> <li>• <b>Effiziente Adsorbentien</b> zur Gasspeicherung oder zur Entfernung von Schadstoffen durch vergrößerte aktive Oberflächen und einstellbare Porengrößen.</li> </ul>
<b>Thermisch</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hitzeschutz</li> <li>• Wärmeisolation</li> <li>• Wärmeleitung</li> <li>• Wärmespeicherung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Nanostrukturierte Hitzeschutzschichten</b> und Legierungen für Turbinenwerkstoffe, um bei erhöhten Arbeitstemperaturen bessere Energiewandlungsgrade zu erreichen.</li> <li>• <b>Superisolierende Nanoschäume</b> (Aerogele, Polymerschäume) zur Wärmeisolation in Gebäuden und Industrieprozessen.</li> <li>• <b>Bessere Wärmeleitung</b> durch Nanofluide und Nanokompositwerkstoffe auf CNT-Basis in Industrieprozessen oder der Solarthermie.</li> <li>• <b>Effiziente Wärmespeicherung</b> durch mikro-/nanoverkapselte Phasenwechselmaterialien, die in Fassadenkomponenten integriert werden.</li> </ul>

Funktionalität	Anwendungsbeispiele
<p><b>Magnetisch</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Weichmagnetische Materialien</li> <li>• Magnetoelektronik</li> <li>• Magnetorheologie</li> <li>• Magnetische Induktionserwärmung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nanokristalline weichmagnetische Eisenlegierungen, denen sich <b>aussergewöhnliche magnetische Eigenschaften</b> aufprägen lassen u. a. für leistungsfähige Komponenten in Stromnetzen (z. B. Ringbandkern, Transformatoren, Drosselspulen).</li> <li>• Magnetische Schichtstapel mit Riesenmagnetowiderstandseigenschaften für <b>magnetoelektronische Sensoren und Datenspeicher</b>.</li> <li>• Dispersionen oberflächenstabilisierter nanoskaliger Eisenpartikel (Ferrofluide) mit <b>magnetisch steuerbarer Viskosität</b> für Dichtungen, Stossdämpfer etc.</li> <li>• Eisennanopartikel zur <b>Fernübertragung von Wärme</b> mittels elektromagnetischer Wechselfelder (z. B. für schaltbare Klebstoffe oder die hyperthermale Krebstherapie)</li> </ul>
<p><b>Biologisch</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Antimikrobielle Wirkung</li> <li>• Bioverfügbarkeit</li> <li>• Biokatalyse</li> <li>• Molekulare Erkennung</li> <li>• Biokompatibilität</li> <li>• Zellgängigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Antimikrobielle Ausrüstung</b> von Kunststoffen in der Medizintechnik, Mobiliaroberflächen, Textilien durch SilberNanopartikel.</li> <li>• <b>Höhere Bioverfügbarkeit</b> von medizinischen Wirkstoffen und Nahrungsergänzungsstoffen durch liposomale Verkapselung und Nanoemulsionen.</li> <li>• Nanopartikel als <b>Transportbehälter</b> für die Einschleusung von Genmaterial in Zellen (Genvektoren) in der Gentherapie.</li> <li>• Molekulare Erkennung von erkrankten Zellen für <b>effektiven Wirkstofftransport</b> durch oberflächenfunktionalisierte Drug-Delivery-Systeme.</li> <li>• Nanostrukturierte Implantatoberflächen und nanopartikuläre Knochenersatzmaterialien für <b>erhöhte Biokompatibilität</b> in der regenerativen Medizin.</li> <li>• Nanostrukturierte Template und Trägersubstanzen für <b>effiziente Biokatalysatoren</b>.</li> </ul>

In einigen Anwendungsbereichen werden Nanomaterialien unmittelbar im Herstellungsprozess eines Produktes bzw. einer technischen Komponente erzeugt und funktional integriert, wie beispielsweise bei der Abscheidung von Nanoschichten als Verschleisschutz für Motorenbauteile oder dem Aufwachsen von Nanodrähten auf Halbleitersubstraten, die in elektronischen Schaltkreisen verbaut werden. In diesen Fällen treten Nanomaterialien nicht als eigenständiges Produkt in der Wertschöpfungs- bzw. Handelskette auf und sind somit auch hinsichtlich möglicher (öko-)toxikologischer Risiken weit weniger kritisch einzuschätzen als Nanomaterialien, die als solche kommerziell erzeugt und gehandelt werden. Die vorliegende Studie fokussiert auf letzteren Bereich, der im Hinblick

auf eine Bewertung der Umwelt- und Gesundheitswirkungen im Sinne der Aufgabenstellung als wesentlich relevanter zu betrachten ist. Allerdings sind auch Produkte zu berücksichtigen, die Nanomaterialien in gebundener Form enthalten, welche aber am Ende des Lebenszyklus, beim Recycling oder der Entsorgung möglicherweise freigesetzt werden.

Die gezielte Herstellung und kommerzielle Vermarktung von Nanomaterialien fällt zum grossen Teil in den Bereich der chemischen Industrie. Nanomaterialien werden in vielen Bereichen der chemischen Industrie für die Optimierung hochwertiger Spezialchemikalien wie z. B. Kunststoffkomposite, Kleb-, Dicht- und Füllstoffe, Pigmente, Katalysatoren oder Beschichtungsmittel eingesetzt. Über verschiedene Stufen der Wertschöpfungsstufe gelangen diese Materialien in eine Vielzahl von Industrie- oder auch Verbraucherprodukten wie Kosmetika oder Reinigungs- und Imprägniermittel.

In einigen Bereichen der chemischen Industrie wie der Herstellung von Industrie-russen, amorpher Kieselsäure, Pigmenten, Polymerdispersionen oder Kolloiden ist die Anwendung nanostrukturierter Materialien bereits seit Jahrzehnten etabliert. In den letzten Jahren hat sich das Spektrum kommerziell verfügbarer Nanomaterialien jedoch deutlich erweitert, und die Produktionskapazitäten neuer Materialklassen wie Kohlenstoffnanoröhren oder organischer Halbleiter werden derzeit auf einen industriellen Massstab hochskaliert.

Der überwiegende Einsatz von Nanomaterialien liegt bei der Optimierung von Werkstoffen und technischen Komponenten für zahlreiche Anwendungsfelder in der Industrie, aber auch im Bereich der Konsumgüter. Das sehr umfassende Anwendungsspektrum von Nanomaterialien ist bereits umfassend in öffentlich zugänglichen Publikationen beschrieben worden (z. B. BMBF 2009 und 2011, Hessen-Agentur<sup>4</sup>), sodass im Folgenden lediglich zwei Bereiche näher erläutert werden, die im Fokus der Studie stehen:

- Anwendungen in Konsumgütern (vgl. Kapitel 5.1.1),
- Anwendungen mit Entlastungspotenzialen für die Umwelt (vgl. Kapitel 5.1.2).

---

<sup>4</sup> Schriftenreihe Hessen-Nanotech, [www.hessen-nanotech.de](http://www.hessen-nanotech.de).

### 5.1.1 Nanoanwendungen im Konsumgüterbereich

Aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften werden Nanomaterialien zur Verbesserung von Produkteigenschaften im Konsumgüterbereich eingesetzt, z. B. in Kosmetika, Haushalts- und Reinigungsmitteln, Textilien, Sport- und Freizeitausrüstungen sowie in Verpackungen. Anwendungen von Nanomaterialien im Konsumgüterbereich sind aus Sicht von Sicherheits- und Verbraucherschutzaspekten besonders relevant, da hierbei eine direkte Exposition der Bevölkerung mit Nanomaterialien möglich ist.

Die potenziellen Einsatzmöglichkeiten von Nanomaterialien betreffen eine Fülle unterschiedlicher Anwendungen und Produktgruppen im Konsumentenbereich. Momentan bestehen allerdings sowohl in der Öffentlichkeit als auch bei staatlichen Behörden Wissensdefizite in Bezug auf den tatsächlichen Einsatz von Nanomaterialien in Konsumentenprodukten. Dies liegt zum einen darin begründet, dass derzeit weder eine gesonderte Kennzeichnungs- noch eine Meldepflicht für die Verwendung von Nanomaterialien in Konsumgütern existieren. Auf der anderen Seite ist auch bei Verwendung des Begriffes «nano» durch die Hersteller im Produktmarketing keine bzw. nur eine sehr unspezifische Aussage darüber gegeben, ob und wie Nanotechnologien bzw. Nanomaterialien im Produkt eingesetzt werden. Die Verwendung des Begriffes «nano» im Produktnamen unterliegt ausser markenrechtlichen Gesichtspunkten keinen Einschränkungen. In der Regel sollen damit Produkteigenschaften wie Kleinheit oder neue, verbesserte Funktionalitäten kommuniziert werden, die allerdings auch ohne den Einsatz von Nanotechnologien bzw. Nanomaterialien erzielt werden können.

Ein definitiver Nachweis von Nanomaterialien in Konsumentenprodukten lässt sich nur durch dezidierte physikochemische Analysen klären, die von behördlicher Seite in der Regel nur dann durchgeführt werden, wenn ein akuter Gefährdungsverdacht besteht. Als Beispiel ist der Reinigungsspray «Magic Nano» zu nennen, der im Jahr 2006 in Deutschland in einigen Fällen nach Einatmen des Aerosols zu Gesundheitsbeeinträchtigungen führte. Untersuchungen des Bundesinstitutes für Risikobewertung ergaben, dass das Produkt keine Nanopartikel enthielt, sondern eine fehlerhafte Lösungsmittelrezeptur die Ursache für die Gefährdung war (BfR 2006).

Aufgrund der unklaren Informationslage bezüglich der tatsächlichen Verwendung von Nanomaterialien in Konsumprodukten sind in den letzten Jahren vermehrt Untersuchungen zur Bestimmung des Nanomaterialgehaltes in Produkten durchgeführt worden. In einer Schweizer Studie der Empa und der ETH Zürich wurden verschiedene Sprays hinsichtlich des Nanopartikelgehaltes in der Dispersion und im Aerosol untersucht (Hagendörfer et al. 2010; Lorenz et al. 2011). Es handelte sich dabei um Produkte aus den Anwendungsbereichen Antitranspirationsdeodorants, Schuhimprägnierung und Pflanzenbehandlung. Dabei konnten bei einigen, aber nicht bei allen der vier untersuchten kommerziellen Sprays Nanopartikel in der Dispersion bzw. im Aerosol nachgewiesen werden. In Aerosolen konnten Nanopartikel vor allem bei treibgasbetriebenen Sprays nachgewiesen werden, wobei die Nanobestandteile sich teilweise erst durch den Sprayprozess aus den Treibmittelbestandteilen bildeten. In einem weiteren Projekt der ETH Zürich wurden Lebensmittelbehälter und Frischhaltebeutel untersucht, die nach Herstellerangaben Nanosilber enthalten sollten. Bei zwei der vier untersuchten Produkte konnte hierbei kein Silbergehalt festgestellt werden (von Goetz 2012).

Zur Verbesserung der Transparenz bezüglich des Einsatzes von Nanomaterialien in Konsumgütern sind in den vergangenen Jahren verschiedene Massnahmen sowohl seitens von NGOs, Konsumentenschutzorganisationen, Verbänden, der Industrie als auch staatlicher Seite initiiert worden. Als Beispiele sind im Internet veröffentlichte Produktlisten und -datenbanken zu nennen, die von NGOs oder auch Hersteller- und Handelsunternehmen veröffentlicht werden (s. Kapitel 15). Staatliche Massnahmen umfassen die Einführung verpflichtender Kennzeichnungen, wie beispielsweise im Rahmen der Novellierung der europäischen Kosmetikverordnung.<sup>5</sup>

Ebenfalls wichtig ist eine umfassende und sachliche Information und Aufklärung von Bürgerinnen und Bürgern von staatlicher Seite. Die zentrale Informationsstelle in der Schweiz zu Chancen und Risiken der Nanotechnologie und synthetischer Nanomaterialien ist das Internetportal InfoNano,<sup>6</sup> an der die Bundesämter für Gesundheit, für Umwelt und für Landwirtschaft, die Kommission für Technologie und Innovation, Swissmedic und die Staatssekretariate für Wirtschaft sowie

---

<sup>5</sup> Verordnung (EG) Nr. 1223/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. November 2009 über kosmetische Mittel; (Download unter <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:342:0059:0209:DE:PDF>).

<sup>6</sup> [www.bag.admin.ch/nanotechnologie](http://www.bag.admin.ch/nanotechnologie).

für Bildung und Forschung beteiligt sind. InfoNano bündelt Informationen zu Anwendungen, Umwelt- und Gesundheitswirkungen sowie Arbeitsschutzaspekten von Nanomaterialien. Ebenfalls mit öffentlichen Fördergeldern unterstützt wird das Internetportal Swiss Nano-Cube, das eine gesamtschweizerische Bildungsplattform zur Mikro- und Nanotechnologie darstellt. Swiss Nano-Cube richtet sich an Lehrende und Lernende von Mittel- und Berufsfachschulen sowie Höheren Fachschulen und dient auch der Verbesserung des Informationsstandes von Bürgerinnen und Bürgern hinsichtlich der Verwendung von Nanoprodukten im Alltag. Über 40 Beispiele von Nanoproduktanwendungen werden in einer medial aufbereiteten Alltagswelt interaktiv erläutert.<sup>7</sup> Eine weitere Schweizer Initiative betrifft eine von der Fédération romande des consommateurs lancierte Wanderausstellung, die die öffentliche Debatte zur Nanotechnologie stimulieren soll.<sup>8</sup>

In diesem Kontext zu nennen ist auch die vom Deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Wissensplattform Nanomaterialien ([www.nanopartikel.info](http://www.nanopartikel.info)), an der die Empa beteiligt ist und die von den Schweizer Bundesbehörden BAG und BAFU unterstützt wird. Auf der Internetplattform sind Informationen über Anwendungen von Nanomaterialien und deren Wirkung auf Gesundheit und Umwelt systematisch und in verständlicher Form für die Öffentlichkeit aufbereitet.

### *Verbreitung von Nanokonsumprodukten in der Schweiz*

Nanokonsumprodukte werden in der Schweiz über die üblichen Distributionswege des Gross- und Einzelhandels, aber in zunehmendem Masse auch über Online-Handelsplattformen verbreitet. Über den Internetvertriebsweg sind prinzipiell sämtliche global verkauften Nanotechnologieprodukte auch in der Schweiz verfügbar. Dennoch ist von einer wichtigen Rolle der Schweizer Handelsketten bei der Verbreitung von Nanoprodukten in der Schweiz auszugehen. Auf Basis des Schweizer Aktionsplans «Synthetische Nanomaterialien» wurde eine NANO-Dialogplattform ins Leben gerufen, mit dem Ziel, den Dialog zwischen den rele-

---

<sup>7</sup> [www.swissnanocube.ch/nanorama/](http://www.swissnanocube.ch/nanorama/).

<sup>8</sup> Diese Ausstellung wird in leicht angepasster Form ab Juni 2013 auch in der Deutschschweiz angeboten. Sie wird von Nationalfonds, TA-SWISS, KTI, SATW und SAMW, Krebsliga, Konsumentenforum sowie verschiedenen Bundesämtern unterstützt [www.frc.ch/dossiers/dossier\\_nanotechnologies/](http://www.frc.ch/dossiers/dossier_nanotechnologies/) und [www.nanoexpo.ch](http://www.nanoexpo.ch).

vanten Akteuren anzuregen und gemeinsam Handlungsoptionen für eine transparente Konsumenteninformation zu erarbeiten.<sup>9</sup> Im Rahmen der Aktivitäten der NANO-Dialogplattform wurden von beteiligten Handelsketten der Interessensgemeinschaft Detailhandel (Migros, Coop, Denner, Manor, Valora und Vögele) Listen mit Nanoprodukten aus dem jeweiligen Warenangebot veröffentlicht.<sup>10,11,12,13</sup>

Unterschieden werden dabei jeweils folgende Produktkategorien n:

- Produkte, die Nanopartikel enthalten und diese freisetzen können (z. B. Kosmetika),
- Produkte, die mithilfe der Nanotechnologie hergestellt wurden und Nanopartikel in gebundener Form enthalten (z. B. Fahrrad mit Rahmen aus CNT-Kompositen),
- Produkte, die einen Nanoeffekt aufweisen (z. B. schmutz-, öl- und wasserabweisende Eigenschaften),
- Bekleidungs- und Outdoorprodukte (z. B. antimikrobielle Ausrüstungen).

Insgesamt werden rund 80 Produktlinien der beteiligten Handelsketten als Nanoprodukte eingestuft. Rund drei Viertel der Produkte beziehen sich auf schmutz-, öl- und wasserabweisende Oberflächeneigenschaften («Nanoeffekt»), wobei eine Verwendung von Nanomaterialien nicht spezifiziert ist. Rund 20 Prozent der genannten Nanoprodukte enthalten nach Einschätzung der Handelsketten freie Nanopartikel, wobei vor allem titandioxidhaltige Sonnenschutz- und Pflegecremes aber auch Versiegelungsprodukte betroffen sind. Anzumerken ist, dass an der Erfassung nur sechs Schweizer Handelsketten beteiligt waren, die ihre

---

<sup>9</sup> Bundesamt für Gesundheit (BAG): Konsumenteninformationen zu Nanoprodukten Ergebnisse der BAG NANO-Dialogplattform, Publikation der BAG NANO-Dialogplattform, Dez. 2010.

<sup>10</sup> [www.migros.ch/mediaObject/migros\\_ch/ueber\\_die\\_migros/nachhaltigkeit/produkte\\_und\\_labels/Standards/Nanoprodukte\\_Nov\\_2011\\_D/original/Nanoprodukte\\_Nov\\_2011\\_D.pdf](http://www.migros.ch/mediaObject/migros_ch/ueber_die_migros/nachhaltigkeit/produkte_und_labels/Standards/Nanoprodukte_Nov_2011_D/original/Nanoprodukte_Nov_2011_D.pdf) (Internetabruf Nov. 2012).

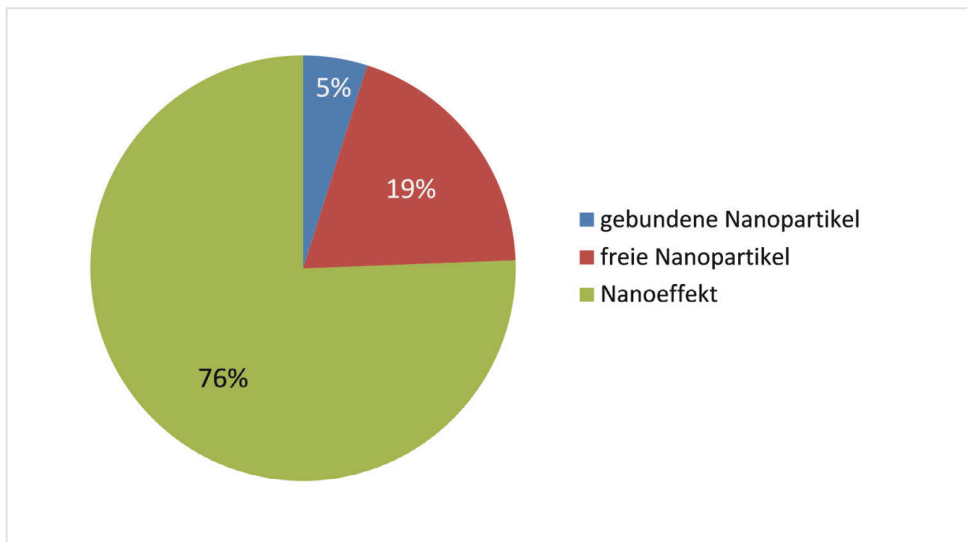
<sup>11</sup> [www.coop.ch/pb/site/nachhaltigkeit/get/documents/coop\\_main/elements/nachhaltigkeit/grundsatzrichtlinien/Downloads/Nanoproduktef\\_032010\\_d.pdf](http://www.coop.ch/pb/site/nachhaltigkeit/get/documents/coop_main/elements/nachhaltigkeit/grundsatzrichtlinien/Downloads/Nanoproduktef_032010_d.pdf) (Internetabruf November 2012).

<sup>12</sup> [www.denner.ch/fileadmin/user\\_upload/denner/web\\_denner/PDF/Nanoprodukte\\_Denner\\_AG\\_08\\_06\\_10.pdf](http://www.denner.ch/fileadmin/user_upload/denner/web_denner/PDF/Nanoprodukte_Denner_AG_08_06_10.pdf) (Abruf Nov. 2012).

<sup>13</sup> Download unter [www.manor.ch/de/nanotechnologien/nachhaltigkeit-nanotechnologien.html](http://www.manor.ch/de/nanotechnologien/nachhaltigkeit-nanotechnologien.html) (Internetabruf Nov. 2012).



Nanoprodukte auf freiwilliger Basis gemeldet haben. Die Gesamtzahl von Konsumprodukten auf dem Schweizer Markt, die aufgrund von Produktbeschreibungen der Hersteller im Kontext mit Nanoeffekten oder der Verwendung von Nanomaterialien stehen, dürfte deutlich grösser sein.



*Abbildung 2 Anteil der von Schweizer Handelsketten vertriebenen Nano-  
produkte nach Art der Nanomaterial-Anwendung*

Zur Vervollständigung der Informationen über die Verbreitung von Nanokonsumgütern in der Schweiz wurden weitere Quellen wie die Nanotechnologieprodukte-Datenbank des Woodrow Wilson Centers ([www.nanotechproject.org](http://www.nanotechproject.org)) ausgewertet. Für die Schweiz finden sich hier 12 Einträge. Das Produktspektrum umfasst Kosmetikcremes für Zahn- und Hautpflege, nanosilberbeschichtete Utensilien und Textilien. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Datenbank nicht als vollständig oder repräsentativ für den Schweizer Markt betrachtet werden kann. Zudem wird aus der Datenbank keine Informationen dazu verfügbar, ob Nanomaterialien in den Produkten tatsächlich eingesetzt werden. Im Prinzip liesse sich dies nur durch aufwendige und kostspielige Produktanalysen verifizieren. Die Herstellerangaben sind oftmals wenig eindeutig und z. T. widersprüchlich. So gibt beispielsweise der Hersteller einer «Nanowhitening»-Zahnpasta entgegen

vorheriger Marketingaussagen an, nur Partikelzusätze im Mikrobereich zu verwenden.<sup>14</sup>

Weitere Anhaltspunkte wurden aus einer Recherche in Bezug auf in der Schweiz registrierter Marken- und Warenzeichen im Kontext der Nanotechnologie abgeleitet. Insgesamt sind in der Schweiz rund 100 Marken mit dem Begriff «nano» im Markennamen registriert, davon rund 10 Prozent von Schweizer Unternehmen. Mit diesen registrierten Markennamen können einige konkrete nanomaterialbasierte Produkte in Bezug gebracht werden, wie z. B. die Marken nanoDerm oder NANO-LIPOBELLE für Liposom basierte Wirkstofftransporter in Hautcremes oder Nahrungsergänzungstoffen. Ergänzt wurden die Recherchen durch eine Auswertung von Internetportalen sowie Lieferanten- und Produktverzeichnissen (vgl. Kapitel 5.2.2). Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über das Spektrum an Nanoprodukten im Consumerbereich in der Schweiz.

*Tabelle 2      Übersicht zu Anwendungen von Nanomaterialien im Konsumgüterbereich, die in der Schweiz hergestellt bzw. vertrieben werden (ohne Anspruch auf Vollständigkeit; Quelle: Literatur- und Internetrecherche)*

Bereich	Produktart	Hinweise zum Nanomaterialeinsatz	Entwicklungsstand
Kosmetik	Sonnenschutzcremes	Titandioxid- bzw. Zinkoxidnanopartikel als UV-Filter	Produkt
	Hautpflegecremes	Liposomartige Container und Nanoemulsionen für Coenzym Q10, Vitamine etc.	Produkt
	Zahncreme	Kalziumperoxid als Bleichmittel in nano-/mikroskaliger Formulierung	Produkt
	Duftstoffe für Kosmetika	Anorganische Nanopartikel als Depot für eine kontrollierte Freisetzung von Duftstoffen	F&E

<sup>14</sup> Vgl. Homepage Swissdent: [www.swissdent.com/swissdent-nanowhitingen-zahnpasta-50ml-und-100ml/](http://www.swissdent.com/swissdent-nanowhitingen-zahnpasta-50ml-und-100ml/) (Abruf Februar 2012).

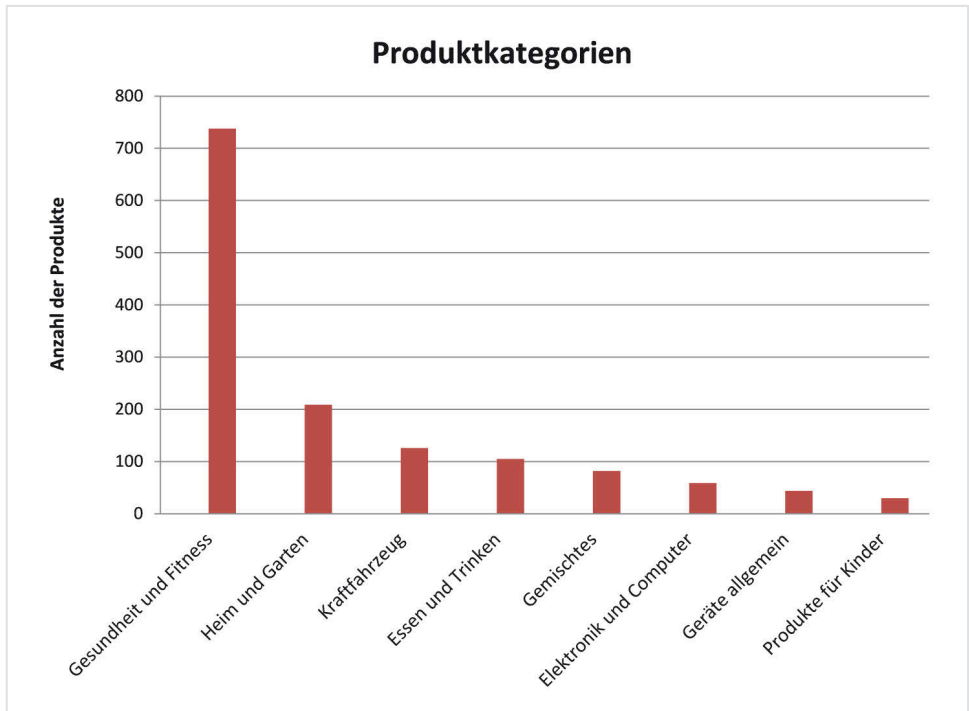
Bereich	Produktart	Hinweise zum Nanomaterialeinsatz	Entwicklungsstand
Versiegelung, Reinigung	Imprägniersprays und -reiniger für Haushalt, Möbel, Automobil	SiO <sub>2</sub> -Zusätze zur Ausbildung mikrostrukturierter hydrophober Oberflächen («Nanoeffekt»), genaue Zusammensetzung oft unklar, Effekt kann auch ohne Zusatz von Nanomaterialien erzielt werden (Fluorcarbon/-silikon-Zusätze)	Produkt
Hygiene	Antibakterielle Ausrüstung von Produktoberflächen	Nanosilberzusätze als Beschichtung oder als Zusatz im Kompositmaterial für diverse Alltagsgegenstände	Produkt
Textilien	Schmutzabweisende/antimikrobielle Textilien	SiO <sub>2</sub> -Zusätze zur Ausbildung mikrostrukturierter hydrophober Oberflächen; Nanosilber als antimikrobielle Ausrüstung	Produkt
Sportgeräte	Steighilfen für Schneesportgeräte, Skihaffelle	Silikonbasierte Nanokomposite zur hydrophoben Ausrüstung	Produkt
Lebensmittel	Funktionelle Lebensmittelzusatzstoffe	Öl-in-Wasser-Nanoemulsionen auf Basis fett-, proteinhaltiger Substanzen, Micellen/Liposomen zur Verkapselung von Nährstoffen zur Erhöhung der Bioverfügbarkeit, amorphes Siliziumdioxid als Trennmittel, Fließ- und Rieselhilfe in pulverigen Lebensmitteln, Carotinoide als Farbstoffe in Getränken	Produkt
Lebensmittelverpackung	Verpackungen mit verbesserten Barriereeigenschaften	Verbundfolien mit Aluminium, Aluminiumoxid oder Siliziumdioxid, PET-Flaschen mit amorphem Kohlenstoff oder Siliziumdioxid	Produkt

Generell ist das Produktspektrum von Nanomaterialanwendungen im Konsumgüterbereich wesentlich umfangreicher. Mögliche Anwendungen, die sich aus verschiedenen Übersichtspublikationen und Produktbeschreibungen ergeben, werden im folgenden Abschnitt näher erläutert.

### *Anwendungsfelder, Trends und internationale Perspektive*

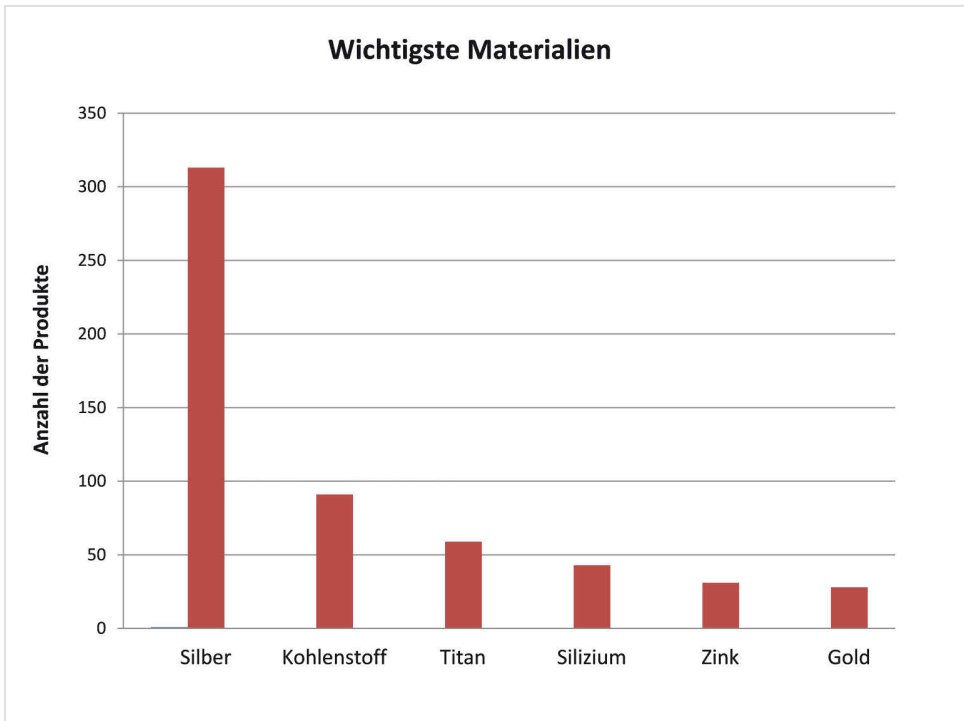
Das derzeit umfassendste Verzeichnis von nanomaterialbasierten Produkten findet sich in einer Datenbank des Woodrow Wilson Centers ([www.nanotechproject.org](http://www.nanotechproject.org)). Das im Jahr 2005 initiierte Projekt hat mittlerweile über 1300 Konsumgüterartikel mit Nanotechnologiebezug identifiziert und hinsichtlich Herkunft und Art des verwendeten Nanomaterials charakterisiert. Auch wenn die Datenbank keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben kann, gibt das Produktverzeichnis einen guten Überblick, in welchen Konsumgüterprodukten Nanomaterialien derzeit Anwendung finden.

Der mit Abstand grösste Anwendungsbereich der in dieser Datenbank erfassten Produkte ist der Gesundheitssektor, in dem die Bereiche Körperpflege, Kosmetik, Kleidung und Sportgeräte zusammengefasst sind. Weiterhin verbreitet sind Reinigungs- und Versiegelungsmittel im Innen- und Aussenbereich sowie im Automobilbereich.



**Abbildung 3** Zuordnung identifizierter Nanoprodukte zu Produktkategorien (Quelle: Nano-Konsumgüter-Datenbank des Woodrow Wilson Centers, [www.nanotech-project.org](http://www.nanotech-project.org), Datenabfrage März 2011)

Von den eingesetzten Materialien dominiert eindeutig Nanosilber, das in über 300 der registrierten Produkte eingesetzt wird. Von allen Nanomaterialien ist der Einsatz von Nanosilber in den letzten Jahren absolut am stärksten angestiegen. Weitere verbreitete Nanomaterialien sind Kohlenstoffnanomaterialien (z. B. CNT oder Fullerene), Titandioxid, Siliziumdioxid, Zinkoxid und Gold.



**Abbildung 4** *Eingesetzte Nanomaterialien in Produkten, die in der Nano-Konsumgüter-Datenbank des Woodrow Wilson Centers verzeichnet sind (Quelle: [www.nanotech-project.org](http://www.nanotech-project.org), Datenabfrage März 2011)*

Neben der Datenbank des Woodrow Wilson Centers existieren weitere Datenbanken zu Konsumgüteranwendungen der Nanotechnologie wie beispielsweise der europäischen Verbraucherschutzorganisation BEUC<sup>15,16</sup> sowie Datenbanken

<sup>15</sup> BEUC inventory of products claiming to contain nano-silver particles available on the EU market (2012) (verfügbar unter [www.beuc.org](http://www.beuc.org)).

<sup>16</sup> BEUC inventory of products claiming to contain nanoparticles available on the EU market (2010) (verfügbar unter [www.beuc.org](http://www.beuc.org)).

in Dänemark<sup>17</sup> und Deutschland<sup>18</sup>. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass die Erfassung von Einträgen auch in diesen Datenbanken lediglich auf Internetrecherchen bzw. Herstellerangaben basiert und der tatsächliche Einsatz von Nanomaterialien in den Produkten nicht verifiziert worden ist.

Unabhängig von der tatsächlichen Verwendung von Nanomaterialien lassen sich eine Vielzahl von prinzipiellen Anwendungsmöglichkeiten und Produktoptionen im Konsumgüterbereich identifizieren. In zahlreichen Publikationen finden sich detaillierte Angaben zur Verwendung von Nanomaterialien in verschiedenen Anwendungsbereichen, die allerdings ebenfalls überwiegend auf Herstellerangaben beruhen. Eine Zusammenstellung der relevantesten Anwendungsmöglichkeiten findet sich in nachfolgender Tabelle.

*Tabelle 3 Übersicht zu generellen Anwendungsmöglichkeiten von Nanomaterialien im Konsumgüterbereich*

Produktgruppe	Nanooptimierte Eigenschaften und eingesetzte Nanomaterialien
Sportgeräte <sup>19,20,21</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kohlenstoffnanoröhren zur Verbesserung mechanischer Eigenschaften (Bruchfestigkeit und Steifigkeit) von Baseball-, Eishockey- und Tennisschlägern, Fahrradrahmen etc.</li> <li>• Nanokristalline Metalllegierungen zur Verstärkung von Golfschlägern</li> <li>• Nano-Schichtsilikate zur Verbesserung der Gasdichtigkeit von Tennisbällen</li> <li>• Nano-Titandioxid für Antibeschlagbeschichtungen von Ski- und Taucherbrillen</li> <li>• Nanokieselsäure in Beschichtungssubstraten zur Hydrophobisierung von Sportgeräten (Golfbälle, Ski-, Bootsaurüstung etc.)</li> </ul>

<sup>17</sup> <http://nano.taenk.dk/en>.

<sup>18</sup> [www.bund.net/themen\\_und\\_projekte/nanotechnologie/nanoproduktdatenbank/](http://www.bund.net/themen_und_projekte/nanotechnologie/nanoproduktdatenbank/).

<sup>19</sup> [www.nanotechproject.org](http://www.nanotechproject.org).

<sup>20</sup> [www.nanotruck.de/treffpunkt-nanowelten/nanotechnologie-konkret/leben-und-freizeit/lifestyle-und-sport/sport-freizeit.html](http://www.nanotruck.de/treffpunkt-nanowelten/nanotechnologie-konkret/leben-und-freizeit/lifestyle-und-sport/sport-freizeit.html).

<sup>21</sup> [www.nanocyl.com/Products-Solutions/Sectors/Sports](http://www.nanocyl.com/Products-Solutions/Sectors/Sports).

Produktgruppe	Nanooptimierte Eigenschaften und eingesetzte Nanomaterialien
Kosmetika <sup>22,23,24,25</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Titandioxid und Zinkoxid als UV-Filter in Sonnencremes</li> <li>• Liposomen als Wirkstoffträger in Hautpflegecremes</li> <li>• Nanoemulsionen zur Verbesserung der Stabilität und Wirksamkeit von Hautlotionen</li> <li>• Fullerene als Radikalfänger in Hautcremes</li> <li>• Nanopigmente (Titandioxid, Aluminiumoxid z. T. verkapselt) zur Lichtstreuung (Antifalteneffekt)</li> <li>• Nanoskalige Effektpigmente (Glimmer etc.) für Kosmetikfarben</li> <li>• Hydroxylapatit-Nanopartikel zur Regeneration von Zahnschmelz</li> </ul>
Textilien <sup>26,27,28,29,30</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nano-Kieselsäure für Oberflächenfunktionalisierung von Textilfasern (Hydrophobisierung/Schmutzresistenz)</li> <li>• Nanosilber für antibakterielle Wirkung (Unterwäsche, Schuhe, Sportkleidung)</li> <li>• Titandioxid für UV-Schutz und Selbstreinigung</li> <li>• Zinkoxid für UV-Schutz und Abriebbeständigkeit</li> <li>• Kohlenstoffnanoröhren für Antistatik, Leitfähigkeit, Abriebbeständigkeit</li> <li>• Nano-Schichtsilikate, Nano-Aluminiumoxid zur Flammhemmung</li> <li>• Nanoskalige Käfigmoleküle (Cyclodextrine, Dendrimere) zur Duftstoffimprägnierung</li> <li>• Aerogele für Kälteschutzkleidung und Funktionstextilien</li> </ul>

<sup>22</sup> Lens, M.: Recent progresses in application of fullerenes in cosmetics. *Recent Pat Biotechnol.*, 2011, 5(2), S. 67–73.

<sup>23</sup> Observatorynano: Nanotechnology in Cosmetics, April 2009; [www.observatorynano.eu](http://www.observatorynano.eu).

<sup>24</sup> [www.impag.ch/index.php?id=1373](http://www.impag.ch/index.php?id=1373).

<sup>25</sup> Merck: Akrobaten des Lichts; M – Das Entdeckermagazin, 12.10.2009.

<sup>26</sup> Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) und Textilverband Schweiz: NanoTextiles: Functions, nanoparticles and commercial applications, 2007; ([www.empa.ch/plugin/template/empa/\\*/78337/---/NanoSafeTextiles\\_1.pdf](http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/78337/---/NanoSafeTextiles_1.pdf)).

<sup>27</sup> Observatorynano: «Report on Textiles N°1», Mai 2009; [www.observatorynano.eu](http://www.observatorynano.eu).

<sup>28</sup> Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) und Textilverband Schweiz: nano textiles, Grundlagen und Leitprinzipien zur effizienten Entwicklung nachhaltiger Nanotextilien, Ausgabe September 2011.

<sup>29</sup> [www.texbac.de/html/frische-depots.html](http://www.texbac.de/html/frische-depots.html).

<sup>30</sup> [www.indiantextilejournal.com/articles/FAdetails.asp?id=4154](http://www.indiantextilejournal.com/articles/FAdetails.asp?id=4154).



Produktgruppe	Nanooptimierte Eigenschaften und eingesetzte Nanomaterialien
Reinigung/ Versiegelung, Hygiene für Haushalt, Auto- pflege etc. <sup>31, 32</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nano-SiO<sub>2</sub> in Beschichtungsformulierungen für Hydrophobisierung/Schmutzresistenz</li> <li>• Nanozinkoxid/-Ceroxid als UV-Schutz z. B. für Möbel, Parkettversiegelungen</li> <li>• Nanopigmente (z. B. Al-oxid) als Kratzschutz z. B. für Parkettfussböden</li> <li>• Nano-Titandioxid für hydrophile Beschichtungen mit Antibeschlageigenschaften oder photokatalytische Selbstreinigung</li> <li>• Nanosilberkomposite und -beschichtungen für antibakterielle Oberflächen</li> </ul>
Lebensmittel/ -Zusatzstoffe/ -Verpackungen <sup>33,34,35</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nanokieselsäure als Rieselhilfe für pulverförmige Lebensmittel (E551)</li> <li>• Titandioxid als Lebensmittelfarbstoff (E171) mit teilweiser Partikelgrößenverteilung im Nanobereich<sup>36</sup></li> <li>• Micellen/Liposomen zur Verkapselung von Nährstoffen zur Erhöhung der Bioverfügbarkeit</li> <li>• Mikronisierung von Vitaminen und Mineralien zur Erhöhung der Bioverfügbarkeit</li> <li>• Nanosilber für antibakterielle Ausrüstung von Lebensmittelbehältern/Folien</li> <li>• Nano-Schichtsilikate für erhöhte Gasdichtigkeit von PET-Getränkeflaschen</li> <li>• SiO<sub>2</sub>-Nanobeschichtung für verbesserte Barriereigenschaften von Kunststoffverpackungen</li> <li>• TiN-Nanopartikel in PET für eine Verbesserung der Warmumformbarkeit bei der Verpackungsherstellung</li> </ul>

<sup>31</sup> BG Bau: Nanoteilchen in Bau- und Reinigungsprodukten, Stand Januar 2011; [www.bgbau.de/d/pages/praev/fachinformationen/gefahstoffe/nano/PDF-files/nano-liste.pdf](http://www.bgbau.de/d/pages/praev/fachinformationen/gefahstoffe/nano/PDF-files/nano-liste.pdf).

<sup>32</sup> Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa): Auswaschung von Nanopartikeln aus Materialien, Empa Technologie-Briefing Nanomaterialien in Farben und Lacken, 6. Juli 2010.

<sup>33</sup> Möller et al. (2009).

<sup>34</sup> Bundesministerium für Gesundheit (BMG): Zusatzstoffe, Aromen und Enzyme in der Lebensmittelindustrie; Wien, August 2010.

<sup>35</sup> Bund für Lebensmittelrecht und Lebensmittelkunde e. V.: Sachstands- und Positionspapier Nanotechnologie im Lebensmittelbereich, Dezember 2009; [www.blk.de](http://www.blk.de).

<sup>36</sup> Weir et al. (2012).

Trotz der Vielzahl der vorliegenden Publikationen zur Thematik, herrscht bezüglich der tatsächlichen Verwendung von Nanomaterialien in Konsumprodukten weiterhin eine relativ hohe Intransparenz. Zum Teil widersprechen die Angaben der Industrie den Einschätzungen von Behörden und NGOs. Im Kosmetikbereich und im Bereich der Lebensmittelinhaltsstoffe ist auf EU-Ebene eine Verbesserung der Transparenz zu erwarten aufgrund der Einführung einer Kennzeichnungspflicht für Nanomaterialien ab 2013 bzw. 2014.

### **5.1.2 Nanoanwendungen mit Entlastungspotenzialen für die Umwelt**

Der Nanotechnologie werden grosse Potenziale im Hinblick auf die Entwicklung ressourcen- und energieeffizienterer Produkte und Produktionstechniken zugesprochen, mit denen ein unmittelbares Entlastungspotenzial für die Umwelt verbunden ist, z. B. durch einen reduzierten Energie- und Materialverbrauch, den Ersatz toxischer Stoffe oder seltener Rohstoffe oder verbesserte Technologien zur Erfassung und Minderung toxischer Stoffe in der Umwelt. Letztere Anwendungen fallen in den Bereich klassischer Umwelttechnologien, die durch den Einsatz von Nanomaterialien wirksamer gestaltet werden können. In der folgenden Tabelle wird ein Überblick über Nanotechnologie-Anwendungen im Umweltsektor gegeben, die bereits im Markt verfügbar bzw. in der Entwicklung sind.

*Tabelle 4 Beispielhafte Übersicht zu Anwendungen und Entwicklungen der Nanotechnologie im Bereich der Umwelttechnik (Quelle: BMBF 2011)*

	<b>Anwendungen im Markt</b>	<b>Forschung und Entwicklung</b>
<b>Reinigung flüssiger Medien</b>	<p>Nanoporöse keramische Filtrationselemente zur <b>Aufbereitung von Industrieabwässern</b> (Vorteil: hohe chemische und thermische Stabilität)</p> <p>Lösemittelstabile Polymermembranen für die <b>organophile Nanofiltration</b>, z. B. zum Recycling homogener Katalysatoren oder der Reinigung organischer Lösemittel</p> <p>Nanostrukturierte Superadsorber auf Basis polymerer Vliese und Fasern zur <b>Absorption von Flüssigkeiten</b> (Hygiene-, Medizintechnikbereich)</p> <p>Eisenoxidnanopartikel zur Adsorption und magnetischen Abtrennung von Schwermetallen zur <b>Trinkwasseraufbereitung</b></p>	<p>Mixed-Matrix-Membranen durch Kombination von CNT mit Polymerfasern oder anorganisch/organische Hybridsysteme zur <b>Trinkwasseraufbereitung</b> (Vorteil: verbesserter Durchsatz)</p> <p>Nanoskalige Bioverbundwerkstoffe zum <b>Abbau organischer Schadstoffe</b>, z. B. durch immobilisierte Mikroorganismen in porösen Keramikstrukturen</p> <p>Nanostrukturierte Polymermembranen (z. B. durch molekulares Prägen oder verankerte Polymerbürsten) zur <b>selektiven Abtrennung toxischer Chemikalien</b> oder pathogener Keime</p> <p>Keramische Nanofiltrationsmembranen zur <b>Aufreinigung von Lösemitteln</b> (Vorteil: Energieeinsparungen durch Ersatz destillativer Aufreinigung) und Industrieabwässern</p>
<b>Reinigung gasförmiger Medien</b>	<p>Fotokatalysatoren auf Basis nanopartikulärer Titandioxidbeschichtungen zum <b>Abbau organischer Schadstoffe</b> für den Einsatz in Glasfaserfiltern, z. B. für Reinraumtechnologie, Pharmaproduktion, OP-Räume</p> <p>Nanoporöse <b>Gastrennmembranen</b> z. B. Mixed-Matrix-Membranen auf Basis organisch-anorganischer Hybridepolymere, Zeolithe</p>	<p>Dreidimensional nanostrukturierte Filtermedien zur effizienten Abscheidung feinsten Tröpfchen aus Gasen, z. B. Kühlschmierstoffpartikel aus der spanenden Industrie</p> <p>Kohlenstoffnanoröhren zur Funktionalisierung hocheffizienter Polymermembranen zum Einsatz in der CO<sub>2</sub>-Abtrennung von Rauchgasen</p> <p>Fotokatalytische CO<sub>2</sub>-Reduktion mit Farbstoff sensibilisierten Halbleitern (u. a. TiO<sub>2</sub>)</p>

	Anwendungen im Markt	Forschung und Entwicklung
Ersatz/Minderung toxischer Stoffe	Nanopartikelartige Zusätze für <b>Antifoulinganstriche</b> (z. B. Zinkoxid, Siliziumdioxid) als Ersatz toxischer TBT-Anstriche im Schiffsbau Ersatz toxischer Stoffe durch Nanomaterialien in unterschiedlichen Industrieanwendungen ( <b>Chrom-Ersatz</b> im Korrosionsschutz, <b>Ersatz halogenhaltiger Brandschutzmittel</b> )	<b>Antifoulinganstriche</b> auf Basis nanopartikelartiger Lackzusätze mit kontrollierter Abgabe von Bioziden Nanoverkapselte Wirkstoffe, z. B. in Kapseln aus elektrogenesponnenen Nanofasern zum effizienten und <b>kontrollierten Einsatz von Pestiziden</b> (Vorteil: verminderter Einsatz umweltbelastender Stoffe)

Auch ausserhalb des klassischen Umweltsektors gibt es zahlreiche Entwicklungen der Nanotechnologie in Anwendungsfeldern, die mit potenziellen Umweltentlastungseffekten verbunden sind. Ein Überblick über einige Entwicklungen im Markt bzw. der anwendungsorientierten Forschung ist in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt, die u. a. auch aktuelle Projekte des Nationalen Forschungsprogramms «Chancen und Risiken von Nanomaterialien» (NFP 64) berücksichtigt. In der folgenden Tabelle wird, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, zunächst eine Übersicht von Anwendungsbereichen gegeben, bei denen zumindest aus Plausibilitätsbetrachtungen Umweltentlastungseffekte mit hoher Wahrscheinlichkeit vermutet werden können. Konkrete und insbesondere belastbare Aussagen hierzu bedürfen einer z. T. aufwendigen ökobilanziellen Untersuchung, sodass derzeit nur sehr wenige relevante Informationen verfügbar sind. In Hinblick auf die konkreten Umweltentlastungseffekte wird daher auf Kapitel 7 verwiesen.

**Tabelle 5** *Beispielhafte Übersicht zu branchenspezifischen Anwendungen und Entwicklungen der Nanotechnologie mit erwarteten Vorteilen/Potenzialen im Hinblick auf Umweltentlastungseffekte (Quelle: VDI TZ)*

Anwendungen im Markt		Forschung und Entwicklung
<b>Chemie</b>	<p>Nanoporöse <b>Katalysatorträger</b> für fein verteilte Edelmetallkatalysatoren z. B. in der chemischen Synthese oder der Umwelt- und Energietechnik (Vorteile: Materialeinsparungen und Effizienz durch vergrösserte Oberfläche)</p> <p><b>Schaltbare Klebstoffe</b> auf Basis magnetischer Kern-/Schale-Nanopartikel als Klebstoffzusatz. Durch äussere Magnetfelder können Klebverbindungen punktgenau erwärmt und ausgehärtet werden bzw. durch erhöhten Energieeintrag wieder gelöst werden (Vorteile: Energieeinsparung und verbesserte Rezyklierbarkeit)</p> <p>Nanostrukturierte permanente <b>Trennschichten</b> durch Plasmapolymerisation für Formgebungswerkzeuge in der Kunststoffverarbeitung (Vorteile: Einsparung von Lösemitteln und nasschemischen Trennmitteln)</p>	<p>Herstellung von <b>Chemiegrundstoffen und Energieträgern aus regenerativen Quellen</b> durch katalytische Umwandlung mithilfe nanostrukturierter Elektroden und Materialien (fotokatalytisch, elektrochemisch, chemisch durch Metallkomplexe oder Metallkatalysatoren in ionischen Flüssigkeiten) (Vorteile: Ressourcenschonung, Recycling)</p> <p>Reversible <b>bionische Haft- und Klebverbindungen</b> (Geckoeffekt, Muschelkleber) durch Nutzung adhäsiver Nanostrukturen z. B. auf Basis von Kohlenstoffnanoröhren auf Kunststoffsubstraten (Vorteile: rückstandsfreies, reversibles Kleben, einfache Demontage)</p> <p><b>Schaltbare hydrophobe/hydrophile Beschichtungslösungen</b> auf Basis selbstorganisierender Polysiloxan-Copolymere für neuartige Wasch-, Reinigungs- und Pflegemitteladditive sowie technische Coatings (Vorteile: Einsparung chemischer Reinigungs-/ Desinfektionsmittel)</p>
<b>Optik</b>	<p>Sol-Gel-<b>Antireflexschichten</b> für Glasabdeckungen von Solarzellen (Vorteile: Verbesserung der Lichtausbeute, Energieeffizienz)</p> <p><b>Photonische Kristalle</b> als optische Filterstruktur und Strahlführung, z. B. in der optischen Datenkommunikation (Vorteil: energieeffiziente Datenübertragung)</p>	<p><b>OLED Flächenlichtquellen</b> mit massgeschneiderter Lichtauskopplung zur Realisierung von hocheffizienten und langlebigen Bauelementen im Beleuchtungssektor (Vorteile: Energie- und Materialeinsparungen in der Beleuchtung)</p> <p>Zinkoxid-Nanostäbe mit hoher Quantenausbeute für kostengünstige, grossflächige und flexible <b>UV LED</b>. Deep-UV LEDs auf der Basis von (AlGaIn)N/AlGaN Quantenfilmen (Vorteil: z. B. energieeffiziente Sterilisation/Wasserreinigung)</p>

	Anwendungen im Markt	Forschung und Entwicklung
<b>Bau</b>	<p><b>Nanooptimierter Beton</b> (UHPC etc.) z. B. erhöhte Festigkeit und Korrosionsschutz durch nanoskalige Bindemittelzusätze (Vorteile: Material-/Energieeinsparungen)</p> <p><b>Vakuuminisulationspanele</b> auf Basis von evakuierten nanoporösen Siliziumdioxidkernen (Vorteil: hohe Dämmwirkung bei geringer Dicke, Material-/Energieeinsparung)</p> <p><b>Fotokatalysatoren</b> auf Basis nanopartikulärer Titandioxidbeschichtungen zum Abbau organischer Schadstoffe für Wandfarben, Beton, Straßenbeläge (Vorteil: Reduktion von Schadstoffen)</p>	<p>«Kalt härtende» <b>Keramik</b> durch nanooptimierte mineralische Bindemittelrezepturen und Hochenergiemahlen von Hütten sand für säureresistente, porenfreie Betone, (Vorteile: Ersatz von Zement, korrosionsbeständig, hohe Tragfähigkeit)</p> <p>Nanoporöse <b>Kunststoffschäume</b>, z. B. durch Vernetzung Tensid stabilisierter Mikroemulsionen (Vorteile: hohe Isolationswirkung bei geringer Dicke, Potenzial für kostengünstige Herstellung)</p> <p><b>Leichtbauwerkstoffe und Dämmstoffe</b> aus zellulösen Nanofasern (Vorteile: Ressourceneffizienz, nachwachsende Rohstoffe)</p>
<b>Energie</b>	<p><b>Solarreceiver für die Solarthermie</b> mit optimierter Energieaufnahme und Hitzebeständigkeit durch Nanobeschichtungen von Absorberflächen (Vorteil: energieeffizientere Solarthermie)</p> <p>Nanostrukturierte Schichtverbundsysteme (Gradientenschichten, Haftvermittlung und thermische Barriere durch Plasmaverfahren) als <b>Hitze-schutz für Turbinenschaufeln</b> in Gas- und Dampfkraftwerken (Vorteile: höhere Betriebstemperaturen und Wirkungsgrade)</p> <p>Keramische <b>Antihafschichten</b> für Wärmetauscher/-rohre in Kraftwerken verhindern Verkrustung und sorgen für effizienteren Wärmetausch (Vorteil: Erhöhung der Energieeffizienz)</p> <p><b>Zeolith-Gas-Wärmepumpe</b> mit nanostrukturiertem Zeolithfüllstoff im Wärmetauscher in Kombination mit Gas-Brennwertheizung (Vorteil: Verbesserung des Wirkungsgrades)</p>	<p>Kostengünstige <b>Farbstoffsolarzellen</b> durch Applikation nanobasierter Siebdruckpasten und Rolle-zu-Rolle-Versiegelung mit laminierten Folien (Vorteil: Effizienzsteigerungen)</p> <p><b>Organische Fotovoltaik</b> auf Basis druckbarer Materialien durch kostengünstige Rolle-zu-Rolle-Verfahren (Vorteil: kosteneffizientere regenerative Energieerzeugung)</p> <p>CNT-Polymerkomposite für <b>stabilere Kunststoffrotoren</b> in kleinen Windkraftanlagen; CNT-verstärkte Harze zur mechanischen Verstärkung von Glasfaserkompositen für Leichtbau-Windrotorblätter (Vorteil: effizientere Energieerzeugung)</p> <p>Nanomembranen zur <b>Abtrennung und Speicherung von Kohlendioxid</b> in CCS-Kraftwerken (Carbon-Capture and Storage (CCS), Vorteile: Verwertungs-/ Depositionsmöglichkeit für klimaschädliche Emissionen)</p>

	Anwendungen im Markt	Forschung und Entwicklung
<b>Maschinenbau</b>	<p>Nanostrukturierte Beschichtungen auf der Basis von amorphem Kohlenstoff zur <b>Reibungsreduktion und Trockenschmierung</b> (Vorteil: Vermeidung umweltbelastender Schmierstoffe)</p> <p>Silikatische Schmierölzusätze zur Ausbildung von in-situ-Verschleisschutzschichten in Getrieben/Motoren (Vorteile: höhere Energieeffizienz, längere Lebensdauer)</p>	<p>Siliziumdioxidnanopartikel als Füllstoff für Kunststoffkomposite zur <b>Reibungsmin-derung</b> bei Antriebsgurten und Förderbändern (Vorteil: Energieeinsparungen im Betrieb)</p> <p>Nanotechnologische Titandioxid- und Chitosanschichten mit <b>antimikrobiellen Eigenschaften</b> für Oberflächen in hygienekritischer Produktion z. B. in der Lebensmittel-/Pharmaindustrie (Vorteil: Einsparung an Desinfektionsmitteln)</p>
<b>Automobilindustrie</b>	<p>Metall-Matrix-Werkstoffe für <b>Leichtbaukomponenten</b> in Motoren</p> <p>Verbesserung der Warmfestigkeit durch sprühkompaktierte Magnesiumsilicidnanopartikel in der Aluminiumlegierung (Vorteil: erhöhte Kraftstoffeffizienz)</p> <p><b>Rollwiderstandsoptimierte Gummimischungen</b> für Autoreifen auf Basis nanoskaliger Strukturrisse und Metalloxide (Vorteil: erhöhte Kraftstoffeffizienz)</p> <p>Schlag-/abrasionsfeste Kunststoffver-scheibungen auf Polycarbonatbasis</p> <p>Verbesserung der Witterungs- und Kratzbeständigkeit durch Plasmabeschichtungen mit integriertem UV-Schutz (Vorteile: Leichtbau, erhöhte Kraftstoffeffizienz)</p>	<p><b>Polymernanokomposite</b> auf Basis nanoskaliger Füllstoffe für Karosserieanwendungen z. B. für Stossfänger, Leichtbauheckklappe, Dachmodule, Kotflügel, Karosserieverkleidung (Vorteile: Leichtbau, erhöhte Kraftstoffeffizienz)</p> <p><b>Verbundwerkstoffe</b> aus Multiwalled-Carbon-Nanotubes (MWNT), Leichtmetallen (Mg, Al, Ti) und deren Legierungen (Vorteile: höhere mechanische Festigkeiten, verbesserte thermische, schwingungsdämpfende und tribologische Eigenschaften)</p> <p><b>Verbesserte Abgaskatalysatoren</b> zur Stickstoffreduktion auf Basis nanoskaliger eisenhaltiger Zeolithverbindungen (Vorteile: toxikologisch unbedenklich, Ersatz seltener Rohstoffe)</p>
<b>Landwirtschaft/Ernährung</b>	<p>Verbesserte <b>Formulierungen von Agrochemikalien</b> und Verkapselungen von Wirkstoffen zur Effizienzerhöhung</p> <p><b>Verbesserte Barriereigenschaften</b> von Lebensmittelverpackungen aus Kunststoff durch Nanobeschichtungen oder Nanoschichtsilikate (Vorteile: Gewichtseinsparungen z. B. bei PET-Flaschen sowie längere Haltbarkeit von Lebensmitteln)</p>	<p>Elektrogesponnene Nanofasern als <b>Depot für Wirkstoffe</b> (Pestizide) in der Landwirtschaft (Vorteile: kontrollierte Abgabe, geringerer Pestizideinsatz)</p> <p><b>Nanosensorik</b> für Schnelltests zur Detektion und Identifikation von Schadorganismen sowie zur Überwachung der Lebensmittelqualität (z. B. durch elektronische Nasen)</p>

## 5.2 Übersicht zur Herstellung und Verbreitung von Nanomaterialien

### 5.2.1 Nanomaterialherstellung und -verbreitung in der Schweiz

Für die Analyse der Herstellung und Anwendung von Nanomaterialien in der Schweiz wurde zum einen auf verfügbare Primärdatenquellen zurückgegriffen und zum anderen Hersteller und Anwenderunternehmen anhand öffentlich zugänglicher Datenquellen identifiziert. Eine breit angelegte Studie zur Untersuchung des industriellen Einsatzes von Nanopartikeln in der Schweiz wurde vom Institut für Arbeit und Gesundheit der Universität Lausanne durchgeführt (Swiss Nano-Inventory). Die Studie umfasste eine Pilotstudie sowie eine repräsentative Erhebung bei Unternehmen des produzierenden Sektors in der Schweiz. Gemäss einer Extrapolation aus den Erhebungsdaten waren im Jahr 2007 ca. 1300 Mitarbeiter in rund 600 Unternehmen in der Schweiz mit der Herstellung und Verarbeitung von Nanopartikeln befasst (Schmid und Riediker 2008; Schmid et al. 2010). Die durchschnittliche Verarbeitungsmenge lag für anorganische Nanopartikel bei rund 1,5 Tonnen und für organische Nanopartikel bei rund 500 kg pro Jahr und Betrieb. Als am meisten betroffener Industriezweig konnte die chemische Industrie identifiziert werden. In der Weiterverarbeitung und -verteilung waren aber auch andere Branchen wie Automobil, Handel und Elektrotechnik betroffen. Bei der Erhebung wurden auch Partikel zwischen 0,1 und 1 µm erfasst, mit der Begründung, dass diese in der Regel auch einen nanoskaligen Anteil enthalten. Absolute Produktionsmengen von Nanomaterialien wurden im Rahmen einer Pilotstudie des Swiss-Nano-Inventory erhoben. Die Verarbeitungsmenge von Nanomaterialien bei den 48 teilnehmenden Unternehmen lag bei ca. 2500 Tonnen pro Jahr. Den grössten Anteil daran wies Carbon Black auf (ca. 1400 t/a) gefolgt von Titandioxid (ca. 440 t/a), Eisenoxiden (365 t/a), Polymeren (ca. 100 t/a), Siliziumdioxid (ca. 75 t/a), Zinkoxid (70 t/a), Silber (ca. 3 t/a), Kohlenstoffnanoröhren (1 t/a) und einigen weiteren Nanopartikeln mit einer Verarbeitungsmenge unter einer Jahrestonne.

Vergleichsdaten zur Herstellung und Anwendung von Nanomaterialien in der Schweiz sind aus anderen Quellen kaum verfügbar.

In Bezug auf den Nanosilbereinsatz in der Schweiz kann eine Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt zur Entsorgung nanosilberhaltiger Abfälle in der Textilindustrie als Referenz herangezogen werden. Demnach liegt die Produk-



tionsmenge von Silberverbindungen für antimikrobielle Anwendungen in Textilien in der Schweiz bei einer Tonne pro Jahr. Laut Studie ist die Schweiz damit nach Deutschland der zweitgrösste Hersteller von Silberverbindungen für Textilanwendungen in Europa. Der grösste Anteil dabei sei auf die Anwendung von Silbersalzen zurückzuführen, die z. T. in nanopartikulärer Form vorliegen, während metallisches Nanosilber nur einen geringen Teil ausmache. Die Herstellungsmenge von metallischem Nanosilber für Textilanwendungen werde auf weniger als 0,2 Tonnen im Jahr 2009 in Europa geschätzt. Die Schätzungen für die Verbrauchsmenge von Silber für biozide Zwecke (auch ausserhalb des Textilbereiches) in der Schweiz werden mit 0,1 bis 1 t pro Jahr angegeben, wobei die Form des eingesetzten Silbers nicht näher spezifiziert wird (EPA 2009).

### **5.2.2 Identifikation von Nanomaterialherstellern und -anwendern in der Schweiz**

Durch eine Literatur- und Internetrecherche wurden Nanomaterialhersteller und -anwenderunternehmen in der Schweiz identifiziert, bei denen sich der Einsatz von Nanomaterialien durch öffentlich zugängliche Datenquellen annehmen lässt. Die Untersuchung erfolgte dabei durch Analyse von Herstellerverzeichnissen, Patent-, Marken-, Forschungs- und Produktdatenbanken sowie weiterer verfügbarer Internetquellen. Einschlägige Datenbanken umfassten z. B. das Lieferantenverzeichnis «Wer liefert was?» in der Schweiz ([www.wlw.ch](http://www.wlw.ch)), eine weltweite Datenbank für Nanomaterialhersteller ([www.nanowerk.com](http://www.nanowerk.com)), Patent- und Markendatenbanken des Eidgenössischen Instituts für Geistiges Eigentum, die Produktdatenbank des Woodrow Wilson Centers sowie die Forschungsdatenbank der EU, die hinsichtlich Hinweisen auf Aktivitäten der Herstellung, des Handels sowie der Anwendung von Nanopartikeln untersucht wurden. Im Internetportal «Wer liefert was?» liefert die Suche nach dem Stichwort «nano» insgesamt 13 verschiedene Rubriken mit insgesamt 80 Einträgen, wobei einige Firmen in verschiedenen Kategorien vertreten sind (vgl. Tabelle 6).

**Tabelle 6**      *Nanotechnologierelevante Einträge in der Datenbank «Wer liefert was?» (www.wlw.ch)*

<b>Kategorie</b>	<b>Einträge</b>
Beschichtung mit Nanowerkstoffen	19
Entwicklung von Nanotechnologie	17
Nanobeschichtungsmaterial für die Oberflächenversiegelung	15
Nanopartikel	6
Nanopulver	2
Nanoversiegelung von Fahrzeuglacken	7
Amorphe, nanokristalline Legierungen	1
Druckluftfilter mit Nanofaser-Technologie	5
Nanofiltrationsanlagen	2
Nanofiltrationsmembranen	3
Nanokapseln	1
Nanopartikel für Kosmetika	1
Nanosilber	1

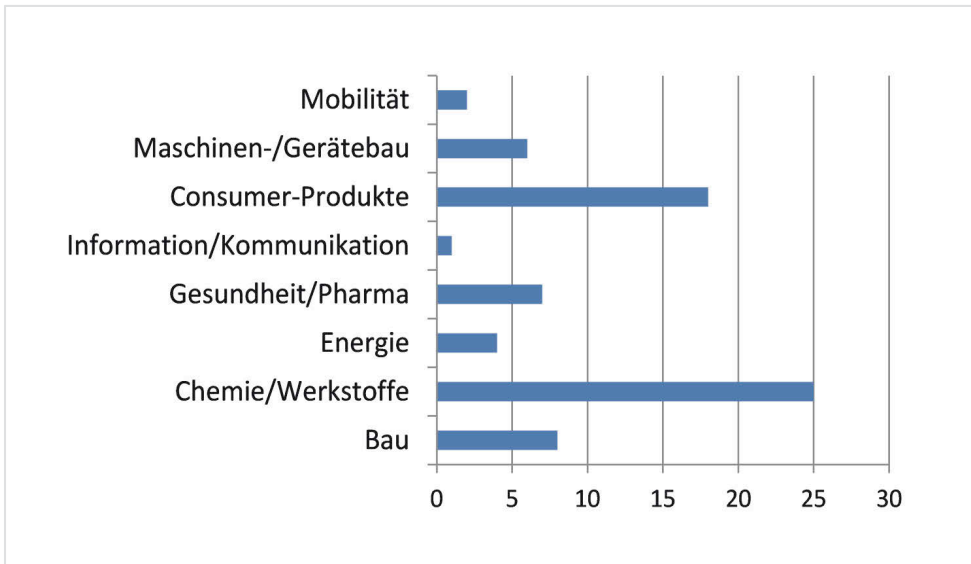
Abzüglich Doppelseinträge konnten aus diesem Datenbestand 20 Unternehmen identifiziert werden, die sich gemäss Firmenprofil und Informationen der Firmenhomepage mit der Herstellung und Verarbeitung von Nanomaterialien befassen. Andere Unternehmen können in die Bereiche Herstellung von Nanoanalytik- und Beschichtungsgeräten sowie dem Dienstleistungsbereich zugeordnet werden (z. B. Auftragsanalytik, Beratung oder Risikobewertung). In der internationalen Nanomaterialherstellerdatenbank [www.nanowerk.com](http://www.nanowerk.com) finden sich weitere ca. 10 Einträge von Schweizer Unternehmen, die Nanomaterialherstellern bzw. -anwendern zugeordnet werden können.

Ergänzende Analysen wurden durch die Auswertung von Patentdatenbanken durchgeführt. Auch wenn nicht jedes Patent per se mit einer kommerziellen Nutzung verbunden ist, gilt die Anmeldung von Patenten als ein relevanter Indikator für die Kommerzialisierung. Um weitere Hinweise auf Unternehmen zu eruieren, die sich mit der Herstellung und Anwendung von Nanomaterialien befassen, wurde daher eine Analyse der Nanotechnologiepatente durchgeführt, bei denen der Erfinder/Anmelder aus der Schweiz stammt. Nanotechnologie-

relevante Patente wurden bei der Recherche durch den Klassifizierungscode B82Y erfasst, der seit 2011 als internationale Patentklassifikation (IPC) von der Weltorganisation für geistiges Eigentum (WIPO) als weltweit einheitliche Klassifikation für die Nanotechnologie rückwirkend eingeführt worden ist. Eingeschränkt wurde die Untersuchung auf einen Anmeldezeitraum ab dem Jahr 2000, um den Fokus auf neue Technologieentwicklungen zu legen. Im Zeitraum von 2000 bis 2011 wurden rund 350 Patentfamilien von Erfindern/Institutionen aus der Schweiz angemeldet. Zu den Schweizer Unternehmen mit den meisten Patentanmeldungen zählen IBM, Ciba (mittlerweile BASF) und Novartis. Einige Firmen mit Patentanmeldungen sind mittlerweile nicht mehr aktiv. Insgesamt konnten rund 20 weitere Unternehmen identifiziert werden, die sich mit Forschung und Entwicklung im Bereich der Nanomaterialien befassen. Die Beteiligung an europäischen Forschungsprojekten wurde ebenfalls zur Identifizierung nanomaterialspezifischer Aktivitäten von Schweizer Unternehmen herangezogen. Im Forschungsprogramm Nanotechnologie/Neue Materialien/Produktion (NMP) des 7. Rahmenprogramms konnten insgesamt 230 Projekteinträge mit Schweizer Beteiligung identifiziert werden. Darunter fanden sich rund zehn Schweizer Unternehmen, die an Projekten mit Nanomaterial basierten Entwicklungen beteiligt waren.

Ergänzt mit Literatur- und Internetrecherchen konnten so aus öffentlichen Quellen rund 60 Schweizer Unternehmen identifiziert werden, die mit der Herstellung und Weiterverarbeitung von Nanomaterialien befasst sind. Dies kann nur als ein unterer Grenzwert für die Abschätzung der Nanomaterialhersteller und -anwender gewertet werden. Je nach Definition des Begriffes Nanomaterialien liesse sich die Liste sicherlich erweitern z. B. durch Unternehmen im Bereich der chemischen Industrie, wie beispielsweise Hersteller und Distributoren von Pigmenten, die gemäss des EU-Definitionsvorschlages wahrscheinlich zu signifikantem Anteil als Nanomaterial aufzufassen sind. Da es sich bei diesen Materialien aber in der Regel um lange etablierte Produktklassen handelt, liegt dieser Aspekt ausserhalb des Fokus der Studie. Die identifizierten Unternehmen dürften zumindest den Kern der Unternehmen mit dezidierten Aktivitäten der Herstellung und Anwendung von Nanomaterialien darstellen. Nicht berücksichtigt worden sind dabei Zulieferer von Nanomaterialien ausserhalb der Schweiz, die ihre Produkte in der Schweiz vermarkten, sowie Unternehmen in der Schweiz, die aus dem Ausland bezogene Nanomaterialien in ihren Produkten einsetzen, ohne dies in der Öffentlichkeit zu kommunizieren.

Die identifizierten Unternehmen sind hinsichtlich Technologie- und Anwendungsfeld charakterisiert worden (s. Tabelle 23 im Anhang). Hauptanwendungsgebiete von Nanomaterialien in der Schweiz sind demnach Chemie und Konsumgüter (vor allem Beschichtungen und Versiegelungen) gefolgt vom Bausektor, Gesundheit/Pharma sowie dem Maschinenbau.



**Abbildung 5** Anwendungsfelder nanomaterialbasierter Entwicklungen und Produkte Schweizer Unternehmen (Quelle: Eigene Erhebung VDI TZ, n=60, Mehrfachnennungen möglich)

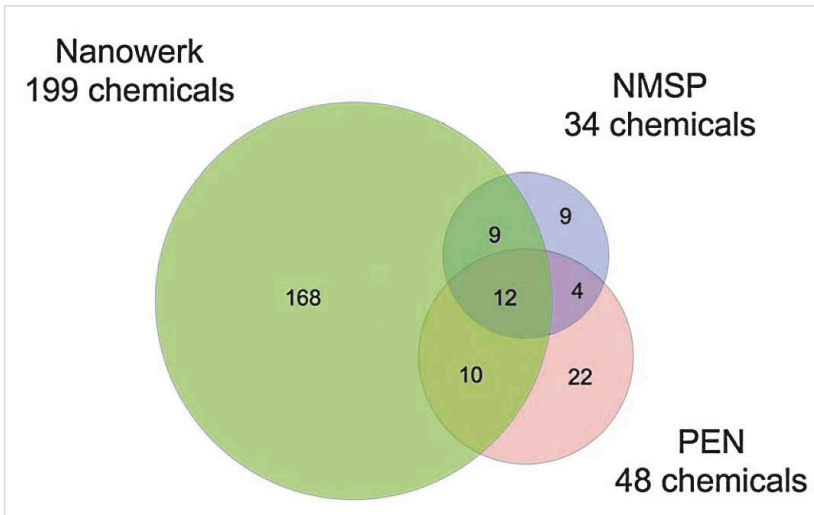
### 5.2.3 Übersicht zu kommerziell verfügbaren Nanomaterialien

Im Folgenden wird über die Untersuchungen in der Schweiz hinaus eine Übersicht zur internationalen Situation der Verbreitung kommerziell relevanter Nanomaterialien gegeben. Unabhängig von der unklaren Definitionslage werden dabei als entscheidende Kriterien für eine Zuordnung die gezielte technische Herstellung sowie technisch nutzbare Eigenschaftsoptimierungen herangezogen.

Bei den industriell relevanten Nanomaterialien handelt es sich in erster Linie um folgende Substanzklassen:

- Metalloxide und -verbindungen wie Siliziumdioxid, Aluminiumoxid, Zinnoxid, Titandioxid, Zinkoxid, Eisenoxid, Ceroxid oder Mischoxide wie Indium- oder Antimonzinnoxid, Metallsalze wie Bariumsulfat,
- nanokristalline Metalle und Metallkolloide (z. B. Silbernanopartikel),
- polymere Nanostrukturen und Komposite (z. B. Polymerdispersionen, Polymernanopartikel, nanopartikelverstärkte Polymere, organische Halbleiter etc.),
- nanoskalige Kohlenstoffmaterialien wie Kohlenstoffnanoröhren und Graphen,
- anorganische Halbleiter (z. B. Quantenpunkte und -drähte),
- anorganisch-organische Hybridmaterialien,
- organische Makromoleküle wie Liposomen und Dendrimere,
- mineralische Nanomaterialien (z. B. Nanoschichtsilikate),
- biologische Nanomaterialien wie DNA- oder Proteincluster.

Untersuchungen der US-amerikanischen EPA im Rahmen des Nanoscale Materials Stewardship Programme (NMSP) haben ergeben, dass rund 250 chemische Substanzen in nanoskaliger Form auf dem Markt verfügbar sind (EPA 2009). Als Quellen wurden dabei die Internetdatenbanken der Firma Nanowerk ([www.nanowerk.com](http://www.nanowerk.com)) und des Woodrow Wilson Centers ([www.nanotech-project.org](http://www.nanotech-project.org)) sowie die von der EPA im Rahmen des NMSP erhobenen Daten herangezogen.



[Übersetzung der Begrifflichkeiten (v.l.n.r.): Nanowerk 199 Chemikalien, NMSP 34 Chemikalien, PEN 48 Chemikalien]

Abbildung 6 Anzahl und die Schnittmengen der in den jeweiligen Quellen erwähnten als Nanomaterial verfügbaren chemischen Substanzen. (Quelle: EPA 2009)

Von den rund 250 chemischen Substanzen konnten über 2000 verfügbare Nanomaterialmodifikationen identifiziert werden, die sich beispielsweise in der Art der Nanostruktur, der Primärpartikelgrösse, dem Agglomerationsgrad, der kristallinen Struktur, der Dotierung oder der Oberflächenmodifikation unterscheiden. Der überwiegende Anteil dieser Nanomaterialien wird lediglich von einzelnen Firmen im Labormassstab erzeugt und ist somit nur für Forschungszwecke relevant. Eine Übersicht über Nanomaterialien, die für Forschungszwecke oder kommerzielle Anwendung auf dem Markt verfügbar sind, findet sich in der folgenden Tabelle. Rein biologische Nanomaterialien bleiben hierbei unberücksichtigt, da sich diese in Bezug auf die Bewertung (öko-)toxikologischer Wirkungen und der Behandlung innerhalb der Chemikaliengesetzgebung signifikant von chemischen Stoffen unterscheiden.

**Tabelle 7** *Kommerziell verfügbare Nanomaterialien (Quellen: Nanowerk Nanomaterial Datenbank, [http://www.nanowerk.com/phpscripts/n\\_dbsearch.php](http://www.nanowerk.com/phpscripts/n_dbsearch.php); BMBF 2009)*

Nanostruktur		Verbindungsklassen	Chemische Zusammensetzung
3 D nano	Nano-partikel	Elemente	Nanopartikel der Elemente Bor, Kohlenstoff, Chrom, Kobalt, Kupfer, Gold, Indium, Eisen, Mangan, Molybdän, Nickel, Niob, Palladium, Platin, Silizium, Silber, Schwefel, Tantal, Zinn, Titan, Wolfram, Zink
		Binäre Verbindungen	Karbide, Nitride, Oxide, Karbonate oder Hydroxide der Elemente Al, Sb, Ba, Bi, B, Ca, Ce, Cr, Co, Cu, Dy, Er, Eu, Ga, Ge, Hf, In, Fe, La, Mg, Mn, Mo, Nd, Ni, Pr, Sm, Si, Tb, Sn, Ti, W, Y, Zr
		Ternäre/komplexe Verbindungen	Mischoxide der Elemente Al, Sb, Ba, Ca, Ce, Co, Cu, Gd, Ga, Au, In, Fe, La, Li, Mg, Mo, Ni, Pt, Rh, Sm, Si, Ag, Sr, Ti, Y, Zn, Zr, Zeolithe, Spinelverbindungen
		Quantenpunkte	Cluster und Nanopartikel der Elemente Tellur, Selen, Sulfide von Cadmium, Indium Zink, Seltenerdverbindungen, biologisch funktionalisierte Quantenpunkte
		Organische Nanopartikel	Polymernanopartikel, Polymerdispersionen, mikronisierte Wirkstoffe, Vitamine etc.
		Makromoleküle	Fullerene (reine Kohlenstofffullerene, funktionalisierte und dotierte Fullerene) Organische Makromoleküle (Dendrimere, Cyclodextrine)
		Nanoschalen/-hohlkörper	Anorganisch (z. B. Au oder Si), organisch (z. B. Liposome, Micellen etc.)
2 D nano	Nano-fasern/-drähte	Nanodrähte, Metalle und Halbleitermaterialien	(z. B. Au, In, Pb, Ag, Zn, ZnO etc.)
		Nanofasern	Polymere, Kohlenstoff
	Nano-röhren	Kohlenstoffnanoröhren	Einwandige und mehrwandige Kohlenstoffnanoröhren, chemisch funktionalisierte Varianten

Nanostruktur		Verbindungsklassen	Chemische Zusammensetzung
1 D nano	Nano-plättchen	Komplexe Schichtsysteme	Schichtsilikate: Montmorillonit, Kaolinit, synthetische Schichtsilikate etc.
		Plättchen aus einzelnen Moleküllagen	Kohlenstoff: Graphene

Weniger als die Hälfte der identifizierten chemischen Substanzen (ca. 90) werden von der EPA in nanoskaliger Form als kommerziell relevant eingestuft (EPA 2009). Es ist anzunehmen, dass weniger als 20 chemische Substanzen derzeit in industriellem Massstab hergestellt werden. Die OECD hat im Jahr 2007 folgende 13 Stoffe als Nanomaterialien mit der grössten industriellen Bedeutung bzw. Potenzial eingestuft und im Rahmen der Aktivitäten der Working Party on Manufactured Nanomaterials bezüglich möglicher Umwelt- und Gesundheitsaspekte untersucht:

- Aluminiumdioxid
- Cerdioxid
- Siliziumdioxid
- Zinkoxid
- Titandioxid
- Eisen und Eisenoxid
- Silbrenanopartikel
- Goldnanopartikel
- Einwandige Kohlenstoffnanoröhren (CNT)
- Mehrwandige CNT
- C60-Fullerene
- Dendrimere
- Nanoschichtsilikate

Die erwähnten Nanomaterialien sind in sehr vielen unterschiedlichen Varianten hinsichtlich Partikelgrössenverteilung, Kristallstruktur, Morphologie sowie der Oberflächenfunktionalisierung auf dem Markt verfügbar. Diese Materialvarianten können sich sowohl hinsichtlich ihrer technisch nutzbaren als auch der toxikologischen Eigenschaften signifikant unterscheiden. Aktuelle Studien deuten darauf hin, dass insbesondere die Oberflächenfunktionalisierung von Nanopartikeln einen wesentlichen Einfluss auf die toxikologischen Eigenschaften des Materials



ausüben kann (Suresh et al. 2012). Oberflächenmodifizierungen sind vor allem bei Metall- und Metalloxidnanopartikeln üblich, um Agglomeration einzuschränken bzw. deren Löslichkeit zu erhöhen. Für die Beschichtung werden eine Vielzahl anorganischer (z. B. Siliziumdioxid), organischer (z. B. Amino-, Polyol-, Carboxylverbindungen) oder biologischer Substanzen (z. B. Polysaccharide, Proteine) eingesetzt (Neouze und Schubert 2008).

#### **5.2.4 Abschätzung weltweiter Marktvolumina**

Um die Einschätzungen mit quantitativen Zahlen zu unterlegen, wurden einschlägige Marktstudien in Bezug auf Nanomaterialien ausgewertet. Für das derzeitige Weltmarktvolumen von Nanomaterialien sowie die Marktentwicklung existieren einige z. T. erheblich differierende Abschätzungen. Der derzeitige Weltmarkt an Nanomaterialien wird von verschiedenen Marktforschungsinstitutionen in einer Größenordnung von ca. 2 bis 12 Milliarden US-Dollar eingeschätzt. Die Abweichungen sind in erster Linie durch die unscharfe Abgrenzbarkeit und Definition von Nanomaterialien begründet. Weitgehend konsistent sind die Einschätzungen für die künftige Entwicklung des Nanomaterialweltmarktes, dem ein starkes Wachstum in den nächsten Jahren prognostiziert wird. Die durchschnittliche jährliche Steigerungsrate für den Gesamtmarkt an Nanomaterialien wird in den nächsten Jahren bei ca. 15–20 Prozent angenommen. Für einige Nanomaterialien wie einwandige Kohlenstoffnanoröhren werden Wachstumsraten von über 100 Prozent erwartet.

**Tabelle 8**      *Übersicht zu Abschätzungen von Marktvolumina von Nanomaterialien (Quelle: BMBF 2011)*

Marktsegment	Weltmarktvolumen (Bezugsjahr)		CAGR <sup>37</sup>
Gesamtmarkt Nanomaterialien (Nanopartikel, -hohlkörper, -fasern, -komposite, -beschichtungen)	12 Mrd. \$ (2011)	20 Mrd. \$ (2015)	15%
Nanomaterialien (nanostrukturierte Metalloxid-/Metallpulver/-partikel, Nanoröhren, Makromoleküle, Quantenpunkte, mineralische Nanomaterialien)	2,5 Mrd. \$ (2011)	34 Mrd. \$ (2025)	20%
Metalloxidnanopulver	2,9 Mrd. \$ (2009)	9,8 Mrd. \$ (2017)	16%
• Titandioxidnanopulver	360 Mio. \$ (2009)	1,5 Mrd. \$ (2017)	20%
Kohlenstoffnanoröhren	167 Mio. \$ (2010)	1 Mrd. \$ (2014)	56%
• SWCNT	1 Mio. \$ (2010)	70 Mio. \$ (2014)	189%
• MWCNT	161 Mio. \$ (2010)	865 Mio. \$ (2014)	52%
• Few Wall CNT	6 Mio. \$ (2010)	63 Mio. \$ (2014)	80%
Polymer-Nanokomposite	460 Mio. \$ (2009)	1,4 Mrd. \$ (2014)	27%
• Nanokeramik gefüllte Komposite	48 Mio. \$ (2009)	145 Mio. \$ (2014)	25%
• Nanoschichtsilikat-Komposite	227 Mio. \$ (2009)	692 Mio. \$ (2014)	20%
• Sonstige Nanopolymerkomposite (Füllstoffe CNT, Metallnanopartikel, Nanobiokomposite)	185 Mio. \$ (2009)	835 Mio. \$ (2014)	35%
Nanoschichtsilikate (Anwendungen als Brandschutz und Gasdiffusionsbarriere)	202 Mio. \$ (2009)	291 Mio. \$ (2015)	6%
Quantenpunkte (optoelektronische und biomedizinische Anwendungen)	67 Mio. \$ (2010)	670 Mio. \$ (2015)	59%
Metallkolloide (inklusive Nanosilber)	200 Mio. € (2010)	k.A.	k.A.
Gold-Biokonjugate	100 Mio. € (2010)	k.A.	k.A.

<sup>37</sup> CAGR: Component Annual Growth Rate.

Marktsegment	Weltmarktvolumen (Bezugsjahr)		CAGR <sup>37</sup>
	2010	2017	
Nanofasern	80 Mio. \$	334 Mio. \$	23%
Elektroaktive Polymere (elektrisch leitfähige Polymere, organische Leiter und Halbleiter)	k.A.	2,8 Mrd. \$	k.A.

Die Marktanalysen bestätigen die Einschätzung, dass Metalloxidnanopulver derzeit mit Abstand die grösste Marktrelevanz von den derzeit verfügbaren Nanomaterialien aufweisen. Nach Abschätzungen einer russischen Marktforschungsinstitution umfassen Metalloxide ca. 80 Prozent des weltweiten Marktes für anorganische Nanopulver (s. folgende Abbildung).

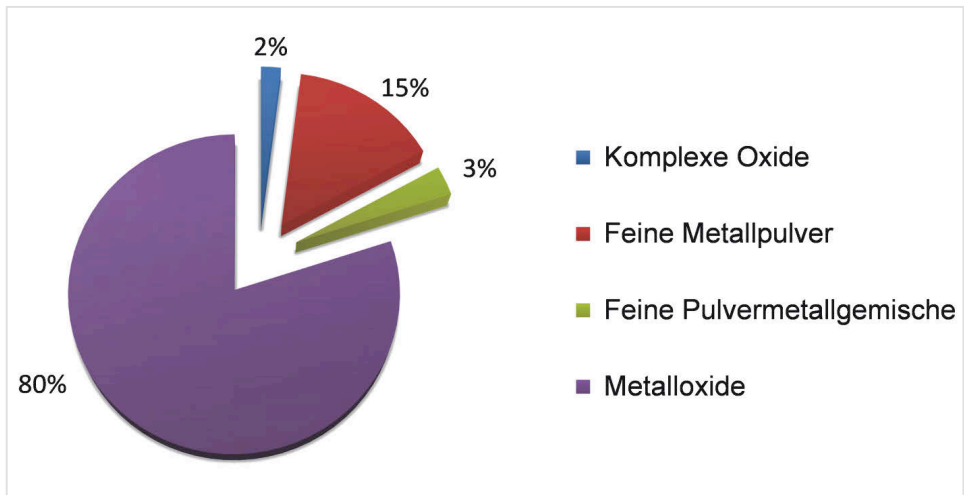


Abbildung 7 Marktanteile unterschiedlicher Materialklassen am Weltmarkt für Nanopulver (Quelle: Abercade Research Company)<sup>38</sup>

Andere Substanzklassen wie Kohlenstoffnanoröhren weisen zwar hohe Steigerungsraten auf, allerdings wachsen in diesem Segment die Produktionskapazitäten schneller als der Absatzmarkt. Die Auslastung der Produktionskapazitäten

<sup>38</sup> [www.abercade.ru/en/materials/industrynews/443.html](http://www.abercade.ru/en/materials/industrynews/443.html) (Internetabruf Februar 2012).

von MWCNT von weltweit derzeit ca. 3000 Tonnen wird auf ca. 10–30 Prozent und der weltweite Bedarf auf unter 200 Tonnen geschätzt (Lux Research 2011).

### 5.2.5 Abschätzung weltweiter Produktionsvolumina

Ähnlich wie bei den Marktvolumina bestehen auch bei der Abschätzung von Produktionsmengen von Nanomaterialien Schwierigkeiten aufgrund der unklaren definitorischen Abgrenzbarkeit. Die Marktforschungsinstitution Future Markets schätzt das Weltproduktionsvolumen von Nanomaterialien auf 20 000 bis 30 000 Tonnen für das Jahr 2010 und prognostiziert für das Jahr 2016 einen Anstieg auf über 40 000 Tonnen.<sup>39</sup> Derartige Abschätzungen sind allerdings nur im Kontext der tatsächlich betrachteten Materialklassen aussagekräftig. Werden beispielsweise Industrierusse (Carbon Black) oder andere Pigmente wie Titandioxid den Nanomaterialien zugerechnet, läge das Produktionsvolumen allein für diese beiden Stoffe bei mehreren Millionen Tonnen pro Jahr (Gagro 2011).

Bezüglich einzelner Nanomaterialien liegen dezidierte Abschätzungen der Produktionsvolumina vor, die zum Teil aber in erheblichem Masse differieren, was vermutlich auch auf die oben angesprochene Definitionsproblematik zurückzuführen ist. Eine Übersicht über Abschätzungen von Produktionsvolumina für verschiedene Nanomaterialien bietet die nachfolgende Tabelle. Besonders hohe Wachstumsraten werden im Bereich der Kohlenstoffnanomaterialien wie Kohlenstoffnanoröhren oder Graphen erwartet. Bezogen auf das Produktionsvolumen für Rohmaterialien prognostiziert Lux Research einen Anstieg auf jeweils rund 1000 Tonnen pro Jahr für beide Materialklassen bis zum Jahr 2020 (Lux Research 2011).

---

<sup>39</sup> Future Markets 2011: Nanomaterials Production 2002–2016: Production Volumes, Revenues and End User Market Demand, Marktreport Abstract, [www.researchandmarkets.com/product/af5b5f/nanomaterials\\_production\\_20022016\\_production](http://www.researchandmarkets.com/product/af5b5f/nanomaterials_production_20022016_production).

**Tabelle 9**      *Übersicht zu Abschätzungen von Produktionsvolumina verschiedener Nanomaterialien*

Nanomaterial	Produktionsvolumen* in Tonnen p.a.	Bezugsjahr	Quelle
SiO <sub>2</sub>	1 590 000	2009	METI 2009 <sup>40</sup>
TiO <sub>2</sub>	700–61 000 50 000 44 000 (nur USA) 1450 (nur Japan)	2007/2008 2010 2008 2009	Nowack 2011 <sup>41</sup> Future Markets 2011 <sup>42</sup> Robichaud 2009 <sup>43</sup> METI 2009
ZnO	20–10 000 480 (nur Japan)	2007/2008 2009	Nowack 2011 METI 2009
CeO <sub>2</sub>	10 000	2010	Kang 2010 <sup>44</sup>
Al-oxide	100	2003	Kearns 2004 <sup>45</sup>
ZrO <sub>2</sub>	2500	2010	Fink 2002 <sup>46</sup>
Metalle	20	2007	Landsiedel 2010 <sup>47</sup>
Silber	4–560	2005/2008	Nowack 2011
Quantum dots	< 100 kg	2001	Sanderson 2009 <sup>48</sup>

<sup>40</sup> Ministry of Economy, Trade and Industry (METI): The Expert Meeting on Safety Measures for Nanomaterial Manufactures etc., Report, 2009.

<sup>41</sup> Nowack, B.: Nanomaterials in the Environment: Life Cycle Aspects; Environmental Nanotechnologies, 7-8 July 2011, Aix en Provence, France; [http://eccorev.cerege.fr/IMG/pdf/Aix\\_Nowack.pdf](http://eccorev.cerege.fr/IMG/pdf/Aix_Nowack.pdf).

<sup>42</sup> Future Markets 2011: The World market for nanoparticle titanium dioxide; Marktreport Abstract; [www.futuremarketsinc.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=38&Itemid=44](http://www.futuremarketsinc.com/index.php?option=com_content&view=article&id=38&Itemid=44).

<sup>43</sup> Robichaud et al.: Estimates of Upper Bounds and Trends in Nano-TiO<sub>2</sub> Production as a Basis for Exposure Assessment, Environ. Sci. Technol., 2009, 43(12), S. 4227–4233.

<sup>44</sup> Kang, H.-Y.: Chemical Information Call-in Candidate Nano Cerium Oxide, Public Workshop Nanotechnologies and Chemical Information Call-in, California Department of Toxic Substances Control 22 September 2010, San Francisco.

<sup>45</sup> Kearns, M.: Development and applications of ultrafine aluminium powder; Materials Science and Engineering: A Volumes 375–377, 15 July 2004, S. 120–126.

<sup>46</sup> Fink, U., Davenport, R.E., Bell, S.L. and Ishikawa, Y.: Nanoscale chemicals and materials: An overview on technology, products and applications SRI-International Report – Speciality Chemicals: Nanotechnology, 2002.

<sup>47</sup> Landsiedel, R., Ma-Hock, L., Kroll, A., Hahn, D., Schnekenburger, J., Wiench, K. and Wohlleben, W.: Testing metal-oxide nanomaterials for human safety, Adv. Mater., 2010, 22, S. 1–27.

Nanomaterial	Produktionsvolumen* in Tonnen p.a.	Bezugsjahr	Quelle
NanoClays	9000	2007	Martin 2008 <sup>49</sup>
CNT (gesamt)	140–150 120–140 ca. 750	2004/2006–2008 2009 2011	Nowack 2011 METI 2009 Nanowerk 2011 <sup>50</sup>
Graphen	15	2007	Landsiedel 2010
Fullerene	0,2–10 3	2002/2005/2008 2009	Nowack 2011 METI 2009

\* Die z. T. stark differierenden Angaben zu den Produktionsvolumina sind auch durch unterschiedliche Definitionsansätze von Nanomaterialien bedingt.

Ob diese Prognosen eintreten, ist angesichts der bisherigen Erfahrungen bei der Markteinführung neuer Materialklassen wie Fullerenen oder Kohlenstoffnanoröhren zumindest zweifelhaft. Die hierbei zu beachtenden Herausforderungen wie die kontrollierte und definierte Herstellung von Nanomaterialien, die Aufskalierung von Produktionskapazitäten, die Anpassung an Weiterverarbeitungsschritte in der Industrie, ungeklärte Sicherheitsaspekte sowie der Nachweis eines verbesserten Preis-Performance-Verhältnisses können die Vermarktung eines Nanomaterials erheblich verzögern.

### 5.2.6 Übersicht zum industriellen Einsatz von Nanomaterialien in Vergleichsländern

Informationen zur industriellen Anwendung von Nanomaterialien in Vergleichsländern lassen sich in erster Linie aus Untersuchungen zu Arbeitsschutzaspekten im Umgang mit Nanomaterialien ableiten. Entsprechende Untersuchungen

<sup>48</sup> Sanderson, K.: Quantum dots go large; Nature, 2009, 459(7248), S. 760–761.

<sup>49</sup> Martin, D., Minchin, R., Smith, S., Xu, Z.P., Carrado, K., Musumeci, A. and Broadhurst, G.: Layered inorganic nanoparticles (clays) – Towards a better understanding of biological interactions, ARC-NSF Nanotechnology workshop AIBN, 22nd February 2008; [www.aibn.uq.edu.au/Download/NSF/Darren\\_Martin\\_AIBN.pdf](http://www.aibn.uq.edu.au/Download/NSF/Darren_Martin_AIBN.pdf).

<sup>50</sup> Nanowerk: Global carbon nanotubes market – industry beckons; October 20th 2011; <http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=23118.php>.

sind beispielsweise in Deutschland, in Frankreich, Grossbritannien, den Niederlanden, Österreich und Dänemark durchgeführt worden. Eine deutsche Studie der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) aus dem Jahr 2008 hat 45 Unternehmen in Deutschland identifiziert, die Nanomaterialien herstellen und verarbeiten.<sup>51</sup> Bezogen auf die gewählte Stichprobe von 650 Unternehmen lässt sich daraus eine Gesamtzahl mit Nanomaterialien befasster Unternehmen in Deutschland auf rund 130 hochrechnen (Stand 2008). Aufgrund der hohen Dynamik im Bereich der Nanotechnologie in Deutschland ist aktuell von einer deutlich höheren Zahl an Unternehmen auszugehen, die mit Nanomaterialien arbeiten. Die Mehrzahl der beteiligten Unternehmen verarbeiten Nanomaterialien in einer Menge von unter 100 kg pro Jahr. Nur drei Unternehmen gaben an, Nanomaterialien mit einem Produktionsvolumen von über 1000 Tonnen pro Jahr herzustellen. Eine französische Studie des Institut national de recherche et de sécurité (INRS) berichtet, dass in Frankreich rund 700 Arbeitnehmer/innen in der Produktion und 3200 Arbeitnehmer/innen in der Verarbeitung von Nanopartikeln tätig sind. Von den identifizierten Nanomaterialien wiesen Carbon Black und Siliziumdioxid die höchsten Produktionsvolumina mit mehr als 50 000 Jahrestonnen auf, gefolgt von Titandioxid und Kalziumkarbonat (zwischen 5000 und 50 000 Jahrestonnen) und Ceroxid, Eisenoxid, Aluminiumoxid und organischen Pigmenten (< 5000 Jahrestonnen).<sup>52</sup> Derzeit plant Frankreich die Einführung eines verpflichtenden Meldesystems für Nanomaterialien, die in Frankreich ab einer Produktionsmenge von 100 g pro Jahr vermarktet werden, wobei die Daten von den Behörden vertraulich behandelt werden sollen.<sup>53</sup> In Grossbritannien hat das Ministerium für Umwelt, Nahrung und Landwirtschaft (DEFRA) verschiedene Aktivitäten zur Einschätzung der Verbreitung von Nanomaterialien initiiert. In einer Studie von 2005 wurden rund 20 Nanomaterialher-

---

<sup>51</sup> Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA): Exposure to Nanomaterials in Germany: Results of the corporate survey of the Federal Institute for Occupational Health and Safety (BAuA) and the Association of the Chemical Industry (VCI) using questionnaires, BAuA 2008;

[http://www.baua.de/de/Themen-von-A-](http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/Nanotechnologie/pdf/Survey.pdf?__blob=publicationFile&v=3)

[Z/Gefahrstoffe/Nanotechnologie/pdf/Survey.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/Nanotechnologie/pdf/Survey.pdf?__blob=publicationFile&v=3).

<sup>52</sup> Institut national de recherche et de sécurité (INRS): Production and use of nano-objects in France, Präsentation B. Honnert, IVSS Kolloquium Nanotechnologie, 4./5.10.2010; [www.issa.int/ger/News-Events/Events/Nanotechnology-risks-and-opportunities](http://www.issa.int/ger/News-Events/Events/Nanotechnology-risks-and-opportunities).

<sup>53</sup> Maurer, L.: French mandatory reporting scheme on nanomaterials, presentation at the workshop «Working with nanomaterials», Brüssel, 29.11.2011.

steller in Grossbritannien identifiziert.<sup>54</sup> Weitere Aktivitäten umfassten die Einführung eines freiwilligen Meldesystems, das allerdings eine geringe Beteiligung aufwies und lediglich 13 Einträge von Nanomaterialherstellern registrierte.<sup>55</sup> In Österreich wurde eine fallstudienbasierte Untersuchung durchgeführt, bei der sieben Unternehmen hinsichtlich ihrer Aktivitäten bei der Herstellung und Verarbeitung von Nanomaterialien detailliert charakterisiert worden sind. Bei den beteiligten Unternehmen lag die Verarbeitungsmenge zum Grossteil unterhalb einer Jahrestonne. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass die Nanomaterialnutzung in Österreich überwiegend noch dem Bereich Forschung und Entwicklung zuzuordnen ist.<sup>56</sup> In Dänemark wurde im Jahr 2010 eine Erhebung bei Unternehmen mit Nanotechnologieaktivitäten durchgeführt, um Informationen über die wichtigsten Anwendungsfelder von Nanomaterialien zu erhalten. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass nach Angaben der Unternehmen lediglich Titandioxid, Siliziumdioxid und Nanoschichtsilikate in signifikanten Mengen in Dänemark eingesetzt werden. Die Anwendung von Nanosilber und Nanoceroxid konnte nicht bestätigt werden.

Auf internationaler Ebene wurden im Rahmen der OECD Working Party on manufactured Nanomaterials Erhebungen in Bezug auf den industriellen Einsatz von Nanomaterialien in beteiligten Ländern durchgeführt. Insgesamt von acht beteiligten Ländern wurden Angaben hinsichtlich der Art und Menge der eingesetzten Nanomaterialien im jeweiligen Land erhalten. Die Teilnahmequote wurde als niedrig bis sehr niedrig bezeichnet. Ergebnisse der Befragung sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

---

<sup>54</sup> Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA): A scoping study into the manufacture and use of nanomaterials in the UK, 2005; <http://archive.defra.gov.uk/environment/quality/nanotech/documents/nano-manufacture.pdf>.

<sup>55</sup> <http://archive.defra.gov.uk/environment/quality/nanotech/policy.htm>

<sup>56</sup> Bundesministerium für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz: Umgang mit nano im Betrieb, Erfahrungen aus Fallstudien in Österreich. Wien, Dezember 2009.



**Tabelle 10** *Ergebnisse einer OECD-Erhebung zu Herstellern und Produktionsvolumina von Nanomaterialien. Daten aus der tschechischen Republik wurden aufgrund mangelnder Vergleichbarkeit nicht berücksichtigt (Quelle: OECD 2011)*

Nanomaterial	Länder	Hersteller	Hersteller > 1 t/a	Anwendungsfelder
Aluminiumoxid	4	6	3	F&E; industrielle Anwendungen, Kosmetika, Konsumentenprodukte
Carbon Black	4	10	> 3	industrielle Anwendungen, Konsumentenprodukte
Carbonnanotubes (MW)	2	14	n.s.	F&E; industrielle Anwendungen
Carbonnanotubes (SW)	2	5	n.s.	F&E; industrielle Anwendungen
Ceroxid	4	4	1	industrielle Anwendungen, Konsumentenprodukte
Fullerene	3	8	0	F&E; industrielle Anwendungen, Kosmetika
Eisen	2	n.s.	n.s.	F&E; industrielle Anwendungen, Konsumentenprodukte
Eisenoxide	3	6	2	F&E; industrielle Anwendungen, Konsumentenprodukte, Kosmetika
Nanoclay	3	3	n.s.	industrielle Anwendungen, Lebensmittel, Konsumentenprodukte
Pharmaceutical Actives	2	3	0	F&E
Silikate	2	3	n.s.	industrielle Anwendungen, Lebensmittel, Konsumentenprodukte
Siliziumdioxid	4	11	3	industrielle Anwendungen, Lebensmittel, Konsumentenprodukte, Pestizide, Kosmetika
Silber-Nanopartikel	4	7	n.s.	industrielle Anwendungen, Konsumentenprodukte

Nanomaterial	Länder	Hersteller	Hersteller > 1 t/a	Anwendungsfelder
Titandioxide	6	25	8	F&E; industrielle Anwendungen, Konsumentenprodukte, Kosmetika
Zinkoxid	5	15	3	F&E; industrielle Anwendungen, Konsumentenprodukte, Kosmetika

(n.s. = nicht spezifiziert)

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Datenbasis in Bezug auf die Mengenströme bei der Herstellung und Anwendung von Nanomaterialien aufgrund der unklaren Definition sowie der z. T. geringen Beteiligung der Industrie an freiwilligen Erhebungen noch relativ unvollständig ist. Künftig könnte sich die Datenlage in Bezug auf die Vermarktung von Nanomaterialien in Europa durch die Einführung eines Nanomaterialregisters der europäischen Chemikalienagentur (European Chemicals Agency – ECHA) verbessern, das auf den Informationen der Registrierungs dossiers unter der REACH-Verordnung und Notifizierungen unter der CLP-Verordnung basieren soll. Nach Angaben der ECHA liegen aktuell 50 bis 60 REACH Registrierungs dossiers mit spezifischen Informationen zu Nanomaterialien vor, die derzeit vom Joint Research Centre der Kommission in ISPRA ausgewertet werden.<sup>57</sup> Weitere Massnahmen wie Kennzeichnungspflichten und verpflichtende Produktregister werden in einzelnen Ländern wie auf EU-Ebene diskutiert.

### 5.3 Zwischenfazit

Nanomaterialien sind weltweit ein Wachstumsmarkt. Abschätzungen für das Weltmarktvolumen von Nanomaterialien liegen derzeit in einer Spanne zwischen ca. 2 und 15 Milliarden US-Dollar. Bezüglich der weltweiten Produktionsmenge liegen die Abschätzungen zwischen einigen Zehntausend bis zu einigen Hun-

<sup>57</sup> Pressemitteilung vom 17.5.2011: ECHA Preparing Nano Inventory from REACH and CLP Submissions;  
<http://nanotech.lawbc.com/2011/05/articles/international/echa-preparing-nano-inventory-from-reach-and-clp-submissions>.

derttausend Tonnen pro Jahr. Die nach wie vor nicht eindeutige definitorische Abgrenzbarkeit erschwert die Quantifizierung der Herstellung und Anwendung von Nanomaterialien. Als industriell relevant werden derzeit maximal 20 bis 30 chemische Substanzklassen eingeschätzt. Die Zahl der im Labormassstab verfügbaren Nanomaterialien liegt wesentlich höher und umfasst derzeit über 250 chemische Substanzklassen mit einigen Tausend Nanomaterialmodifikationen.

Die Datenbasis hat sich in den letzten Jahren durch Studien zur Verwendung von Nanomaterialien in der Industrie in verschiedenen Ländern deutlich erweitert. Allerdings basieren die Einschätzungen bislang auf freiwilligen Angaben von Herstellern und Anwendern, und die Beteiligung an freiwilligen Massnahmen zur Produktregistrierung war bislang eher gering. Künftig werden zusätzlich Informationen aus den Registrierungsdossiers und CLP-Einstufungen der ECHA zur Verfügung stehen, sodass sich die Datenlage weiter verbessern wird. Mit dem EU-Vorschlag von 2011 zur Definition von Nanomaterialien ist ein erster Schritt für eine praktikable Nachverfolgung erfolgt. Im nächsten Schritt sind technisch und wirtschaftlich handhabbare Nachweismethoden zu entwickeln und international abzustimmen. Im Bereich der Kosmetika und der Lebensmittelinhaltsstoffe wird sich die Transparenz durch die Einführung einer verpflichtenden Kennzeichnung in den nächsten Jahren erhöhen.

Die Schweiz ist im Gegensatz zu Ländern wie den USA, Deutschland oder Japan kein Standort, an dem Nanopulver wie Titandioxid, Zinkoxid oder Carbon Black im grossvolumigen Industriemassstab hergestellt werden. In der Schweiz überwiegen die Herstellung und Applikation von Nanopartikeln für spezifische Anwendungsbereiche wie z. B. Beschichtungen, Konsumgüter oder Pharmaka. Für die Schweiz lieferte die Nanoinventory-Studie des Instituts für Arbeit und Gesundheit der Universität Lausanne eine erste quantitative Grundlage für die Einschätzung des Ausmasses des Nanomaterialeinsatzes. Aus den Resultaten einer Pilotstudie ergab sich hierbei eine pro Jahr verarbeitete Menge an Nanomaterial von ca. 2500 Tonnen (Stand 2007). Auf Basis einer repräsentativen Erhebung wurde die Zahl der Unternehmen, die Nanomaterialien entlang der Wertschöpfungskette in verschiedenen industriellen Anwendungsfeldern verarbeiten, auf rund 600 geschätzt. Inwieweit diese Zahlen vor dem Hintergrund der neuen EU-Definition relevant sind, ist schwer zu sagen. Bei den in der Schweiz verwendeten Nanomaterialien handelt es sich überwiegend um anorganische Pigmente. In diesem Marktsegment sind in den nächsten Jahren moderate Zuwächse zu erwarten, wobei anzunehmen ist, dass der Anteil nanoskaliger

Varianten überproportional ansteigt. Im Bereich des Nanosilbers ist für die Schweiz von einer Verarbeitungsmenge von unter einer Tonne auszugehen. Im Rahmen der eigenen Untersuchungen konnten aus öffentlichen Datenquellen rund 60 Unternehmen in der Schweiz identifiziert werden, die sich mit der Herstellung und Anwendung von Nanomaterialien befassen. Unternehmen, die Nanomaterialien in nachfolgenden Verarbeitungsschritten der Wertschöpfungsstufe einsetzen, sind dabei nicht systematisch erfasst.

Die Anzahl der Unternehmen mit Nanomaterialaktivitäten ist stark davon abhängig, welche Definition für Nanomaterialien herangezogen wird und welche Stufen der Wertschöpfung betrachtet werden. Es ist möglich, dass sich gemäss der neuen EU-Definition die Zahl der Unternehmen, die als Nanomaterialhersteller eingestuft werden, deutlich erhöht. Nach Einschätzung der chemischen Industrie könnte das Kriterium eines 50-prozentigen Anteils von Nanoobjekten bezogen auf die Anzahlverteilung der Primärpartikel einen Grossteil lange etablierter Pigmentverbindungen betreffen. Belastbare Aussagen lassen sich aber erst treffen, wenn entsprechende standardisierte Messverfahren und -vorschriften zur Überprüfung des Kriteriums etabliert worden sind. Die Anzahl der Unternehmen würde ebenfalls höher ausfallen, wenn alle Unternehmen gezählt werden würden, die bereits in Komponenten integrierte Nanomaterialien bis zum Endprodukt weiterverarbeiten. Um belastbare Aussagen in Bezug auf diese Materialflusskette treffen zu können, liegen allerdings zu wenige öffentlich verfügbare Informationen vor.

Im Konsumentenbereich konnten rund 100 Nanoprodukte identifiziert werden, die in der Schweiz hergestellt oder vertrieben werden. Rund drei Viertel der Produkte beziehen sich auf schmutz-, öl- und wasserabweisende Oberflächeneigenschaften («Nanoeffekt»), wobei eine Verwendung von Nanomaterialien nicht spezifiziert ist. Rund 20 Prozent der genannten Nanoprodukte enthalten nach Einschätzung der Handelsketten freie Nanopartikel, wobei vor allem titandioxidhaltige Sonnenschutz- und Pflegecremes, aber auch Versiegelungsprodukte betroffen sind. In Bezug auf Gefährdungsabschätzungen sind insbesondere die Anwendungen relevant, bei denen Nanopartikel in ungebundener Form im Produkt vorliegen (z. B. in Aerosolsprays oder Kosmetika), ferner auch Produkte, bei denen freie Nanopartikel im Verlauf des Produktlebenszyklus freigesetzt werden können (z. B. Nanosilber in Textilien).

Als relevanteste Nanomaterialien für den Schweizer Markt sind nanostrukturierte Metalloxidpulver wie Siliziumdioxid, Titandioxid und Zinkoxid, Kohlenstoffnanoröhren sowie mit Bezug auf Konsumentenprodukte auch Nanosilber zu nennen.

## 6 Überblick über die aktuelle Forschungslandschaft zur Risikobewertung

Im vorliegenden Kapitel wird ein Überblick über die Forschungslandschaft zur Sicherheitsbewertung von Nanomaterialien in der Schweiz sowie eine Einbindung in internationale Aktivitäten gegeben. Abgeleitet aus der Analyse relevanter Review-Studien und Forschungsberichte wurde der aktuelle Stand der Risikoforschung beleuchtet sowie zukünftige Forschungsfragen aufgezeigt. Die Ergebnisse bieten eine Grundlage zur Identifikation relevanter Nanomaterialien und Anwendungsfelder für vertiefende Analysen in den nachfolgenden Kapiteln.

Die Forschung zu Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsaspekten von Nanomaterialien hat in den letzten Jahren stark an Intensität zugenommen. Eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten und -projekten sind in den letzten Jahren auf nationaler, europäischer (u. a. innerhalb des 6. und 7. EU-Forschungsrahmenprogramms) und internationaler Ebene (insbesondere die Working Party on Manufactured Nanomaterials der OECD) initiiert worden (vgl. Kapitel 6.2). Eine internationale Datenbank der OECD zu Nanorisikoforschung umfasst aktuell rund 750 Projekteinträge.<sup>58</sup> Für die Schweiz sind derzeit 27 Projekteinträge registriert, die allerdings das gesamte Spektrum der Risikoforschungsaktivitäten nur unvollständig repräsentieren (vgl. Kapitel 6.1).

Hintergrund dieser verstärkten Aktivitäten im Bereich der Risikoforschung sind Hinweise, dass die mit der Nanoskaligkeit verbundenen technisch nutzbaren Eigenschaften von Nanomaterialien (z. B. erhöhte spezifische Oberfläche, Quanteneffekte etc.) auch in Bezug auf (öko-)toxikologische Wirkungen veränderte und möglicherweise erhöhte Gefährdungseigenschaften für Mensch und Umwelt aufweisen. Diese These stützt sich zum einen auf tierexperimentell beobachtete Entzündungsreaktionen nach inhalativer Aufnahme von Nanopartikeln, aber auch auf experimentelle Befunde hinsichtlich qualitativ neuer toxikologischer Effekte, die u. a. infolge einer verstärkten Aufnahme und erhöhten Mobilität von Nanopartikeln in biologischen Organismen (z. B. durch Überwindung biologischer Barri-

---

<sup>58</sup>

<http://webnet.oecd.org/NANOMATERIALS/Pagelet/Default.aspx>.

eren) zu beobachten sind.<sup>59, 60, 61</sup> In der Debatte um mögliche Risiken durch Nanomaterialien wird dabei oftmals auf Wissenslücken bei der Beurteilung der Gefährlichkeit hingewiesen, die vor allem durch das Fehlen adäquater Mess-techniken und nanospezifischer Testroutinen bedingt seien.

In diesem Zusammenhang erscheint zunächst eine Einordnung der Nanorisiko-forschung in den allgemeinen Kontext der Gefährdungsbewertung von Chemika-lien sinnvoll, da Nanomaterialien als Teilgebiet der chemischen Stoffe zu behan-deln sind. Von den weltweit über 100 000 kommerziell verfügbaren chemischen Stoffen ist ein Grossteil vor dem Jahr 1981 ohne eine explizite Risikobewertung auf den Markt gekommen. Das Problem lückenhafter Informationen zu (öko-)toxicologischen Eigenschaften ist somit kein spezifisches Charakteristikum von Nanomaterialien, sondern gilt generell im Chemikalienbereich. Abschätzungen der Europäischen Chemikalienbehörde ECHA haben ergeben, dass Bedenken bedingt durch fehlende Daten in Bezug auf mögliche Risiken für Arbeit-nehmer/innen, Verbraucher/innen oder die Umwelt zwischen ein und zwei Drittel aller Chemikalien betrifft. Somit stellen Nanomaterialien keinen Sonderfall in Bezug auf Datenlücken dar, die im Zuge von Nachregistrierungen im Rahmen der REACH-Verordnung geschlossen werden sollen. Ob auch nanospezifische Risiken durch die neue Chemikaliengesetzgebung abgedeckt werden, ist im Rahmen sogenannter REACH-Implementierungsprojekte für Nanomaterialien (RIPoN) überprüft worden. Insgesamt sind drei RIPoN-Projekte durchgeführt worden, die die Themen Substanzidentifizierung, Informationsanforderungen und Prüfung sowie Chemikaliensicherheitsbewertung von Nanomaterialien behan-deln.<sup>62, 63, 64</sup> In Bezug auf die Substanzidentifizierung von Nanomaterialien konnte

---

<sup>59</sup> SRU 2011.

<sup>60</sup> Dechema 2011.

<sup>61</sup> ENRHES-Project 2009: Engineered Nanoparticles – Review of Health and Environmental Safety, final report;  
[http://ihcp.jrc.ec.europa.eu/whats-new/enhres-final-report/at\\_multi\\_download/file?name=ENRHES\\_review.pdf](http://ihcp.jrc.ec.europa.eu/whats-new/enhres-final-report/at_multi_download/file?name=ENRHES_review.pdf).

<sup>62</sup> European Commission: REACH Implementation Project Substance Identification of Nano-materials, advisory report, March 2011;  
[http://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/pdf/report\\_ripon1.pdf](http://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/pdf/report_ripon1.pdf).

<sup>63</sup> European Commission: Specific Advice on Fulfilling Information Requirements for Nanomateri-als under REACH, final project report, July 2011;  
[http://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/pdf/report\\_ripon2.pdf](http://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/pdf/report_ripon2.pdf).

dabei bislang kein Konsens der beteiligten Expertinnen und Experten erreicht werden, sodass weitere Abstimmungen erforderlich sind.

## 6.1 Überblick über die Forschungslandschaft in der Schweiz

Die Aktivitäten der Risikoforschung zu Nanomaterialien in der Schweiz haben in den letzten Jahren stark zugenommen, sowohl im Bereich der Projektförderung im Rahmen staatlicher Förderprogramme als auch im Bereich der institutionellen und universitären Forschung.

Einen Schwerpunkt der auf Nanomaterialien bezogenen Material- und Risikoforschung in der Schweiz stellen die aktuellen Nationalen Forschungsprogramme «Intelligente Materialien» (NFP 62) sowie «Chancen und Risiken von Nanomaterialien» (NFP 64) des Schweizer Nationalfonds dar (siehe unten).

Eine weitere wichtige Säule der Risikoforschung zu Nanomaterialien in der Schweiz ist die Ressortforschung der Schweizer Bundesbehörden BAFU (Bundesamt für Umwelt) und BAG (Bundesamt für Gesundheit), die in den letzten Jahren verschiedene Projekte zur Untersuchung der Auswirkung von Nanomaterialien auf Umwelt und Gesundheit initiiert haben.

Die zentrale Informationsstelle in der Schweiz zu Chancen und Risiken der Nanotechnologie und synthetischer Nanomaterialien ist das Internetportal InfoNano ([www.bag.admin.ch/nanotechnologie](http://www.bag.admin.ch/nanotechnologie)), an dem die Bundesämter für Gesundheit, für Umwelt und für Landwirtschaft, die Kommission für Technologie und Innovation, Swissmedic und die Staatssekretariate für Wirtschaft sowie für Bildung und Forschung beteiligt sind. InfoNano bündelt Informationen zu Anwendungen, Umwelt- und Gesundheitswirkungen sowie Arbeitsschutzaspekten von Nanomaterialien.

Im Folgenden werden einige der wichtigen Akteure der Nanorisikoforschung in der Schweiz im Kurzprofil vorgestellt sowie Beispiele für einschlägige Forschungsprojekte genannt. Als Datenquellen dienten hierbei Recherchen in Forschungsdatenbanken (u. a. das Schweizer Informationssystem über Forschung

---

<sup>64</sup> European Commission: Specific Advice on Exposure Assessment and Hazard/Risk Characterisation for Nanomaterials under REACH, final project report, July 2011; [http://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/pdf/report\\_ripon3.pdf](http://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/pdf/report_ripon3.pdf).

und Entwicklung, ARAMIS<sup>65</sup>; der Forschungs- und Entwicklungsinformationsdienst der Europäischen Union, CORDIS<sup>66</sup>; die Datenbank der Workingparty on Manufactured Nanomaterials der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, OECD<sup>67</sup>, sowie Internetauftritte der betreffenden Forschungsinstitutionen.

## **Nationale Forschungsprogramme des Schweizer Nationalfonds (SNF)**

### *«Intelligente Materialien» (NFP 62)*

Das Nationale Forschungsprogramm «Intelligente Materialien» ist als Kooperationsprogramm zwischen dem Schweizerischen Nationalfonds (SNF) und der Förderagentur für Innovation (KTI) angelegt und hat zum Ziel, die Entwicklung neuer intelligenter Materialien zu fördern. Dabei bilden Nanomaterialien einen wichtigen Schwerpunkt.

Das NFP 62 verfügt über elf Millionen Schweizer Franken für eine Forschungsdauer von fünf Jahren, wobei die Forschungsprojekte bereits im Januar 2010 begonnen haben. Diese sind in insgesamt vier Module unterteilt und umfassen u. a. folgende nanotechnologische Entwicklungsrichtungen:<sup>68</sup>

- Funktionelle Materialien für Anwendungen in molekularer Elektronik
- Kontrolliertes Freisetzen von Medikamenten aus Nanocontainern
- Intelligente synthetische Nanoorganellen zur Krebstherapie
- Integrierte Nanopartikel für zukünftige Bauteile in Einzelelektronprozessen
- Nanofasern als intelligente Wirkstoffspeicher
- Nanocontainer zur lokalen Wirkstoffabgabe zur Erweiterung verengter Herzkranzgefässe

---

65 [www.aramis.admin.ch](http://www.aramis.admin.ch).

66 [www.cordis.europa.eu](http://www.cordis.europa.eu).

67 <http://webnet.oecd.org/NanoMaterials>.

68 [www.nfp62.ch](http://www.nfp62.ch).



*«Chancen und Risiken von Nanomaterialien» (NFP 64)*

Das NFP 64 ist mit zwölf Millionen Franken für eine Forschungsdauer von fünf Jahren ausgestattet. Die ersten 18 Projekte sind im Dezember 2010 gestartet. In der zweiten Ausschreibung sind seit Mai 2012 fünf weitere Projekte hinzugekommen. Das Ziel des NFP 64 ist es, Chancen und Risiken erkennen zu helfen, die aus dem Gebrauch von Nanomaterialien für die menschliche Gesundheit, die Umwelt und natürliche Ressourcen entstehen. In fünf Forschungsschwerpunkten werden folgende Fragestellungen adressiert:<sup>69</sup>

- Biomedizinische Anwendungen: Untersuchung möglicher Auswirkungen des Einsatzes von Nanomaterialien auf die Gesundheit
- Umwelt: Evaluation der Auswirkungen von Nanopartikeln auf Umwelt und ökologische Systeme
- Nahrungsmittel: Synthetische Nanomaterialien als Nahrungsmittelzusätze, in Nahrungsmittelverpackungen und mögliche gesundheitliche Auswirkungen
- Energie: Entwicklung neuer effizienter Energiesysteme sowie Verständnis der Eigenschaften solcher Nanomaterialien über die gesamte Lebensdauer, auch im Hinblick auf Gesundheit und Umwelt
- Baumaterialien: Untersuchung und Einsatz innovativer Nanomaterialien, Nanokomposite und Bau- und Konstruktionswerkstoffe sowie Evaluation möglicher Risiken für Mensch und Umwelt über den gesamten Lebenszyklus

**ETH-Bereich**<sup>70</sup>

Ein grosser Teil der Nanorisikoforschung in der Schweiz ist innerhalb des ETH-Bereiches gebündelt. Der ETH-Bereich umfasst die zwei Eidgenössischen Technischen Hochschulen in Zürich (ETH-Zürich) und Lausanne (EPFL) sowie vier Forschungsanstalten (Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, EAWAG; Paul Scherrer Institut, PSI; Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL; Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Empa).

---

<sup>69</sup> [www.nfp64.ch](http://www.nfp64.ch).

<sup>70</sup> [www.ethrat.ch/de/normale-seite-page/auf-einen-blick](http://www.ethrat.ch/de/normale-seite-page/auf-einen-blick).

*ETH Zürich (www.ethz.ch)*

Die Nanorisikoforschung der ETH Zürich ist auf verschiedene Forschungsanstalten (u. a. EAWAG und Empa, siehe unten) sowie auf verschiedene Forschungsthemen verteilt, u. a. in der Safety and Environmental Technology Group<sup>71</sup> sowie dem Functional Materials Laboratory<sup>72</sup>. Im Fokus stehen dabei Untersuchungen zu toxischen und ökotoxischen Wechselwirkungen von Nanomaterialien, die Modellierung des Umweltverhaltens sowie die Exposition durch Nanomaterialien in Alltagsprodukten. Auswahl an Projekten:

- Toxic and ecotoxic properties of synthetic nanomaterials. Investigations for major accident prevention (laufend)
- Assessment of the Total Consumer Exposure to Ag Nanoparticles (laufend)
- NanoSpray II Project (laufend)
- Development of Environmental Fate Models for Engineered Nanoparticles (laufend)
- Prediction of Engineered Nanoparticles Concentration in Environmental Compartments by Material Flow Modeling (laufend)

*EPFL, Lausanne (www.epfl.ch)*

Die EPFL – École polytechnique fédérale de Lausanne – ist im Kontext der Nanorisikoforschung aktiv im Bereich der Charakterisierung von Nanopartikeln. Fokussiert sind die Aktivitäten am Institute of Material Science des Powder Technology Laboratory<sup>73</sup>, am Supramolecular Nanomaterials and Interfaces Laboratory und am Nanophotonic and Metrology Laboratory<sup>74</sup>, die auch in die Organisation des NFP 64 eingebunden sind. Projekte:

- Nicht invasive Messung der Interaktion zwischen Nanopartikeln und aquatischen Mikroorganismen (NFP 64, laufend)

---

<sup>71</sup> [www.sust-chem.ethz.ch/](http://www.sust-chem.ethz.ch/).

<sup>72</sup> [www.fml.ethz.ch/](http://www.fml.ethz.ch/).

<sup>73</sup> <http://ltp.epfl.ch/>.

<sup>74</sup> <http://.sunmil.epfl.ch>.

- Neuartige Nanopartikel für die effiziente und sichere Medikamentenzufuhr (NFP 64, laufend)
- Intelligenter Medikamententransporter im Körper (NFP 62, laufend, zusammen mit dem AMI, Universität Fribourg)
- VIGO – Testplattform für die vier wichtigsten biologischen Endpunkte für die Untersuchung von Nanomaterialien (CCMX, Industrie und BAG und BAFU, laufend)

### *EAWAG ([www.eawag.ch](http://www.eawag.ch))*

Im Bereich der Nanorisikoforschung fokussiert die EAWAG als Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs auf das Verhalten und den Verbleib von Nanomaterialien in der aquatischen Umwelt (natürliche Gewässer, urbane Wassersysteme) sowie auf die Wechselwirkungen von Nanomaterialien mit aquatischen Organismen und Ökosystemen. Die Risikoforschung zu Nanomaterialien wird als Querschnittsthema in verschiedenen Forschungsabteilungen bearbeitet. Von der stofflichen Seite stehen vor allem metallische Nanopartikel und Metalloxide, aber auch Kohlenstoffnanomaterialien im Fokus der Untersuchungen. Auswahl an Projekten:<sup>75</sup>

- Verhalten von Silbernanopartikeln in Kläranlagen (NFP 64, laufend, Abteilung Verfahrenstechnik)
- Nanopartikel in Fassaden und deren Vergleich mit Bioziden (abgeschlossen, Abteilung Verfahrenstechnik)
- Biologischer Abbau und Transformation von Kohlenstoff-Nanomaterialien (NFP 64, laufend, Abteilungen Umweltmikrobiologie und Umweltchemie)
- Effekte von Silber-Nanopartikeln auf Nahrungsketten und Umweltprozesse (NFP 64, laufend, Abteilung Umwelttoxikologie)
- Interaktion metallischer Nanopartikel mit aquatischen Organismen (NFP 64, laufend, Abteilung Umwelttoxikologie)
- Interaktion von Nanopartikeln mit Periphyton (laufend, Abteilung Umwelttoxikologie)

---

<sup>75</sup> [www.eawag.ch/forschung/utox/schwerpunkte/nanoecotoxicology/projektuebersicht/projekt17/index\\_EN](http://www.eawag.ch/forschung/utox/schwerpunkte/nanoecotoxicology/projektuebersicht/projekt17/index_EN).

- Effekte von Silbernanopartikeln auf das Proteom von Zebrafischembryonen (laufend, Abteilung Umwelttoxikologie)
- Interaktion von Silber- und Ceroxid-Nanopartikeln mit der Alge *Chlamydomonas reinhardtii*: Einfluss von physikochemischen Partikeleigenschaften (laufend, SNF, Abteilung Umwelttoxikologie)
- Entwicklung eines in-vitro-Testsystems zur Bewertung von Bioverfügbarkeit und Toxizität von Nanopartikeln in Fisch (laufend, EU-Projekt – NanoValid, Abteilung Umwelttoxikologie)
- Einfluss von Oberflächenbeschichtungen auf die Kurzzeittoxizität von Silbernanopartikeln auf die Fotosynthese (laufend, Abteilung Umwelttoxikologie)
- Untersuchungen zum Lebenszyklus von Nanopartikeln mithilfe von radioaktiv markierter TiO<sub>2</sub>- und Ag<sub>0</sub>-Materialien (laufend, BMBF, Abteilung Umwelttoxikologie in Zusammenarbeit mit dem Institut für Radiochemie, HZDR Leipzig, Deutschland)
- Löslichkeit von Metall- und Metalloxid-Nanopartikeln in natürlichen Gewässern (laufend, BAFU, Abteilung Umwelttoxikologie)
- Löslichkeit von Kohlenstoffnanoröhren in natürlichen Gewässern (abgeschlossen, Zusammenarbeit Empa-EAWAG)

### *Empa (www.empa.ch)*

Die Empa ist eine interdisziplinäre Forschungs- und Dienstleistungsinstitution für Materialwissenschaften und Technologieentwicklung innerhalb des ETH-Bereichs. Die Nanorisikoforschung ist als Querschnittsthema in verschiedenen Forschungsschwerpunkten der Empa verankert (u. a. im Schwerpunkt Gesundheit und Leistungsfähigkeit<sup>76</sup>) und ist in verschiedenen Abteilungen angesiedelt, vor allem im Technology and Society Lab<sup>77</sup>, Materials Biology Interactions und Analytische Chemie. Auswahl an Projekten:

- Evaluationsplattform für Sicherheits- und Umweltrisiken von mit Kohlenstoff-Nanoröhren verstärkten Kompositen (NFP 64, laufend)

---

<sup>76</sup> [www.empa.ch/plugin/template/empa/1322\\*/---/l=1](http://www.empa.ch/plugin/template/empa/1322*/---/l=1).

<sup>77</sup> [www.empa.ch/plugin/template/empa\\*/-32937/l=1](http://www.empa.ch/plugin/template/empa*/-32937/l=1).

- NanoHouse-Activities towards the development of appropriate solutions for the use, recycling and/or final treatment of nanotechnology-based products (EU FP7, laufend)
- Modellierung von Nanomaterialien in der Umwelt (NFP 64, laufend)
- Nanopartikeltransport durch die menschliche Plazenta (NFP 64, laufend)
- Reference methods for managing the risks of engineered nanomaterials (EU FP7, laufend)
- Release of nanoparticles from textiles (laufend)
- VIGO – a new evaluation tool for the determination, description and comparison of the biological effects of nanomaterials – Testplattform für die vier wichtigsten biologischen Endpunkte für die Untersuchung von Nanomaterialien (CCMX-Kompetenzzentrum für Materialwissenschaften und Technologie der EPFL Lausanne, Industrie und Bundesamt für Gesundheit und Bundesamt für Umwelt, laufend)
- NanoSpray II Project (laufend)
- MARINA – Managing Risks of NanoMaterials (EU 7. Forschungsrahmenprogramm, laufend)
- DaNa (Erfassung, Bewertung und breitenwirksame Darstellung von gesellschaftlich relevanten Daten und Erkenntnissen zu Nanomaterialien), – Wissensplattform für Nanomaterialien (BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (D), BAG – Bundesamt für Gesundheit und BAUFU – Bundesamt für Umwelt, laufend)
- European Network on the Health and Environmental Impact of Nanomaterials (EU FP7 abgeschlossen)
- Nanorisk: Safety and Risks of Carbon Nanotubes (abgeschlossen)
- Characterization of Particulate Matter (incl. Nanoparticles) for the Life Cycle Assessment Methodology according to their Impact on Human Health (abgeschlossen)
- NeuroCNTox – Neurotoxicity of Carbon Nanotubes (abgeschlossen)
- Quantitative risk assessment of nanoparticles in the environment: Exposure modeling and ecotoxicological considerations (abgeschlossen)
- Protein-carbon nanotubes interaction, uptake and the influence on oxidative stress and inflammation as key factors in nanoparticles-cell interaction (abgeschlossen)
- Solubilization of carbon nanotubes and fullerenes in natural waters under environmental conditions (abgeschlossen)

- Ecotoxicology of Nanoparticles: Biota-Nanoparticle-Pollutant Interactions in aqueous systems – Comparison of Black Carbon and Carbon Nanotubes (abgeschlossen)
- Nanommune – Comprehensive assessment of hazardous effects of engineered nanomaterials on the immune system (abgeschlossen)

*Paul Scherrer Institut, PSI ([www.psi.ch](http://www.psi.ch))*

Das Paul Scherrer Institut (PSI) gehört zum ETH-Bereich. Es ist das grösste Forschungszentrum für Natur- und Ingenieurwissenschaften in der Schweiz. Anknüpfungspunkte zur Nanoriskoforschung bestehen u. a. im Bereich der Aerosolforschung (Labor für Atmosphärenchemie), bei der auch gesundheitliche Wirkungen von ultrafeinen Aerosolpartikeln betrachtet werden.

*Institut für Arbeit und Gesundheit, Lausanne (Institut universitaire romand de Santé au Travail: [www.i-s-t.ch](http://www.i-s-t.ch), [www.unil.ch](http://www.unil.ch))*

Das Institut für Arbeit und Gesundheit ist als eine private, an den Universitäten Lausanne und Genf angebundene Stiftung in den Bereichen Wissenstransfer, Beratung und Forschung auf dem Gebiet des Arbeits- und Gesundheitsschutzes tätig. Die Risikoforschung zu Nanopartikeln ist angesiedelt im Bereich «Effects of particles on health». Im Vordergrund stehen hier Arbeiten zur Verbreitung, Exposition und humantoxikologischen Wirkungen von Nanomaterialien. Das Institut für Arbeit und Gesundheit koordinierte das im Mai 2012 beendete EU-Projekt «NanoImpactNet», ein multidisziplinäres europäisches Netzwerk zur Einschätzung des Einflusses von Nanomaterialien auf Umwelt und Gesundheit.<sup>78</sup>

Auswahl an Projekten:

- MARINA – Managing Risks of NanoMaterials (EU FP7, laufend)
- NanoTOES – Nanotechnology: Training of Experts in Safety (EU FP7, laufend)
- QNano – A pan-European infrastructure for quality in nanomaterials safety testing (EU FP7, laufend)
- Health effects of occupational traffic particle exposure (SNF, laufend)

---

<sup>78</sup> [www.nanoimpactnet.eu/](http://www.nanoimpactnet.eu/).

- Nanoparticle tracking and oxidative stress biomarkers in healthy non-smoking volunteers (NRP64, laufend)
- Evaluation in vitro de la réactivité des particules fines et ultrafines (AFSSET, in Auswertung)
- Exhaled breath condensate (EBC) as a matrix for nanoparticle exposure and health effects evaluation (BAG, in Auswertung)
- NanoImpactNet: The European Network on the Health and Environmental Impact of Nanomaterials (EU FP7, abgeschlossen)
- NanEx – Development of Exposure Scenarios for Manufactured Nanomaterials (EU FP7, abgeschlossen)
- Characterization of Particulate Matter (incl. Nanoparticles) for the Life Cycle Assessment Methodology according to their Impact on Human Health (abgeschlossen)
- Interplay of lung cells and their cellular responses upon exposure to combustion-generated ultrafine particles and manufactured nanoparticles (abgeschlossen)
- European Network for the Coordination of Science and Technology in the field of Health Effects of Manufactured Nanoparticles (abgeschlossen)
- Nanoinventory: manufactured nanoparticles in Swiss industries and the potential for human exposures (abgeschlossen)
- In vitro reactivity of fine and ultrafine particles (abgeschlossen)
- Use of nanoparticles in industry: safety aspects (abgeschlossen)

#### *Universität Bern ([www.unibe.ch](http://www.unibe.ch))*

Aktivitäten zur Nanoriskoforschung der Universität Bern finden sich überwiegend am Departement Klinische Forschung, DKF ([www.dkf.unibe.ch](http://www.dkf.unibe.ch)), und am Institut für Anatomie ([www.ana.unibe.ch](http://www.ana.unibe.ch)), welche Wechselwirkungen von Nanopartikeln mit der Lunge und Zellen der Lunge erforschen. Ebenfalls beteiligt an Forschungsarbeiten zur Nanoriskoforschung ist das Institut für angewandte Physik ([www.iap.unibe.ch](http://www.iap.unibe.ch)), das Messtechniken zum Nachweis von Nanopartikeln entwickelt. Auswahl an Projekten:

- Nachweis und Verbleib von Nanopartikeln in der Lunge und erwartete biologische Effekte (abgeschlossen)

- Integrierte Nanopartikel für zukünftige Bauteile in Einzelelektronprozessen (NFP 62, laufend, Departement Chemie der Universität Basel zusammen mit Departement Chemie und Biochemie der Universität Bern)
- Biomedizinische Nanopartikel als Immunmodulatoren (NFP 64, laufend, zusammen mit Adolphe Merkle Institut, Universität Fribourg)
- Risikoanalyse inhalierter Nanopartikel mit in-vitro-Technologie (NFP 64, laufend)
- Nanopartikel aus abbaubaren Implantaten: Verteilung und Wirkung im Hirngewebe (NFP 64, laufend)
- Zentrum für Toxikologie und Feinstaubforschung. Elektronenmikroskop-Tomografie zur Untersuchung der Verteilung des Nanogewebes und der Nanozellen (abgeschlossen)
- Interaktion von ultrafeinen Partikeln mit der inneren Oberfläche der Lunge (abgeschlossen)
- Entwicklung einer Partikelexpositionsanlage zur Untersuchung des Entzündungs- und Toxizitätspotenzials von Nanopartikeln im Modell einer epithelialen Barriere der Atemwege (abgeschlossen)
- Vergleich der Wirkung von Asbestfasern mit der von Kohlenstoff-Nanoröhrchen (abgeschlossen)
- Verhalten von ultrafeinen Partikeln in Lungengewebe und in Lungenzellen – Bedeutung für unsere Gesundheit (abgeschlossen)
- Partikel-Lungen-Interaktion: Mechanismen und Auswirkungen auf die Funktion der Lungenzellen (abgeschlossen)

*Universität Basel ([www.unibas.ch](http://www.unibas.ch))*

Aktivitäten finden sich ganz besonders am Institut für Nanowissenschaften ([www.nanoscience.ch](http://www.nanoscience.ch)), das auch den Nationalen Forschungsschwerpunkt Nanowissenschaften mit vielen Projekten über Nanomaterialien beherbergt (siehe unten), am Biozentrum (Ausbildung in Nanowissenschaften und verschiedene Forschungsprojekte), am Universitätsspital (Nanomedizin) und am Departement Chemie (Projekt im NFP 62, zusammen mit dem Departement Chemie und Biochemie der Universität Bern).



*Swiss Nanoscience Institute SNI an der Uni Basel ([www.nanoscience.ch/nccr/](http://www.nanoscience.ch/nccr/))*

Das Swiss Nanoscience Institute (SNI) geht aus dem 2001 gegründeten Nationalen Forschungsschwerpunkt (NFS) Nanowissenschaften hervor und bildet einen universitären Forschungsschwerpunkt. Im SNI wird grundlagenwissenschaftliche mit anwendungsorientierter Forschung verknüpft. Bearbeitet werden auch übergeordnete wissenschaftliche Fragestellungen, die sich durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse, aber auch durch politische, ökonomische und soziale Diskussionen ergeben. In diesem Kontext wird u. a. auch an Fragestellungen zur Toxizität von Kohlenstoffnanoröhren geforscht.

*Adolphe Merkle Institut, AMI, Universität Fribourg, ([www.am-institute.ch](http://www.am-institute.ch))*

Das Adolphe Merkle Institute (AMI) ist ein an der Universität Fribourg eingerichtetes Forschungsinstitut, das sich mit nanowissenschaftlichen Fragestellungen weicher Materie befasst. Im Bereich der Risikoforschung zu Nanomaterialien bestehen Aktivitäten im Bereich der Wechselwirkung von Nanopartikeln mit Zellen. Ausgewählte Projekte:

- Biomedizinische Nanopartikel als Immunmodulatoren (NFP 64, laufend, zusammen mit dem DKF der Universität Bern)
- Intelligente Materialien an der Spitze eines Fischerhakens (NFP 62, laufend)
- Bioinspirierte mechanisch adaptive Nanokomposite (NFP 62, laufend)
- Intelligente Medikamententransporter im Körper (NFP 62, laufend, zusammen mit der EPFL)

*Nationaler Forschungsschwerpunkt (NFS) «Nanowissenschaften» ([www.nanoscience.ch/nccr/](http://www.nanoscience.ch/nccr/))*

Im Rahmen des Nationalen Forschungsschwerpunkts (NFS) «Nanowissenschaften – Impulse für Lebenswissenschaften, Nachhaltigkeit, neue Informations- und Kommunikationstechnologien» wurde eine Schnittstelle zwischen Forschungsinstitutionen und der Industrie gebildet und das «Swiss Nanoscience Institute» (SNI) in Basel begründet. Zu den Forschungsfeldern zählen Nanobiologie, Computing- und Quantum-Kohärenz, atomare und molekulare Nanosysteme, molekule-

lare Elektronik, funktionale Materialien, angewandte Projekte in Nanowissenschaften und Nanotechnologie sowie gesellschaftliche und ethische Fragestellungen. Unter vielem anderen werden Untersuchungen zur Toxikologie von Kohlenstoffnanoröhren durchgeführt.

*Agroscope (www.agroscope.ch)*

Das Agroscope ist die Forschungs- und Dienstleistungsinstitution des Bundesamtes für Landwirtschaft. Die Nanoforschung fokussiert sich neben analytischen, methodischen Entwicklungen auf die Abschätzung von Folgen für einen Einsatz in der Landwirtschaft. Auswahl von Aktivitäten:

- Analytik und Effekte von CNT und Mischungen mit Pestiziden in aquatischen Systemen (SNF)
- Methodenentwicklung von Nanomaterialien im Boden (NFP 64)
- Effekte von Nanomaterialien auf Kulturpflanzen und Funktionen und Strukturen von mikrobiellen Bodengemeinschaften (NFP 64)

## 6.2 Europäische und internationale Forschungsrahmenprogramme und OECD-Aktivitäten

Auf europäischer Ebene nimmt die Risikoforschung zu Nanomaterialien eine wichtige Rolle innerhalb des 6. und 7. Forschungsrahmenprogrammes ein. In mehr als 50 laufenden oder bereits abgeschlossenen Projekten sind von der Europäischen Kommission in den letzten Jahren rund 140 Millionen Euro in die Untersuchung von Risikoaspekten bei der Verwendung synthetischer Nanomaterialien investiert worden.<sup>79</sup> Neben Forschungsaktivitäten wurden dabei auch die Netzwerkbildung unterstützt sowie übergreifende Fragestellungen wie u. a. die Risikokommunikation adressiert. Eine Übersicht zu einzelnen Forschungsaktivitäten findet sich in einer Publikation des Nano-Safety-Clusters, das zur Verbesserung des Informationsflusses und der Erzeugung von Synergieeffekten zwi-

---

<sup>79</sup> [www.nanosafetycluster.eu/home/european-nanosafety-cluster-compendium.html](http://www.nanosafetycluster.eu/home/european-nanosafety-cluster-compendium.html) (Internetabruf März 2012).

schen den Einzelprojekten etabliert worden ist.<sup>80</sup> Schweizer Institutionen sind in der europäischen Nanorisikoforschung stark engagiert. Das im 7. Rahmenprogramm geförderte und im Frühjahr 2012 abgeschlossene europäische Netzwerk NanoImpactNet wurde vom Institut für Arbeit und Gesundheit in Lausanne koordiniert.

Zu erwähnen ist hier auch das Schwerpunktprogramm der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) SPP1313 «Biological Responses to Nanoscale Particles» mit über 40 Forschungsprojekten. Die Schweiz ist mit einem Projekt beteiligt (AMI Universität Fribourg zusammen mit Universität Bern).<sup>81</sup>

Ausserhalb Europas sind vor allem Forschungsaktivitäten in den USA hervorzuheben, die wesentlich zur Identifizierung und Bewertung möglicher Risiken von Nanomaterialien für die Gesundheit und die Umwelt beitragen. Beteiligt sind hierbei sowohl staatliche Behörden wie die Umweltschutzbehörde EPA (Environmental Protection Agency)<sup>82</sup>, das nationale Institut für Arbeitssicherheit und -gesundheit NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health)<sup>83</sup>, das nationale Institut für Umwelt- und Gesundheitswissenschaften NIEHS (National Institute of Environmental Health Sciences)<sup>84</sup> als auch universitäre Forschungseinrichtungen wie die Harvard University<sup>85</sup>, die University of Rochester<sup>86</sup>, die North Carolina State University<sup>87</sup> oder die Duke University<sup>88</sup>.

Auf internationaler Ebene sind die Aktivitäten der OECD zur Nanorisikoforschung hervorzuheben. Die OECD hat mit ihren Testrichtlinien für Chemikalien herausragende Bedeutung für die internationale Chemikaliensicherheit. Im Jahr 2006 initiierte die OECD die «Working Party on Manufactured Nanomaterials» (WPMN), mit dem Ziel, international abgestimmte Methoden und Strategien zu

---

<sup>80</sup> Michael Riediker and Georgios Katalagarianakis (Eds.): Compendium of Projects in the European NanoSafety Cluster – 2012 edition, update 1. Lausanne, Switzerland: Institute for Work and Health; [www.nanosafetycluster.eu/uploads/files/pdf/Compendium2012\\_u1\\_web.pdf](http://www.nanosafetycluster.eu/uploads/files/pdf/Compendium2012_u1_web.pdf).

<sup>81</sup> Vgl. [www.spp1313.de/](http://www.spp1313.de/).

<sup>82</sup> [www.epa.gov/nanoscience/](http://www.epa.gov/nanoscience/).

<sup>83</sup> [www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/](http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/).

<sup>84</sup> [www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/sya-nano/index.cfm](http://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/sya-nano/index.cfm).

<sup>85</sup> [www.hsph.harvard.edu/nano/index.html](http://www.hsph.harvard.edu/nano/index.html).

<sup>86</sup> [www2.envmed.rochester.edu/envmed/lung/faculty.html](http://www2.envmed.rochester.edu/envmed/lung/faculty.html).

<sup>87</sup> <http://ncsu.edu/nano/research/>.

<sup>88</sup> [www.ceint.duke.edu](http://www.ceint.duke.edu).

entwickeln, um die potenziellen Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanomaterialien zu erfassen und zu beherrschen. Die Aufgaben der WPNM umfassen eine internationale Harmonisierung von Methoden zur Gefahren-, Expositions- und Risikobewertung von Nanomaterialien.<sup>89</sup> Die Arbeiten der WPNM sind in acht Arbeitsgruppen gegliedert. Kernstück der Aktivitäten ist die Sicherheitsprüfung von 13 wichtigen und verbreiteten Nanomaterialien nach insgesamt 59 Prüfkriterien zu den physikalisch-chemischen Eigenschaften, zur Toxizität und Ökotoxizität sowie zum Umweltverhalten. Das Testprogramm soll Empfehlungen zu Testmethoden erarbeiten, die es erlauben, die spezifischen physikalisch-chemischen Eigenschaften von Nanomaterialien zu bestimmen. Auch Empfehlungen zu notwendigen Änderungen bestehender Testmethoden sollen gegeben werden. Vom Testprogramm wird zudem eine valide Datenbasis erwartet, um die (öko-)toxikologischen Eigenschaften von Nanomaterialien im Vergleich zu grobkörnigem Material einschätzen zu können.

*Tabelle 11 Übersicht zu den Steering Groups (SG) der OECD WPNM (Quelle: BMBF 2011)*

<b>Gruppe</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Aufgabe</b>
<b>SG 1/2</b>	Datenbank zur Information und Analyse der Nanorisiko-forschung	Qualitätsgesicherte Datenbank für Projekte der Risikoforschung zum Informationsaustausch und zur Identifizierung von Schwerpunkten und Lücken
<b>SG 3</b>	Prüfung einer repräsentativen Auswahl synthetischer Nanomaterialien	Prüfungsprogramm für 13 Nanomaterialien; Gewinnung gesicherter Daten
<b>SG 4</b>	Synthetische Nanomaterialien und Testrichtlinien	Überarbeitung/Anpassung von OECD-Testverfahren; Identifizierung zusätzlicher Verfahren
<b>SG 5</b>	Zusammenarbeit bei freiwilligen und regulatorischen Programmen	Sammlung und Analyse nationaler Programme zur Sicherheit bei Nanomaterialien
<b>SG 6</b>	Zusammenarbeit bei der Risikobewertung	Fallstudien zur Risikobewertung und Identifizierung spezieller Kriterien
<b>SG 7</b>	Alternative Testmethoden in der Nanotechnologie	Entwicklung von Teststrategien mit tierversuchsfreien Verfahren

89

[www.oecd.org/env/nanosafety](http://www.oecd.org/env/nanosafety).

Gruppe	Bezeichnung	Aufgabe
<b>SG 8</b>	Expositionsmessung und Expositionsminderung	Richtlinien für die Exposition von Beschäftigten, Verbrauchern und Umwelt
<b>SG 9</b>	Nachhaltige Nutzung synthetischer Nanomaterialien	Fallstudien zur lebenszeitbezogenen Bewertung der Vor- und Nachteile von Nanoanwendungen in Bezug auf Umwelt und Gesundheit

### 6.3 Fragestellungen und weiterer Forschungsbedarf

Trotz der bereits vorliegenden umfangreichen Ergebnisse der Nanorisikoforschung besteht weiterhin ein hoher Forschungsbedarf in verschiedenen Bereichen der Einschätzung von Auswirkungen von Nanomaterialien auf Mensch und Umwelt. Im Nationalen Forschungsprogramm NFP 64 «Chancen und Risiken von Nanomaterialien» werden aktuell folgende Fragestellungen vertiefend untersucht:

- Projekte in Bezug auf gesundheitliche Aspekte:
  - In-vivo-Lebenszyklus kohlenstoffbeschichteter Nanomagnete
  - Nanopartikel aus abbaubaren Implantaten: Verteilung und Wirkung im Hirngewebe
  - Risikoanalyse inhalierter Nanopartikel mit In-vitro-Technologie
  - Mit biomimetischen Nanofasern verstärkte Knochenersatzmaterialien
  - Nanomedikamente für chronisch entzündliche Darmerkrankungen
  - Nachweis und Verbleib von Nanopartikeln in der Lunge und erwartete biologische Effekte
  - Biomedizinische Nanopartikel als Immunmodulatoren
  - Neuartige Nanopartikel für die effiziente und sichere Medikamentenzufuhr
  - Nanopartikeltransport durch die menschliche Plazenta
- Projekte in Bezug auf Umweltfragestellungen:
  - Effekte von Silbernanopartikeln auf die Nahrungsketten und Umweltprozesse

- Effekte von Nanopartikeln auf Bodenmikroorganismen und Nutzpflanzen
  - Verhalten von Silber-Nanopartikeln in Kläranlagen
  - Biologischer Abbau und Transformation von Kohlenstoff-Nanomaterialien
  - Nicht invasive Messung der Interaktion zwischen Nanopartikeln und aquatischen Mikroorganismen
  - Modellierung von Nanomaterialien in der Umwelt
  - Interaktion metallischer Nanopartikel mit aquatischen Organismen
- Projekte im Bereich Nahrungsmittel:
    - In-vitro-Test zur Risikoabschätzung von Nanopartikeln in Lebensmitteln
    - Nanostrukturierte Eisenverbindungen in Lebensmitteln: Absorptionswege und potenzielle Toxizität im Magen-Darm-Trakt
  - Projekte im Bereich Energie:
    - Chancen und Risiken von nanoskaligem Elektrodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien
    - Sicherheit von Nanomaterialien in grossformatigen Lithium-Ionen-Akkumulatoren
  - Projekte im Bereich Baumaterialien:
    - Evaluationsplattform für Sicherheits- und Umweltrisiken von mit Kohlenstoff-Nanoröhrchen verstärkten Kompositen
    - Zellulose Nanokomposite als neue Konstruktionswerkstoffe
    - Beurteilung der Wirksamkeit und Umweltrisiken von nanokupferbasierten Holzschutzmitteln

Prioritäre Forschungsthemen, die in weiteren Forschungsstrategien, Gutachten und Positionspapieren geäussert worden sind (vgl. EASAC-JRC 2011<sup>90</sup>, SRU 2011, Dechema 2011, Nanokommission 2010, BAuA 2006), umfassen u. a. die folgenden Punkte:

---

<sup>90</sup> European Academies Science Advisory Council (EASAC) und Joint Research Centre (JRC): Impact of engineered nanomaterials on health: considerations for benefit-risk assessment, September 2011; [http://www.easac.eu/fileadmin/PDF\\_s/EASAC\\_Nanosafety\\_Report\\_WEB.pdf](http://www.easac.eu/fileadmin/PDF_s/EASAC_Nanosafety_Report_WEB.pdf).

- Untersuchungen zur Gesundheit (Humantoxikologie 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 (isolierte Nanoobjekte, Agglomerate) im Körper
  - Entwicklung und Bewertung toxikologischer Prüfmethoden 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

In ihrer Relevanz besonders hervorzuheben sind Werkzeuge zum Nachweis und zur Charakterisierung von Nanomaterialien sowie Untersuchungen zu chronischen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt (vgl. Kapitel 8.2).

## 6.4 Zwischenfazit

Die Forschung zu Sicherheitsaspekten von Nanomaterialien hat bereits eine Tradition von 10 bis 15 Jahren, für einige industrierelevante Materialien sogar von einigen Jahrzehnten. Aufgrund einer verstärkten gesellschaftlichen und politischen Diskussion möglicher Risiken von Nanomaterialien sind die Aktivitäten der Risikoforschung in den letzten Jahren stark ausgeweitet worden. Dies gilt insbesondere für die Schweiz, die seit vielen Jahren im Bereich der Nanowissenschaften engagiert ist. So hat der Nationale Forschungsschwerpunkt (NFS) «Nanowissenschaften – Impulse für Lebenswissenschaften, Nachhaltigkeit, neue Informations- und Kommunikationstechnologien» mit einem Fördervolumen von rund 50 Mio. CHF im Zeitraum von 2001 bis 2013 wesentlich dazu beigetragen, neue Ansätze, Fabrikationsmethoden und das Verständnis der Nanowissenschaften weiterzuentwickeln. Der NFS «Nanowissenschaften» bildet eine Schnittstelle zwischen Forschungsinstitutionen und der Industrie und hat das Swiss Nanoscience Institute (SNI) in Basel als führendes Nanotechnologie-Institut in der Schweiz begründet.<sup>91</sup> Die Risikoforschung zu Nanomaterialien ist in der Schweiz breit aufgestellt und umfasst sowohl Projektförderung im Rahmen staatlicher Förderprogramme als auch den Bereich der institutionellen und universitären Forschung. Einen Schwerpunkt bildet das aktuelle Nationale Forschungsprogramm «Chancen und Risiken von Nanomaterialien» (NFP 64) des Schweizer Nationalfonds, welches für eine Forschungsdauer von fünf Jahren mit insgesamt 12 Millionen Franken ausgestattet ist. Hervorzuheben ist die starke internationale Vernetzung der Risikoforschung zu Nanomaterialien in der Schweiz, die auf einer hohen Beteiligung Schweizer Institutionen an den For-

---

<sup>91</sup> [www.snf.ch/nfp/nccr/D/nfskonkret/laufende/Seiten/nanowissenschaften.aspx](http://www.snf.ch/nfp/nccr/D/nfskonkret/laufende/Seiten/nanowissenschaften.aspx).



schungsrahmenprogrammen der EU, aber auch auf der Beteiligung an ausländischen Forschungsaktivitäten wie dem Forschungsschwerpunkt 1313 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) begründet ist.

Auf europäischer Ebene sind innerhalb des 6. und 7. Forschungsrahmenprogrammes in mehr als 50 laufenden oder bereits abgeschlossenen Projekten in den letzten Jahren rund 140 Millionen Euro in die Risikoforschung investiert worden. Ausserhalb Europas tragen vor allem Forschungsaktivitäten in den USA wesentlich zur Identifizierung und Bewertung möglicher Risiken von Nanomaterialien für die Gesundheit und die Umwelt bei. Darüber hinaus ist auf internationaler Ebene die von der OECD eingerichtete «Working Party on Manufactured Nanomaterials» (WPMN) hervorzuheben. Neben der Überprüfung der Tauglichkeit bestehender Testrichtlinien zur Prüfung von Nanomaterialien ist die Sicherheitsprüfung von 13 wichtigen und verbreiteten Nanomaterialien nach insgesamt 59 Prüfkriterien zu den physikalisch-chemischen Eigenschaften, zur Toxizität und Ökotoxizität sowie zum Umweltverhalten ein zentrales Element dieser Arbeiten.<sup>92</sup> Angesichts der genannten Aktivitäten auf verschiedenen Ebenen hat die Zahl der Studien zur Untersuchung der Wechselwirkung von Nanopartikeln mit biologischen Organismen und der Umwelt in den letzten Jahren weltweit deutlich zugenommen. Die Aussagekraft und Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist zum Teil allerdings dadurch eingeschränkt, dass in den Studien zu wenig Informationen zur Charakterisierung der eingesetzten Nanomaterialien vorhanden sind, unzureichende Qualitätssicherungsmassnahmen durchgeführt oder unrealistisch hohe Stoffkonzentrationen eingesetzt worden sind (Krug und Wick 2011). Weiterhin mangelt es derzeit noch an Referenzmaterialien sowie validierten und standardisierten Testmodellen und -methoden, die für eine Vergleichbarkeit von Ergebnissen notwendig wären. Bezüglich der Ergebnisse dieser Studien wird auf das vertiefende Kapitel 7 verwiesen.

---

<sup>92</sup> OECD: List of Manufactured Nanomaterials and List of Endpoints for Phase One of the Sponsorship Programme for the Testing of Manufactured Nanomaterials; ENV/JM/MONO (2010) 46, December 2010.



## **7 Produkte und Anwendungen mit hohem Nachhaltigkeitspotenzial**

Im Rahmen des vorliegenden Kapitels wird ein Überblick über Nanoanwendungen mit Entlastungspotenzialen für die Umwelt gegeben, wobei sowohl marktverfügbare Produkte als auch solche, die sich noch in der Entwicklung befinden, tabellarisch zusammengestellt sind (vgl. Kapitel 5.1.2). Ausgehend von diesen Ergebnissen werden im Folgenden Applikationen bzw. Anwendungsbereiche exemplarisch herausgegriffen, die bereits jetzt über ein grosses Marktvolumen verfügen bzw. für die in naher Zukunft ein hohes Marktpotenzial zu erwarten ist.

### **7.1 Charakterisierung von Anwendungen mit grosser wirtschaftlicher Bedeutung bzw. hohem Marktpotenzial**

Auf dieser Basis wird anhand von konkreten Fallbeispielen,<sup>93</sup> aber auf einer grösstenteils qualitativen Ebene diskutiert, welche positiven Auswirkungen die jeweiligen Applikationen auf verschiedene Aspekte der Nachhaltigkeit haben können. Dabei werden je nach Datenverfügbarkeit folgende Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigt:

- CO<sub>2</sub>-Fussabdruck (Product Carbon Footprint),
- Energieeffizienz,
- Ressourcenverfügbarkeit- und verbrauch,
- Gebrauchsnutzen,
- Gesellschaftlicher Nutzen,

---

<sup>93</sup> Bei der Auswahl der Fallbeispiele wurde auf Anwendungen fokussiert, die den Bereichen «Mobilität», «Bauen und Wohnen» sowie «Lebensmittel» zuzuordnen sind. Bei diesen drei Bereichen handelt es sich um Tätigkeitsfelder, die in Hinblick auf Umweltbelastung (z. B. Treibhauseffekt) zu den wichtigsten Verursachern zählen.

- Lebenszykluskosten  
sowie
- Beschäftigungswirkung.

Die Auswahl der zuvor genannten Gesichtspunkte hat zum Ziel, bei der Charakterisierung der Nanoanwendungen neben Aspekten des Umwelt- und Klimaschutzes auch sozioökonomische Parameter aufzugreifen und dadurch alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit zu adressieren.

Die nachfolgenden Fallbeispiele erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, weder bezüglich der betrachteten Branchen und Einsatzbereiche noch der betrachteten Gesichtspunkte. Vielmehr ist es das Ziel der Beschreibungen, möglichst anschaulich die Ansatzpunkte und Mechanismen zu charakterisieren, durch die dank des Einsatzes von Nanomaterialien Umwelt- bzw. Nachhaltigkeitspotenziale erschlossen werden könnten.

### **7.1.1 Rollwiderstandsoptimierte Reifen**

Der Einsatz von Nanomaterialien als Füllstoffe in Autoreifen wird schon seit vielen Jahren praktiziert. Diese Füllstoffe haben einen Anteil von ca. 30 Prozent an der Gesamtmasse des Reifens und werden benötigt, um v. a. die Haftung, aber auch den Rollwiderstand und die Abrieb- und Reissfestigkeit des Reifenmaterials zu verbessern. Aus diesem Anforderungsprofil wird ersichtlich, dass mit dem Einsatz der Füllstoffe zum Teil konträre Ziele verfolgt werden. So soll der Reifen zwar auf der Strasse gut haften, jedoch ist gleichzeitig auch ein möglichst geringer Rollwiderstand gewünscht.

Um dieses komplexe Wechselspiel optimal einzustellen, werden bei der Herstellung dem Naturkautschuk als dem Hauptbestandteil des Reifens nanoskalige Industrierusse (Carbon Black) sowie oberflächenmodifizierte hydrophile Silica (Siliziumdioxid) und Organosilane (Silica-Mischverbindungen) zugesetzt.

Die Verwendung von Carbon Black ist bereits schon seit vielen Jahren gebräuchlich. Insgesamt handelt es sich bei Carbon Black um einen Massenmarkt im Milliardenmassstab, wobei ca. 90 Prozent des weltweiten Produktionsvolumens in Höhe von ca. acht Millionen Tonnen auf das Anwendungsspektrum der Reifen und andere Anwendungen in der Gummiindustrie entfallen (ICBA 2006; Luther et al. 2004). Neuartige nanostrukturierte Carbon-Black-Typen ermöglichen in der

Gebrauchsphase des Reifens eine weitere Reduzierung des Rollwiderstands und resultierend daraus eine Einsparung von Kraftstoff. Dies wirkt sich positiv auf die Energieeffizienz und die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Fahrzeugs aus. Neben einem geringeren Rollwiderstand trägt die Verwendung von Carbon Black aber auch zu einer längeren Haltbarkeit des Reifens bei, was eine verbesserte Ressourceneffizienz bezüglich des benötigten Naturkautschuks ermöglicht. Ebenfalls eine Verlängerung der Lebensdauer bewirken die bereits erwähnten Silica, durch die jedoch in Verbindung mit den Organosilanen insbesondere bei Winterreifen zusätzlich eine Verbesserung des Nassrutschverhaltens erzielt werden kann (Lüth 2011). Dieser Aspekt steigert somit über Umweltgesichtspunkte hinaus nicht nur den Gebrauchsnutzen, sondern hat im Falle eines signifikanten Beitrags zu einer Reduzierung der Anzahl von Verkehrsunfällen auch Auswirkungen auf den gesellschaftlichen Nutzen des Produkts. Sofern die zusätzlichen Kosten für die höherwertige Gummimischung durch die Kraftstoffeinsparung sowie die verlängerte Lebensdauer des Reifens und damit längere Austauschzyklen amortisiert werden, ergeben sich für die Konsumentinnen und Konsumenten zusätzlich geringere Lebenszykluskosten.

Jenseits von Carbon Black, Silica und Organosilanen wurden in letzter Zeit auch eine Reihe weiterer nanoskaliger Füllstoffe entwickelt bzw. diskutiert. Zu nennen ist hier insbesondere der Einsatz von Carbon Nanotubes (CNT), wodurch eine bis zu sechs Mal so hohe Reißfestigkeit im Vergleich zu herkömmlichen Gummimischungen und damit möglicherweise eine nochmals deutlich längere Lebensdauer erreicht werden kann (Vasiliadis 2011). Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass bei einem Einsatz von CNT den genannten Chancen auch erhebliche Risiken gegenüberstehen, wobei insbesondere die unkontrollierte Freisetzung und Feinverteilung von CNT durch den Reifenabrieb zu nennen ist (Riediker 2009). Im Übrigen wird bezüglich der allgemeinen Risiken des Einsatzes von CNT auf Kapitel 8.1.2 verwiesen.

Im Rahmen einer laufenden Studie der OECD werden derzeit die Nachhaltigkeitsaspekte des Einsatzes von Nanomaterialien bei Reifen genauer untersucht.<sup>94</sup>

---

94

Vgl. [www.biac.org/members/tech/docs/NEWS-11-12-TECH.pdf](http://www.biac.org/members/tech/docs/NEWS-11-12-TECH.pdf).

### 7.1.2 **Beton mit beschleunigter Aushärtung bzw. verbesserter Endfestigkeit**

Beton ist ein zentral wichtiger mineralischer Baustoff im Bauwesen und wird durch Mischen von unterschiedlichen Typen von Zement sowie grober und feiner Gesteinskörnung und Wasser hergestellt, wobei neben diesen Hauptbestandteilen auch weitere Zusatzmittel und -stoffe zum Einsatz kommen. Neben der Verwendung von Beton direkt an der Baustelle (Einfüllen in die Schalungen) spielt auch vorgefertigter Beton (Betonfertigteile) bei der späteren Bauwerkherstellung eine wichtige Rolle.

Bei den erwähnten Zusatzmitteln und -stoffen wurden in den letzten Jahren auch Produkte entwickelt, die Nanomaterialien enthalten. Ein Beispiel hierfür ist ein Zementzusatzstoff des Schweizer Zementproduzenten Holcim, der unter dem Namen Nano-T<sup>®</sup> Technology vermarktet wird. Das Produkt zielt darauf, die Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung (englisch: Interfacial Transition Zone, ITZ) positiv zu beeinflussen. Mittels feingemahlenem, gebranntem Schiefer werden zum einen sehr hohe Packungsdichten erreicht, darüber hinaus zusätzliche Kristallisationskeime gebildet und durch zusätzlich entstehende Hydratationsprodukte u. a. die Dauerhaftigkeit und Zugfestigkeit von Standardzement verbessert (Schmidt und Lunk o.J.).

Ein ähnliches Beispiel ist das Zusatzmittel X-SEED<sup>®</sup> der Firma BASF, durch dessen Einsatz bei der Betonherstellung eine beschleunigte Entwicklung der Frühfestigkeit des Betons erreicht wird. Im Rahmen des Projekts «Nano-NachhaltigkeitsCheck» wurde dieses Produkt aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten genauer beleuchtet (vgl. Möller et al. 2012). Die wichtigsten Ergebnisse sollen im Folgenden kurz dargestellt werden.

X-SEED besteht aus anorganischen Nanomaterialien (Calciumsilikathydrat), die dem Beton als Kristallisationskeime zugegeben werden und so seine Aushärtung beschleunigen. Dadurch kann der Beton im Vergleich zu konventionellem Beton bereits nach der halben Aushärtungsdauer entschalt<sup>95</sup> werden. Gleichzeitig sind keine Einbußen bei der Endfestigkeit und den Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons zu verzeichnen; diese sind gleichbleibend oder sogar höher. X-SEED wird in wässriger Suspension hergestellt und verbleibt in dieser Darreichungsform auch während des Verkaufs und der Zugabe bei der Betonherstellung.

---

<sup>95</sup> «Entschalen» bezeichnet man das Entnehmen des ausgehärteten Betonelements aus seiner Form.

Nach dem Erhärtungsprozess des Betons ist X-SEED chemisch fest im Beton eingebunden (vgl. Möller et al. 2012).

Im Rahmen des «Nano-NachhaltigkeitsCheck» wurde ein mittels X-SEED hergestelltes Betonfertigteile («Nanoprodukt») mit einem herkömmlichen Produkt ohne Beschleuniger («Referenzprodukt») verglichen, wobei die Vorteile der beschleunigten Aushärtung sowohl hinsichtlich einer Steigerung der Ressourceneffizienz als auch bezüglich einer verbesserten Energieeffizienz betrachtet wurden:

- In Hinblick auf die Steigerung der Materialeffizienz kann beim Nanoprodukt dank des durch X-SEED optimierten Erhärtungsprozesses ein Zementtyp mit einem geringeren Klinkeranteil verwendet werden (CEM II ersetzt CEM I). Dieser Zement verursacht bei der Herstellung auch weniger Treibhausgasemissionen.
- Bei der Zielrichtung einer gesteigerten Energieeffizienz kann durch die schnellere Betonerhärtung erreicht werden, beim Nanoprodukt auf die Zufuhr von Heizenergie zu verzichten, ohne dabei die Aushärtungsdauer im Vergleich zu konventionellem Beton zu verlängern. Das Heizen ist insbesondere in der kälteren Jahreszeit für einen kontrollierten Abbindeprozess des Betons erforderlich; ein Verzicht darauf führt zu einer deutlichen Energieeinsparung.

Im Vergleich zum Referenzprodukt können beim Einsatz von X-SEED bei beiden zuvor genannten Szenarien per Saldo Energie und Treibhausgase eingespart werden.<sup>96</sup> Im Rahmen des Projekts «Nano-NachhaltigkeitsCheck» wurden diese in einem orientierenden Ansatz quantifiziert. Rechnet man beispielsweise im MaterialszENARIO die spezifischen CO<sub>2</sub>-Einsparungen pro Kubikmeter Beton auf den europäischen Markt für Betonfertigteile hoch, so können mit X-SEED perspektivisch pro Jahr bis zu rund 2,7 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden. Dies beruht auf der Annahme, dass bei etwa 90 Millionen Kubikmeter Fertigteilbeton rund die Hälfte davon bei Verwendung von X-SEED auf klinkerreduzierte Zemente umgestellt werden kann. Beim Energieszenario beträgt das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial pro Jahr etwa 1,2 Millionen Tonnen. Hier wird davon ausgegangen, dass rund 25 Prozent der Betonfertigteile in Europa zur Beschleunigung

---

<sup>96</sup> Die Herstellung von X-SEED spielt bei der Gesamtbilanz nur eine untergeordnete Rolle. So beträgt der Energieaufwand für die Herstellung von X-SEED nur 62 Megajoule pro Kubikmeter Beton, dessen Produktion insgesamt im MaterialszENARIO circa 1630 Megajoule verursacht. Dies entspricht einem Anteil von nur 3,8 Prozent.

der Erhärtung zusätzlich mit Wärme behandelt werden. Um dieses Einsparpotenzial auch realisieren zu können, muss auf die Wärmezufuhr allerdings tatsächlich verzichtet werden. Eine dennoch durchgeführte Erwärmung zugunsten eines noch schnelleren Herstellungsprozesses würde die Treibhausgas-einspareffekte wieder zunichte machen (Möller et al. 2012).

Bei den Nutzenaspekten birgt mit X-SEED versetzter Beton Vorteile gegenüber dem Referenzprodukt. So weist er reduzierte Bewegungseigenschaften von Chemikalien im Beton auf und schont abiotische Ressourcen wie Kalkstein und Ton. Beim Gebrauchsnutzen ist die hohe Robustheit der Betonfertigteile hervorzuheben. Auch bei der Beschäftigungswirkung geht BASF von einem positiven Effekt aus. Respektive toxikologischer Aspekte ist festzuhalten, dass von dem Nanoprodukt nur geringe oder keine Risiken für Mensch und Umwelt ausgehen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass X-SEED in Lösung hergestellt und verkauft wird sowie dass die zugesetzten Nanomaterialien nach dem Erhärtungsprozess chemisch fest, d. h. untrennbar in den Beton eingebunden sind (Möller et al. 2012).

### 7.1.3 Nanoporöse Dämmstoffe

Angesichts der hohen Relevanz des Gebäudesektors in Hinblick auf das Erreichen anspruchsvoller Klimaziele soll ein weiteres Produktspektrum aus dem Baubereich beleuchtet werden. So konnte durch nanotechnologische Neuentwicklungen im zurückliegenden Jahrzehnt das Spektrum der verfügbaren Dämmmaterialien deutlich erweitert werden. Zu nennen sind hier insbesondere sogenannte Aerogele. Diese entstehen durch Vernetzung von Silikatnanoteilchen mit organischen Molekülen im Sol-Gel-Verfahren. Nachdem im Anschluss das Lösemittel entzogen wird, bildet sich ein transluzentes Gel mit einem Durchmesser von wenigen Millimetern, welches bis zu 95 Prozent aus Luft besteht. Trotz seiner geringen Dichte verfügt das Material über eine hohe Härte. Da der Durchmesser der Poren von Aerogelen nur wenige<sup>97</sup> Nanometer beträgt, wird in dem Dämmmaterial die Luftzirkulation und damit die Weiterleitung von Wärme und Schall weitgehend unterbunden. Aus diesem Grund ermöglichen Aerogele im Bausektor zahlreiche Einsatzmöglichkeiten. Beispielsweise können Aerogele

---

<sup>97</sup> Typischerweise haben Aerogele einen Porendurchmesser von ca. 20 nm (Cabot 2011).



als dünne Schicht zwischen zwei Kunststoffplatten eingeschlossen werden. Dadurch wird insbesondere der nachträgliche Einbau von Dämmmaterialien in Altbauten erleichtert. Darüber hinaus eignen sie sich aufgrund ihrer Lichtdurchlässigkeit auch für energiesparende Aussenfassaden oder Dachkonstruktionen, die neben einer effizienten Wärmedämmung auch Tageslicht in das Innere der Gebäude hindurchlassen sollen.

Ein bedeutender Hersteller von Aerogelen ist das US-amerikanische Unternehmen Cabot, welches bereits seit 2003 Aerogele im grosstechnischen Massstab am Produktionsstandort in Frankfurt herstellt. Ursprünglich unter dem Markennamen Nanogel<sup>®</sup> kommerzialisiert, handelt es sich bei dem Produkt nach den Angaben des Herstellers um das weltweit leichteste, lichtdurchlässige feste Dämmmaterial. Mit seinem aktuellen Markennamen Lumira<sup>®</sup> zielt das Aerogel von Cabot vor allem auf den Markt von Tageslichtbeleuchtungssystemen, die gleichzeitig einen hohen Umweltstandard erreichen sollen. Mit einem U-Wert von 0,64 W/(mK) je 25 mm Dicke und einer bei dieser Dicke erzielbaren Tageslichtdurchlässigkeit von 55 Prozent kann mit Lumira der Wunsch nach stark isolierenden Materialien mit gleichzeitiger Transparenz des Dämmmaterials kombiniert werden. Dadurch ermöglicht das Material neben der Einsparung von Heizenergie eine weitere Verbesserung der Energieeffizienz, da durch die Nutzung von Tageslicht auch der Energiebedarf für Beleuchtungszwecke sinkt. Hierbei können insbesondere die Betreiber von Bürogebäuden, Schulen oder Sportkomplexen profitieren. Im Rahmen einer Fallstudie konnte gezeigt werden, dass durch den Umbau der Dachkonstruktion einer Sportstätte in den USA mit einer Grundfläche von 5090 Quadratmetern CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 904 000 kg pro Jahr eingespart werden können. Hierfür wurde das ursprünglich freitragende Membrandach des Komplexes durch eine Aerogel-Gewebelage zwischen zwei Lagen PTFE-Baugewebe ersetzt. Zusätzlich zu der verbesserten Energieeffizienz und den geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen kann durch Aerogele aber auch die Übertragung externer und interner Geräusche reduziert und damit eine deutliche Verbesserung der Schalldämmung des Gebäudes erreicht werden. Als eine weitere Verbesserung des Gebrauchsnutzens ist zu nennen, dass Aerogele zugleich wasserabweisend sind und dadurch das Eindringen von Feuchtigkeit und Schimmelbildung verhindern. Dies bedeutet, dass jenseits der Ebene des Gebrauchsnutzens möglicherweise auch ein positiver gesellschaftlicher Nutzen besteht, falls die zuvor genannten Effekte zu weniger Krankheiten bei den Gebäudenutzern führen (Cabot 2011).

Nanoporöses Silica kann darüber hinaus als alternatives<sup>98</sup> Kernmaterial in Vakuumisulationspaneelen, kurz auch «VIP» genannt, eingesetzt werden. Dabei handelt es sich um hocheffiziente Dämmmaterialien, die aufgrund ihres evakuierten, porösen Kernmaterials im Vergleich zu konventionellen Dämmstoffen wesentlich geringere Materialstärken aufweisen. Während die Wärmeleitfähigkeit herkömmlicher Dämmmaterialien wie Glas-, Mineralwolle oder Polystyrolschaum zwischen 0,035 und 0,050 W/(mK) liegt, beträgt sie bei Vakuumisulationsdämmplatten zwischen 0,004 bis 0,008 W/(mK) (BauNetz 2012; Randel 2003).

Es wird in diesem Zusammenhang auch darauf hingewiesen, dass die Schweizer Firma Fixit AG im Laufe des Jahres 2013 ein gemeinsam mit der Empa entwickeltes Verputzmaterial auf Basis von Aerogelen auf den Markt bringen wird.<sup>99</sup>

#### 7.1.4 Lebensmittelverpackungen mit Nano-Barriereschichten

Weiterhin haben nanotechnische Neuentwicklungen auch bereits auf dem Verpackungsmarkt Einzug erhalten. Wie in der im Jahre 2009 abgeschlossenen TA-SWISS-Studie mit dem Titel «Nanotechnologie im Bereich der Lebensmittel» detailliert dargelegt wurde, gilt dies insbesondere für den Bereich von Lebensmittelverpackungen auf Polymerbasis, die über nanotechnologisch optimierte Barriereigenschaften verfügen (vgl. Möller et al. 2009).

Prominentes Beispiel sind PET-Flaschen (v. a. für Bier und Fruchtsäfte), die zur Verbesserung der Sperreigenschaften gegenüber Sauerstoff und Kohlendioxid auf der Innenseite mit amorphem Kohlenstoff oder Siliziumoxid überzogen werden. Bei Siliziumdioxid wird mittels Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD) eine 40–60 nm dicke Schicht aufgebracht, die es ermöglicht, beim PET-Trägermaterial mit deutlich geringeren Wandstärken und folglich geringerem Ressourceneinsatz auszukommen. So beträgt die Masse einer PET-Flasche mit einem Volumen von 0,5 Litern nur noch ca. 25 Gramm. Im Rahmen der Studie konnte durch eine orientierende Bilanzierung gezeigt werden, dass die Nano-PET-Flaschen durch ihre verbesserte Ressourceneffizienz auch in puncto CO<sub>2</sub>-Emissionen Einsparpotenziale erschliessen können. Im direkten Vergleich mit Aluminiumdosen und Einweg-Getränkeflaschen führte die Analyse zu dem

---

<sup>98</sup> Typischerweise wird als Kernmaterial Polyurethanschaum verwendet (BauNetz 2012).

<sup>99</sup> Vgl. Pressemitteilung der Empa und Fixit, August 2012, [www.fixit.ch/pdf/1346154133-MM-Aerogel-Putz-Fixit-DE%20Empa%20200812.pdf](http://www.fixit.ch/pdf/1346154133-MM-Aerogel-Putz-Fixit-DE%20Empa%20200812.pdf).

Ergebnis, dass die Nano-PET-Flasche relativ zur Aluminiumdose rund ein Drittel weniger Treibhausgase verursacht, während im Vergleich zur Einweg-Glasflasche das Umweltentlastungspotenzial sogar rund 60 Prozent beträgt. Hochgerechnet auf das Gesamtaufkommen ergeben sich angesichts des in der Schweiz relativ hohen Anteils von Aluminiumdosen am Biermarkt allein für dieses Teilsegment bereits erhebliche kumulierte Einsparpotenziale. Bezogen auf den Schweizer Gesamtverbrauch von Aluminiumdosen in Höhe von rund 3500 Tonnen würde ein kompletter Ersatz dieser Aluminiumdosen durch Nano-PET-Flaschen beim Treibhauspotenzial zu einer jährlichen Entlastung von rund 10 000 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten führen. Dies entspricht in etwa der Menge, die 1500 Schweizer Haushalte jedes Jahr emittieren. Neben diesem Umweltentlastungspotenzial bieten die Nano-PET-Flaschen zumindest im Vergleich zu Glasflaschen auch ein physisches Entlastungspotenzial für die Konsumentinnen und Konsumenten, da sie deutlich<sup>100</sup> leichter sind (Möller et al. 2009).

Neben den PET-Flaschen mit nanomodifizierter Membran existieren auch Verpackungsfolien aus Verbundmaterialien für empfindliche Lebensmittel (z. B. Snacks, Chips, Süß- und Backwaren), die zur Verbesserung der Sperreigenschaften gegenüber Sauerstoff, Wasserdampf und Aromastoffe im Vakuumverfahren (PVD) mit einer ca. 50 nm dicken Schicht aus Aluminium, Aluminiumoxid oder Siliziumoxid bedampft werden. Um diese empfindliche Schicht zu schützen, wird die Folie mit einer Siegfolie kaschiert, wodurch ein direkter Lebensmittelkontakt mit den verwendeten Nanomaterialien unterbunden wird (Möller et al. 2009).

Grundsätzlich loben die Hersteller von Nano-Lebensmittelverpackungen eine längere Haltbarkeit der verpackten Produkte aus. Vor diesem Hintergrund ist zu diskutieren, inwieweit diese neuartigen Verpackungen einen signifikanten Beitrag zu einer Reduzierung des Verderbs von Lebensmitteln beitragen können. So werden in der Schweiz gemäss Schätzungen der UNO-Welternährungsorganisation (FAO) jedes Jahr rund 250 000 Tonnen Nahrungsmittel entsorgt. Dies entspricht in etwa 30 Prozent der produzierten Esswaren (Tages-Anzeiger 2011). Dabei ist allerdings zu beachten, dass es sich bei dem Verderb von Lebensmitteln um ein sehr komplexes Thema handelt, welches mit der Forderung nach einer bestimmten Grösse und Form der Lebensmittel (z. B. Gurken) bereits auf dem Feld seinen Anfang nimmt. Darüber hinaus tragen auch die stets gut gefüllten bzw. z. T. überfüllten Regale bei den Detailhändlern zu dem Problem bei.

---

<sup>100</sup> Bezogen auf eine 0,5-Liter-Flasche hat eine Nano-PET-Flasche mit 26 Gramm weniger als ein Zehntel des Gewichts einer Glasflasche mit 375 Gramm (Möller et al. 2009).

Dennoch ist davon auszugehen, dass die Konsumentinnen und Konsumenten den Verderb von Lebensmitteln bei der Lagerung zu Hause reduzieren und zudem Kosten einsparen können, wenn ihnen dank (nano-)optimierter Verpackungen länger haltbare Lebensmittel zur Verfügung stehen. Angesichts der sich verschärfenden Lebensmittelknappheiten insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern kann weiterhin angenommen werden, dass bessere Verpackungen auch einen gesellschaftlichen Nutzen stiften. Ob nicht zuletzt durch Nanomaterialien modifizierte Verpackungen auch zu einer verbesserten Energieeffizienz und weniger Treibhausgasemissionen führen werden, muss angesichts der verwendeten Materialien gegebenenfalls im Detail betrachtet werden, da bei der Verwendung bestimmter Nanomaterialien nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Einsparungen durch geringeren Verderb durch die z. T. aufwendigen Herstellungsprozesse der Nanomaterialien überkompensiert werden.

### **7.1.5 Verbundwerkstoffe mit CNT und anderen Nanofasern**

Aus der Basis der Erfahrungen mit ersten Produkten mit Carbon Nanotubes (CNT) im Freizeitsektor (z. B. Golf- und Tennisschläger, Velorahmen, -lenker und -helme, Skier, Surfbretter und Sportschuhe) und im Bereich industriell verwendbarer Produkte (z. B. Kunststofffass mit antistatischer Aussenschicht, leitfähiger Kunststoff für die Aussenhaut von Formel-1-Wagen, Flugzeugen und Autos) loten die Hersteller von CNT (z. B. Bayer MaterialScience im Rahmen der Innovationsallianz Inno.CNT) derzeit die Zukunftsperspektiven des Materials in Hinblick auf weitergehende Problemlösungen mit hohem Nachhaltigkeitspotenzial aus.

Hervorzuheben ist der mögliche Einsatz von CNT in der Luftfahrtindustrie. Hier können Beimengungen von CNT in kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) deren mechanische Eigenschaften nochmals verbessern. Bei modernen Flugzeugen werden bereits heute rund 20 bis 50 Prozent CFK eingesetzt, ein Trend, der mittels CNT-Einsatz fortgeschrieben werden und aufgrund des verringerten Gewichts zu erheblichen Einsparungen von Kerosin während der Nutzungsphase der Flugzeuge führen könnte. Bei Inno.CNT wird angesichts der erwarteten Produktionszahlen in diesem Sektor von einem Bedarf von 300 bis 500 Tonnen CNT in den nächsten zehn Jahren ausgegangen (Inno.CNT o.J.).

Erste Abschätzungen ergaben, dass die konsequente Verwendung von CNT-Kompositwerkstoffen bei Flugzeugen im Vergleich zu Aluminium-Flugzeugzellen zu einer Gewichtseinsparung in Höhe von ca. 14 Prozent führen würde. Resultierend daraus wäre eine Kraftstoffeinsparung von rund 10 Prozent möglich, was sich angesichts des hohen Beitrags der Nutzungsphase an den gesamten Umweltbelastungen während des Lebenszyklus von Flugzeugen vermutlich auch positiv auf den CO<sub>2</sub>-Fussabdruck auswirken wird (O'Donnell 2003). Aus ähnlichen Gründen ist folglich auch ein positiver Einfluss auf die Lebenszykluskosten zu erwarten. Im Gegensatz dazu lassen sich die Auswirkungen auf die Beschäftigungswirkung nur sehr schwer abschätzen bzw. vorhersagen.

Ein weiteres Beispiel ist die Leistungssteigerung von Windkraftanlagen. Hier sollen bis 2030 in der Nordsee (z. B. vor den deutschen Küsten) in grossem Umfang Offshoreanlagen installiert werden, die (allein für Deutschland) eine Leistung von 20 000 bis 25 000 Megawatt aus Windkraft erzeugen sollen. Die recht rauen Bedingungen auf hoher See setzen jedoch Verbundmaterialien mit hohen Anforderungen an die mechanischen und chemischen Eigenschaften voraus, die mittels CNT erreicht werden können. Falls die Energiewende, d. h. der Umbau der Energieversorgung weg von fossilen und hin zu erneuerbaren Quellen, tatsächlich durch CNT beschleunigt werden könnte, würden diese Materialien auch einen bedeutenden gesellschaftlichen Nutzen stiften.

Es wird jedoch betont, dass aufgrund der bereits verfügbaren Informationen bzw. existierenden Besorgnispotenziale respektive der toxikologischen Effekte von CNT (vgl. Kapitel 8.1.2) auf Umwelt und Gesundheit die vorhandenen Chancen nicht einseitig betrachtet werden dürfen. Vielmehr kommt es darauf an, fallspezifisch die Risiken insbesondere unter sorgfältiger Betrachtung der Expositionswahrscheinlichkeit zu ermitteln.

Nicht zuletzt wegen der bestehenden Vorbehalte bezüglich des Einsatzes von CNT wird derzeit auch verstärkt im Bereich alternativer Fasermaterialien, z. B. auf Basis von Zellulose, geforscht (vgl. u. a. Som 2012). Ziel dieser Forschung ist es u. a., ähnlich positive Eigenschaften in puncto mechanische Eigenschaften zu erreichen, andererseits jedoch Materialien mit einem geringeren toxikologischen Gefährdungspotenzial zur Verfügung zu stellen. Auf diese Entwicklungsrichtung wird im Rahmen eines Fallbeispiels in Kapitel 7.3 im Detail eingegangen.

## **7.2 Vorgehensweise zur Quantifizierung der Nachhaltigkeitsaspekte**

Ausgehend von den im Wesentlichen qualitativen Beschreibungen in Hinblick auf die Nachhaltigkeitspotenziale von ausgewählten Nanoanwendungen wird im folgenden Kapitel dargelegt, welche Eckpunkte beachtet werden sollten, wenn eine möglichst weitgehende Quantifizierung der Nachhaltigkeitsaspekte angestrebt wird. In diesem Zusammenhang wird beschrieben, wie mittels des Lebenszyklusansatzes die Systemgrenzen der Untersuchung festgelegt werden (vgl. Kapitel 7.2.1) und wie ein geeignetes Referenzprodukt für eine vergleichende Betrachtung ausgewählt wird (vgl. Kapitel 7.2.2). Darüber hinaus behandelt Kapitel 7.2.3 die zeitliche Verankerung der Untersuchung im Entwicklungsprozess. Abschliessend wird in Kapitel 7.2.4 auf die Vorgehensweise bei der Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Fussabdruckes als dem Leitparameter für Klimaschutzaspekte eingegangen.

### **7.2.1 Anwendung des Lebenszyklusansatzes**

Der Lebenszyklusansatz ist ein Ansatz für die Bewertung von ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekten eines Produkts, eines Prozesses oder einer Dienstleistung, der aus dem methodischen Konzept von Produkt-Ökobilanzen (englisch «Life Cycle Assessment», LCA) abgeleitet ist. Dabei wird davon ausgegangen, dass jeder Lebensweg eines Produkts oder einer Dienstleistung mit der Gewinnung und der Aufbereitung von Rohstoffen beginnt, gefolgt durch Weiterverarbeitung, Transport und Anwendung des Produkts sowie schliesslich mit der Abfallbehandlung endet (vgl. folgende Abbildung).

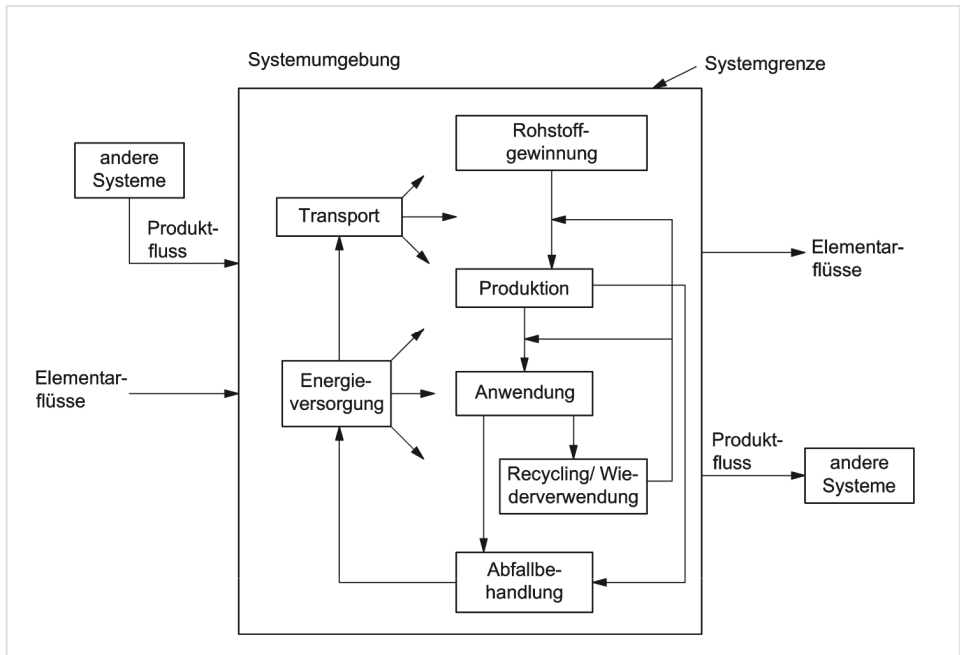


Abbildung 8 Überblick über den Lebenszyklus eines Produktes (Quelle: DIN EN ISO 14040:2009:11)<sup>101</sup>

Aufgrund der dabei berücksichtigten Prozesse wird der Lebenszyklusansatz auch als Cradle-to-grave-Ansatz (deutsch «von der Wiege bis zur Bahre») bezeichnet. Die Verwendung des Lebenszyklusansatzes ermöglicht es, die wichtigsten (positiven wie negativen) Auswirkungen eines Produktsystems zu identifizieren.

Insbesondere hilft dieser Ansatz dabei, gegebenenfalls vorhandene Zielkonflikte und Problemverlagerungen aufzudecken. Dabei handelt es sich sowohl um Problemverlagerungen zwischen den einzelnen Lebenswegabschnitten (wie

<sup>101</sup> Wiedergegeben mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Massgebend für das Anwenden der DIN-Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, D-10787 Berlin, erhältlich ist.

Verlagerungen von Umweltbelastungen von der Produktions- in die Anwendungsphase) sowie zwischen verschiedenen Umweltaspekten beziehungsweise -medien (zum Beispiel CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Luft und versauernd wirkende Substanzen in Wasser und Boden).

Der Fokus der Diskussion zu Nanomaterialien lag bisher eher auf deren Produktion und Anwendung. Wie Erfahrungen aus vielen anderen Gebieten zeigen, gewinnt aber mit zunehmendem Einsatz von Stoffen auch die Frage des sicheren Recyclings und der Entsorgung an Bedeutung. Es reicht nicht, die nanotechnologischen Anwendungen nur in der Nutzungsphase zu bewerten. Insbesondere auch die nachgelagerten Prozessketten müssen betrachtet werden. Daher sollte im Rahmen der Nachhaltigkeitsanalyse beispielsweise thematisiert werden, ob die bestehenden Entsorgungssysteme in der Lage sind, Nanomaterialien zu erfassen und sicher zu behandeln (vgl. hierzu auch Kapitel 8).

### **7.2.2 Vergleichende Betrachtung zu einem Referenzprodukt**

Die Nachhaltigkeit eines Produktes kann nicht absolut, sondern nur im Vergleich zu einem Referenzprodukt mit derselben Funktionalität quantifiziert werden. Dies setzt eine ausführliche Betrachtung der verschiedenen Nutzenaspekte eines Produktes voraus. Ausserdem impliziert dieser Grundgedanke eine vergleichende Betrachtung des nanotechnologischen relativ zu einem bereits bestehenden Produkt.

Da im Rahmen einer Analyse des Nanoprodukts diejenigen Nachhaltigkeitsaspekte herausgearbeitet werden sollen, die sich spezifisch durch den Einsatz von Nanomaterialien beziehungsweise der Nanotechnologien im Sinne einer «enabling technology» ergeben, muss es sich bei dem Referenzprodukt um ein Produkt handeln, bei dem bezüglich der untersuchten Funktionalität keine Nanomaterialien verwendet werden.

Bei der Auswahl des Referenzprodukts ist zu beachten, dass sowohl Nano- als auch Referenzprodukt über die gleiche grundlegende technische Funktionalität verfügen. Das Prinzip der funktionellen Äquivalenz ist sehr wichtig, da sonst Alternativen untersucht und bewertet würden, die nicht vergleichbar sind. Aus diesem Grund sollten die Nutzenaspekte der untersuchten Produkte zu Beginn der Untersuchung genau analysiert und benannt werden. Ausgehend von dieser Untersuchung ist dann festzulegen, bei welchen Nutzenaspekten es sich um



grundlegende technische Funktionalitäten handelt und welche eher einen Zusatznutzen bilden.

Falls es sich bei dem Nanoprodukt um ein völlig neuartiges Produkt oder ein Produkt mit bislang nicht realisierbaren Eigenschaften handelt, ist es im Einzelfall nicht möglich, ein Referenzprodukt mit der gleichen grundlegenden technischen Funktionalität zu spezifizieren. In diesem Fall muss dann bei der Festlegung des Referenzprodukts auf ein Produkt ausgewichen werden, das der Funktionalität des Nanoprodukts am nächsten kommt.<sup>102</sup> Die Auswahl sollte durch die Frage geleitet werden, welches konventionelle Produkt das Nanoprodukt bei seiner Markteinführung beziehungsweise bei einer zunehmenden Nachfrage gegebenenfalls substituieren kann. Sollten mehrere «Kandidaten» für das Referenzprodukt infrage kommen, empfiehlt es sich, dabei auch den derzeitigen Marktanteil mit zu berücksichtigen.

In jedem Fall sollten die bei der Auswahl des Referenzprodukts getroffenen Annahmen nachvollziehbar dokumentiert und als ergänzende Information zu den Ergebnissen der Einschätzung zur Verfügung gestellt werden.

Grundsätzlich ist es natürlich auch möglich, vergleichende Untersuchungen von Nanoprodukten untereinander durchzuführen. Beispielsweise könnte eine interessante Forschungs- und Entwicklungsfragestellung darin bestehen, welcher relative Vorteil mit der Verwendung eines anderen beziehungsweise neuartigen Nanomaterials verbunden ist.

### 7.2.3 Rechtzeitige Verankerung im Entwicklungsprozess

Das Ziel einer Nachhaltigkeitsanalyse sollte neben einer Beschreibung des Status quo immer auch die mit einem konkreten Nanoprodukt verbundenen Optimierungspotenziale aufzeigen. Auf diese Weise können Möglichkeiten erschlossen werden, in einem entwicklungsbegleitenden Ansatz die vorhandenen Potenziale optimal zu erschliessen und Risiken frühzeitig zu erkennen. Eine rein beschreibende Analyse ohne die Möglichkeit, auf die eigentliche Produktentwicklung Einfluss zu nehmen, wäre für eine integrierte Abwägung der Chancen und Risiken nicht zielführend. Aufgrund dieser Zielsetzung ergibt sich ein Span-

---

<sup>102</sup> Je nach untersuchtem Produkt kann es sich beim Referenzprodukt im Extremfall jedoch auch um eine sogenannte «Nullvariante» handeln, falls die untersuchte Funktionalität ausschliesslich durch eine nanotechnologische Anwendung bereitgestellt werden kann.

nungsfeld in Hinblick auf die zeitliche Verankerung der Analyse: Wird zu früh im Entwicklungsprozess angesetzt, so sind noch nicht alle Chancen und Risiken identifizierbar oder ausreichend quantifizierbar, wird zu spät im Entwicklungsprozess angesetzt, so verbleiben keine ausreichenden Gestaltungsfreiräume mehr. Eine solche Betrachtung hätte dann nur noch affirmativen Charakter.

Vor diesem Hintergrund entfaltet eine quantitative Betrachtung der Nachhaltigkeitsaspekte vor allem dann eine grosse Wirkung, wenn sie bei Produkten durchgeführt wird, die kurz vor oder in der Phase der Markteinführung stehen. Zu diesem Zeitpunkt sind einerseits viele der Randbedingungen im Lebenszyklus des Produkts (wie etwa Ressourcenverbräuche, Herstellungsprozesse, Nutzungseigenschaften etc.) mit einer ausreichenden Genauigkeit festgelegt und eine belastbare Datenbasis für eine möglichst weitgehende Quantifizierung der Nachhaltigkeitsaspekte vorhanden. Auf der anderen Seite ist das Produkt noch nicht so am Markt etabliert, dass sich keine Spielräume mehr für die weitere Produktentwicklung beziehungsweise für eine Optimierung ergeben.

Grundsätzlich kann jedoch auch bereits in einem relativ frühen Stadium der Produktentwicklung mit einer Evaluation begonnen werden. Diese wird zu diesem Zeitpunkt notwendigerweise stärker qualitativen Charakter aufweisen und daher eher geeignet sein, bereits frühzeitig wesentliche zu berücksichtigende Aspekte (wie beispielsweise Recyclingfragen) in den Blick zu nehmen. Mit der weiteren Konkretisierung der Produktgestaltung kann dann iterativ auch eine Konkretisierung und weitere Quantifizierung der Betrachtung vorgenommen werden.

#### **7.2.4 Überblick über ausgewählte methodische Ansätze**

Für die Analyse der Nachhaltigkeitsaspekte steht eine Vielzahl unterschiedlicher methodischer Ansätze zur Verfügung, mit denen die zahlreichen Aspekte auf ökologischer, ökonomischer und sozialer Ebene analysiert und bewertet bzw. abgeschätzt werden können.

Im Rahmen des Projekts «Nano-NachhaltigkeitsCheck» hat das Öko-Institut insgesamt 14 Schlüsselindikatoren vorgeschlagen, die eine querschnittsartige Betrachtung der verschiedenen Gesichtspunkte ermöglichen (vgl. Möller et al. 2012). In der folgenden Übersicht werden davon sieben Schlüsselindikatoren herausgegriffen, die bereits im Rahmen von Kapitel 7.1 bei der Charakterisierung

der Produkte systematisch herangezogen wurden, und hinsichtlich ihrer Stärken und Limitationen kurz charakterisiert.

**Tabelle 12** *Charakterisierung ausgewählter methodische Ansätze zur Nachhaltigkeitsanalyse in Hinblick auf ihre Stärken und Limitationen bzw. Grenzen*

Aspekt	Stärken	Limitationen/Grenzen
CO <sub>2</sub> -Fussabdruck (Product Carbon Footprint)	Analyse des Beitrags des Untersuchungsgegenstandes zum Treibhauseffekt, wobei neben CO <sub>2</sub> auch alle übrigen treibhauswirksamen Gase berücksichtigt werden	Keine Berücksichtigung toxikologischer Aspekte <sup>103</sup>
Energieeffizienz	Analyse des kumulierten Energieaufwandes (KEA) des Untersuchungsgegenstandes, wobei eine Bewertung der verschiedenen Energieträger entsprechend der jeweils aufgewendeten Primärenergie erfolgt	Keine Berücksichtigung toxikologischer Aspekte <sup>103</sup>
Ressourcenverbrauch	Analyse und Bewertung der Knappheiten und Konflikte, die mit dem Einsatz von Ressourcen verbunden sind	Knappheiten bei den Ressourcen sind stark von ökonomischen Randbedingungen abhängig
Gebrauchsnutzen	Detaillierte Analyse der Nutzenaspekte für Konsument/innen	Keine Berücksichtigung der Kosten, die mit diesen Nutzenaspekten verbunden sind
Gesellschaftlicher Nutzen	Ermittlung des Einflusses des Untersuchungsgegenstandes auf ein gesellschaftlich relevantes Themenfeld wie die Bekämpfung von Armut, Hunger und Fehlernährung, Förderung von Gesundheit, Bildung und Information etc.	Analyse ist stark wertehabhängig und bedarf einer möglichst transparenten Dokumentation der Annahmen
Lebenszykluskosten	Faire Bewertung von Produkten, die bei der Anschaffung teuer sind, aber z. B. durch geringeren Energieverbrauch während der Nutzungsphase diese Zusatzkosten kompensieren können	Berücksichtigung und Monetarisierung von allfälligen Umweltschäden ist methodisch schwierig und v. a. ethisch fragwürdig

<sup>103</sup> Dabei handelt es sich um einen bedeutenden Nachteil, der bei der Interpretation der Resultate unbedingt berücksichtigt werden muss.

Aspekt	Stärken	Limitationen/Grenzen
Beschäftigungswirkung	Quantifizierung der zusätzlichen Arbeitsplätze, die durch die Herstellung des Untersuchungsgegenstandes neu geschaffen werden	Genauere Zuordnung von neu geschaffenen Arbeitsplätzen zu dem jeweiligen Untersuchungsgegenstand in der Praxis oftmals schwierig

### 7.2.5 CO<sub>2</sub>-Fussabdruck als Leitparameter für die Quantifizierung von Klimaschutzaspekten

Angesichts der vielversprechenden Potenziale und Lösungsansätze, die nanotechnologische Neuentwicklungen zu den vorhandenen Klimaschutzzielen bieten (vgl. hierzu Kapitel 7.1), kommt dem Schlüsselindikator «CO<sub>2</sub>-Fussabdruck» (engl.: Product Carbon Footprint) im Rahmen einer quantitativen Betrachtung eine besondere Bedeutung zu. Hierbei handelt es sich um einen quantitativen Parameter, der das Treibhausgaspotenzial des Nanoprodukts im Vergleich zum Referenzprodukt vergleichbarer Funktionalität zum Ausdruck bringt. Das Treibhausgaspotenzial bezeichnet die Bilanz aller klimarelevanten Emissionen entlang des gesamten Lebenszyklus eines Produkts in einer definierten Anwendung und bezogen auf eine definierte Nutzeinheit (vgl. Griebhammer und Hochfeld 2009). Treibhausgasemissionen im Sinne dieser Definition sind all diejenigen gasförmigen Stoffe, für die vom Weltklimarat IPCC ein Koeffizient für das Treibhauspotenzial (engl.: Global Warming Potenzial = GWP) definiert wurde. Der Lebenszyklus der Vergleichsobjekte beinhaltet dabei die gesamte Wertschöpfungskette, von Herstellung und Transport der Rohstoffe und Vorprodukte über Produktion und Distribution bis hin zur Nutzung, Nachnutzung und Entsorgung. Bezüglich der grundsätzlichen Vorgehensweise wird aus Platzgründen auf die derzeit gültigen internationalen Ökobilanz-Normen (EN ISO 14040 und EN ISO 14044) verwiesen. Ergänzende Informationen zur methodischen Vorgehensweise befinden sich in (PAS 2050:2008).

Die Auswertung für den Schlüsselindikator «CO<sub>2</sub>-Fussabdruck» entspricht der Wirkungsabschätzung einer Ökobilanz, wobei allerdings nur die Wirkungskategorie des Treibhauspotenzials ermittelt wird. In diesem Schritt werden die im Rah-

men der Datenerfassung ermittelten Sachbilanzdaten klassifiziert<sup>104</sup> und charakterisiert<sup>105</sup> und zum Treibhauspotenzial aggregiert. Diese Grösse verfügt über die Einheit «Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente» (abgekürzt: kg CO<sub>2</sub>e).

Sofern die Datenbasis dies erlaubt, kann im Falle einer CO<sub>2</sub>e-Einsparung auch eine Hochrechnung durchgeführt werden, die ausgehend von der CO<sub>2</sub>e-Einsparung pro Vergleichseinheit eine Extrapolation der Einsparung auf das weltweite Potenzial (bei heutigen Marktdaten) vornimmt.

### 7.3 Quantitative Abschätzung der Umweltentlastungspotenziale für ein konkretes Fallbeispiel

Im vorliegenden Kapitel werden die zuvor beschriebenen Eckpunkte in Hinblick auf die Abschätzung der Nachhaltigkeitspotenziale für ein konkretes Fallbeispiel angewendet. Entsprechend der Vorbetrachtungen in Kapitel 2.1 werden Kunststoff-Kompositmaterialien mit zellulosen Nanofasern als ein besonders geeignetes Fallbeispiel erachtet. Dabei spielt eine wichtige Rolle, dass sich bei Hochleistungsanwendungen die Nachfrage nach faserverstärkten Verbundmaterialien (z. B. glas- und kohlefaserverstärkte Polymere) in den letzten Jahrzehnten stark ausgeweitet hat. Hinzu kommt, dass im Zuge der allgemeinen Diskussion um die Substitution einer auf Rohöl und anderen fossilen Quellen basierenden Energie- und Rohstoffversorgung Werkstoffe auf Basis erneuerbarer Quellen wie Zellulose als eine interessante Entwicklungsrichtung erscheinen, an der folglich auch eine Reihe Schweizer Forschungseinrichtungen (z. B. Adolphe Merkle Institut der Universität Fribourg, Empa und EPFL) massgeblich beteiligt sind. Zudem steigen im internationalen Umfeld zunehmend Unternehmen in die Kommerzialisierung von zellulosen Nanofasern ein (z. B. die norwegische Firma Innventia mit einer Kapazität von derzeit 100 kg/Tag, vgl. Kapitel 7.3.1).

---

<sup>104</sup> Klassifizierung bedeutet die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den ausgewählten Wirkungskategorien (vergleiche EN ISO 14040).

<sup>105</sup> Als Charakterisierung wird die Umwandlung des zugeordneten Sachbilanzergebnisses in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators bezeichnet. Hierfür kommen Charakterisierungsfaktoren zum Einsatz, die aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurden (vergleiche EN ISO 14040).

Als Untersuchungsparameter wird der zuvor beschriebene «CO<sub>2</sub>-Fussabdruck» herangezogen, mit dessen Hilfe mögliche Entlastungseffekte des Produktes bezüglich Klimaschutz im Vergleich zu einem noch zu definierenden «Nicht-Nano»-Referenzprodukt abgeschätzt werden. Ausgehend von den Ergebnissen dieser orientierenden Untersuchung wird eine Hochrechnung durchgeführt, mit deren Hilfe die spezifischen Umweltentlastungen auf die insgesamt erzielbaren Entlastungspotenziale von relevanten Marktsegmenten überschlagen werden sollen.

### 7.3.1 Stand der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bei Zellulose-Nanokompositen

Die Forschung und Entwicklung von Kompositwerkstoffen auf Basis von Nanozellulose ist ein vergleichsweise junges Forschungsgebiet, welches sich in den letzten Jahren recht dynamisch entwickelt hat. Die Gründe hierfür sind v. a. in den Eigenschaften der Nanozellulose zu suchen. Neben einer reichlich vorhandenen Rohstoffquelle sind hier insbesondere die hohe Reissfestigkeit, die geringe Dichte sowie Biokompatibilität und Bioabbaubarkeit zu nennen (Hentze 2010; Siró und Plackett 2010).

Aus physikalisch-chemischer Sicht handelt es sich bei Nanozellulose um eine ganze Klasse neuer Nanomaterialien mit einem breiten Eigenschafts- und Anwendungsspektrum. Zu den wichtigsten Partikeltypen gehören mikrofibrillierte Zellulose (engl. microfibrillated cellulose, MFC) und Zellulose-Nanodrähte (engl. Cellulose Nanocrystals, CNC):

- MFC kann beinahe aus jedem beliebigen zellulosehaltigen Ausgangsmaterial<sup>106</sup> hergestellt werden, wobei meist Zellstoff verwendet wird. Ein wesentlicher Prozessschritt bei der Herstellung ist die Isolierung der Fibrillen, die mittels Hochdruck-Homogenisierung erreicht wird. Dieser Prozessschritt war bislang mit einem Energieaufwand von rund 30 kWh/kg sehr energieintensiv und dementsprechend teuer, weshalb in der Vergangenheit die Produktion und Verwendung von Nanozellulose als unattraktiv

---

<sup>106</sup> Zu den wichtigsten Rohstoffen gehören Holz, Stroh, Zuckerrüben und Bananenblätter, aber auch Baumwolle, Bioabfälle und Abfallstoffe aus der Papierherstellung kommen als Ausgangsmaterial infrage (Hentze 2010; Siró und Plackett 2010).

eingestuft wurde. Allerdings konnte in den letzten ca. fünf Jahren durch die Entwicklung von chemischen und enzymatischen Vorbehandlungsschritten der Energiebedarf für die Homogenisierung erheblich gesenkt werden, sodass inzwischen ein Aufschluss der Zellstoffs mit weniger als 1 kWh/kg realisiert werden kann (Siró und Plackett 2010). MCF haben einen Durchmesser von 10 bis 100 nm sowie eine Länge von 0,5 bis über 10  $\mu\text{m}$  und enthalten in ihrer Molekülstruktur neben amorphen auch bereits kristalline Bereiche. Daher erreichen MFC-Folien eine hohe Festigkeit (ca. 200 MPa) und mit einem E-Modul von bis zu 20 GPa auch bereits eine relativ hohe Steifigkeit (Moon et al. 2011; Siró und Plackett 2010).

- Bei CNC handelt es sich um die eine kristalline Form der Nanozellulose, welche durch die Säurehydrolyse von MFC oder nativen Zellulosefasern mit Salz- oder Schwefelsäure zurückbleibt. Dadurch entstehen stabförmige Whiskers mit einem Durchmesser von 3 bis 5 nm bei einer Länge von 50 bis 500 nm, wobei 54 bis 88 Prozent des Materials in kristalliner Form vorliegen. Dadurch erreichen CNC mit einem E-Modul von 140 bis 220 GPa die Steifigkeit von Kevlar, einer wirtschaftlich bedeutenden Aramidfaser, die bei Faserverbundwerkstoffen zum Einsatz kommt (Moon et al. 2011; Siró und Plackett 2010).

Als grundsätzliche Nachteile von Nanozellulose ist die hohe Wasseraufnahme, die Inkompatibilität mit vielen Polymermatrices sowie Limitierungen der Verarbeitungstemperaturen zu nennen. So kommt es ab ca. 200 °C zu einer Degradation der Fasern (Hentze 2010; Siqueira et al. 2010).

Aufgrund dieser Randbedingungen ist das Einbringen von unmodifizierter Nanozellulose als Verstärkungsmaterial in thermoplastische Kunststoffe nicht möglich. Folglich beschränkt sich die Verwendung u. a. auf die Verstärkung von Naturkautschuk, Polylactiden (PLA), Polyvinylacetat (PVA) sowie duroplastischen Harzen (z. B. Phenol- und Epoxidharze). Darüber hinaus sind Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich von Phenol-Formaldehyd-Klebstoffen und als Barrierschicht in Lebensmittelverpackungen publiziert (Hentze 2010; Siqueira et al. 2010; Tingaut et al. 2009).

Ein bedeutender Schritt zur Kommerzialisierung von Nanozellulose wurde 2011 vollzogen, als die schwedische Firma Innventia die weltweit erste Pilotanlage zur Produktion von Nanozellulose in grösserem Massstab in Betrieb nahm. Diese Anlage verfügt über eine Kapazität von 100 kg/Tag und kommt aufgrund einer

mechanischen und enzymatischen Vorbehandlung bei der Homogenisierung mit einem Energieeinsatz von 0,5 kWh/kg aus (Innventia o.J.).

In der Schweiz existieren derzeit mehrere Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, die sich mit Zellulose-Nanokompositen befassen. Zu nennen sind hier insbesondere die Arbeiten von Prof. Weder am Adolphe Merkle Institute der Universität Fribourg. Dort wird im Rahmen von NFP 64 an der wissenschaftlichen Basis für die Entwicklung neuer Hochleistungskomposite aus synthetischen Kunststoffen und Zellulose-Nanofasern gearbeitet. Entwicklungsziele sind zum einen Leichtbaumaterialien, deren mechanische Eigenschaften mit Stahl vergleichbar sind, zum anderen poröse Nanokomposite als ökologische Alternative zu konventionellen Isolationsschäumen (Weder 2012a). Darüber hinaus werden in einem Projekt im Rahmen des Schweizer Forschungsprogramms «Ressource Holz» (NFP 66) neue Verarbeitungsmethoden für Zellulose-Nanokomposite entwickelt, wobei die Minimierung der Verwendung organischer Lösungsmittel im Vordergrund steht (Weder 2012b).

«SustainComp», ein von der EU im 7. Forschungsrahmenprogramm (FP7) gefördertes Projekt, befasst sich mit dem Ziel, nachhaltige Kompositmaterialien für ein möglichst breites Anwendungsspektrum bereitzustellen. In einem insgesamt 17 Partner umfassenden Konsortium sind sowohl grosse Unternehmen im Bereich der Rohstoffbereitstellung als abnehmerseitig auch Papiermühlen und Verpackungshersteller vertreten. Die bereits erwähnte Firma Innventia ist ebenfalls involviert; die Schweiz ist mit der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) und der Eidgenössischen Materialprüfungs- & Forschungsanstalt (Empa) beteiligt (SustainComp o.J.).

Ein weiteres FP7-Projekt mit dem Titel «NanoCelluComp» hat die Zielsetzung, ausgehend von Nahrungsmittelabfällen Zellulose-Nanofasern herzustellen, die in erster Linie in biogene Matrixmaterialien (z. B. Polysaccharide) eingebracht werden sollen, um 100-prozentige Bio-Komposite zu erhalten. Neben dem dänischen Biotechnologieunternehmen Novozymes ist bewertungsseitig die Empa in das Projekt eingebunden (NanoCelluComp 2011; NanoCelluComp 2012). Innerhalb des Projekts wird aktuell diskutiert, mit den Zellulose-Nanofasern Glasfasern in Epoxidharz- und Polyester matrices zu substituieren (Som 2012).



### 7.3.2 Spezifizierung der Zellulose-Nanokomposite und Modellierungsannahmen

Vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten kann davon ausgegangen werden, dass Nanozellulose (hier: MFC) als ernst zu nehmendes Substitut von herkömmlichen Verstärkungsmaterialien bei ausgewählten Kompositwerkstoffen zur Verfügung stehen wird. Kurz- bis mittelfristig erscheint angesichts der mechanischen Eigenschaften u. a. die Substitution von Glasfasern in Epoxidharzsystemen interessant. Daher soll im Rahmen der Quantifizierung der Umweltentlastungspotenziale dieser Anwendungsbereich von Zellulose-Nanokompositen exemplarisch herausgegriffen und im Rahmen einer orientierenden Bilanzierung der CO<sub>2</sub>-Fussabdruck ermittelt werden.

Als Ausgangsmaterial für die Herstellung von MFC wird gebleichter Frischfaser-Sulfitzellstoff (auf Holzbasis) angenommen. Dabei handelt es sich um eine konservative Annahme, da in den aktuellen Forschungs- und Entwicklungsprojekten auch Lebensmittelabfälle bzw. Reststoffe aus der Papierherstellung als Input untersucht werden.

Bezüglich der Extraktion der Zellulosefibrillen aus dem Ausgangsmaterial wird der von Innventia entwickelte Homogenisierungsprozess mit mechanischer und enzymatischer Vorbehandlung angenommen, so wie er in der oben beschriebenen Pilotanlage im Technikmassstab bereits zur Verfügung steht. Der Energiebedarf des Prozesses wird seitens Innventia mit 0,5 kWh/kg Nanozellulose beziffert (Innventia o.J; Klemm et al. 2011). In erster Näherung wird von einer Nanozellulose-Ausbeute von 90 Prozent ausgegangen, da Sulfitzellstoff fast vollständig (> 90 Prozent) aus Zellulose besteht. Auf die modelltechnische Abbildung der Enzymbereitstellung wird aufgrund der sehr geringen Einsatzmenge (Konzentration geringer als 0,1 Prozent, vgl. Siró und Plackett 2010) verzichtet.

Weiterhin wird angenommen, dass die so hergestellte Nanozellulose (MFC) die derzeit marktüblichen Glasfasern 1:1 ersetzen kann, d. h., ein Kilogramm Nanozellulose substituiert ein Kilogramm Glasfasern. Die Polymermatrix, in der die Fasern eingebracht werden, soll aus Epoxidharz bestehen; aufgrund der Tatsache, dass diese in beiden Vergleichssystemen benötigt wird, wird auf eine Modellierung an dieser Stelle verzichtet. Der Vergleich bezieht sich somit ausschliesslich auf die Herstellung von Nanozellulose versus Glasfaser. Auf allfällige Vorzüge der Nanozellulose im End-of-Life-Bereich (z. B. Energiegutschrift bei der Kehrlichtverbrennung) wird im Rahmen der orientierenden Untersuchung verzichtet, wobei es sich hierbei um eine weitere konservative Annahme handelt.

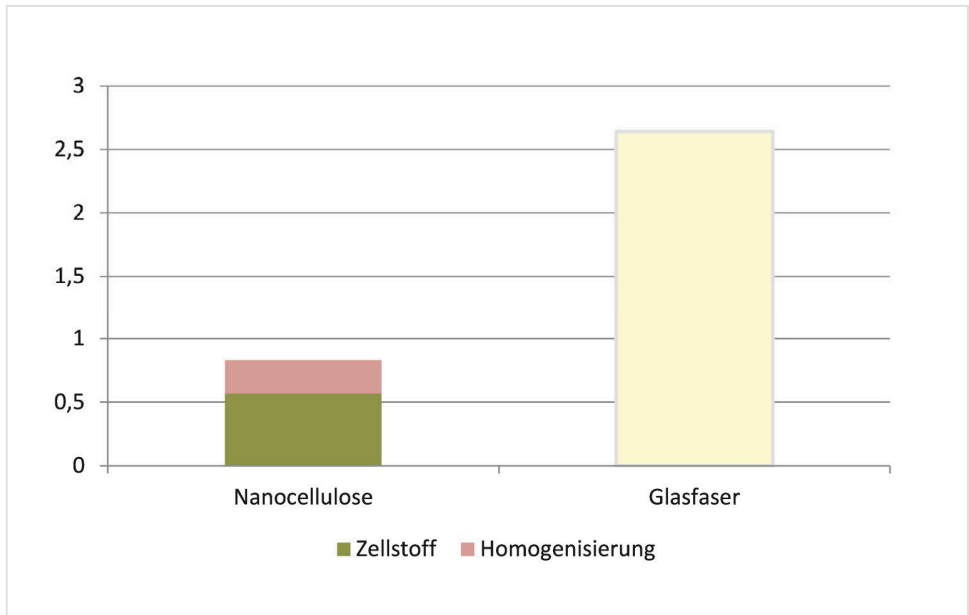
In der folgenden Tabelle werden die wichtigsten Annahmen zur Datenbasis zusammengefasst.

*Tabelle 13 Modellierungsannahmen und Datenbasis für den Vergleich von Nanozellulose mit Glasfasern*

Prozess/Produkt	Datenherkunft	Anmerkung
Gebleichter Sulfitzellstoff	EcoInvent 2.2: Sulfitzellstoff, gebleicht, ab Werk (RER)	Repräsentativ für europäischen Durchschnitt
Homogenisierungsprozess	Spezifische Daten der Firma Innventia: Stromverbrauch beträgt 500 kWh/Tonne (Innventia o.J.)	
Elektrischer Strom	EcoInvent 2.2: Strom, Mittelspannung, Produktion UCTE, ab Netz (RER)	Repräsentativ für europäischen Durchschnitt
Herstellung Glasfaser	EcoInvent 2.2: Glasfaser, ab Werk (RER)	Repräsentativ für europäischen Durchschnitt

### 7.3.3 Ergebnisse der orientierenden Untersuchung und Beitragsanalyse

Führt man den Vergleich zwischen der Herstellung von Nanozellulose, d. h. mikrofibrillierter Zellulose (MFC), und Glaserfasern entsprechend der zuvor beschriebenen Annahmen durch, so ergibt sich für den CO<sub>2</sub>-Fussabdruck der beiden Vergleichsobjekte folgendes Bild (vgl. Abbildung 9):



**Abbildung 9** *CO<sub>2</sub>-Emissionen der Herstellung von Nanocellulose (MFC) im Vergleich zur Herstellung von Glasfasern (Angaben in kg CO<sub>2</sub>e)*

Daraus wird ersichtlich, dass MFC im Vergleich zu Glasfasern deutlich besser abschneidet. Während die Herstellung von einem Kilogramm Glasfasern ca. 2,6 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2</sub>e) verursacht, liegen die Treibhausgasemissionen von MFC mit 0,83 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Kilogramm bei weniger als einem Drittel. Dies bedeutet, dass im Falle einer 1:1-Substitution von Glasfasern durch MFC pro Kilogramm Glasfasern ca. 1,8 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente eingespart werden können.

Den grössten Beitrag den CO<sub>2</sub>-Emissionen der Nanocellulose liefert mit fast 70 Prozent die Bereitstellung des (Sulfit-)Zellstoffs. Dies bedeutet, dass der CO<sub>2</sub>-Fussabdruck der Nanocellulose weiter deutlich reduziert werden kann, falls es im Rahmen der weiteren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten tatsächlich gelingt, als Ausgangsstoffe in nennenswertem Umfang auch Lebensmittelabfälle und Reststoffe aus der Papierherstellung zu erschliessen. Eine weitergehende Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist möglich, wenn die Herstellung von Nanocellu-

lose (Homogenisierung des Sulfitzellstoffs) beispielsweise in der Schweiz oder in skandinavischen Ländern erfolgt, deren Strommix deutlich geringere spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweist als der im Rahmen dieses Fallbeispiels angenommene europäische Durchschnitt.

### 7.3.4 Hochrechnung der Entlastungspotenziale und Limitationen

Im Jahr 2011 wurden in Europa insgesamt wurden 1,049 Millionen Tonnen glasfaserverstärkter Kunststoff verarbeitet. Den grössten Anteil daran hatten mit jeweils 25 Prozent Verfahren in offener Form (z. B. Handlaminieren oder Faserspritzen) sowie das Pressen von plattenförmigen Pressmassen (SMC) und Faser-Matrix-Halbzeugen (BMC). Die Herstellung von Behältern und Rohren sowie kontinuierliche Verfahren haben einen Anteil von 15 respektive 12 Prozent (AVK 2011).

Insbesondere beim Pressen plattenförmiger Pressmassen finden Naturfasern als preiswerte Alternative zu Glasfasern zunehmend Verbreitung. Angesichts der im Vergleich zu Glasfasern deutlich geringeren Dichte<sup>107</sup> von Nanozellulose kann auch davon ausgegangen werden, dass der Bereich der mobilen Anwendungen ein hohes Marktpotenzial für Nanozellulose bietet.

Im Rahmen einer vorsichtigen Schätzung wird angenommen, dass mittel- bis langfristig durch die verschiedenen Anwendungsbereiche für Nanozellulose 25 Prozent der glasfaserverstärkten Kunststoffe durch Zellulose-Nanokomposite substituiert werden können. Ausgehend von dem spezifischen CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial in Höhe von rund 1,8 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Kilogramm Glasfaser könnte sich so ein Gesamteinsparpotenzial von knapp einer halben Million Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente ergeben.

Bei der Verifizierung dieser Hochrechnung ist zu beachten, dass Nanozellulose je nach Anwendungsgebiet modifiziert bzw. weitergehend behandelt werden muss, um die jeweiligen Spezifikationen zu erfüllen. Dies kann zu zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen führen, welche das Einsparpotenzial schmälern würden. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob Zellulose-Nanokomposite die gleiche Haltbarkeit und Witterungsbeständigkeit wie glasfaserverstärkter Kunststoff aufweisen. In diesem Zusammenhang kann insbesondere die hohe Wasseraufnahme (vgl.

---

<sup>107</sup> MFC-Filmbahnen weisen Dichten zwischen 0,8 und 1,07 g/cm<sup>3</sup> auf (Klemm et al. 2011). Im Vergleich liegt die Dichte von Glasfasern bei 2,55 g/cm<sup>3</sup> rund drei Mal so hoch.

Kapitel 7.3.1) einen limitierenden Faktor darstellen. So sollten bei einer vollständigen Bilanzierung zusätzlich zu diesem Vergleich der Herstellung zwischen Nanozellulose und Glasfasern grundsätzlich auch andere allfällige Unterschiede hinsichtlich Anwendung und Entsorgung berücksichtigt werden. Hierfür liegen derzeit jedoch keine gesicherten Annahmen und belastbaren Daten vor.

Andererseits ist in diesem Zusammenhang auch zu prüfen, ob neben der Substitution glasfaserverstärkter Kunststoffe durch die Verwendung von Zellulose-Nanokompositen auch im Bereich anderer Werkstoffe (z. B. Stahl, kohlefaserverstärkte Kompositmaterialien) oder als Substitut für CNT weitere nennenswerte Entlastungspotenziale bestehen. Der Vorteil von Nanozellulose im Vergleich zu CNT liegt v. a. in ihrer Biokompatibilität und Bioabbaubarkeit sowie dem neuerdings vergleichsweise energieeffizienten Herstellungsprozess. Andererseits werden die Festigkeitswerte von CNT nicht erreicht. Als weitere Nachteile von Nanozellulose sind die hohe Wasseraufnahme, die Inkompatibilität mit vielen Polymermatrices sowie Limitierungen bei den Verarbeitungstemperaturen zu nennen.

## 7.4 Zwischenfazit

Anhand von Beispielen aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen konnte in Vertiefung von Kapitel 5.1.2 gezeigt werden, dass heute bereits einige nanomaterialhaltige Produkte und Anwendungen erhältlich sind, die einen positiven Effekt auf die Umwelt aufweisen. Das Spektrum der Anwendungen reicht von rollwiderstandsoptimierten Reifen über schnellhärtende Betone und hocheffiziente Dämmstoffe bis hin zu Lebensmittelverpackungen und Verbundwerkstoffe für den Flugzeugbau. Hervorzuheben ist, dass Forschungseinrichtungen in der Schweiz (z. B. Adolphe Merkle Institut der Universität Fribourg, Empa etc.) im Bereich der Verbundwerkstoffe stark engagiert sind, wobei auch alternative Rohstoffe (z. B. Nanozellulose) zum Einsatz kommen.

In der folgenden Tabelle werden die wichtigsten Ergebnisse der Fallbeispiele aus den Kapiteln 7.1 und 7.3 und in Hinblick auf ausgewählte Aspekte der Nachhaltigkeit zusammengefasst.

**Tabelle 14** Zusammenfassung der Einschätzungen zu ausgewählten Nachhaltigkeitsaspekten für verschiedene Nanoprodukte

Aspekt	Reifen	Beton	Dämmstoffe	Lebensmittelverpackungen	CNT-Verbundwerkstoffe	Zellulose-Nanokomposite
CO <sub>2</sub> -Fussabdruck	+	+	+	+	+	+
Energieeffizienz	+	+	+	+	+	+
Ressourcenverbrauch	+	+	+	+	+	+
Gebrauchsnutzen	+	+	+	+	+	?
Gesellschaftlicher Nutzen	+	o	+	?	?	?
Lebenszykluskosten	?	+/o	?	?	+	?
Beschäftigungswirkung	?	+	?	?	?	?

(+: signifikanter Vorteil gegenüber Referenzprodukt (Nicht-Nanoprodukt); o: derzeit kein signifikanter Vorteil gegenüber Referenzprodukt erkennbar; ?: Klärungsbedarf)

Trotz einiger quantitativer Angaben zu den einzelnen Nachhaltigkeitsaspekten, die in den Produktbeschreibungen sowie der Literatur z. T. verfügbar sind, beschränken sich in den meisten Fällen die öffentlich verfügbaren Informationen auf eher vage bzw. rein qualitative Angaben. Andererseits stehen jedoch beispielsweise für die Analyse der Umweltauswirkungen und des Energiebedarfs mit den internationalen Normen für Ökobilanzierung und dem CO<sub>2</sub>-Fussabdruck bereits etablierte methodische Ansätze zur Verfügung, die grundsätzlich auch für die Bewertung von Nanoprodukten geeignet sind. Bei einem verstärkten Einsatz dieser Instrumente, der für mehr Transparenz bezüglich der tatsächlichen Chancen sowie eine Realisierung der vermuteten Potenziale unerlässlich ist, sollten v. a. folgende beiden Punkte beachtet werden:

- Ob ein Produkt, welches Nanomaterialien enthält, tatsächlich nachhaltig ist, kann nur im Einzelfall und im Vergleich zu einem marktverfügbaren Referenzprodukt vergleichbarer Funktionalität ermittelt werden.

- Die Analyse der Nachhaltigkeitsaspekte sollte möglichst frühzeitig, d. h. idealerweise noch während des Entwicklungsprozesses durchgeführt werden, da in diesem Stadium aufgrund der noch vorhandenen Freiheitsgrade bei der Materialauswahl eine integrierte Betrachtung sowie ein Management der Chancen und Risiken besonders sinnvoll ist.





## **8 Auswirkungen von Nanomaterialien auf Umwelt und Gesundheit**

### **8.1 Identifizierung von Nanomaterialien mit Schädigungspotenzial für Umwelt und Gesundheit**

Ziel dieses Abschnitts ist es, zu ermitteln, welche Nanomaterialien bzw. welche konkreten Anwendungen von Nanomaterialien für Umwelt und Gesundheit relevant sind und welche von diesen leicht Belastungswerte erreichen, die Flora, Fauna und Mensch potenziell schädigen können. Für eine solche Relevanz- oder Risikoabschätzung ist zum einen die potenzielle Exposition von Mensch und Umwelt gegenüber Nanomaterialien von Bedeutung, zum anderen deren Gefahrenpotenzial in Form ihrer toxikologischen und ökotoxikologischen Eigenschaften.

In einem ersten Schritt wurden, ausgehend von den Mengenerhebungen in Kapitel 5, diejenigen Nanomaterialien identifiziert, die hinsichtlich ihrer Produktions- bzw. Verarbeitungs menge die (derzeit) grösste industrielle Bedeutung in der Schweiz haben:

- Industrieruss/Carbon Black,
- Kohlenstoffnanoröhren (CNT; Carbon-Nano-Tubes),
- Fullereene,
- Titandioxid,
- Eisenoxid,
- Silber,
- Siliziumdioxid,
- Zinkoxid.

Für diese Nanomaterialien wurden in einem zweiten Schritt Angaben zu ihrer Anwendung bzw. ihrem Vorkommen in Produkten zusammengestellt. Synthetische Nanomaterialien sind typischerweise nur die Ausgangsmaterialien für nanotechnologische Zwischen- oder Endprodukte, gelangen also in der Regel

erst nach weiteren Verwendungsschritten in die Umwelt oder zum Verbraucher (SRU 2011). Bei den Produkten muss zwischen freien und gebundenen Nanopartikeln unterschieden werden. Letztere sind an Oberflächen gebunden oder fest in eine Produktmatrix eingebracht. Dieser Unterschied zwischen ungebundenen und gebundenen Nanopartikeln ist entscheidend für die Exposition von Mensch und Umwelt. Ungebundene Nanopartikel könnten auf drei Wegen in den Organismus gelangen: über die Atemwege,<sup>108</sup> die Haut oder über den Magen-Darm-Trakt. Die grössten Risiken sehen Wissenschaftler in der Einatmung von Nanopartikeln (BfR 2012). Freie Nanopartikel können eingeatmet werden und so in die Lunge gelangen. In der Lunge können die Nanopartikel dann ins Blut übertreten und somit im ganzen Organismus bzw. in alle Organe verteilt werden. Bei den Produkten ist somit auch entscheidend, in welcher Form die Nanomaterialien auf den Markt kommen, da die Produktform Einfluss auf den Expositionspfad hat. Beispielhaft sind hier Kosmetika wie z. B. Sonnenschutzmittel zu nennen, die entweder als Cremes (dermale Exposition überwiegt) oder als Sprays (inhalative Exposition überwiegt) vermarktet werden. Ein weiteres Augenmerk ist auch auf Nanomaterialien zu legen, bei denen die offene Umweltsanierung vorgesehen ist, wie zum Beispiel bei Agrochemikalien oder bei Materialien zur Boden- und Gewässersanierung wie z. B. Eisenoxid-Nanopartikel (s. Kapitel 8.1.5).

Eine Freisetzung von nanoskaligen Materialien aus Produkten kann prinzipiell während des gesamten Lebenswegs erfolgen: während der Produktion, der Weiterverarbeitung, dem Transport, beim Gebrauch oder bei der Entsorgung von Materialien und Produkten.<sup>109</sup> Die Freisetzung kann dabei generell in die Umweltmedien Luft, Wasser oder Boden/Sedimente stattfinden, wodurch es zur Exposition von Umwelt und Mensch kommen kann.

Bisher konzentrieren sich die Lebensweguntersuchungen für Nanomaterialien bezüglich ihrer möglichen Freisetzung in die Umwelt sowie einer daraus resultierenden Exposition von Umwelt und Mensch vor allem auf die Herstellung und, in deutlich geringerer Masse, auch auf die Nutzung von Nanomaterialien. Die Umwelteinträge bei der Entsorgung von Nanoprodukten werden dagegen bisher wenig beachtet, obwohl viele Nanomaterialien in kurzlebigen Produkten verwendet werden (SRU 2011).

---

<sup>108</sup> Hierbei ist zu beachten, dass bei wasserlebenden Organismen nicht die Lunge, sondern die Kiemen die Atemwege darstellen.

<sup>109</sup> Die End-of-Life-Aspekte bzw. die Umwelteinträge bei der Entsorgung von Nanoprodukten werden im Arbeitspaket 6 näher diskutiert.

Nanomaterialien können allerdings nicht nur als Einzelpartikel freigesetzt werden, sondern auch in agglomerierter/aggregierter oder oberflächenmodifizierter bzw. funktionalisierter Form sowie eingebettet in eine Matrix. Die jeweilige Form kann das weitere Verhalten der freigesetzten Nanomaterialien in der Umwelt wie z. B. die Aggregation entscheidend beeinflussen (Nowack und Bucheli 2007).

Neben den möglichen Freisetzungs- und Expositionspfaden wurden Informationen und Daten zum Verbleib und Verhalten dieser Nanomaterialien in der Umwelt (u. a. zum Beispiel Aggregation/Agglomeration, Mobilität und Wechselwirkung mit anderen Stoffen) beschrieben. Je nach Form, Grösse und Oberflächenmodifikation können die Nanopartikel komplexe physikalische, chemische und biologische Interaktionen in der Umwelt zeigen, v. a. in Gewässern. Freie Nanopartikel lagern sich häufig zu grösseren Verbänden zusammen und setzen sich dann bevorzugt im Sediment eines Gewässers ab. Nanomaterialien, welche mit speziellen Beschichtungen versehen wurden (d. h. oberflächenmodifiziert), können jedoch als freie Partikel in der Wasserphase verbleiben und unter Umständen durch Strömungen weit im Gewässer verteilt werden (Völker 2011).

Zusätzlich zu der Dispersion der Partikel in natürlichen Kompartimenten spielt bei der Toxizität mancher Nanopartikel die Ionenfreisetzung eine entscheidende Rolle. Zink- oder Kupfer-Nanopartikel beispielsweise zeichnen sich beide durch eine sehr hohe Gewässertoxizität aus, weil sie Ionen freisetzen können. Im Falle von Zink sind Bulk- und Nanomaterial alleine aufgrund der Ionenwirkung ungefähr gleich toxisch. Im Falle von Kupfer wurde eine Zunahme der Toxizität um den Faktor 51 für die Nanoform gegenüber der Bulkform festgestellt (Kahru und Dubourguier 2010). Die Tatsache, dass die Ionen für die Wirkung verantwortlich sind, trifft auch auf nanoskaliges Silber zu (Navarro et al. 2008; Piccapietra et al. 2012).

Weiterhin wurde das Gefahrenpotenzial der Nanomaterialien in Form ihrer toxikologischen und ökotoxikologischen Eigenschaften beschrieben. Abschliessend wurde für jedes der untersuchten Nanomaterialien die vorhandene Datenlage diskutiert. Eine Bewertung der Risiken erwies sich dagegen für die meisten nanoskaligen Materialien als derzeit noch nicht möglich, da in vielen Fällen Daten zur Exposition und zur Toxikologie fehlen.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass stoffliche Risiken im Rahmen der Chemikalienbewertung auf Basis der folgenden Formel abgeschätzt werden:

Risiko = Gefahr x Exposition.

Damit also ein Risiko besteht, müssen gleichzeitig ein chemischer Stoff mit einer gefährlichen Eigenschaft und eine Exposition gegenüber diesem chemischen Stoff vorhanden sein.

Bei der Risikobewertung wird der sogenannte Risikoquotient (RQ) ermittelt, der sich aus der abgeschätzten Exposition (PEC)<sup>110</sup>, geteilt durch eine abgeschätzte Wirkung (PNEC)<sup>111</sup> berechnet. Ergibt sich ein Wert kleiner als 1, so liegt ein akzeptables Risiko vor. Ist der Risikoquotient hingegen grösser als 1, so besteht ein nicht akzeptables Risiko und Massnahmen zur Minderung der Exposition müssen ergriffen werden. Dieser Ansatz wird auch für die Risikobewertung von Nanomaterialien angewandt (Aschberger et al. 2011).

Bei diesem gängigen Ansatz der Chemikalienbewertung wird (bisher) nicht die Wahrscheinlichkeit berücksichtigt, mit der eine unerwünschte Nebenwirkung bzw. ein Schaden bei einem Menschen oder in der Umwelt auftritt. Diese Wahrscheinlichkeit wird von verschiedenen Expertinnen und Experten aber als zentrales Kriterium für die Abschätzung von Risiken angesehen, sodass die korrekte Risikoformel nach Ansicht dieser Experten folgendermassen lauten muss:

Risiko = Eintrittswahrscheinlichkeit x Schadensausmass.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass in anderen Disziplinen (beispielsweise in der Risikoethik) der Risikobegriff z. T. anders definiert wird (vgl. Kapitel 11).

In den nachfolgend dargestellten Stoffprofilen basieren die (vorläufigen) Risikobewertungen auf dem oben beschriebenen, im Chemikalienrecht üblichen Prinzip des Risikoquotienten.

Grundlage für die Stoffprofile waren die folgenden Review-Studien:

- Sondergutachten des Sachverständigenrates für Umweltfragen der Bundesrepublik Deutschland zu Vorsorgestrategien für Nanomaterialien (SRU 2011)

---

<sup>110</sup> PEC: Predicted Environmental Concentration; d. h. die zu erwartende Umweltkonzentration.

<sup>111</sup> PNEC: Predicted No Effect Concentration; d. h. vorausgesagte Konzentration, bis zu der sich keine Auswirkungen auf Organismen in der Umwelt zeigen.

- Erhebung zu den grundlegenden Kenntnissen zur Exposition sowie potenziellen Umwelt- und Gesundheitsrisiken ausgewählter Nanomaterialien (Mikkelsen et al. 2011)
- Studie zur Emission von Nanopartikeln aus ausgewählten Produkten in ihrem Lebenszyklus (Kuhlbusch und Nickel 2010)

Die Daten und Informationen aus den Reviews wurden durch weitergehende Literaturrecherchen ergänzt und aktualisiert.

### 8.1.1 Carbon Black/Industrieruss

Carbon Black bzw. Industrieruss ist gezielt hergestellter elementarer Kohlenstoff in der Form kolloidaler Partikel, verursacht/produziert durch unvollständige Verbrennungsprozesse oder thermische Zersetzung von gasförmigen oder flüssigen Kohlenwasserstoffen unter kontrollierten Bedingungen. Es fällt als schwarzes, feines, stark staubendes Pulver an.

Dem gegenüber steht der Kamin- bzw. Dieseleruss, der als undefiniertes Nebenprodukt bei der Verbrennung von Kohle bzw. Kohlenwasserstoffen entsteht (= Kohlenstoffpartikel bzw. Russe aus Verbrennungsprozessen; DaNa 2012<sup>112</sup>).

#### *Stoffprofil*

##### ► Anwendungen/Produkte

Industrieruss wird überwiegend als Füllstoff in der Gummiindustrie (ca. 90 Prozent) eingesetzt, davon 65 Prozent in der Reifenherstellung<sup>113</sup> (Stand 2002; Kuhlbusch und Nickel 2010). Eine weitere Anwendung ist die Nutzung als Schwarzpigment in Farben, Tuschen, Tonern und Lacken ebenso wie in Papier, Plastik und Fasern. Je nach Verwendungszweck werden Carbon-Black-Partikel mit unterschiedlichen durchschnittlichen Partikelgrößen zwischen 20 nm und 300 nm in der Industrie eingesetzt (Kuhlbusch und Nickel 2010). Mit Ausnahme

---

<sup>112</sup> [www.nanopartikel.info/cms/Wissensbasis/CarbonBlack](http://www.nanopartikel.info/cms/Wissensbasis/CarbonBlack) (abgerufen am 29.08.2012).

<sup>113</sup> Der prozentuale Anteil an Carbon Black im Reifen beträgt ca. 22 bis 30 Prozent (Environment Agency 1998).

von Tonern liegt der nanopartikuläre Industrieruss primär in einer Matrix gebunden vor.

Eine besonders leitfähige Variante wird zur Herstellung von Elektroden und Kohlebürsten genutzt.

► Physikochemische Eigenschaften

Industrieruss ist in Wasser und herkömmlichen Lösungsmitteln nicht löslich (SRU 2011).

► Freisetzung, Exposition und Umweltkonzentrationen

Industrieruss kann prinzipiell bei der Herstellung, der Weiterverarbeitung in Produkten, der Nutzungsphase oder auch der Entsorgung freigesetzt werden, sodass es zu einer Exposition von Umwelt und Mensch kommen kann.

Die Kontaktmöglichkeiten für den Menschen mit Industrieruss betreffen vor allem die Staubbelastung bei der Herstellung (SRU 2011). Kuhlbusch und Nickel (2010) verweisen in diesem Zusammenhang aber darauf, dass der Abfüllungsprozess von Carbon Black bei sorgsamer Handhabung keine signifikante Quelle für nanoskalige Carbon-Black-Partikel darstellt. Auch weitere Untersuchungen von Aerosolpartikeln während der Carbon-Black-Produktion in Reaktorräumen und solchen zur Pelletierung haben gezeigt, dass im ungestörten Betriebsablauf keine Freisetzung von nanoskaligen Carbon-Black-Partikeln zu erwarten ist (Kuhlbusch und Fissan 2006). Eine Freisetzung kann aber bei Leckagen und Unfällen nicht völlig ausgeschlossen werden.

Während der Nutzungsphase kann Industrieruss unter anderem durch Abrieb von Fahrzeugreifen freigesetzt werden. Hierzu liegen aber bisher keine konkreten quantitativen Abschätzungen vor. Kuhlbusch und Nickel (2010) ziehen zur Ableitung der Freisetzungsrates Studien heran, die sich allgemein mit der Emission von Partikeln aus Reifen beschäftigen und kommen dabei zum Schluss, dass beim Gebrauch der Reifen keine industriell hergestellten nanoskaligen Carbon-Black-Partikel freigesetzt werden, sondern – sofern im nanoskaligen Bereich – durch sekundäre Prozesse gebildete Russpartikel.

In Innenräumen kann es zur Freisetzung von Carbon Black aus Tonern beim Betrieb von Druckern und Kopierern kommen. Allerdings kommt die Schweizer SUVA (2012) in einem Factsheet zur Gesundheitsgefährdung durch Laserdrucker, Kopiergeräte und Toner zu dem Schluss, dass die Gefährdung durch Toner nicht auf die Freisetzung von Ultrafeinpartikeln wie Carbon Black zurückzuführen ist.

In der Umwelt vermischt sich der Industrierusseintrag mit den Verbrennungsrückständen aus anderen Quellen, vorrangig aus der Verbrennung fossiler Energieträger, die ihrerseits in der Partikelverteilung einen erheblichen Anteil als Nanopartikel freisetzen (SRU 2011). Der Beitrag von Industrieruss ist demgegenüber verschwindend gering, weil die Mengen um 3 bis 6 Zehnerpotenzen geringer sind.

Koelmans et al. (2008) haben mittels Modellierung die Mengen von synthetisch hergestellten kohlenstoffbasierten Nanopartikeln (manufactured carbon-based nanoparticles – MCNPs) und von Kohlenstoffpartikeln aus Verbrennungsprozessen in aquatischen Sedimenten miteinander verglichen und kommen zu dem Ergebnis, dass die Konzentrationen der synthetisch hergestellten kohlenstoffbasierten Nanopartikel im Bereich von 1,2 und 2000 µg/kg Trockensediment liegen (Angaben für die Schweiz) und somit um den Faktor 1000 bis 1 000 000 niedriger sind als die Konzentrationen von Kohlenstoffpartikeln aus Verbrennungsprozessen.

Die oben beschriebenen Anwendungsgebiete von Industrieruss lassen hauptsächlich eine Freisetzung über den Luftpfad erwarten (durch Verbrennung, Abrieb etc.). Anschliessend kann es zu einer Ablagerung auf Oberflächen und Auswaschung der deponierten Partikel in Boden und Wasser kommen. Koelmans et al. (2008) gehen davon aus, dass der Eintrag durch nanoskaliges Carbon Black aufgrund der hohen Hintergrundkonzentration an Russen aus Verbrennungsprozessen in natürlichen Kompartimenten eher eine vernachlässigbare Rolle einnimmt (zitiert in Kuhlbusch und Nickel 2010).

Aufgrund der bisher zusammengetragenen Informationen können keine Aussagen zur Expositionshöhe von Mensch und Umwelt gegenüber industriell erzeugtem Carbon Black gemacht werden.

#### ► Umweltverhalten

Zum Umweltverhalten von industriell hergestelltem Carbon Black sind derzeit keine speziellen Studien verfügbar.

#### ► Humantoxizität

Die Aufnahme von Industrieruss findet aufgrund der überwiegenden Freisetzung über den Luftpfad der daraus resultierenden Expositionsbedingungen überwiegend über die Belastung der Atemluft statt. Industrieruss wird dabei hauptsächlich im Lungengewebe zurückgehalten.

Aus epidemiologischen Daten exponierter Beschäftigter sowie tierexperimentellen Studien ist die entzündungsauslösende Wirkung von Industrieruss in der Lunge nachgewiesen (Sorahan und Harrington 2007). Von besonderer Relevanz ist eine chronische Wirkung von geringen Partikelkonzentrationen, die allerdings bisher noch unzureichend untersucht wurde.

Industrieruss wirkt darüber hinausgehend mutagen sowie genotoxisch und verursacht im Tierexperiment nach Einatmen bei chronischer Belastung Lungentumore (SRU 2011).

Die Internationale Agentur für Krebsforschung (IARC) der Weltgesundheitsorganisation (WHO) stuft Carbon Black als mögliches Humankarzinogen (Gruppe 2B) ein.<sup>114</sup>

Bedingt durch die inhalative Aufnahme findet sich Industrieruss v. a. im Lungengewebe, wo er aber bis zu einem gewissen Grad in die Blutkapillaren der Lunge und damit in das Herz-Kreislauf-System übertreten und im ganzen Organismus verteilt werden kann. Ein Abtransport aus der Lunge über die Lymphe ist denkbar. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf (SRU 2011).

Des Weiteren gibt es Hinweise auf ein Schädigungspotenzial für die innere Schicht der Blutgefäße (Endothel) (SRU 2011). Dieser Prozess ist ein Risikofaktor für Verschlusskrankungen (Thrombose). Zudem wurden in Tierexperimenten allergieverstärkende Wirkungen nachgewiesen.

#### ► Ökotoxizität

Bisher liegen nur sehr wenige Untersuchungen zur Ökotoxizität von Industrieruss vor.

In Versuchen an Flohkrebse wurde nach Exposition gegenüber sedimentgebundenen Kohlenstoffpartikeln unterschiedlicher Grösse nur eine geringe Toxizität nachgewiesen (SRU 2011). Der LC50, d. h. die Konzentration, die bei 50 Prozent der Versuchstiere zum Tod führt, lag zwischen 18 und 40 g/kg.

In Studien mit Immunzellen der Miesmuschel (*Mytilus galloprovincialis*) konnten Canesi et al. (2008) nachweisen, dass nanoskaliger Industrieruss Entzündungsreaktionen auslösen kann.

Tests an Embryonen des Zebrafisch (*Danio rerio*) wiesen für Industrieruss bis zu einer Konzentration von 240 mg/l keine Wirkung auf das Schlüpfverhalten nach (Cheng et al. 2007, zitiert in SRU 2011).

---

<sup>114</sup> <http://monographs.iarc.fr/ENG/Publications/techrep42/TR42-8.pdf>.



### *Vorläufige Diskussion bzw. Interpretation der Datenlage*

Die Datenlage hinsichtlich der Identifizierung gefährlicher Eigenschaften ist für den Menschen relativ umfangreich und differenziert. Im Humanbereich ist von einer geringen akuten Toxizität auszugehen. Som et al. (2011) kommen zu dem Ergebnis, dass Carbon Black ein Material ist, das zwar in biologischen Systemen nachgewiesenermassen (Entzündungs-)Reaktionen hervorrufen kann, dass diese Effekte aber erst in einem sehr hohen Konzentrationsbereich auftreten. Obwohl Carbon Black seitens der Internationalen Agentur für Krebsforschung (IARC) der Weltgesundheitsorganisation (WHO) als mögliches Humankarzinogen (Kategorie 2B) einstuft ist, ist die kanzerogene Wirkung der Partikel nicht abschliessend geklärt. Für derartige Substanzen gilt das sogenannte Minimierungsgebot. Das heisst, dass emissionsmindernde Massnahmen ergriffen werden müssen, auch wenn kein Immissionsgrenzwert besteht, welcher überschritten ist.

Zur Ökotoxizität und zum Umweltverhalten von Industrieruss liegen bisher nur wenige Untersuchungen vor. Diese Studien weisen zwar auf eine relativ geringe Ökotoxizität hin, sodass Carbon Black als eher unbedenklich eingestuft werden kann (Som et al. 2011), aber für eine Risikoeinschätzung sowie für eine Abschätzung möglicher Sekundärwirkungen auf die menschliche Gesundheit sind weitere Daten erforderlich.

## **8.1.2 Kohlenstoffnanoröhren (CNT; Carbon-Nano-Tubes)**

### *Stoffprofil*

#### ► Anwendungen/Produkte

Synthetisch hergestellte Nanofasern, -röhren, -drähte und -stäbchen gehören zu den besonders vielversprechenden Nanomaterialien. Wegen der ähnlichen Eigenschaften der letzten vier ultrafeinen Kohlenstoffstrukturen werden im Folgenden nur CNT behandelt. CNT werden vielfach in Kompositmaterialien eingesetzt, die hohem, mechanischem Stress widerstehen müssen. Sie finden sich in vereinzelter Verteilung (dispergiert) in Sportgeräten wie Tennisschlägern oder Fahrradrahmen wieder. Aus solchen Verbundmaterialien ist die Freisetzung während des sachgemässen Gebrauchs praktisch ausgeschlossen. Auch in Kunststoffteilen in der Automobilindustrie und der Luftfahrt sind die besonderen

mechanischen Eigenschaften (d. h. hohe mechanische Stabilität bei geringem Gewicht) dieser Kompositmaterialien gefragt. Ihre elektrischen Eigenschaften qualifizieren sie zusätzlich zur Vermittlung von elektrischer Leitfähigkeit von Kunststoffen und als antistatische Beschichtungen für Verpackungsmaterial von gefährdeten Bauteilen. Besonders einwandige CNT zeichnen sich zusätzlich durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit aus. In der Medizin laufen Forschungsbemühungen zum Einsatz von CNT als Trägermaterial für pharmakologisch interessante Moleküle und als Transportsysteme für Stoffe zur Diagnostik und Therapie (SRU 2011). Anwendungen von CNT in der Nanomedizin sind allerdings wegen deren nachgewiesenen negativen Wirkungen auf die Gesundheit kritisch zu hinterfragen (Gehr 2012).

#### ► Physikochemische Eigenschaften

Reine CNT sind ausschliesslich aus Kohlenstoffmolekülen aufgebaut. Sie können einwandig (singlewall carbon-nano-tubes; SWCNT) oder, die innen liegende Röhre von mehreren Schichten umschlossen, mehrwandig (multiwall carbon-nano-tubes; MWCNT) sein. Weitere morphologische Eigenschaften können Flexibilität, Verschluss der Enden, oder Verzweigungsgrad sein. Ihre mechanischen und bioaktiven Eigenschaften sind unter anderem dem extremen Verhältnis von Durchmesser (meist im Bereich von 1 bis 50 nm) zu Länge (bis zu mehreren 100  $\mu\text{m}$ ) geschuldet. Während des Herstellungsprozesses kommt es zu Verunreinigungen mit Metallen wie Nickel und Kobalt. Des Weiteren sind viele Interaktionen mit organischen Molekülen an der grossen Oberfläche der CNT möglich. Die Verunreinigungen und Modifikationen bzw. Oberflächenmodifikationen haben signifikanten Einfluss auf die physikochemischen Eigenschaften dieser Kohlenstoffkonstrukte. In Reinform und ohne chemische Modifikationen sind CNT extrem hydrophob. Diese Eigenschaft kann jedoch massgeschneidert verändert werden. Unmodifiziert sind CNT nicht leicht dispergierbar (Lam et al. 2004). Sie tendieren zur Bildung von Aggregaten und Agglomeraten, abhängig von ihrer Morphologie (SRU 2011).

#### ► Freisetzung, Exposition und Umweltkonzentrationen

Bei sachgemäßem Umgang ist die Freisetzung von CNT während der Produktion unwahrscheinlich. Erst durch die sehr unterschiedlichen Bedingungen bei der Weiterverarbeitung kann es zur Freisetzung kommen. Es sind keine Daten aus industriellem Umfeld verfügbar, aber Untersuchungen in Laboratorien, die mit CNT umgehen, zeigen die Notwendigkeit für sorgfältigen Umgang und geeig-

nete Modifikationen des Arbeitsplatzes wie z. B. Abluftfilteranlagen. Auf Handschuhen von Arbeitern konnten Maynard et al. (2004) Konzentrationen zwischen 0,2 und 6 mg pro Hand nachweisen, während die Konzentration in der Luft mit 0,7 bis 53  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (bei multiplen Messungen an unterschiedlichen Orten) gering war. Han et al. (2008) wiesen bei einem Mischprozess eine Anzahlkonzentration von 173 bis 193 Fasern pro ml Luft nach. Gemäss WHO-Grenzwerten für Asbest liegt die zulässige Höchstbelastung bei 0,1 Fasern pro ml (maximale Arbeitsplatzkonzentration, MAK).

Für den Endverbraucher oder Anwender von Kompositmaterialien wird die Chance einer Exposition als niedrig eingeschätzt. Die CNT sind fest in die jeweilige Matrix eingebettet. Die Einschätzung der Freisetzung durch Korrosion und Verschleiss gestaltet sich schwierig, da CNT auch bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern entstehen. Daher ist die Zuordnung der Quelle einer möglichen Kontamination nicht trivial (SRU 2011). Eine ubiquitäre mögliche Quelle für die Freisetzung von CNT sind beispielsweise Autoreifen. In ihrer Produktion werden CNT eingesetzt, und es ist nicht auszuschliessen, dass diese im Zuge von Verwitterung und Abrieb wieder freigesetzt werden (vermutet auch durch Gottschalk und Nowack 2011). Gezeigt hat sich dies ebenfalls bei anderen Nanomaterialien, die während ihrer Gebrauchsphase in einer Matrix eingebettet sind (z. B.  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  usw.) (Lin et al. 2005).

Die Umweltkonzentration von CNT ist schwer erfassbar. Grundsätzlich sind CNT in Wasser nicht leicht dispergierbar, gewinnen aber durch ihre grosse Oberfläche und Reaktionsfreudigkeit schnell an Löslichkeit (SRU 2011). Aufgrund der Entstehung von CNT aus der unvollständigen Verbrennung von organischem Material sind die Quellen von CNT im Ökosystem ebenfalls schwer bestimmbar. Modellrechnungen ergeben CNT-Konzentrationen zwischen 0,003 ng/l (Gottschalk et al. 2009) und 0,8 ng/l (Mueller und Nowack 2008) in natürlichen Gewässern. Obwohl diese Werte deutlich unterhalb der vorliegenden Wirkkonzentrationen liegen (vgl. Mueller und Nowack 2008), ist ein Anstieg der Konzentrationen aufgrund der steigenden weltweiten Produktion zu erwarten.

#### ► Umweltverhalten

CNT sind biologisch schlecht abbaubar und akkumulieren aufgrund ihres hydrophoben Charakters nicht in der wässrigen Phase, sondern an den Grenzflächen (Wasser/Luft; Wasser/Sediment). Hier tendieren sie zur Agglomeration und konsequent zur Sedimentation, wie Kennedy et al. (2008) zeigen konnten. Wegen ihrer Fähigkeiten, mit organischen Molekülen zu interagieren und chemische

Bindungen einzugehen, können sie ihren Charakter jedoch fließend von hydrophob zu hydrophil verändern. Gleichzeitig gewinnen sie häufig an chemischer Funktionalität durch die Komplexbildung mit diversen Molekülen (Farré et al. 2009). Organische Bestandteile im Wasser können MWCNT stabilisieren und für über einen Monat stabil in Modelllösung und natürlichem Oberflächenwasser halten (Hyung et al. 2007).

#### ► Humantoxizität

Zu der pathologischen Wirkung von Fasern mit extrem geringem Querschnitt im Vergleich zu ihrer Länge existieren bereits umfangreiche Daten aus Forschungen an Asbestfasern. Die zell- und tierexperimentellen Erkenntnisse für CNT unterscheiden sich bisher in wesentlichen Punkten nicht von den bei Asbestfasern gewonnenen, sofern sie von derselben Dimension und Form/Struktur sind.<sup>115</sup> Auch Asbestfasern sind nicht in jedem Falle krebserregend und schädlich für die Lunge. Die Kanzerogenität ist vielmehr in dem Verhältnis zwischen Länge und Durchmesser begründet. Wenn dieses Verhältnis sehr gross ist und die CNT oder auch die Asbestfasern in ihrer Länge den Durchmesser von Makrophagen in der Lunge überschreiten, dann können sie nicht vollständig internalisiert<sup>116</sup> werden. Dies führt zu Entzündungsreaktionen und einer verzögerten Reinigung des Lungengewebes. Als Folge davon kann u. a. Krebs entstehen (Poland et al. 2008; Johnston et al. 2010a; Aschberger et al. 2010). In reinem Zustand (ohne metallische Verunreinigungen aus dem Produktionsprozess und ohne Anreicherung von organischen Molekülen aus der Umwelt auf der Oberfläche der Fasern) zeigen CNT geringe akute Toxizität in Zellkulturexperimenten (Kolosnjaj et al. 2007). Diese geringe Toxizität wurde vorwiegend auf oxidativen Stress zurückgeführt. Eine akute Genotoxizität konnte nicht nachgewiesen werden, sofern die CNT nicht verunreinigt waren. Im Verbund mit Metallen aus dem Herstellungsprozess fanden Lindberg et al. (2009) und Pacurari et al. (2008) dagegen Schäden an der DNA der exponierten Zellen.

---

<sup>115</sup> Auch für Asbestfasern gilt, dass nicht alle per se kanzerogen sind, sondern nur solche mit einer gewissen Dimension bzw. Form/Struktur. Entscheidend ist das Verhältnis zwischen Durchmesser und Länge («high aspect ration»); d. h., sie müssen dünn genug sein (im Nanometerbereich), um in die Lungenbläschen vordringen zu können, und gleichzeitig lang genug (bis ca. 20 µm), sodass sie nicht problemlos von Makrophagen aufgenommen werden.

<sup>116</sup> Dies bedeutet, dass die CNT von den Makrophagen nicht vollständig umschlossen und aus dem Körper ausgeschleust werden können. Die Makrophagen können dabei Entzündungsstoffe produzieren und diese in die Umgebung entlassen, was zu einer Zerstörung des Gewebes führen kann.

Im Tierversuch zeigt sich eine Abhängigkeit von der Art der CNT (SWCNT oder MWCNT) und der Länge der CNT mit den beobachteten toxischen Effekten (Krug und Wick 2011). Bei den Experimenten von Sato et al. (2005), die CNT unterschiedlicher Länge unter die Haut von Ratten implantierten, zeigte sich eine Verstärkung der beobachteten Entzündungsreaktionen proportional zur Länge der CNT. Hier, wie auch in anderen Studien, wird die Verstärkung der pathologischen Wirkung der Unfähigkeit der Makrophagen zugeschrieben, die CNT vollständig zu umschliessen (SRU 2011).

Der Hauptexpositionsweg ist jedoch die Inhalation von CNT. Auch hier werden im Lungengewebe primär Entzündungen und Gewebeveränderungen hervorgerufen (Muller et al. 2006; Shvedova et al. 2005; Warheit et al. 2004). SWCNT sind gegenüber MWCNT erhöht toxisch. Während bei MWCNT Reizungen und Gewebeveränderungen im Pulmonaltrakt der Versuchstiere festgestellt wurden, führte die Inhalation von SWCNT ab 5 mg/kg Körpergewicht zu einer Mortalitätsrate von 15 Prozent. Lam et al. (2004) zeigten, dass Veränderungen im Lungengewebe der Versuchstiere 90 Tage nach Exposition ausgeprägter waren als nach fünf Tagen. Daraus leitet sich eine hohe Persistenz im biologischen System ab. Hier konnte keine erhöhte Genotoxizität bei gereinigten MWCNT festgestellt werden (Thurnherr et al. 2011).

Es wurde bisher keine Resorption im Magen-Darm-Trakt von höheren Organismen beschrieben (SRU 2011).

#### ► Ökotoxizität

Die Datenlage zur der Umwelttoxizität von CNTs ist von widersprüchlichen Ergebnissen und grossen Datenlücken geprägt. 2010 beschrieben Kahru und Dubourguier den Stand der Forschung zur Ökotoxizität von Nanomaterialien in ihrem Reviewartikel sehr anschaulich. Hier werden ausschliesslich L(E)C50-Werte aus der vorhandenen Literatur genutzt und für verschiedene Nanomaterialien gegenübergestellt. Die spezifische Toxizität der CNTs ist stark abhängig von den Studienbedingungen, der Reinheit der CNTs und von den verwendeten Organismen. Beispielhaft sind im Folgenden die Ergebnisse einiger Einzelstudien dargestellt.

Experimente an Zebraquärling-Embryonen zeigten erst ab Konzentrationen von 120 mg/l pathologische Veränderungen. Diese wurden von Cheng et al. (2007) jedoch auf Kobalt- und Nickelverunreinigungen der CNT zurückgeführt. Der Wasserfloh *Daphnia magna* nahm SWCNT via Ingestion auf, sofern die CNTs hydrophil funktionalisiert wurden. Die Funktionalisierung wurde bei diesen Expe-

rimenten von den Flöhen verdaut und die CNTs wurden wieder ausgeschieden (Roberts et al. 2007). Die Bakterien *E. coli* reagierten mit einer 80-prozentigen Abnahme der Zellvitalität nach einer Inkubationszeit von 60 Minuten bei einer Konzentration von 5 µg/ml (Kang et al. 2007). Schwab et al. (2011) zeigen, dass CNT zwar das Wachstum von Algen hemmen, diese Hemmung aber nicht auf eine toxische Wirkung von CNT zurückzuführen ist, sondern auf indirekte Effekte wie Verdunkelung und Verklumpung durch vorhandene CNT-Agglomerate (eingesetzte Konzentrationen zwischen 1,8 und 36 mg CNT / L – je nach Agglomerationsstatus).

Aufgrund der hohen Reaktivität von reinen CNTs sind diese Ergebnisse allerdings allesamt mit Vorsicht zu behandeln. Auf dem Lebensweg von CNTs können mannigfaltige Modifikationen auf den Oberflächen angesammelt werden, die zu hochgradig unterschiedlichen Effekten in Ökosystemen führen können. CNTs können, analog zu Fullerenen und vielen anderen Nanopartikeln, als Vektoren dienen und Moleküle auf ihrer Oberfläche in Organismen hineintransportieren. In dieser Funktion sind sie zwar medizinisch interessant, können aber andererseits unter bestimmten Bedingungen negative Effekte auf Organismen haben (Park et al. 2008). Der Transport von hydrophoben organischen Molekülen oder anderen Umweltgiften durch deren Bindung an die Oberfläche der CNTs sind denkbare Szenarien (Nowack et al. 2012; Hofmann et al. 2009). Wenn keine Oberflächenmodifikationen vorliegen und keine Verunreinigungen aus dem Produktionsprozess mehr vorhanden sind, gilt ökotoxikologisch Ähnliches wie humantoxikologisch. CNTs können Krebs fördern, sofern sie morphologisch bestimmte Bedingungen erfüllen. Erfüllen sie Letztere nicht, beruht ihre potenzielle Toxizität in grossem Masse auf ihren unbeabsichtigten Modifikationen, die entlang ihres Lebenszyklus angesammelt und verändert werden können (Grainger und Castner 2008; Yokel und MacPhail 2011; Landsiedel et al. 2012).

Basierend auf einem Lebenszyklusansatz berechnen Gottschalk et al. (2009; 2010) unter Berücksichtigung des Produktionsvolumens, der Verbrauchsmengen von CNT-haltigen Produkten sowie verfügbaren Umwelt- und ökotoxikologischen Daten von CNT-Risikoquotienten für die Schweiz und Europa. Die Risikoquotienten liegen für alle Umweltkompartimente weit unter 1 ( $< 0,0005$ ). Daraus kann geschlossen werden, dass bei den aktuellen Verwendungsbedingungen (d. h. Produktionsvolumina und Anwendungen) und dem derzeitigen Kenntnisstand hinsichtlich Umweltverhalten und Ökotoxikologie kein Risiko für Organismen in der Umwelt zu erwarten ist.

### *Vorläufige Diskussion bzw. Interpretation der Datenlage*

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Elastizitäten, Längen, Geometrien und Funktionalisierungen sind generelle Aussagen schwierig (Som et al. 2011). Experimente, bei denen die Geometrie der Nanotubes, die Modifikation oder das Material, aus dem sie bestehen, variiert werden, sind notwendig. Erste Schritte auf diesem Weg sind bereits unternommen (SRU 2011, S. 243–45). Darüber hinaus gibt es bisher nur wenige alternative Materialien, die es erlauben, diesen Parameter zu variieren. Dazu gehören Zellulose «Nanowhiskers» aus Baumwolle, wie sie zum Beispiel von Clift et al. (2011) untersucht werden.

In langer, steifer Form weisen CNTs ein pathologisches Profil ähnlich dem von Asbestfasern auf. Sofern sie in reiner Form vorliegen, konnte ihnen jedoch noch keine kanzerogene Wirkung nachgewiesen werden. Oberflächenmodifikationen oder Interaktionen mit organischen Molekülen führen in vielen Fällen zu erhöhter Wasserlöslichkeit und können die Toxizität, in Abhängigkeit von der Art der Modifikation, verstärken oder abschwächen. Es ist auf Grundlage der existierenden Daten nicht möglich, genau zu bestimmen woher beobachtete toxische Effekte rühren. CNTs werden nicht nur zu spezifischen Zwecken produziert, sondern entstehen auch spontan bei der unvollständigen Verbrennung von organischem Material. Obwohl sie eine hohe Biopersistenz und eine sehr schlechte Bioabbaubarkeit zeigen, schätzen Robichaud et al. (2005) das Umweltrisiko und die Exposition als sehr gering ein, da die CNTs für die meisten Anwendungen fest in Kompositmaterialien eingebettet sind. Hauptsächliche Gefahrenquellen sind während der Weiterverarbeitung zu fertigen Kompositmaterialien zu erwarten, wo unsachgemäße Handhabung oder ungenügende Sicherheitsvorkehrungen am Arbeitsplatz zu sehr hohen Konzentrationen von CNT in der Luft führen können (SRU 2011). Da sehr unterschiedliche Einsatzgebiete für die Zukunft erwogen werden, sind weitere Expositionswege, etwa durch Benutzung und Reinigung von modifizierten Textilien oder Abrieb und Verwitterung von CNT enthaltenden Gummi- oder anderen Kompositmaterialien, denkbar (Som et al. 2011; Gottschalk und Nowak 2011).

### 8.1.3 Fullerene

#### *Stoffprofil*

##### ► Anwendungen/Produkte

Fullerene haben ein breites Anwendungsspektrum. Sie sind sowohl in der industriellen Anwendung als Katalysator, Halbleiter, Supraleiter (bei niedrigen Temperaturen), Rohstoff für künstliche Diamanten oder hitzebeständige Schmiermittel nutzbar als auch im medizinischen Bereich als Wirkstofftransporter. Sie haben auch Eingang in einige Konsumprodukte wie Kosmetika (Antioxidantien in Hautcremes und Lippenstiften) oder in Sportgeräte wie Badminton- und Tennisschläger gefunden (Franco et al. 2007). Andere Anwendungsgebiete sind im Bereich von Brennstoffzellen, Solarzellen und Batterien angesiedelt (Mikkelsen et al. 2011).

##### ► Physikochemische Eigenschaften

Fullerene sind kugelförmige Kohlenstoffkonstrukte, die innen hohl sind. Sie werden aufgrund der durch den Kohlenstoff vermittelten geometrischen Bindungsstruktur gerne mit Fussbällen verglichen. Es sind verschiedene Kugelgrößen möglich, an denen mindestens 60 und maximal 94 Kohlenstoffatome beteiligt sind.

Industriell sind Fullerene aus den zuvor genannten Gründen interessant.

Medizinisch sind sie interessant, weil sie potenziell als Transporter für Wirkstoffmoleküle verwendet werden können, die in ihrem Inneren geschützt verfrachtet werden können. An sich sind Fullerene nicht wasserlöslich, aber durch Modifikationen ihrer Oberfläche wie z. B. der Hydroxylierung können sie hydrophil werden. Es sind viele biologisch und medizinisch interessante Liganden für eine derartige Oberflächenfunktionalisierung denkbar. Die Eigenschaften des Grundmoleküls würden sich für jede Modifikation signifikant verändern.

Wie auch alle anderen Nanomaterialien können Fullerene mit Proteinen und anderen Biomolekülen, wie sie in den meisten Ökosystemen vorkommen, chemisch interagieren (Johnston et al. 2010b; SRU 2011) und dadurch gleichzeitig eine höhere Persistenz vor Ort erlangen und in ihrer toxischen Wirkung verändert werden (Kahru und Dubourguier 2010).



### ► Freisetzung, Exposition und Umweltkonzentrationen

Die Freisetzung von Fullerenen ist während der Herstellung, Weiterverarbeitung und Nutzungsphase möglich. Hier wurden von Fujitani et al. (2008) und Yeganeh et al. (2008) zwar erhöhte Konzentrationen in der Luft von verarbeitenden Betrieben während bestimmter Arbeitsschritte festgestellt, aber es handelte sich überwiegend um Agglomerate. Das Ausmass der Freisetzung während der Nutzungsphase und der Expositionspfad hängen von der jeweiligen Anwendung ab. So kommt es beim Einsatz von einigen Kosmetika zur direkten Exposition von Menschen. Boxall et al. (2007) berichten von Fullerenanteil von ca. 5 bis 6 Prozent in Mascara und Eyeliner. Hansen et al. (2008) schätzen in einem Worst-Case-Szenario die tägliche Belastung durch Hautkontakt mit 26 µg/kg Körpergewicht ein. Dies gilt für die Annahme von 0,1 Prozent Fullerenen in Kosmetikprodukten.

Es ist so gut wie keine Freisetzung von Fullerenen während der Nutzenphase in Kompositmaterialien zu befürchten, da hier, ähnlich wie bei den CNTs, feste Bindungen an die einbettende Polymermatrix bestehen.

Gottschalk et al. (2009) berechnen die Konzentrationen von Fullerenen mit 0,017 und 0,04 ng/l in Oberflächengewässern und 0,012 und 0,0107 mg/kg in Klärschlamm für Europa bzw. die Schweiz. Diese Werte liegen in etwa um das 2000-fache unter der höchsten von aquatischen Organismen noch tolerierten Konzentration. Boxall et al. (2007) hingegen vermuten Umweltkonzentrationen von bis zu 0,3 µg/l in England. Obwohl sie damit etwa eine Grössenordnung höher liegen als Gottschalk et al. (2009), sind sie damit jedoch immer noch um das 100-fache niedriger als, ausgehend von den ökotoxikologischen Endpunkten, bedenklich wäre.

### ► Umweltverhalten

Nicht funktionalisierte Fullerene besitzen eine sehr geringe Löslichkeit in Wasser und tendieren zu Agglomeration. Umweltfaktoren wie Ozon oder organische Bestandteile im Wasser können die Löslichkeit der Fullerene beeinflussen (Gao et al. 2009). Xie et al. (2008) konnten die Deagglomeration von C<sub>60</sub>-Fullerenen in Wasser in Abhängigkeit von steigender Huminsäurekonzentration beobachten. Gleichzeitig nahm die toxische Wirkung der unmodifizierten Fullerene auf Bakterien ab. Durch Hydroxylierung hydrophilisierte Fullerene weisen eine hohe Mobilität in einem porösen System (Sand-Grundwasser-Modell) auf. In dieser Form erreichen Fullerene zwar viele biologische Systeme, sind aber auch dem biologischen Abbau deutlich zugänglicher. Schreiner et al. (2009) zeigten die Fähigkeit

zweier Pilzsorten (*Phlebia tremellosa* und *Trametes versicolor*), hydroxylierte Fullerene binnen von 32 Wochen mit minimalen negativen Effekten auf den eigenen Organismus abzubauen.

#### ► Humantoxizität

Inhalation von trockenen Fullerenen führte im Tierversuch kurzfristig zu leichten Entzündungsreaktionen, aber nicht zu bleibenden Schäden (Sayes et al. 2007). Fullerene konnten in den Untersuchungen von Baker et al. 2008 nicht aus der Lunge in das Blutgefäßsystem übertreten. Es verblieben bis zu 50 Prozent mehr Nanopartikel in der Lunge, im Vergleich zur Nichtnanoform. Dies schliesst jedoch nicht aus, dass Fullerene mit anderen Oberflächenmodifikationen oder nach spezifischen Proteininteraktionen nicht mobiler werden (Johnston et al. 2010b; SRU 2011). Werden Fullerene intravenös verabreicht, etwa zu diagnostischen oder therapeutischen Zwecken, so reichern sie sich in der Leber an und werden nur langsam über den Zeitraum von mehreren Wochen ausgeschieden. Aus dem Blutgefäßsystem können manche Fullerene auch die Blut-Hirn-Schranke überwinden. Diese Eigenschaft ist von den Modifikationen der Fullerene abhängig, und obwohl keine konkreten toxischen Effekte bei den verwendeten Modifikationen erkennbar waren, bleibt die Frage ungeklärt, was die Anreicherung von Fullerenen im Zentralnervensystem bewirken kann (Wohlfart et al. 2011; Chen et al. 2012). Versuche mit Schweinehaut lieferten Indizien für einen möglichen Durchtritt der Fullerene durch die Haut, wie etwa nach Aufbringung in Form von Kosmetika. Das Eindringen der Fullerene war allerdings an die Wahl des Lösungsmittels gekoppelt (Xia et al. 2010). Generell ist die Fähigkeit von Fullerenen zum Durchtritt von Hautschichten von ihrer Funktionalisierung und dem verwendeten Lösungsmittel abhängig. In manchen Zellkulturexperimenten konnte eine leichte Cytotoxizität nachgewiesen werden, welche mit der Modifikation der Fullerene und der daran gekoppelten Wasserlöslichkeit, der Bildung von reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) unter UV-Einwirkung und der Interaktion von Fullerenen mit Zellmembranen und daraus resultierenden Beschädigungen in Zusammenhang gebracht wurde. Weitere Effekte, die in Zellkulturexperimenten, in Versuchen mit Bakterien und mit aquatischen Organismen festgestellt werden konnten, standen in sehr engem Zusammenhang mit dem verwendeten Lösungsmittel, welches in kleinen Mengen dem wässrigen Medium zugesetzt werden musste, um Löslichkeit von unmodifizierten Fullerenen zu gewährleisten (Wiesner et al. 2008; Lovern und Klaper 2006; Oberdörster et al. 2006).

### ► Ökotoxizität

Wie bereits beschrieben, sind die toxischen Effekte der Fullerene in natürlichen Ökosystemen ziemlich gering. Sie kommen eher durch Lösungsmittel zustande, die experimentell eingesetzt werden, um die Wasserlöslichkeit zu gewährleisten, als durch die Fullerene selber. Darüber hinaus sind Oberflächenmodifikationen von entscheidender Bedeutung für die Toxizität (Mikkelsen et al. 2011). Die prinzipiell vorhandene Toxizität wird durch Interaktion mit organischen Bestandteilen im Ökosystem stark vermindert (Li et al. 2008). Darüber hinaus sind einige Erkenntnisse aus der Ökotoxizität von Fullerenen nur unzureichend belastbar, da auf der Basis etablierter Testverfahren für lösliche Substanzen keine aussagekräftigen Daten für Fullerene gewonnen werden können (siehe auch Abschnitt «Humantoxizität», S. 130). Für die Wirkung von Fullerenen in der Umwelt ist, wie bei vielen Nanopartikeln, nicht allein der Grad der Emission von Bedeutung, sondern vor allem die Menge an primären Nanopartikeln, die in suspendierter Form vorliegt. Es sind tiefere Kenntnisse und mehr Forschung zu dem Verhalten von Kolloiden unter relevanten Umweltbedingungen erforderlich, um eine sinnvolle Risikoevaluation vornehmen zu können.

### *Vorläufige Diskussion bzw. Interpretation der Datenlage*

Aufgrund der geringen nachweisbaren Toxizität und der sehr geringen, modellierten Umweltkonzentration ist für unmodifizierte Fullerene nur ein geringes nanospezifisches Risiko erkennbar. Wie bei CNTs sind auch bei Fullerenen toxische Effekte massgeblich an deren Modifikationen gekoppelt. Sowohl für umweltrelevante Aspekte als auch für humantoxische Überlegungen sind die jeweiligen Modifikationen und Erscheinungsformen (Staub, Aerosol, flüssig, fest) von grosser individueller Bedeutung. Die Fähigkeit, die Blut-Hirn-Schranke bei intravenöser Gabe zu überwinden, rechtfertigt weitere Untersuchungen zu dem Verbleib und den Effekten von Fullerenen im Zentralnervensystem. Aus der Literatur wird deutlich, dass die Art der Oberflächenmodifikation drastische Auswirkungen auf alle Expositionswege und die damit verbundene Toxizität hat.

## 8.1.4 Titandioxid

### *Stoffprofil*

#### ► Anwendungen/Produkte

Die Anwendungen von Titandioxid reichen von Kosmetikprodukten (z. B. Sonnencreme, Zahnpasta) über Aussenanstriche, Oberflächenbeschichtungen (z. B. für selbstreinigende Dachziegel, Zement, Fenster) bis hin zu Textilien. Dabei steht die Eigenschaft von Titandioxid, energiereiches UV-Licht zu absorbieren, im Vordergrund. Eine weitere Anwendung umfasst den Einsatz in Solarzellen. Daneben wird Titandioxid aufgrund seiner fotokatalytischen Eigenschaften zur Desinfektion von Abwasser und in Wandfarben angewandt.

Derzeit dominiert der Einsatz von  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln in dermalen Sonnenschutzmitteln (SRU 2011; Mikkelsen et al. 2011; Kuhlbusch und Nickel 2010).

#### ► Physikochemische Eigenschaften

Titandioxid kommt in drei kristallinen Formen vor: Anatas (tetragonale Kristalle), Brookit (orthorhombische Kristalle) und Rutil (tetragonale Kristalle), die sich zum Teil auch in ihren physikochemischen und (öko-)toxikologischen Eigenschaften unterscheiden.

Titandioxid absorbiert UV-Licht und ist daher ein effektiver UV-Filter. Nanoskaliges Titandioxid ist im Gegensatz zu makroskaligem  $\text{TiO}_2$  transparent, weshalb es bevorzugt in Sonnencreme eingesetzt wird (v. a. die rutil Form). Die Anatasform verfügt über spezifische elektrische, fotokatalytische und somit auch antimikrobielle Eigenschaften.

Die fotokatalytische Aktivität von  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln birgt das Risiko, dass durch diese Reaktionen unerwünschte Zwischenprodukte gebildet werden können, wie zum Beispiel Formaldehyd, Acetaldehyd oder Nitrat, die hinsichtlich der Gesundheit und der Umwelt ein Problem darstellen können (SRU 2011).

#### ► Freisetzung, Exposition und Umweltkonzentrationen

Titandioxid kann prinzipiell bei der Herstellung, der Weiterverarbeitung in Produkten, der Nutzungsphase oder auch der Entsorgung freigesetzt werden, sodass es zu einer Exposition von Mensch und Umwelt kommen kann.

### Exposition Mensch:

Nach Kuhlbusch und Nickel (2010) konnte bei Messungen an Arbeitsplätzen, an denen nanoskaliges TiO<sub>2</sub> verarbeitet wird, keine signifikante Freisetzung von nanoskaligen TiO<sub>2</sub>-Partikeln nachgewiesen werden. Zumindest für die untersuchten Produktionsstätten und unter der Vorgabe eines sorgfältigen Umgangs ist mit einer geringen Freisetzung von TiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln in die Atmosphäre zu rechnen. Auch Asbach et al. (2009) konnten bei Messungen zur Freisetzung von TiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln an zwei unterschiedlichen Arbeitsplätzen in der Partikelherstellung und -weiterverarbeitung keinen signifikanten Anstieg der Partikelkonzentration nachweisen.

Allerdings kann es bei Leckagen sowie bei der Reinigung von Maschinen zur Freisetzung von nanoskaligem Titandioxid in die Aussenluft und ins Abwasser kommen.

Das Ausmass der Freisetzung während der Nutzungsphase und der Expositionspfad hängen von der jeweiligen Anwendung ab:

Beim Einsatz von Kosmetikprodukten wie z. B. Sonnencreme kommt es zum direkten dermalen Kontakt der Konsumenten mit TiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln. Hansen et al. (2008) berechnen für eine Sonnencreme mit einem 2-prozentigen Anteil an TiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln eine Worst-Case-Exposition von 57 µg/kg Körpergewicht pro Tag, bezogen auf ein zweijähriges Kind. Verschiedene Studien zeigen jedoch, dass TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel in Kosmetikprodukten nicht über die intakte Haut in den Körper eindringen und somit über diesen Weg auch nicht über das Blut-Kreislauf-System systemisch verfügbar werden. Einer ersten Studie zufolge werden TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel auch bei durch UV-Licht geschädigter, entzündeter Haut nicht in den Körper aufgenommen; allerdings dringen hier die Partikel in tiefere Hautschichten vor. Zum Partikelverhalten auf erkrankter Haut sind dringend weitergehende Studien erforderlich (SRU 2011 S. 144 ff.).

Da einige Sonnenschutzmittel auch als Sprays angeboten werden, kann es ebenfalls zu einer inhalativen Exposition mit TiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln kommen. Basierend auf Modellrechnungen schätzen Mikkelsen et al. (2011) die maximale Kurzzeiteexposition bei dieser Anwendung auf 3,5 g/m<sup>3</sup>.

Arbeiter sind beim Verarbeiten von Produkten, die nanoskaliges TiO<sub>2</sub> enthalten, wie z. B. Aussenwandfarben, ebenfalls TiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln exponiert. Das Ausmass dieser potenziellen Exposition ist noch nicht untersucht.

Bulkförmiges TiO<sub>2</sub> (d. h. makroskaliges TiO<sub>2</sub>) enthält häufig zu einem gewissen Anteil auch Partikel der Nanofraktion. Dieses bulkförmige TiO<sub>2</sub> wird unter anderem auch zum Weissfärben und Aufhellen von Lebensmitteln eingesetzt, vor

allem von Süsswaren, weissen Saucen und Dressings, sodass durch den Verzehr solcher Lebensmittel auch nanoskaliges  $\text{TiO}_2$  aufgenommen wird. Powell et al. (2010) schätzen, dass in Grossbritannien täglich 5 mg (makro- und nanoskaliges)  $\text{TiO}_2$  pro Person über die Nahrung aufgenommen werden. Weir et al. (2012) zeigen, dass  $\text{TiO}_2$  als Zusatzstoff in zahlreichen Nahrungsmitteln enthalten ist. Die höchsten Anteile an  $\text{TiO}_2$  mit bis zu 360 mg pro Portion wurden in Bonbons, Süssigkeiten und Kaugummi gefunden. Auch Körperpflegemittel wie Zahncreme und verschiedene Sonnencremes können bis zu 10 Gewichtsprozent  $\text{TiO}_2$  enthalten. Die Autoren schätzen, dass ca. 36 Prozent der eingesetzten  $\text{TiO}_2$ -Partikel der Nanofraktion angehören. Aus den Ergebnissen schliessen die Autoren zudem, dass Kinder bedingt durch ihren Konsum an Süssigkeiten und ihr geringeres Körpergewicht am stärksten exponiert sind.

#### Exposition Umwelt:

Zunächst einmal ist zu beachten, dass Titan ein sehr häufig in der Erdkruste vorkommendes Element ist. Der Eintrag von  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln in die Umwelt geschieht derzeit vorrangig durch Abwaschen von Sonnenschutzcreme (vor allem in Badegewässern) sowie durch Auswaschung aus Fassadenanstrichen bzw. den verwitterungsbedingten Abtrag von  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln aus beschichteten Oberflächen von Baumaterialien oder Glasscheiben. Die Freisetzung in die Umwelt erfolgt dabei in erster Linie über den aquatischen Pfad. Kaegi et al. (2008) haben im Rahmen einer Studie den Eintrag von nanoskaligen  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln aus Aussenwandfarben (sowohl frisch gestrichen als auch zwei Jahre gealtert) im Abwasser nachgewiesen. Zudem wurden  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel in einem in unmittelbarer Nähe befindlichen Bach gefunden. Durch wiederholte Regenfälle konnten erhebliche Mengen an  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln (bis zu 70 Prozent) aus den Fassadenfarben ausgewaschen werden (mündliche Auskunft, zitiert in Kuhlbusch und Nickel 2010). Hierbei ist zudem wichtig zu betonen, dass die untersuchten Farben keine  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel, sondern nur  $\text{TiO}_2$ -Pigmente enthielten. Es handelt sich hier also um Freisetzung von Nanopartikeln aus konventionellen Materialien. Eine Studie von Hsu und Chein (2007) zeigt, dass  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel auch von Oberflächenbeschichtungen freigesetzt werden können, wobei das Ausmass der Freisetzung abhängig ist vom Material, das beschichtet wird, von der UV-Strahlung, dem das oberflächenbeschichtete Material ausgesetzt ist, und der mechanischen Beanspruchung.

Auf Basis von Modellberechnungen für die Schweiz schätzen Mueller und Nowack (2008) die zu erwartenden Umweltkonzentrationen (PEC-Werte) im Wasser

auf 0,7 µg/L (realistisches Szenario) bis 16 µg/L (maximale Emission) und ca. 1 mg/kg im Boden.

Berechnungen für Grossbritannien kommen auf Konzentrationen in Oberflächengewässern von 24,5 µg/L und im Boden von 1030 µg/kg (Boxall et al. 2007).

Gottschalk et al. (2009) berücksichtigen bei ihren Berechnungen die mögliche Sedimentation der (agglomerierten) TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel und kommen auf Konzentrationen von 0,015 und 0,021 µg/L für Oberflächengewässer in Europa und in der Schweiz. Deutlich höhere Konzentrationen werden für den Kläranlagenauslauf (4,28 µg/L für die Schweiz bzw. 3,47 µg/L für Europa) berechnet. Ausserdem zeigen die Berechnungen, dass sich TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel vor allem im Sediment sowie in klärschlammbehandelten Böden anreichern.<sup>117</sup>

#### ► Umweltverhalten

TiO<sub>2</sub> ist wasserunlöslich und stabil und wird daher in der Umwelt nicht aufgelöst. Im Wasser bilden TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel statt dessen schnell vergleichsweise stabile Agglomerate und Aggregate, die mit der Zeit aus dem Wasser ins Sediment übertreten und von dort wahrscheinlich kaum wieder verfügbar werden (SRU 2011).

In einer Studie zum Verhalten von TiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln in Kläranlagen zeigten Kiser et al. (2009), dass ein gewisser Teil von den in die Kläranlagen eingetragenen Nanopartikeln nicht im Klärschlamm zurückgehalten wird, sondern die Kläranlage passiert und somit zu einer Exposition der aquatischen Umwelt führen kann.

Bedingt durch seine fotochemische Reaktivität wirkt TiO<sub>2</sub> unter Lichteinfluss deutlich toxischer als im Dunkeln (Hund-Rinke und Simon 2006). Aus diesem Grund wird TiO<sub>2</sub>, das in der Kosmetikindustrie verwendet wird, auch häufig beschichtet, z. B. mit Aluminiumoxid, um fotochemische Reaktionen zu unterbinden (Som et al. 2010). Studien von Fouqueray et al. (2012a+b), Botta et al. (2011) und Labille et al. (2010) zeigen, dass die vom Hersteller vorgenommenen Oberflächenmodifikationen degradieren und dadurch die Dispersion der Nanopartikel vor allem im aquatischen Kompartiment signifikant verändert wird. Die vom Hersteller unbeabsichtigten neuen Modifikationen, die erst im Verlauf der Nutzungs- und Entsorgungsphase auftreten, verhelfen den Nanopartikeln zu neuen und vielfältigen Eigenschaften (s.a. Landsiedel et al. 2012).

---

<sup>117</sup> Die Aussagen zu Anreicherungen von TiO<sub>2</sub> in klärschlammbehandelten Böden beziehen sich nicht auf die Schweiz, da hier kein Klärschlamm ausgebracht wird.

### ► Humantoxizität

Herkömmliches, d. h., nicht nanoskaliges Titandioxid wurde von der IARC (International Agency for Research on Cancer) der WHO (World Health Organization) in Kategorie 2B als mögliches Kanzerogen für den Menschen eingestuft. Die Klassifizierung basiert auf tierexperimentellen Langzeitinhalationsversuchen, sowohl an nanoskaligem wie nicht nanoskaligem Titandioxid (SRU 2011).

Das Sondergutachten des Sachverständigenrats für Umweltfragen (SRU 2011) fasst die Erkenntnisse aus humantoxikologischen Studien mit TiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln folgendermassen zusammen:

Nach Einatmen verbleiben TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel weitgehend im Lungengewebe. Ein geringer Anteil kann in das Blutgefässsystem (in die Lungenkapillaren) eindringen und dadurch in andere Organe transportiert werden (Kapp et al. 2004; Geiser et al. 2005).

In verschiedenen In-vitro- und In-vivo-Studien zur Humantoxizität von TiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln wurde in der Regel eine geringe Toxizität nachgewiesen. Allerdings wird sowohl in vivo wie in vitro für TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel bestätigt, dass sie teilweise schon in geringen Konzentrationen die Bildung reaktiver Sauerstoffspezies fördern und damit oxidativen Stress induzieren. Bei Inhalationsexperimenten konnten Entzündungsreaktionen in der Lunge beobachtet werden, die aber in Abhängigkeit von der Konzentration und Dauer in der Regel reversibel sind. Die Kristallstruktur Anatas der TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel ist dabei aktiver als die andere ebenfalls verwendete Kristallstruktur Rutil. Bei hohen Expositionsdosen wirken TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel bei Ratten in der Lunge kanzerogen (Roller 2009; Valberg et al. 2009). Unklar ist, ob diese Wirkung auf die (unrealistisch) hohen Expositionsdosen zurückzuführen ist. Es besteht Unsicherheit hinsichtlich einer Kanzerogenität von TiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln infolge einer chronischen Exposition (Roller 2009). Valberg et al. (2009) bemängeln jedoch die extrem hohen Partikeldosen, die von Roller (2008) verwendet wurden, und berechnen für diese eine drei- bis elffache Überladung der Lungen der Tiere mit Partikeln. Die pathologischen Effekte solcher Überladungen sind mit Partikelmenge und -grösse, nicht jedoch mit Partikelmaterial gekoppelt. Dennoch ist die Möglichkeit der Kanzerogenität nicht von der Hand zu weisen, da mehrere Studien zeigen, dass TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel bis in den Zellkern vordringen können und damit in der Lage sind, mit der DNA direkt zu interagieren oder diese mittels Radikalbildung und sekundärem oxidativem Stress zu schädigen (Geiser et al. 2005; Buzea 2007; Schins und Knaapen 2008; Xu et al. 2009).



Mit Blick auf die Verwendung von  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln in Kosmetikprodukten ist weitgehend bestätigt, dass keine relevante dermale Absorption von  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln durch gesunde Haut, unabhängig von Form und Oberflächenstruktur, stattfindet (s.o., Kapitel «Freisetzung, Exposition und Umweltkonzentrationen», S. 132).

Mikkelsen et al. (2011) fassen in ihrem Risikoprofil zu den gesundheitlichen Aspekten zusammen, dass nanoskaliges  $\text{TiO}_2$  aus dem Magen-Darm-Trakt absorbiert werden und in sekundäre Organe weiterverteilt werden kann. Die akute Toxizität nimmt mit abnehmender Partikelgrösse zu. Zudem hängt die Toxizität von der Struktur der Nanopartikel ab, wobei die Anatasform toxischer ist als die Rutilform (zu den verschiedenen kristallinen Formen siehe Abschnitt «Physikochemische Eigenschaften», S. 118).  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel verursachen Entzündungsreaktionen, induzieren oxidativen Stress und bewirken histologische Veränderungen in den Zielorganen. Primäres Zielorgan nach Inhalation ist die Lunge, wogegen nach oraler Exposition die Leber als Zielorgan genannt wird. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Untersuchungen zu Effekten auf Darmzellen bisher kaum vorliegen.

#### ► Ökotoxizität

Es liegen einige Studien zur Wirkung von  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln auf aquatische Organismen vor, aber nur sehr wenige für terrestrische Organismen. Die Ergebnisse der Studien sind zum Teil sehr konträr, was unter anderem darauf zurückzuführen ist, dass für die Herstellung der Testsuspensionen bisher keine einheitlichen Standards existieren:  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel neigen zur Aggregation bzw. Agglomeration in der Testsuspension, wodurch die Wahrscheinlichkeit sinkt, dass frei schwimmende Testorganismen mit einzelnen Nanopartikeln in Kontakt kommen, während am/im Wasser lebende Organismen umso mehr exponiert werden. Abhilfe wird hier durch den Einsatz von Ultraschall oder Lösungsmitteln geschaffen. Bei Letzteren ist allerdings nicht auszuschliessen, dass beobachtete Effekte auf die Lösungsmittel und nicht auf die  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel zurückzuführen sind. Auch im Testdesign unterscheiden sich die verschiedenen Studien.

Für Wasserflöhe (*Daphnia magna*) reichen die Testergebnisse von wenig toxisch bis toxisch, je nach Autor und Testdesign. Vor allem Tests zu chronischen Wirkungen zeigten zum Teil deutliche Effekte auf das Wachstum und die Nahrungsaufnahme sowie auf Mortalität und Reproduktion (zitiert in SRU 2011 und Mikkelsen et al. 2011). Beeinflussende Grössen in diesen Tests waren neben der  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel-Konzentration die Anwesenheit von Futter oder auch das

Testmedium selbst (Flusswasser versus Leitungswasser). Völker (2011) berichtet, dass eine dreiwöchige Behandlung von Wasserflöhen mit nanoskaligem Titandioxid zu einem verminderten Wachstum der Tiere führt und die Reproduktion negativ beeinflusst wird.

Die bisher vorliegenden – teils sehr konträren – Daten erlauben keine eindeutige Schlussfolgerung hinsichtlich der Ökotoxizität von  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln auf Wasserflöhe.

Tests an Algen zeigten eine wachstumshemmende Wirkung von  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln, wobei das Ausmass des wachstumshemmenden Effekts abhängig von der Partikelgrösse des Titandioxids war: Partikel mit geringerer Grösse (25 nm) lösten bei geringeren Konzentrationen geringere Effekte aus als grössere Partikel (100 nm) (Hund-Rinke und Simon 2006).

Test mit Regenbogenforellen haben gezeigt, dass – obwohl nur eine geringe akute Toxizität beobachtet werden konnte –  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel zu physiologischen und morphologischen Veränderungen in Kiemen und Darm geführt haben sowie zu oxidativen Stress in diesen Organen und im Gehirn. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass für  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel gegebenenfalls nicht die typischen (z. B. in REACH definierten) Endpunkte relevant, sondern andere Effekte von Bedeutung sind (Federici et al. 2007; zitiert in SRU 2011 und Mikkelsen et al. 2011). Ihre Studien zeigen, dass im Wasser vorhandene  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel die Akkumulationsrate von Arsen und Cadmium in Fischen erhöhen. Es wird vermutet, dass sich die Schwermetalle an die Nanopartikel binden und mit diesen leichter in die Organismen aufgenommen werden können (Zhang et al. 2007 und Sun et al. 2009, zitiert in SRU 2011).

Studien weisen auf eine mögliche Bioakkumulation von  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln in aquatischen Organismen hin, aber weitere Tests sind erforderlich, um das Bioakkumulationspotenzial mit Hinblick auf verlässliche BCF-Werte<sup>118</sup> zu quantifizieren (Mikkelsen et al. 2011).

Dabei stellt sich auch die Frage, ob sich die in niederen Organismen akkumulierten  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel über die Nahrungskette anreichern können (Biomagnifikation). Über diese Biomagnifikation könnten die Nanopartikel letztendlich auch von den Endgliedern der Nahrungskette (d. h. Raubtieren, Greifvögeln und Mensch) aufgenommen werden. In ersten Untersuchungen von Priester et al. (2012) konnte in diesem Zusammenhang gezeigt werden, dass am unteren Ende der Nahrungskette Protozoen Bakterien aufnehmen können, welche mit  $\text{TiO}_2$ -

---

<sup>118</sup> BCF: Bioconcentration factor = Biokonzentrationsfaktor.

Nanopartikel umgeben sind, und dass die Protozoen die aufgenommenen  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel in den Nahrungsvakuolen akkumulieren. In einem Experiment von Völker (2011) wurden Daphnien mit Algen gefüttert, die zuvor mit  $\text{TiO}_2$ -Partikeln behandelt worden waren. Es konnte gezeigt werden, dass die Nanopartikel an den Algen haften blieben und nach der Verfütterung der Algen eine Anreicherung von  $\text{TiO}_2$ -Partikeln im Darm der Daphnien beobachtet werden konnte. Da Daphnien über Nahrungsketten mit zahlreichen anderen Organismen in Beziehung stehen, besteht die Sorge, dass sich die Partikel auch in diesen Organismen anreichern. Ausserdem zeigte der Versuch, dass die Aufnahme der Titandioxidpartikel über die Nahrung bei den Daphnien zu einer höheren Sterblichkeit führte, als wenn die Partikel über das Wasser verabreicht wurden.

### *Vorläufige Diskussion bzw. Interpretation der Datenlage*

Eine Exposition der Umwelt erfolgt vornehmlich über den aquatischen Ausbreitungspfad durch Abwaschen von Sonnenschutzcreme sowie durch Auswaschung aus Fassadenanstrichen bzw. Abtrag durch Verwitterung aus beschichteten Oberflächen. Im Wasser können die nanoskaligen Materialien durch tierische Organismen direkt oral aufgenommen werden oder indirekt über die Nahrungskette, über das Sediment oder über die Kiemen. Der Mensch ist neben dem aquatischen Ausbreitungspfad einer direkten dermalen Exposition durch die Verwendung von Kosmetikprodukten ausgesetzt, welche nanoskaliges  $\text{TiO}_2$  enthalten.

In verschiedenen In-vitro- und In-vivo-Studien zur Humantoxizität von  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln wurde in der Regel eine geringe Toxizität nachgewiesen. Allerdings wird sowohl in vivo wie in vitro für  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel bestätigt, dass sie teilweise schon in geringen Konzentrationen die Bildung reaktiver Sauerstoffspezies fördern und damit oxidativen Stress induzieren. Bei Inhalationsexperimenten konnten Entzündungsreaktionen in der Lunge beobachtet werden. Bei hohen Expositionsdosen wirken  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel bei Ratten in der Lunge kanzerogen.

Mit Blick auf die Verwendung von  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln in Kosmetikprodukten ist weitgehend bestätigt, dass  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel nicht über die intakte Haut in den Körper eindringen.

Stone et al. (2009) haben auf Basis von modellierten Umweltkonzentrationen und vorliegenden Ökotoxizitätsstudien eine vorläufige Abschätzung des Umweltrisikos von  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln durchgeführt. Nach Ableitung eines aquatischen

PNEC<sup>119</sup> von 5,8 µg/L<sup>120</sup> ergeben sich je nach Emissionsszenario Risikoquotienten (PEC<sup>121</sup>-/PNEC-Werte) von 0,1 bis 4,2. Unter den Annahmen des Szenarios mit den hohen Umweltkonzentrationen wäre demzufolge ein Risiko für Schädigungen an Wasserorganismen zu erwarten, berücksichtigt man die niedrigeren Konzentrationen aus der zweiten Modellierungsstudie, hingegen nicht.

Gottschalk et al. (2010) berechnen für die Schweiz Risikoquotienten von 0,02 für Oberflächengewässer und von 4,28 für den Kläranlagenauslauf.

Bezüglich der Risikoabschätzung für die Umwelt existieren allerdings Unsicherheiten, sowohl hinsichtlich der Validität der ökotoxikologischen Testergebnisse als auch der zu erwartenden Umweltkonzentrationen.

Das Sondergutachten des Sachverständigenrats für Umweltfragen (SRU 2011) kommt zu der Einschätzung, dass für die Abschätzung eines Gesundheits- und Umweltrisikos insbesondere Daten über Langzeitwirkungen niedriger TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel-Dosen und Expositionsszenarien für den gesamten Lebenslauf der Produkte wünschenswert wären. Insbesondere das mögliche Potenzial, Mutationen und die Bildung von Tumoren zu induzieren, rechtfertigt einen vorsorgenden Umgang sowohl in der Material- und Produktherstellung wie auch der Anwendung, solange eine abschliessende Risikobewertung nicht möglich ist.

### 8.1.5 Elementares Eisen und Eisenoxid

#### *Stoffprofil*

##### ► Anwendungen/Produkte

Eisen- und Eisenoxid-Nanopartikel sind aufgrund ihrer magnetischen und katalytischen Eigenschaften für verschiedene technische und medizinische Anwendungen von Interesse. Hinsichtlich der von ihnen ausgehenden Chancen und Risiken sind aber vor allem die folgenden Anwendungsbereiche in der Umweltsanierung und Medizin zu beachten:

---

<sup>119</sup> PNEC = Predicted No Effect Concentration (vorausgesagte Konzentration eines i. d. R. umweltgefährlichen Stoffes, bis zu der sich keine Auswirkungen auf die Umwelt zeigen).

<sup>120</sup> PNEC: abgeleitet ausgehend vom niedrigsten EC50 (Alge) von 5,8 mg/L und einem Sicherheitsfaktor von 1000.

<sup>121</sup> PEC = Predicted Environmental Concentration (prognostizierte Umweltkonzentration).

### 1) Umweltsanierung:

- Eisen-Nanopartikel haben katalytische Eigenschaften und können in kontaminierten Standorten (z. B. belastete Böden, Sedimente und Grundwasserkörper) zur Dechlorierung von chlorierten Lösungsmitteln (z. B. Tetrachlormethan, Trichlorethen), zum oxidativen Abbau von Pestiziden, Oxidation von Nitrit oder Immobilisierung von Metallen wie Chrom, Quecksilber und Arsen beitragen (SRU 2011).
- Einsatz von Eisenoxid zur Adsorption und magnetischen Abtrennung von Schwermetallen zur Trinkwasseraufbereitung.

### 2) Medizin:

- Nutzung von Eisenoxid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) in der Krebserkennung und -behandlung (Wärmetherapie) (Shubayev et al. 2009; Jain et al. 2005).
- Aufgrund ihrer superparamagnetischen Eigenschaften werden Eisenoxid-Nanopartikel als Kontrastmittel in der Kernspintomografie eingesetzt.
- Bei der sogenannten NANOTHERM<sup>®</sup> Therapie werden magnetische Eisenoxid-Nanopartikel in Tumore gespritzt und mittels magnetischer Wechselfelder erhitzt. Dadurch werden die Tumorzellen entweder irreparabel geschädigt (Thermoablation) oder sie werden empfindlicher gegenüber einer begleitenden Radio- oder Chemotherapie (Hyperthermie) (MagForce AG 2011<sup>122</sup>).
- Erforscht wird derzeit der Einsatz von magnetischen Eisenoxid-Nanobjekten (sog. SPIONs, superparamagnetic ironoxide nanoparticles), die mit Wirkstoffen beladen im Körper durch ein Magnetfeld gezielt in ein Organ gesteuert werden und dort ihre Fracht abladen (Dechema 2011).

Daneben werden Eisenoxid-Nanopartikel zur Herstellung von Pigmenten und Ferrofluiden (Dispersionen mit nanoskaligem Eisenoxid oder anderen magnetischen Materialien) z. B. in schnell rotierenden Computerfestplatten als flüssige Dichtungen eingesetzt.

---

<sup>122</sup>

MagForce AG: [www.magforce.de/studien/aerzte-informationen.html](http://www.magforce.de/studien/aerzte-informationen.html) (abgerufen am 24.10.12).

### ► Physikochemische Eigenschaften

Eisenoxid-Nanopartikel weisen eine geringe Stabilität<sup>123</sup> auf, weshalb es in vielen Fällen notwendig ist, die Partikel chemisch durch Beschichtung oder Formulierung zu stabilisieren. Als Stabilisatoren können zum Beispiel Fettsäuren, Amine oder Metalle wie Gold genutzt werden (SRU 2011). Bestimmte Eisenoxide sind magnetisch, wodurch sie im Bereich der Nanomedizin gezielt zum Einsatzort gesteuert werden können (siehe Abschnitt «Anwendungen/Produkte», S. 117).

### ► Freisetzung, Exposition und Umweltkonzentrationen

Exposition Mensch:

Menschen können sowohl bei der Herstellung und Weiterverarbeitung von Eisenoxid-Nanopartikel exponiert werden als auch bei der Anwendung von Arzneimitteln bzw. Medizintechniken sowie durch Eisen- und Eisenoxid-Nanopartikel zur Sanierung von belasteten Böden oder Wasserkörpern. Untersuchungen zur Freisetzung bzw. Exposition bei der Herstellung und Verarbeitung von Eisen- und Eisenoxid-Nanopartikeln liegen nach derzeitigen Kenntnissen nicht vor.

Die meisten Studien zum Verhalten und zur Wirkung von Eisenoxid-Nanopartikeln im Organismus beschäftigen sich mit für medizinische Zwecke funktionalisierten Strukturen.

Bei ihrer Anwendung in der Medizin werden Eisenoxid-Nanopartikel direkt in den Körper verabreicht, z. B. durch intravenöse Injektion in die Blutbahn, was zu einer raschen und gewollten Verteilung der Partikel im ganzen Körper führt. Dabei können sie mit speziellen Proteinen beschichtet werden, um sie gezielt zu bestimmten Organen oder Zellen zu dirigieren (z. B. mit Folat zur Markierung von Krebszellen) (DaNa 2012).

Im nicht medizinischen Bereich konnten Baroli et al. (2007) in einer Studie zur Aufnahme von sehr kleinen, mit organischen Verbindungen stabilisierten Eisen- und Eisenoxidpartikeln (ca. 5 bis 6 nm im Durchmesser) eine Penetration der Nanopartikel durch die Hornhaut in tiefere Hautschichten nachweisen.

Zhu et al. (2009) dokumentieren eine Aufnahme von Eisenoxid-Nanopartikeln über die Lunge und eine weite Verteilung der Nanopartikel im Organismus und Akkumulation in verschiedenen Organen durch Translokation in das Blutgefäßsystem. Die höchsten Eisenkonzentrationen fanden sich in der Leber, gefolgt von Milz, Herz und Nieren. Eisen gelangte in sehr geringen Mengen auch ins Gehirn,

---

<sup>123</sup> Zu nennen sind hier v. a. eine geringe Löslichkeit in Wasser unter Wasserstoffgenese sowie Löslichkeit in Abhängigkeit von Umgebungs-pH-Wert und geeigneten Reaktionspartnern.

die Halbwertszeit der Partikel im Blutplasma war mit 22,8 Tagen hoch. Mit Ausnahme der Niere wurden die Eisenkonzentrationen in den Organen in hohem Masse auf partikuläres und somit nicht ionisches Eisen zurückgeführt. Einzelne Eisen-Nanopartikel wurden im Epithel und in den Makrophagen der Lunge bis zu 30 Tage nach der Exposition nachgewiesen (Zhu et al. 2009, zitiert in SRU 2011).

#### Exposition Umwelt:

Ein relevanter Eintragspfad für Eisen-Nanopartikel in die Umwelt ist deren gezielte Ausbringung zum Zweck der Sanierung von belasteten Böden oder Grundwasserkörpern. Dabei soll über die Eisen-Nanopartikel die oxidative Transformation von Schadstoffen gefördert werden, die dabei nicht endgültig entfernt, sondern lediglich dechloriert, oxidiert oder immobilisiert werden (SRU 2011). So wird z. B. bei der Grundwassersanierung elementares Eisen (nano zero valent iron; nZVI) in Mengen bis > 1 t Nano-eisen pro Sanierung eingetragen (Mueller et al. 2012). Da es sich hier um eine gezielte und zugleich umweltoffene Anwendung handelt, ist die Bewertung möglicher negativer Effekte und eines resultierenden Risikos von besonderer Bedeutung.

Da Eisen und Eisenoxid aus natürlichen Quellen in vergleichsweise grossen Mengen in der Umwelt vorkommen, ist die Quantifizierung und Bewertung des zusätzlichen Eintrags von Eisen- und Eisenoxid-Nanopartikeln allerdings schwierig.

#### ► Umweltverhalten

Wie bei Titandioxid ist auch bei Eisen und Eisenoxid zu beachten, dass diese in der Umwelt aus natürlichen Quellen vorkommen. Eisenoxid-Nanopartikel haben im Wasser eine Agglomerationsneigung, die allerdings vom pH-Wert sowie von dem Vorhandensein von Huminsäuren<sup>124</sup> sowie anderen organischen Molekülen im Wasser beeinflusst wird. So förderten sowohl ein Anstieg des pH-Wertes als auch der Huminsäurekonzentration die Aggregation der Eisenoxid-Nanopartikel. Sehr hohe Huminsäurekonzentrationen führten wiederum zur Deaggregation der gebildeten Aggregate. Die Ergebnisse weisen auf die Bildung einer Oberflächenbeschichtung der Eisenoxid-Nanopartikel aus Huminsäuren hin (Baalousha 2009 und Baalousha et al. 2008, zitiert in SRU 2011).

---

<sup>124</sup> Huminsäuren sind natürliche organische Verbindungen, die bei der Humusbildung oder beim Abbau von Humus entstehen.

Eisenoxid-Nanopartikel, die durch eine Huminsäurebeschichtung stabilisiert sind, bleiben im Wasser länger für Organismen verfügbar und können weitertransportiert werden, wogegen agglomerierte bzw. an Schwebstoffe adsorbierte Partikel schneller ins Sediment absinken können.

Verschiedene Studien haben sich mit der Mobilität von Eisennanopartikeln in unterschiedlichen porösen Materialien bzw. Sanden beschäftigt (Saleh et al. 2008; Schrick et al. 2004). Dabei zeigte sich, dass diese weitgehend immobil sind, durch Modifikationen der Partikeloberflächen mit Polymeren, Tensiden<sup>125</sup> oder Säuren aber eine hohe Mobilität erlangen können. So wiesen Yang et al. (2007) zum Beispiel nach, dass mit Polyacrylsäure stabilisierte Eisen-Nanopartikel eine hohe Mobilität in Silikatsand, nicht aber in Lehmsand aufweisen (zitiert in SRU 2011).

#### ► Humantoxizität

Tests an Zellen aus dem Lungenepithel von Ratten konnten nur eine geringe bzw. keine Zytotoxizität von  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Nanopartikeln (zweiwertiges Eisenoxid = Hämatit) bzw.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -Nanopartikeln (dreiwertiges Eisenoxid = Magnetit) nachweisen (Karlsson et al. 2008, zitiert in SRU 2011). Auch in Tests mit humanen Knochenmarkzellen konnten keine Hinweise für negative Effekte durch die Exposition gegenüber Eisenoxid-Nanopartikeln gefunden werden (Bregoli et al. 2009). In Untersuchungen an Leberzellen von Ratten wiesen Eisenoxid-Nanopartikel ebenfalls nur eine geringe Zytotoxizität auf (Hussain et al. 2005). Wirkungen auf die Zellviabilität wurden aber bereits bei niedrigen bis moderaten Eisenoxid-Nanopartikelkonzentrationen beobachtet (Brunner et al. 2006 und Pisanic et al. 2007, zitiert in SRU 2011).

In Tierversuchen erzeugen Eisenoxid-Nanopartikel Entzündungsreaktionen in der Lunge und eine Induktion von oxidativem Stress.

Die Aufnahme von Eisenoxid-Nanopartikeln in den Körper zeigt nach Inhalation sowie Instillation (Injektion einer Suspension von Eisenoxid-Nanopartikeln in die Luftröhre), dass das Zielorgan für Schädigung vor allem die Lunge ist (Zhu et al. 2009; SRU 2011). Zusätzlich treten durch den Übertritt der Partikel in das

---

<sup>125</sup> Tenside sind Substanzen, die die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit oder die Grenzflächenspannung zwischen zwei Phasen herabsetzen und so die Bildung von Dispersionen ermöglichen/unterstützen bzw. als Lösungsvermittler wirken.



Blutgefässsystem in der Lunge systemische Effekte<sup>126</sup> auf, die für die Anwesenheit von Entzündungsreizen im Blutkreislauf sprechen. Bemerkenswert ist, dass bereits die kurzzeitige inhalative Aufnahme von moderaten Partikelkonzentrationen zu Effekten in der Lunge führen kann. Die Aufnahme von Eisenoxid-Nanopartikeln über die Haut ist offenbar kaum systematisch untersucht. Eisenoxid-Nanopartikel werden aus dem Magen-Darm-Trakt sehr wahrscheinlich resorbiert. Es ist jedoch bislang nicht bekannt, welcher Anteil der Partikel sich bereits im Darm auflöst und in ionischer Form resorbiert wird. Für die Aufnahme von Eisenionen stehen aufgrund der Bedeutung als essenzielles Spurenelement verschiedene Transportsysteme zur Verfügung. Die Bioverfügbarkeit des Eisens aus Eisennanopartikeln nutzt man bereits bei der Verwendung als Arzneimittel zur Behandlung der Eisenmangelanämie. Die für den Zulassungsprozess erforderlichen kinetischen Studien sind nicht allgemein zugänglich (zitiert in SRU 2011). Das Sondergutachten des Sachverständigenrats für Umweltfragen (SRU 2011) fasst zusammen, dass die Toxizität von Eisenoxid-Nanopartikeln vor allem durch die Förderung von oxidativem Stress und den damit verbundenen Folgewirkungen mit Glutathionmangel und Freisetzung von Entzündungsmediatoren getragen wird. Dabei ist der Einfluss von Partikelform und Grösse für die Toxizität von Eisenoxid-Nanopartikeln weniger bedeutsam als die chemische Zusammensetzung der Partikel in der Hülle und dem Kern. Die Beschichtung von Eisenoxid-Nanopartikeln mit Silikat, Dextran oder Rhodamin-Isothiocyanat kann deren bisher nachgewiesene geringe akute bzw. subakute Toxizität weiter mindern (SRU 2011).

#### ► Ökotoxizität

In ökotoxikologischen Tests zeigten sich Eisenoxid-Nanopartikel moderat bis kaum akut toxisch. In chronischen Tests gibt es sowohl für den Wasserfloh (*Daphnia magna*) als auch für Fischembryonen Hinweise auf Anpassungsreaktionen auf oxidativen Stress (Baumann et al. 2010; Li et al. 2009). In Tests an terrestrischen Pflanzen war die Keimung von Salat- und Gurkenpflanzen nicht durch Eisenoxid-Nanopartikeln beeinträchtigt.

---

<sup>126</sup> Von systemischen Effekten wird gesprochen, wenn die Wirkung einer Substanz nicht oder nicht nur am Ort der Resorption (Aufnahme) auftritt, sondern an irgendeinem anderen Ort/Organ im System.

### *Vorläufige Diskussion bzw. Interpretation der Datenlage*

Das Sondergutachten des Sachverständigenrats für Umweltfragen folgert hinsichtlich der naturwissenschaftlichen Risikobewertung, dass die Datenlage zum Verhalten und Verbleib von Eisenoxid-Nanopartikeln Lücken bei chronischen Studien aufweist und dass Untersuchungen zur Aufnahme nach Hautkontakt fehlen (SRU 2011). Es ist zu erwarten, dass im humantoxikologischen Bereich Studien zur oralen Aufnahme im Rahmen der Prüfung als Arzneimittel durchgeführt wurden, welche aber allgemein nicht zur Verfügung stehen. Eine umfassende Bewertung des Gesundheitsrisikos ist daher aus Sicht des SRU (2011) derzeit noch nicht möglich.

## **8.1.6 Silber**

### *Stoffprofil*

#### ► Anwendungen/Produkte

Nanosilber ist wegen seiner antimikrobiellen (bakteriziden und fungiziden) Wirkung bereits seit mehr als 100 Jahren in verschiedenen Produkten im Einsatz. Nowack et al. (2011) zeigen, dass Silber-Nanopartikel mit einem Durchmesser von 7 bis 9 nm bereits 1889 erwähnt werden. Verwendet wurden diese in Heilmitteln oder in Bioziden, um das Wachstum von Bakterien auf Oberflächen zu vermeiden wie z. B. in antibakteriellen Wasserfiltern oder in Algiziden für Swimmingpools.

Das Spektrum der Produkte, in denen Silber-Nanopartikel Verwendung finden, ist inzwischen sehr breit. Die gängigste Verwendung ist die Beschichtung von Produkten mit Nanosilber:

- Lebensmittelverpackungen (vgl. Möller et al. 2009),
- Küchengeräte wie Kühlschränke und Waschmaschinen,
- medizinische Produkte (antimikrobielle Textilien, Wundpflaster etc.).

Ebenfalls häufig wird Nanosilber in Suspensionen und in Fasern für die Textilherstellung (v. a. Unterwäsche, Socken, Sport- und Funktionstextilien etc.) eingesetzt.

Dabei können die Silber-Nanopartikel in die Synthesefasern eingebunden oder im Rahmen der Endausrüstung auf die Oberfläche der Fasern (frei oder gebunden) aufgelagert werden. Ebenso können die aufgelagerten Schichten die Fasern frei ummanteln oder kovalent mit den Fasermaterialien verbunden sein. Schwierigkeiten bereitet es, die Textilien so auszurüsten, dass die gewünschte Funktion längerfristig erhalten bleibt, also möglichst permanent ist und insbesondere die mechanische und thermische Beanspruchung der Wäschepflege übersteht (Hund-Rinke et al. 2008).

Des Weiteren finden sich Silbernanopartikel in Verbraucherprodukten wie Raumsprays, Produkte zur Wasseraufbereitung, Hygieneprodukte (z. B. Shampoo, Seife, Zahnpasta), Waschmittel, Wand- und Fassadenfarben sowie in Antifoulinganstrichen für Boote (SRU 2011; Kuhlbusch und Nickel 2010; Mikkelsen et al. 2011).

#### ► Physikochemische Eigenschaften

Reines Nanosilber neigt zur Aggregation und wird deshalb häufig oberflächenmodifiziert, z. B. mit Dextran, Citrat, Polysacchariden oder Polyvinylpyrrolidonen (PVP), um die Aggregation zu verhindern.

In wässrigen Lösungen werden aus Nanosilber freie Silberionen ( $\text{Ag}^+$ ) freigesetzt.

#### ► Freisetzung, Exposition und Umweltkonzentrationen

Es wird erwartet, dass die Partikel während der Herstellung und Weiterverarbeitung an Arbeitsplätzen freigesetzt werden können. Untersuchungen hierzu liegen aber nicht vor.

Eine Grosszahl der nanosilberhaltigen Produkte hat aus produkttechnischen Gründen nanoskaliges Silber oberflächlich gebunden, um die Freisetzung von Silberionen zu ermöglichen. Die vermutlich toxischere Form des Silbers ist das Silberion ( $\text{Ag}^+$ ), welches hauptsächlich beim Kontakt mit Wasser aus den betrachteten Produkten freigesetzt werden kann (Kuhlbusch und Nickel 2010).

#### Exposition Mensch:

Die Möglichkeiten für den Menschen, mit Silber-Nanopartikeln in Kontakt zu kommen, sind neben Herstellung und Weiterverarbeitung vor allem der Umgang mit nanosilberhaltigen Produkten und die indirekte Exposition über Wasser (siehe nachfolgenden Abschnitt «Exposition Umwelt»).

Die direkte Exposition erfolgt vornehmlich durch Kontakt mit nanosilberhaltigen Textilien, Kosmetikartikeln und medizinischen Produkten wie Wundpflaster. Hier ist auch eine indirekte Exposition über Kontakt zu beschichteten Oberflächen zu nennen. Die dermale Aufnahme von Silber-Nanopartikeln ist aber, selbst bei geschädigter Haut, gering (Mikkelsen et al. 2011). Zur inhalativen Exposition kann es bei der Verwendung von Desinfektionssprays kommen. Kommt es zum Eindringen von Silbernanopartikeln in das Lungengewebe, so können dort Silberionen freigesetzt werden (Limbach et al. 2007; Park et al. 2010; Christensen et al. 2010). Orale Exposition ist möglich infolge der Verwendung von nanosilberhaltigen Hygieneartikeln wie z. B. Zahncreme. Nicht ausgeschlossen werden können auch die eventuelle Aufnahme von Silbernanopartikeln aus Lebensmittelverpackungen über die Nahrung sowie die indirekte Exposition über Rückstände im Trinkwasser.

Hinsichtlich der Exposition von Arbeitnehmer/innen und Konsument/innen gegenüber Nanosilber sind weitere Untersuchungen notwendig.

#### Exposition Umwelt:

Für einen Grossteil der Anwendungen und Produkte von Nanosilber scheint die Freisetzung ins Wasser zu überwiegen, wogegen die Emission in die Luft eine eher untergeordnete Rolle spielt. Eine mögliche Exposition der Umwelt erfolgt demnach vornehmlich über den aquatischen Pfad.

Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Silber-Nanopartikeln in unterschiedlichsten Produkten kann von einem zunehmenden diffusen Eintrag in die Umwelt ausgegangen werden. Silber-Nanopartikel können zum einen bei der Reinigung von Oberflächen, die mit Silber-Nanopartikeln beschichtet sind, freigesetzt oder durch den Regen aus Fassadenfarben ausgewaschen werden. Bislang gibt es keine Studien zur Quantifizierung der Freisetzung von Silber-Nanopartikeln aus solchen Farben und zum Verbleib in der Umwelt. Anhaltspunkt für eine solche Quantifizierung kann hier aber die Studie von Kaegi et al. (2008) zum Eintrag von nanoskaligen  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln aus Aussenwandfarben ins Abwasser geben. Durch wiederholte Regenfälle konnten dabei bis zu 70 Prozent der  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel aus den Fassadenfarben ausgewaschen werden (siehe Abschnitt «Exposition Umwelt» von  $\text{TiO}_2$ , S. 134).

Ein direkter Eintrag von Silber-Nanopartikeln ins Wasser erfolgt durch den Einsatz in Antifoulingfarben (Watermann et al. 2010).

Auch nach dem Gebrauch von nanosilberhaltigen Kosmetika und Reinigungsmitteln oder dem Waschen von mit Nanosilber ausgerüsteten Textilien können

Nanopartikel in das Abwasser und somit über die Kläranlagen in die Umwelt gelangen. Einige Hersteller von nanosilberhaltigen Textilien weisen darauf hin, dass die Textilien ihre antimikrobielle Wirkung für eine begrenzte Anzahl von Waschungen beibehalten, was impliziert, dass ständig ein gewisser Anteil des Nanosilbers bzw. der Silberionen freigesetzt wird (Benn und Westerhoff 2008 und Luoma 2008, zitiert in Kuhlbusch und Nickel 2010).

Bei der Untersuchung sechs unterschiedlicher Ausführungen von Socken, die nach Herstellerangaben mit Silber-Nanopartikeln ausgerüstet waren, wurden Gehalte von bis zu 1360 µg Silber/g Material bestimmt. Während simulierter Waschvorgänge in destilliertem Wasser zeigten sich deutliche Unterschiede, sowohl im zeitlichen Verlauf der Freisetzung als auch im Hinblick auf den Anteil des abgegebenen Silbers am Gesamtgehalt. Diese Unterschiede werden auf die verschiedenen Techniken zur Ausrüstung der Textilien mit Silber-Nanopartikeln zurückgeführt. Das abgegebene Silber lag sowohl als Ionen als auch in Form von Partikeln in Grössen zwischen einem und einigen Hundert nm vor, die maximale Freisetzung betrug 1,3 mg Silber/L Wasser bzw. 68 µg Silber/g Material (Benn und Westerhoff 2008, zitiert in SRU 2011). In Studien, in denen Waschmittel zur Behandlung der mit Silber modifizierten Textilien verwendet wurden, zeigte sich, dass unterschiedliche Formen von Silber (partikulär oder in Form von Ionen) freigesetzt werden. Partikuläres Silber (hier AgCl) war dabei die häufigste Form nach der Freisetzung aus den Textilien. Die Ionenfreisetzung war unter Bedingungen, wie sie in realen Waschprozessen vorliegen (hoher pH-Wert und die Anwesenheit von reaktiven Ionen wie Chloridionen) gering (Geranio et al. 2009; Lorenz et al. 2012). Es ist nicht auszuschliessen, dass die Ionen später im Lebenszyklus unter veränderten chemischen Bedingungen im Abwasser, der Kläranlage oder in Oberflächenwasser freigesetzt werden.

Eine Freisetzung von Silber-Nanopartikeln konnte auch bei beschichteten Polypropylenbehältern (= Lebensmittelverpackung) gemessen werden (Aitken et al. 2009; von Goetz 2012). Im Rahmen einer Expositionsabschätzung für nanoskaliges Silber aus Lebensmittelverpackungen kommt von Goetz (2012) aber zu der Schlussfolgerung, dass die Exposition von Verbrauchern über diesen Pfad als eher gering einzustufen ist im Vergleich zu anderen Quellen.

In einem ersten Modellierungsansatz berechneten Mueller und Nowack (2008) für die Schweiz zu erwartende Umweltkonzentrationen (PEC) von Silber-Nanopartikeln im Wasser in Höhe von 0,03 µg/L in einem realistischen und 0,08 µg/L in einem Szenario mit maximalen Emissionen. Im Boden errechneten

sie für die entsprechenden Szenarien PEC-Werte von 0,02 und 0,1 µg/kg. Diese Abschätzungen wurden von Gottschalk et al. (2010) überarbeitet: Für Oberflächenwasser berechneten sie einen PEC-Wert von 0,72 ng/L (= 0,00072 µg/L) und für den Kläranlagenauslauf einen PEC-Wert von 11,8 ng/L (= 0,0118 µg/L). In einer Studie von Blaser et al. (2008) wurden die PECs für gelöstes Silber entlang des Rheins für drei Szenarien errechnet: Minimum (4 bis 40 ng/L), Intermediate (10 bis 140 ng/L) und Maximum (30 bis 320 ng/L). Die PEC im Sediment waren in den Szenarien wie folgt: Minimum (0,04 bis 2 mg/kg), Intermediate (0,1 bis 6 mg/kg) und Maximum (0,3 bis 14 mg/kg).<sup>127</sup> Auch bei der Entsorgung nanosilberhaltiger Produkte kann es zu einer Freisetzung und einem resultierenden Eintrag von Silber-Nanopartikeln in die Umwelt kommen. Zahlen liegen bisher nicht vor.

#### ► Umweltverhalten

Lowry et al. (2012) haben das Umweltverhalten von Silber-Nanopartikeln in verschiedenen Umweltkompartimenten analysiert. Eine signifikante Verminderung der Bioverfügbarkeit von Silber in der Umwelt tritt durch die Komplexbildung mit Schwefel zu Schwefelsulfid ( $\text{AgS}_2$ ) ein. Den hier vorgestellten Daten zufolge ist diese zu grossen Teilen nach 18 Monaten eingetreten.

Eine Studie zum Verhalten von Nanosilber in Kläranlagen kommt zu dem Ergebnis, dass der überwiegende Teil des eingetragenen Nanosilbers (ca. 90 Prozent) schnell zu schlecht löslichem und vor allem nicht mehr antimikrobiell wirksamem Silbersulfid umgesetzt wird, welches sich im Klärschlamm anreichert. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist hier den besonderen Bedingungen in der Kläranlage geschuldet (erhöhte Temperaturen, erhöhte Konzentrationen von verfügbarem Schwefel). Dieses Silbersalz ist extrem schwerlöslich und um Grössenordnungen weniger giftig als freie Silberionen. Dabei spielt die ursprüngliche Form des Silbers im Abwasser – ob als metallische Nanopartikel, ob gelöst als Silberionen oder als unlöslicher Silbersalzniederschlag – offenbar keine Rolle (Tiede et al. 2010; Nowack 2010). Da Klärschlamm in der Schweiz verbrannt wird, führt dieser Eliminationsprozess in der Kläranlage zu einer vernachlässigbaren Freisetzung von Silber in die Umwelt (Som et al. 2010).

---

<sup>127</sup>

Blaser et al. (2008) gehen davon aus, dass Silber nicht als freies Nanopartikel, sondern als Silberion z. B. aus Textilien oder Plastik freigesetzt wird. Die Studie von Benn und Westerhoff (2008) weist dagegen auch eine Freisetzung von nanoskaligen Silberpartikeln aus Textilien nach.

Unklar ist aber noch, in welcher Form das nicht gebundene Silber im Abfluss der Kläranlagen vorliegt und was mit dem Silbersulfid in natürlichen Gewässern geschieht, ob es etwa stabil ist oder wieder in andere Silberformen umgewandelt wird (Nowack 2010). Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Zusätzlich zeigte sich in Versuchen, dass sich die Nanopartikel nicht an vorhandene Biofilme in den Abwasserkanälen anlagern, sondern vielmehr an Feststoffe binden und dann kolloidal abtransportiert werden. Das Abwassersystem wirkt daher als Multi-Barrieren-System auf die Silber-Nanopartikel. Eine Freisetzung der Silber-Nanopartikel in die Oberflächengewässer und die Umwelt kann demzufolge weitgehend ausgeschlossen werden (Kaegi et al. 2011).

Auch Pronk et al. (2009) gehen davon aus, dass Nanosilberpartikel aufgrund ihrer kolloidalen Eigenschaften stark an Schwebstoffen oder im Sediment sowie im Boden gebunden werden.

Silber-Nanopartikel sind als stark wassergefährdend (WGK 3<sup>128</sup>) eingestuft worden, wobei es derzeit Diskussionen über die Gültigkeit dieser Einstufung gibt.

#### ► Humantoxizität

Die akute Toxizität von Nanosilber wird seitens verschiedener Expertinnen und Experten als eher gering eingestuft und toxische Effekte beim Menschen (mit Ausnahme von Argyrie, siehe folgenden Abschnitt) sind erst bei sehr hohen Konzentrationen zu erwarten (Christensen et al. 2010) (akut oraler LD50<sup>129</sup> Ratte > 1600 mg/kg \* Tag; Wijnhoven et al. 2009). Christensen et al. (2010) erläutern auch Indikatoren für möglicherweise auftretende Gentoxizität, aus der verfügbaren Literatur lassen sich aber keine belastbaren Schlüsse ziehen.

Nach chronischer Aufnahme von Silberstäuben (inhalativ) und kolloidalem Silber (oral) kann Silber in elementarer Form oder als Sulfid dauerhaft in Haut, Schleimhaut sowie inneren Organen abgelagert werden und dort zu kennzeichnenden blaugrauen Verfärbungen (Argyrie) führen. Für solche Fälle mit sichtbaren, kosmetisch belastenden Hautverfärbungen gibt es beim Menschen bislang keine gesicherten Hinweise auf weitere pathologisch veränderte Organfunktionen oder typische Krankheitsbilder (SRU 2011).

Fallberichte zur Anwendung silberhaltiger Arzneimittel lassen den Verdacht auf ein neurotoxisches Potenzial sowie allergische Reaktionen zu (SRU 2011).

---

<sup>128</sup> WKG = Wassergefährdungsklasse.

<sup>129</sup> LD50 (LD = lethal dosis) ist die Wirkstoffdosis, bei der 50 Prozent der Versuchorganismen innerhalb eines bestimmten Zeitraumes sterben.

Aus tierexperimentellen Untersuchungen ist sowohl nach Einatmen als auch nach oraler Aufnahme die Verteilung der Silber-Nanopartikel im Körper bestätigt. Bei Ratten waren nach Inhalation von Silber-Nanopartikeln (18 nm) im Bereich der gültigen Höchstmengen im Arbeitsschutz für Silberstaub in der Luft über 28 Tage keine Schadwirkungen erkennbar. Bei einer 90-Tage-Inhalationsstudie mit Silber-Nanopartikeln (18 nm) wurden dagegen auch in der niedrigsten Dosisgruppe noch Atemstörungen, vermutlich durch entzündliche Veränderungen, registriert (LOAEL bei  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (Takenaka et al. 2001; zitiert in SRU 2011).

Bei oraler Aufnahme von Silbernanopartikeln (60 nm) über 28 Tage waren 30 mg/kg Körpergewicht der höchste Wert ohne Wirkung (NOAEL). Im Mikrokern-test wurde bis zu Konzentrationen von 1000 mg/kg/d über 28 Tage keine Genotoxizität beobachtet (SRU 2011).

Die dermale Aufnahme von Silber-Nanopartikeln ist gering, selbst bei geschädigter Haut. Daher kann angenommen werden, dass gesundheitliche Risiken über Hautkontakt eher von geringer Bedeutung sind (Mikkelsen et al. 2011).

Die Kenntnisse zur Elimination von Silber-Nanopartikeln aus dem Körper sind noch lückenhaft. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen kommt in seinem Sondergutachten zu dem Schluss, dass die Ausscheidung in den Harn eine bedeutende Rolle spielt und in diesem Kontext eine Bindung im Nierenepithel zu erwarten ist (SRU 2011). Eine Abschätzung möglicher gesundheitlicher Folgen wie auch die Ermittlung eines etwaigen Schwellenwertes sieht der Sachverständigenrat für Umweltfragen aber wegen fehlender Daten zur chronischen Aufnahme derzeit als nicht möglich an.

Aus Inhalationsstudien ist auch der Transport von Silber-Nanopartikeln über den Riechnerv in das Gehirn bekannt (Takenaka et al. 2001; Ji et al. 2007; beide zitiert in SRU 2011). Dies kann auch oder sogar vorrangig Silberionen betreffen. Ob sich dadurch schädliche Folgen für das Nervensystem ergeben, ist derzeit unbekannt.

Die Ergebnisse von In-vitro-Studien deuten auf eine Abhängigkeit der Wirkungen von Silber-Nanopartikeln von der spezifischen Oberfläche hin, da kleinere Partikel bei gleicher Massendosis stärker wirken als grössere. Auch die Ummantelung hat einen Einfluss auf die Wirkung der Partikel. Bei kohlenwasserstoffbeschichteten Silber-Nanopartikeln zwischen 15 und 55 nm werden die grösseren Partikel in Zellkulturen besser toleriert und haben geringere nachweisbare Effekte als die kleineren Partikel. Die kleineren Partikel haben zudem auch eine geringere Neigung zur Agglomeration und wirken daher schon bei etwa siebenfach gerin-



geren Konzentrationen (massebezogen) zytotoxisch (Carlson et al. 2008, zitiert in SRU 2011).

Das Sondergutachten des Sachverständigenrats für Umweltfragen sieht Datenlücken insbesondere hinsichtlich Aufnahme, Verteilung und Elimination der Partikel aus dem Organismus und ihrer Effekte nach chronischer Exposition, besonders neurotoxischer und sensibilisierender Wirkungen (SRU 2011). Weiterhin fehlen Daten zur Kanzerogenität und Reproduktionstoxizität, die angesichts des verbreiteten Einsatzes in verbrauchernahen Produkten als erforderlich angesehen werden.

#### ► Ökotoxizität

Die Ökotoxizität von Silber-Nanopartikeln einerseits und wasserlöslichem  $\text{AgNO}_3$ -Salz andererseits wurde in einer Reihe von akuten Standardtests mit Fischen (adulte und juvenile), Invertebraten und Algen bestimmt (Griffitt et al. 2008). Die akuten Tests mit juvenilen Fischen und Daphnien zeigten vergleichbare Toxizitäten für Silber-Nanopartikel und  $\text{AgNO}_3$ -Salzen. Bei adulten Fischen zeigte sich allerdings, dass die Silber-Nanopartikel um einen Faktor 100 bis 1000 weniger toxisch waren als das Silbersalz  $\text{AgNO}_3$ . Ein ähnliches Ergebnis wurde auch bei Algen beobachtet, bei denen die Silber-Nanopartikel um einen Faktor 50 weniger toxisch waren als das Silbersalz  $\text{AgNO}_3$ . Griffitt et al. (2008) zeigen, dass sich in den Versuchsansätzen mit Silber-Nanopartikeln nur etwa 1 Prozent des elementaren Silbers in 48 Stunden löst. Diese Daten deuten darauf hin, dass die Toxizität von Nanopartikeln v. a. auf die Freisetzung von Ionen zurückzuführen ist (vgl. hierzu auch Navarro et al. 2008 und Piccapietra et al. 2012).

In einer Multigenerationsstudie mit Nanosilber hat Völker (2011) Daphnien über mehrere Generationen Silber-Nanopartikeln ausgesetzt, d. h., die im Versuch geschlüpften Jungtiere wurden in einem weiteren Experiment erneut auf ihre Fortpflanzungsleistung hin untersucht. Hier zeigte sich, dass nachkommende Generationen erheblich sensibler auf die Behandlung mit Silbernanopartikeln reagierten, was laut Völker (2011) deutlich macht, dass chronische Folgen nanopartikulärer Substanzen nicht in Kurzzeittests erfasst werden können. Für eine adäquate Risikobewertung von Nanomaterialien müssen daher unbedingt Versuche mit einem verlängerten Expositionszeitraum durchgeführt werden.

Die Konzentration an freien Silberionen im Wasser, und damit auch die Wirkung von Silber-Nanopartikeln, wird von anderen gelösten Stoffen deutlich beeinflusst. Beispielsweise führen die Bildung schwerlöslicher Verbindungen (wie  $\text{AgCl}$  oder  $\text{Ag}_2\text{S}$ ) sowie eine Bindung an gelöste organische Verbindungen (wie Huminsäu-

ren) durch Verminderung der Konzentration freier Silberionen zu einer Reduktion der toxischen Effekte auf Wasserorganismen. Andererseits können durch Versauerung und gesteigerte Sauerstoffversorgung vermehrt Silberionen aus Partikeln freigesetzt werden (Hund-Rinke et al. 2008, zitiert in SRU 2011; Stone et al. 2009).

Choi und Hu (2008) zeigen, dass Silber-Nanopartikel negative Effekte auf nitrifizierende Bakterien in Kläranlagen haben können (zitiert in Mikkelsen et al. 2011). Mit Hinblick auf eine mögliche Resistenzbildung von Bakterien gegenüber Silber-Nanopartikeln und einer daraus folgenden eingeschränkten bioziden Wirkqualität sollte der verbreitete Einsatz von Silber-Nanopartikeln in Verbraucherprodukten überdacht werden. Wie auch von Lorenz et al. (2012) diskutieren, sind vor allem Nanopartikel in diesem Zusammenhang von Interesse, da makroskaliges Silber in viel geringerem Masse Silberionen freisetzt.  $\text{Ag}^+$ -Ionen werden überwiegend mit der antimikrobiellen Wirkung von Silber in Verbindung gebracht, und deren Freisetzung wird durch nanoskaliges Silber extrem begünstigt.

Das Sondergutachten des Sachverständigenrats für Umweltfragen sieht Datenlücken insbesondere hinsichtlich Studien zu den Langzeitwirkungen im Wasser und im Boden, zum anderen sind dringend Studien zur Entwicklung bakterieller Resistenzen gegen Silber und Antibiotika erforderlich (SRU 2011).

### *Vorläufige Diskussion bzw. Interpretation der Datenlage*

Viele Anwendungen von Silber-Nanopartikeln sind verbrauchernah und umwelt-offen, sodass von einer relevanten Exposition von Mensch und Umwelt auszugehen ist. Die derzeitige Datenlage hinsichtlich der Identifizierung gefährlicher Eigenschaften von Silber-Nanopartikeln wird seitens SRU 2011 als unzureichend angesehen. Eine umfassende Risikoeinschätzung ist daher momentan noch nicht möglich. Die bestehenden Daten weisen auf eine geringe Humantoxizität, aber auf eine deutliche Ökotoxizität hin. Ausserdem sind Silber-Nanopartikel bereits als stark wassergefährdend (WGK 3) eingestuft.

Basierend auf dem heutigen Wissensstand stufen Som et al. (2010) Silber-Nanopartikel bezüglich der Gesundheit eher als unbedenklich ein, wogegen das Risikopotenzial für die Umwelt als problematisch angesehen wird. Zu diesem Ergebnis kommen auch Gottschalk et al. (2010), die Risikoquotienten von 1,03 für Oberflächenwasser und von 4,28 für den Kläranlagenauslauf berechnen.

Datenlücken bestehen im Bereich der Humantoxikologie, insbesondere hinsichtlich Aufnahme, Verteilung und Elimination der Partikel aus dem Organismus und ihrer Effekte nach chronischer Exposition, besonders neurotoxischer und sensibilisierender Wirkungen. Weiterhin fehlen Daten zur Kanzerogenität und Reproduktionstoxizität, die angesichts des verbreiteten Einsatzes in verbrauchernahen Produkten als erforderlich angesehen werden (SRU 2011).

Im Bereich der Ökotoxikologie fehlen zum einen Studien zu den Langzeitwirkungen im Wasser und im Boden, zum anderen sind dringend Studien zur Entwicklung bakterieller Resistenzen gegen Silber und Antibiotika erforderlich (SRU 2011).

Es besteht Unsicherheit hinsichtlich möglicher neurotoxischer und sensibilisierender Wirkungen, die vereinzelt nach arzneilicher Anwendung beschrieben wurden. Die Relevanz dieser Befunde für die Bewertung des Risikos für den deutlich niedriger exponierten Verbraucher sollte untersucht werden. Weiterhin besteht Unsicherheit hinsichtlich Mechanismen und Verbreitung bakterieller Silberresistenzen und deren Relevanz für Resistenzen gegenüber Antibiotika (SRU 2011).

### 8.1.7 Siliziumdioxid

#### *Stoffprofil*

##### ► Anwendungen/Produkte

Siliziumdioxid-Nanopartikel ( $\text{SiO}_x\text{-NP}$ ) werden seit Jahrzehnten in der Industrie und in Konsumgütern aller Art eingesetzt. In der Industrie finden sie hauptsächlich Anwendung in Präzisionspoliermitteln und als Zusatzstoff bei Kunststoffen/Gummi (z. B. Autoreifen), Farben und Pigmenten. Des Weiteren werden  $\text{SiO}_x\text{-NP}$  als Entschäumer in der Papierproduktion und bei der Raffinierung von Lebensmitteln wie etwa entkoffeiniertem Kaffee oder Tee eingesetzt.

Andere bekannte Konsumgüter mit durch  $\text{SiO}_x\text{-NP}$  vermittelten Wirkungen finden sich bei Kosmetika, Polyethylenterephthalat (PET)-Flaschen-Beschichtungen und Materialstabilisatoren, hygroskopischen Trockenmitteln, Trennmitteln, Imprägniersprays etc. (SRU 2011; Mikkelsen et al. 2011).

### ► Physikochemische Eigenschaften

Bei den hier behandelten  $\text{SiO}_x$ -NP handelt es sich um von Menschenhand gefertigte Nanopartikel, die auch als amorphes  $\text{SiO}_x$  oder Kieselsäure bezeichnet werden. Sie unterscheiden sich deutlich von den in der Natur auch vorkommenden kristallinen Formen von  $\text{SiO}_x$ -NP (Quarz-NP). Unterschiedliche Produktionsprozesse führen zu zwei unterschiedlichen Nanoformen. Die durch Fällung aus der flüssigen Phase hergestellten  $\text{SiO}_x$ -NP zeichnen sich durch Porosität und damit durch eine sehr hohe Oberfläche aus. Die pyrogen hergestellten  $\text{SiO}_x$ -NP verfügen über eine fast porenfreie Oberfläche und deutlich weniger freie Hydroxylgruppen auf ihrer Oberfläche. Amorphe  $\text{SiO}_x$ -NP (Kieselsäuren) sind in geringem Umfang wasserlöslich, sind aber in der Lage, kolloidale Lösungen (Kieselsole) auszubilden und dann durch Agglomeration zu Kieselgelen zu kondensieren.

Nach der Herstellung sind  $\text{SiO}_x$ -NP aus amorphem Silizium hydrophil aufgrund der auf der Oberfläche befindlichen Hydroxidgruppen. An diesen können kovalent Modifikationen angebracht werden, die die Oberflächeneigenschaften massgeblich beeinflussen. Je nach Wahl der Funktionalisierung können hydrophobe Eigenschaften erzeugt werden, Farbstoffmoleküle gebunden oder pharmazeutisch relevante Stoffe gebunden und transportiert werden.

### ► Freisetzung, Exposition und Umweltkonzentrationen

$\text{SiO}_x$ -NP können prinzipiell bei der Herstellung, der Weiterverarbeitung in Produkten, der Nutzungsphase oder auch der Entsorgung freigesetzt werden, so dass es zu einer Exposition von Mensch und Umwelt kommen kann.

In der industriellen Hauptanwendung von  $\text{SiO}_x$ -NP als Präzisionspoliermittel sind die Freisetzung und die Exposition von Mensch und Umwelt aufgrund von zu meist gekapselten Systemen unwahrscheinlich. Die nicht fachgerechte Entsorgung könnte allerdings zu einer Umweltbelastung durch Abwassereintrag oder entsorgte Luftfilter führen. Hier existieren bisher keine Daten.

Ein minimal besser quantifizierbarer Eintrag von  $\text{SiO}_x$ -NP in die Umwelt ist wahrscheinlich dem Einsatz von Farben, Pigmenten und Kunststoffen geschuldet. Die Datenlage ist auch hier unzureichend, da ungenügende Informationen über den Gehalt von  $\text{SiO}_x$ -NP in den Produkten sowie auch in Industrieabwässern und belasteten Böden vorliegen. Ein hypothetisches Szenario beschäftigt sich dennoch mit  $\text{SiO}_x$ -NP-haltiger Farbe mit einem zehnpromzentigen Marktanteil im Vereinigten Königreich. Hier würden  $\text{SiO}_x$ -NP in Umweltmedien und Klärschlamm in folgenden Konzentrationen auftreten: Wasser (0,0007  $\mu\text{g/l}$ ), Klärschlamm

(0,02 mg/kg) und Boden (0,03 µg/kg). Trotz der theoretischen Natur werden die Werte als wichtige Kenngrösse für das experimentelle Design von Versuchsreihen zur Toxizität verwendet.

Lin et al. (2005) betrachten die Freisetzung von Nanopartikeln in der Nähe von Autoverkehrsknotenpunkten im Süden Taiwans. Die hier geltenden Sicherheitsvorschriften in Bezug auf Partikelfilterung und Katalysatoren sind zwar anders als in Zentraleuropa, aber die von ihnen gemessenen Partikelkonzentrationen im Strassenverkehr werden auch auf den Abrieb von Reifen zurückgeführt. 40,8 Prozent der kumulativen Massenfraktion der Partikel liegen ihren Messungen zufolge unter 100 nm Grösse. Es ist also gemäss dieser Ergebnisse durchaus mit einem substanziellen Eintrag von Nanopartikeln in die Umwelt aus dem Reifenabrieb des Strassenverkehrs zu rechnen.

Weitere nicht quantifizierte Quellen von SiO<sub>x</sub>-NP, denen Mensch und Umwelt exponiert sind, sind die oben bereits genannten Produkte aus dem Konsumsektor. Es existieren keine korrelierbaren Daten zur Belastung der Atemwege und des Verdauungssystems aufgrund der bereits genannten Unklarheit der NP-Konzentration in kommerziellen Aerosol- und Kosmetikprodukten. Zur dermalen Resorption gibt es ebenfalls keine Daten (SRU 2011; Mikkelsen et al. 2011).

#### ► Umweltverhalten

SiO<sub>x</sub>-NP tendieren zur Agglomeration und damit zum Sedimentieren im aquatischen System. Wechselwirkungen mit anderen Chemikalien und Nanomaterialien sind nicht dokumentiert, aber im biologischen System können sie sich, abhängig von ihrer Grösse, über eine limitierte Zeit anreichern (SRU 2011).

#### ► Humantoxizität

Akut toxische Effekte auf den Menschen sind nicht dokumentiert. Tierexperimente weisen jedoch darauf hin, dass toxische Effekte durchaus vorhanden sind. Sie sind aber sowohl vom Kontaminationsweg (oral, inhalativ oder intravenös) als auch von der Grössenverteilung der verwendeten SiO<sub>x</sub>-NP abhängig: Orale Aufnahme führte zu keinen messbaren Problemen, und die Partikel wurden über Galle und Niere ausgeschieden. Intratracheale Instillation führte bei den Versuchstieren, abhängig von der NP-Grössenverteilung (je kleiner desto schädlicher), zu erheblichen Folgen: Bei einer Belastung von 3 mg/Tier führte die Instillation von 230 nm grossen SiO<sub>x</sub>-NP zu keinen äusserlich erkennbaren Effekten. Die gleiche Dosis von 14 nm grossen Partikeln führte bei einigen Tieren zu Atemnot und Tod kurz nach der Instillation. Beide Partikelgrössen schädigten die

Epithelzellen und führten zu Entzündungen in den Atemwegen (Kaewamatawong et al. 2005). Bei beiden Partikelgrößen wurden Ödeme und Blutungen in den Lungen der Tiere festgestellt. Die pathologischen Effekte waren bei den 14 nm SiO<sub>x</sub>-NP über den gesamten Zeitraum ausgeprägter.

Dieser Effekt lässt sich vermutlich nicht nur auf die NP-Größe zurückführen, sondern ist auch der grösseren Oberfläche der kleineren SiO<sub>x</sub>-NP geschuldet. Darauf deuten Zellkulturexperimente von Waters et al. (2009) hin, bei denen die Toxizität als eine Funktion der Partikelanzahl untersucht wurde. Hier war ausschliesslich die exponierte Oberfläche der NP ausschlaggebend für den toxischen Effekt.

Für die intravenöse Gabe von NP lässt sich keine Abhängigkeit von Toxizität zu präsentierter Oberfläche ableiten. Belastungen der Leber, Milz und Nieren in Form von Entzündungen waren feststellbar. Sie wurden mit zunehmender Ausscheidung der NP aus dem System zurückgebildet (Cho et al. 2009).

Erhöhte Konzentrationen von Nanopartikeln sind an den Membranen der Zelle und im Zytoplasma auffindbar (SRU 2011). Es existieren keine Daten bezüglich der Kanzerogenität bei chronischer Inhalation von SiO<sub>x</sub>-NP aus amorphem Silizium.

#### ► Ökotoxizität

Es liegen bisher nur wenige Studien zur Ökotoxikologie von SiO<sub>x</sub>-NP vor. Bei den meisten davon handelt es sich um Kurzzeittests an aquatischen Organismen. Die Ergebnisse dieser Studien belegen eine geringe Toxizität. Bei hohen Konzentrationen von SiO<sub>x</sub>-NP kann es zu Kieferfehlbildungen und embryonalen Deformationen bei Zebrafischarten kommen. Bei Grünalgen wurden Wachstumsinhibition und Zellkoagulationen festgestellt und bei *Daphnia magna* führten Konzentrationen von 10 mg/L zu 70 Prozent Mortalität (Adams et al. 2006). Da keine Schätzungen zu Konzentrationen von SiO<sub>x</sub>-NP in der Umwelt existieren, kann keine quantitative Einschätzung des Risikos vorgenommen werden.

#### *Vorläufige Diskussion bzw. Interpretation der Datenlage*

Aufgrund der mangelhaften Datenlage zu Konzentrationen von SiO<sub>x</sub>-NP in Ökosystemen kann keine realistische Einschätzung vorgenommen werden.

Die in diesem Kapitel erwähnten experimentellen Studien lassen jedoch eine vergleichsweise geringe Gefährdung durch SiO<sub>x</sub>-NP vermuten, da eine unrealis-

tisch hohe Dosis bei der Inhalation notwendig war, um akute Effekte hervorzurufen. In vielen Produkten liegen die  $\text{SiO}_x$ -NP allerdings auch in einer Matrix gebunden vor und es kommt erst später durch Erosionsprozesse oder auf dem Abfallweg zur Freisetzung. Abhängig von der verwendeten Produktionsmethode kann es zu unterschiedlich hohen Kontaminationen des amorphen  $\text{SiO}_x$  mit kristallinem  $\text{SiO}_x$  kommen. Kristallines  $\text{SiO}_x$  ist humantoxischer als amorphes  $\text{SiO}_x$ , aber nur zu geringen Anteilen im kommerziell hergestellten  $\text{SiO}_x$ -NP-Produkt (Som et al. 2011). Langzeiteffekte von freien  $\text{SiO}_x$ -NP auf Lebewesen lassen sich aufgrund der Datenlage nicht abschätzen. In einer Matrix gebundene  $\text{SiO}_x$ -NP sind als ungefährlich zu betrachten (SRU 2011; Mikkelsen et al. 2011). Wie oben schon erläutert, kann es hier aber im Zuge der Nutzungsphase (z. B. Reifenabrieb) zum Eintrag in die Umwelt kommen (Lin et al. 2005).

### 8.1.8 Zinkoxid

#### *Stoffprofil*

##### ► Anwendungen/Produkte

Zinkoxid ( $\text{ZnO}_x$ ) in Mikro- und Nanoform wird als UV-Schutz eingesetzt. In dieser Funktion findet es sich in Sonnenschutzmitteln, Kosmetika, Textilien, Holz- und Kunststofflacken. Hier ist allerdings zu beachten, dass in der Schweiz  $\text{ZnO}_x$  als UV-Filter in kosmetischen Mitteln (einschliesslich Sonnenschutzmitteln) nur in der «Nicht-Nanoform» eingesetzt werden darf.<sup>130</sup> Ausserdem werden Anwendungen in der Medizin als Bakterizid oder zur Krebsbehandlung erwogen. Zinkoxid-Nanopartikel ( $\text{ZnO}_x$ -NP) sind weiterhin ein Bestandteil von Halbleitern in Elektronikartikeln wie z. B. TFT-Bildschirmen (SRU 2011).

##### ► Physikochemische Eigenschaften

Die endpunktrelevanten physikochemischen Eigenschaften von  $\text{ZnO}_x$  unterscheiden sich nicht sehr in Abhängigkeit von der Grössenordnung der Partikel.  $\text{ZnO}_x$  ist in jeder Form in der Lage, UV-A- und UV-B-Strahlen zu absorbieren und die Energie in die Bildung von reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) umzusetzen.  $\text{ZnO}_x$ -NP sind transparent für den sichtbaren Bereich des Lichtes und bedingt

---

<sup>130</sup> [www.bag.admin.ch/themen/lebensmittel/04861/05280/12049/index.html?lang=de](http://www.bag.admin.ch/themen/lebensmittel/04861/05280/12049/index.html?lang=de).

wasserlöslich (Brunner et al. 2006). In Abhängigkeit von Oberfläche/Volumenratio werden Zinkionen ( $\text{Zn}^{2+}$ ) in wässrige Lösung abgegeben (SRU 2011).

#### ► Freisetzung, Exposition und Umweltkonzentrationen

Die Hauptexposition von Mensch und Umwelt erfolgt durch den Einsatz von  $\text{ZnO}_x$ -NP als UV-Schutz. Hier werden  $\text{ZnO}_x$ -NP entweder direkt in Form von Kosmetika auf die Haut aufgetragen und später wieder abgewaschen oder gelangen über den Einsatz in Holz- und Plastiklacken und aus Textilien in die Umwelt. Am Arbeitsplatz kann es durch unsachgemässen Umgang oder durch Inhalation von Metaldämpfen bei Lichtbogenschweissarbeiten zur Exposition kommen (SRU 2011). In diesem Zusammenhang gilt in Deutschland die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) von  $1 \text{ mg/m}^3$  (DFG 2008). Modellierungen der Gewässerbelastungen mit  $\text{ZnO}_x$ -NP kamen zu höchst unterschiedlichen Ergebnissen, die zwischen  $0,03 \text{ }\mu\text{g/l}$  (Gottschalk et al. 2009) und  $76 \text{ }\mu\text{g/l}$  (Boxall et al. 2007) für Oberflächengewässer in Europa liegen. Dies ist auch durch die zugrunde gelegten Modelle und Annahmen bedingt.

#### ► Umweltverhalten

$\text{ZnO}_x$ -NP sind leicht wasserlöslich: bis pH 8 wird eine vollständige Auflösung in natürlichen Wässern erwartet. Im Boden sind die Nanopartikel persistent. In wässriger Lösung geben sie  $\text{Zn}^{2+}$ -Ionen ab, aus denen sich auch beobachtete toxische Effekte ableiten (SRU 2011). Jede Form von Oberflächenmodifikation kann Einfluss auf die Ionenabgabe in Wasser haben und diese entweder beschleunigen oder bremsen. Einzelfallbeobachtungen sind hier in Abhängigkeit von der jeweiligen Modifikation erforderlich.

#### ► Humantoxizität

Untersuchungen bescheinigen  $\text{ZnO}_x$ -NP keine relevante Humantoxizität aufgrund ihrer Morphologie. Zinkoxid ist ein wichtiges Spurenelement ( $70 \text{ mg/Tag}$  für Menschen, Som et al. 2011). Alle beobachteten Effekte basieren auf Entzündungsreaktionen und oxidativen Stress. Speziell die Reaktivität von gelösten  $\text{Zn}^{2+}$ -Ionen ist massgeblich für zytotoxische Effekte verantwortlich. Die reaktiven Ionen können mit Zellbestandteilen interagieren und diese inaktivieren oder denaturieren. In diesem Zusammenhang ist die vereinfachte Freisetzung von Zinkionen aufgrund der hohen Oberfläche von  $\text{ZnO}_x$ -NP wahrscheinlich relevant. Die Inhalation von  $\text{ZnO}_x$ -NP aus Metaldämpfen, wie sie beispielsweise beim Lichtbogenschweissen oder früher bei der Messinggiesserei entstanden, führt zu



einem temporären pathologischen Zustand, der «Metallfieber» getauft wurde. Grippeähnliche Symptome dokumentieren Entzündungsreaktionen des Lungengewebes. Nach ca. 48 Stunden normalisiert sich der Zustand der Betroffenen wieder.

Der am häufigsten auftretenden Expositionsform über den Hautkontakt konnten keinerlei negative Effekte für den Menschen attribuiert werden. ZnO<sub>x</sub>-NP können die äusseren Hautschichten nicht überwinden (Gamer et al. 2006; Nohynek et al. 2007; SCCP 2007). Lediglich Zn<sup>2+</sup>-Ionen konnten in tieferen Hautschichten festgestellt werden (Cross et al. 2007; Gulson et al. 2010).

#### ► Ökotoxizität

Wie bereits erläutert, sind auch hier die freien Zinkionen die Verursacher toxischer Effekte im Ökosystem. Wasserorganismen reagieren gleichermassen auf nano- und makroskalige Partikelgrössen. Dies ist ein Indiz dafür, dass in diesem Fall die Partikelgrössen nicht entscheidend für die beobachteten Effekte sind. Die höchsten Konzentrationen von ZnO<sub>x</sub>-NP, bei der keine negativen Effekte festgestellt werden können (NOEC – no observed effect concentration), liegen bei 17 µg/l für Grünalgen und bei 30 µg/l für Biberschwanzzeenkrebse.

Da die Datenlage zu der Verteilung von ZnO<sub>x</sub> im Ökosystem ungenügend ist, kommen unterschiedliche Studien zu unterschiedlichen Einschätzungen der Menge von ZnO<sub>x</sub> im Ökosystem (s. Kapitel «Freisetzung, Exposition und Umweltkonzentrationen», S. 156).

#### *Vorläufige Diskussion bzw. Interpretation der Datenlage*

Aufgrund der erweiterten Anwendungsgebiete durch die nanoskalige Form von ZnO<sub>x</sub> steht eine erhöhte Einbringung von ZnO<sub>x</sub> in die Umwelt zu befürchten. Die ZnO<sub>x</sub>-NP unterscheiden sich in ihrer Toxizität nicht von anderen ZnO<sub>x</sub>-Formen, da die freigesetzten Zn<sup>2+</sup>-Ionen massgeblich für die toxischen Effekte verantwortlich sind (SRU 2011). Es ist schwierig, anhand der vorhandenen Literatur zu unterscheiden, ob die beobachteten toxischen Effekte ZnO<sub>x</sub>-NP und/oder den Zinkionen zuzuschreiben sind. Hier besteht noch Klärungsbedarf (Som et al. 2011).

## 8.2 Transformationseffekte und Langzeitwirkungen von Nanomaterialien (AP 5)

Die Stoffprofile in Abschnitt 8.1 zeigen, dass die Mehrzahl der bisher durchgeführten Studien bezüglich der Auswirkungen von Nanomaterialien auf die Gesundheit und Umwelt unbehandelte, nicht gealterte (engl. *pristine*) Nanomaterialien untersucht und sich dabei vor allem auf kurzzeitige Expositionen und akute (öko-)toxikologische Effekte konzentriert hat. Über die langfristigen Auswirkungen von Nanomaterialien ist dagegen bisher nur sehr wenig bekannt; das gilt sowohl für potenzielle Transformationsprozesse synthetischer Nanomaterialien nach Freisetzung in die Umwelt als auch für deren toxikologischen und ökotoxikologischen Langzeiteffekte, die Aufnahme in Organismen (Bioakkumulation) und die Anreicherung in der Nahrungskette (Biomagnifikation).

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich der nachfolgende Abschnitt mit den potenziellen Transformationsprozessen synthetischer Nanomaterialien sowie mit der Notwendigkeit von Studien zur Untersuchung toxischer Langzeiteffekte von Nanomaterialien auf Umwelt und menschliche Gesundheit. Dabei wird auch diskutiert, welche Arten von Studien und methodologischen Ansätzen zur Analyse der Langzeiteffekte von Nanomaterialien aus Sicht von Expertinnen und Experten notwendig sind.

### 8.2.1 Potenzielle Transformationsprozesse synthetischer Nanomaterialien

Es existiert eine enorme Vielzahl unterschiedlicher Nanomaterialien. Selbst stofflich identische Nanomaterialien, wie z. B. die Gruppe der Titandioxide, unterscheiden sich in der Regel untereinander, u. a. hinsichtlich ihrer Grösse, Kristallform, spezifischen Oberfläche – und vor allem ihrer Oberflächenbehandlung. Gleiches gilt jeweils für die anderen stofflich identischen Nanomaterialien wie Zinkoxide, Silber, Kohlenstoffröhren (CNT) etc. (Som et al. 2010).

Es ist bekannt, dass sich die Stoffeigenschaften von Nanomaterialien gleicher stofflicher Zusammensetzung, aber verschiedener Grösse, verschiedener Kristallformen und verschiedener Oberflächenbeschaffenheit, zum Teil deutlich voneinander unterscheiden (physikalisch-chemische Eigenschaften) und dadurch auch die Risikoprofile der einzelnen Nanomaterialien unterschiedlich ausfallen

(SCENIHR 2010). Den grössten Einfluss spielen dabei die verschiedenen Oberflächenbehandlungen der Nanomaterialien.<sup>131</sup> Ziele dieser Behandlungen sind der Schutz der Oberfläche gegen unerwünschte Reaktionen oder Degradation, Verhinderung von Agglomeration und Aggregation, Anbringen bestimmter funktioneller Gruppen für spezifische Reaktionen oder die zielgerichtete Einstellung bestimmter Eigenschaften. Die Oberflächenchemie von Nanomaterialien hat auch einen entscheidenden Einfluss darauf, wie sich Nanomaterialien in biologischen Prozessen verhalten. Die zahlreichen verschiedenen Oberflächenfunktionalisierungen können zu unzähligen potenziellen Wechselwirkungen zwischen (oberflächenbehandeltem) Nanomaterial und Umwelt/umgebendem Medium führen.

Expertinnen und Experten weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass die überwiegende Zahl an toxikologischen und ökotoxikologischen Studien bisher mit dem unbehandelten Nanomaterial durchgeführt wird, wogegen in den meisten realen Anwendungen aber oberflächenbehandelte bzw. -funktionalisierte Nanomaterialien eingesetzt werden. Da die Oberflächenchemie eine Schlüsselrolle bei der Risikobestimmung der Nanomaterialien spielt, sollten die Effekte der Oberflächenfunktionalisierung auf die Bioverfügbarkeit und damit auch die (Öko-)Toxizität und Bioakkumulation von Nanomaterialien in Zukunft verstärkt untersucht werden (Stone et al. 2009; Som et al. 2010). Laut dem wissenschaftlichen Ausschuss der EU, SCENIHR (2010), sollte sogar jede Kombination von Nanomaterial und Coating bei der Risikobewertung individuell betrachtet werden.

Weiterhin wird oftmals nicht berücksichtigt, dass synthetische Nanomaterialien typischerweise nur die Ausgangsmaterialien für nanotechnologische Zwischen- oder Endprodukte sind, die in der Regel erst nach weiteren Verwendungsschritten in Form von nanohaltigen Produkten in die Umwelt oder zum Verbraucher gelangen (SRU 2011).

Die Nanomaterialien selbst und die nanohaltigen Produkte unterliegen dabei verschiedensten Prozessen, welche dazu führen, dass die Nanomaterialien ihre Form und chemische Zusammensetzung (bei der Produktherstellung, während der Nutzungsphase des Produkts und/oder nach der Freisetzung) ändern und dass in der Umwelt letztendlich transformierte Nanomaterialien zu finden sind, die sich zum Teil grundlegend von den Originalformen («*as manufactured*») unterscheiden. Diese Transformationsprozesse umfassen unter anderem foto-

---

<sup>131</sup> Anstelle von Oberflächenbehandlung spricht man häufig auch von «Coating», Oberflächenmodifikation oder Oberflächenfunktionalisierung.

chemische Umwandlungen, Aggregation und Agglomeration, Oxidation und Reduktionsprozesse, Lösungs- und Fällungsreaktionen, Ad- und Desorptionsvorgänge, aber auch Biotransformation und biogeochemische Prozesse (Nowack et al. 2012). Dabei ist zu beachten, dass Veränderungen nicht nur in der abiotischen, sondern auch in der biotischen Umgebung (d. h. in Zellen und Organismen) erfolgen können (Schirmer et al. 2013). Je nach Nanomaterial und Transformationsreaktion können die transformierten Nanomaterialien grössere oder auch kleinere Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit haben als die ursprünglich hergestellten Nanomaterialien. Beispielhaft sei hier die Aggregation von Nanomaterialien genannt: Durch die Aggregation von Nanopartikeln wird deren Löslichkeit und somit die Bioverfügbarkeit reduziert, was wiederum die Toxizität beeinflussen kann. Somit können sich die (öko-)toxikologischen Effekte von aggregierten Nanomaterialien von denen freier Nanomaterialien grundlegend unterscheiden.

Daher wird seitens der Expertinnen und Experten diskutiert, ob die derzeit üblichen Untersuchungen mit unveränderten Nanomaterialien für die Erhebung von Endpunkten zur Risikobewertungen transformierter Nanomaterialien, so wie sie in der Umwelt grösstenteils vorliegen, geeignet bzw. ausreichen (Nowack et al. 2012; Levard et al. 2012) oder ob hier zusätzliche Untersuchungen mit den tatsächlich freigesetzten Nanoformen notwendig sind.

Aus diesem Grund schlagen Nowack et al. (2012) die folgende Kategorisierung bzw. Unterscheidung von synthetischen Nanomaterialien im Rahmen der Risikobewertung nanomaterialhaltiger Produkte vor: 1) unveränderte Nanomaterialien, wie sie hergestellt werden (P-ENM)<sup>132</sup>; 2) im Produkt eingearbeitete bzw. modifizierte Nanomaterialien (PM-ENM); 3) im Produkt gealterte bzw. durch Umwelteinflüsse veränderte ENM (PW-ENM) und schliesslich 4) aus dem Produkt in die Umwelt freigesetzte und dort durch Transformationsprozesse veränderte Nanomaterialien (ET-ENM). Abbildung 10 beschreibt diese Kategorisierung für Nanomaterialien (Nowack et al. 2012).

Zukünftige Forschungsprojekte und Untersuchungen sollten darauf zielen, für alle diese verschiedenen Formen von synthetischen Nanomaterialien Daten zum

132

ENM = «engineered nanomaterials»

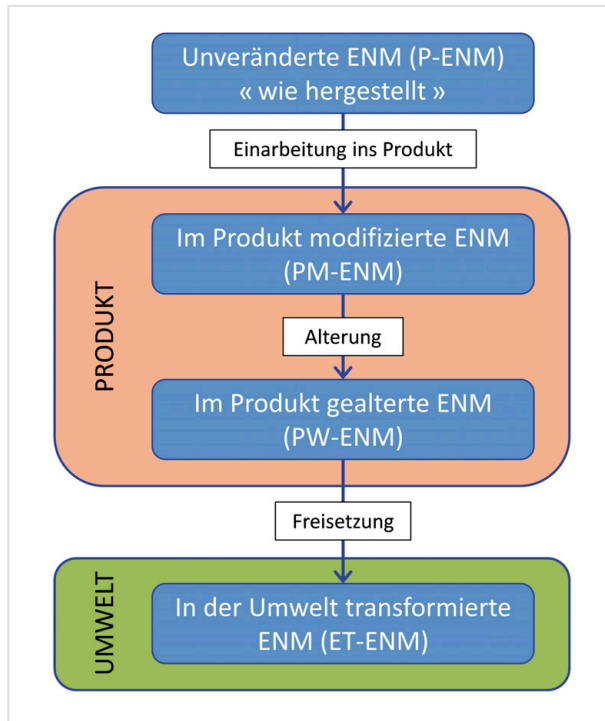
P-ENM = «pristine engineered nanomaterials»

PM-ENM = «product-modified engineered nanomaterials»

PW-ENM = «product-weathered engineered nanomaterials»

ET-ENM = «environmentally transformed engineered nanomaterials».

Verhalten und zu Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zu erheben (Nowack et al. 2012).



**Abbildung 10** *Kategorisierung synthetischer Nanomaterialien (engineered nanomaterials «ENM») (Quelle: Nowack et al. 2012, eigene Übersetzung aus dem Englischen)*

Wissenslücken beginnen oftmals schon bei der Frage, welche Form des Nanomaterials im Produkt eingearbeitet ist. Wie zuvor beschrieben, werden häufig nicht die unveränderten Formen der Nanomaterialien verwendet, sondern (oberflächen-)modifizierte bzw. funktionalisierte Nanomaterialien. Oftmals fehlen aber genaue Angaben seitens der Hersteller.

Für einige Anwendungen von Nanomaterialien in Produkten liegen bereits Untersuchungen und Informationen hinsichtlich der freigesetzten Formen von Nanomaterialien vor (s. Kapitel 8.1). Allerdings beschränken sich diese Untersuchun-

gen bisher auf eine überschaubare Anzahl von Verwendungen wie vor allem Silber in Textilien und Titandioxid in Wandfarben und Oberflächenbeschichtungen. Bei der überwiegenden Anzahl der anderen Nanomaterialien und deren Verwendungen in Produkten sind die Kenntnisse bezüglich der freigesetzten Formen, Zusammensetzungen und Oberflächeneigenschaften dagegen eher dürftig. Gleiches gilt für das Verhalten und die Effekte dieser freigesetzten Nanoformen und deren kurz- bis langfristige Transformationen in der Umwelt. Eine Schlüsselfrage im Rahmen der Risikobewertung von Nanomaterialien ist daher der Punkt, ob und inwieweit neben der Bewertung der unmodifizierten Materialien auch die in den Produkten/Anwendungen tatsächlich eingesetzten, zum Teil modifizierten Formen bei der Risikoabschätzung zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus erscheint es auch notwendig, in die Umwelt freigesetzte und dort durch Transformationsprozesse veränderte Nanomaterialien verstärkt in die Risikobewertung aufzunehmen (Nowack et al. 2012).

## 8.2.2 Bestimmung toxischer Langzeitwirkungen von Nanomaterialien

Die Mehrzahl der bisher durchgeführten und in Abschnitt 8.1 beschriebenen Untersuchungen konzentriert sich auf kurzzeitige Expositionen und akute (öko-)toxikologische Effekte von Nanomaterialien. Über die längerfristigen Auswirkungen von Nanomaterialien auf Gesundheit und Umwelt ist bisher verhältnismässig wenig bekannt. So ist oftmals unklar, ob die in Kurzzeittests beobachteten Reaktionen und Effekte über einen längeren Zeitraum anhalten, ob womöglich andere Effekte ausgelöst werden oder ob die beobachteten Reaktionen mit der Zeit wieder abklingen. Generell stellt sich hier die Frage, ob die Kurzzeitreaktion von Zellen, Geweben, Organen und Organismen nicht in erster Linie als einfache Abwehrreaktionen auf Einwirkung von Fremdmaterialien betrachtet werden müssen. Erst die Erkenntnis, ob die Reaktion über die Zeit persistiert oder wieder abklingt, erlaubt eine abschliessende Beurteilung des Effektes (Gehr 2012). Wissenslücken gibt es auch hinsichtlich der Folgen von Langzeitexpositionen. Die Notwendigkeit der Bestimmung von Langzeitwirkungen von Nanomaterialien lässt sich anhand verschiedener Beispiele verdeutlichen:

- Kurzzeittests werden häufig mit sehr hohen einmaligen Dosen durchgeführt. Eine reale Exposition gegenüber Nanomaterialien erfolgt aber in der

Regel in deutlich geringeren Konzentrationen über längere Zeiträume. So tauchen Nanopartikel im Abwasser üblicherweise nicht in Stossbelastungen auf, sondern sie werden einigermassen gleichmässig ins Abwasser eingetragen (Umwelt 2010). Diese chronische Exposition gegenüber Nanomaterialien kann zu völlig anderen Effekten (einschliesslich Bioakkumulation) führen als die in akuten Tests gefundenen Wirkungen (Crane und Handy 2007).

- In einer Multigenerationsstudie mit Nanosilber hat Völker (2011) Daphnien über mehrere Generationen Silber-Nanopartikeln ausgesetzt, d. h., die im Versuch geschlüpften Jungtiere wurden in einem weiteren Experiment erneut auf ihre Fortpflanzungsleistung hin untersucht. Hier zeigte sich, dass nachkommende Generationen erheblich sensibler auf die Behandlung mit Silbernanopartikeln reagierten.
- Langzeit-Toxizitätstests berücksichtigen, dass es bei einigen Nanomaterialien (z. B. Silbernanopartikeln) zu verzögerten Effekten aufgrund eines zwar schlechten, aber mit der Zeit doch erfolgenden Auflösens und einer daraus verzögerten Bioverfügbarkeit kommen kann (Beispiel: Auflösen von Nanosilber bzw. langsame Freisetzung von  $\text{Ag}^+$ -Ionen; Pronk et al. 2009, S. 33).
- Auch ist es nicht auszuschliessen, dass Nanomaterialien, die in den Organismus aufgenommen werden und dort über einen längeren Zeitraum verbleiben, ohne ausgeschieden zu werden, zu chronischen Entzündungen führen können (Umwelt 2010).
- Erste Studien geben Hinweise auf eine Anreicherung von Nanomaterialien in Organismen und eine mögliche Akkumulation in der Nahrungskette. In ersten Untersuchungen von Priester et al. (2012) mit Titandioxid konnte in diesem Zusammenhang gezeigt werden, dass Protozoen Bakterien aufnehmen können, welche mit  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln umgeben sind, und die Protozoen die aufgenommenen  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel in den Nahrungsvakuolen akkumulieren. In einem Experiment von Völker (2011) konnte gezeigt werden, dass sich  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel im Darm der Daphnien anreichern, wenn diese mit  $\text{TiO}_2$ -behandelten Algen gefüttert werden. Da Daphnien über Nahrungsketten mit zahlreichen anderen Organismen in Beziehung stehen, besteht die Sorge, dass sich die Nanopartikel in der Nahrungskette anreichern können.  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel können, wie Versuche mit Mäusen belegen, bei Inhalation Entzündungsreaktionen in der Lunge hervorrufen (Yazdi et al. 2010).

- Expertinnen und Experten betonen die Notwendigkeit epidemiologischer Studien, um den Zusammenhang zwischen Exposition gegenüber Nanomaterialien und ihrem potenziellen Gefährdungspotenzial beurteilen zu können (Riediker 2012). So liegen einerseits für verschiedene Formen von Carbon Nanotubes (CNTs; Murphy et al. 2012) und nanoskalierten TiO<sub>2</sub>-Partikeln (Yazdi et al. 2010) Hinweise vor, wonach diese Materialien bei Aufnahme über die Atemluft (Inhalation) Tumore in sensitiven Tiermodellen induzieren können. Epidemiologische Untersuchungen liefern andererseits für Nanomaterialien bisher nicht hinreichend aussagekräftige Daten (BfR 2011).
- Eine wichtige Angelegenheit im Zusammenhang mit der Beurteilung von durch Nanomaterialien verursachten Effekten ist der Dosiseffekt per se in Tierexperimenten (Oberdörster et al. 2007) einerseits sowie das Problem der Dosis im In-vivo – In-vitro-Vergleich (Han et al. 2012) andererseits.

Im Rahmen eines OECD-Sponsorship-Programms für Nanomaterialien werden die OECD-Testrichtlinien für Chemikalien auf ihre Eignung für die Untersuchung von Nanomaterialien überprüft. Die Überprüfung der OECD-Testrichtlinien einschliesslich Tests zur chronischen (Öko-)Toxizität durch die OECD Working Party on Manufactured Nanomaterials (WPMN) hat ergeben, dass viele der Standardtestverfahren auch für die Testung von Nanomaterialien geeignet sind, einige Verfahren aber nur für bestimmte Nanomaterialien in Betracht kommen bzw. einer Adaption bedürfen und einige Prüf- und Testverfahren völlig neu erarbeitet werden müssen (OECD 2009). In diesem Zusammenhang kommt die WPMN zu dem Ergebnis, dass, vor allem in den Testrichtlinien für Toxikologie und Ökotoxikologie, die Vorgaben für die Probenvorbereitung, Dosierung, Verabreichung und Messung für die Prüfung von Nanomaterialien angepasst oder ergänzt werden müssen (OECD 2009; OECD 2010; Hund-Rinke 2012).

Aus diesen Ergebnissen des OECD-Sponsorship-Programms kann abgeleitet werden, dass sich die Bestimmung toxischer Langzeitwirkungen von Nanomaterialien an den existierenden OECD-Testrichtlinien orientieren kann. Darüber hinaus werden aber gegebenenfalls zusätzliche nanospezifische Tests – sowohl zur Bestimmung akuter als auch chronischer bzw. Langzeiteffekte – notwendig sein. Hinweise auf zusätzliche nanospezifische Endpunkte oder notwendige Adaptationen existierender Tests lassen sich immer wieder aus den Ergebnissen der durchgeführten Standardtests ableiten. So fanden beispielsweise Federici et al. (2007) in Tests mit Regenbogenforellen, dass TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel zwar nur eine



geringe akute Toxizität aufweisen, dafür aber zu physiologischen und morphologischen Veränderungen in Kiemen und Darm geführt haben sowie zu oxidativen Stress in diesen Organen sowie im Gehirn. Die Autoren schlussfolgern daraus, dass für TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel andere Effekte als diejenigen, die typischerweise in den Standardtests bestimmt werden, von Bedeutung sind.

Dabrunz et al. (2011) fanden im Rahmen von erweiterten Standardtests mit Wasserflöhen (*Daphnia magna*), dass durch eine zeitliche Ausdehnung des Testzeitraums von 48 auf 96 Stunden negative Auswirkungen von TiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln auf die Gewässerorganismen beobachtet werden konnten, die bei Einhaltung der Standardtestbedingungen nicht auftraten. Einer der Autoren der Studie schliesst daraus, dass neue Standardtests zur Risikobewertung von Chemikalien aufgesetzt werden müssten, die den Eigenschaften von Nanomaterialien besser Rechnung tragen (Schulz 2011).

Crane und Handy (2007) weisen darauf hin, dass die Übertragung von Ergebnissen aus Laborversuchen auf Freilandbedingungen zu falschen oder irreführenden Schlussfolgerungen führen kann, da in der Natur keine einheitlichen und kontrollierten Laborbedingungen herrschen. Das spielt bei Nanomaterialien vor allem auch deshalb eine grosse Rolle, weil ihre zahlreichen verschiedenen Oberflächenfunktionalisierungen zu unzähligen potenziellen Wechselwirkungen zwischen (oberflächenbehandeltem) Nanomaterial und Umwelt/umgebendem Medium führen können. Daher ist das Verhalten der Nanomaterialien sehr stark vom umgebenden Medium (pH-Wert, Vorhandensein organischer Substanz etc.) abhängig.

Über die tatsächlich freigesetzten Mengen von Nanopartikeln, deren Verbleib bzw. Verhalten und Effekte in der Umwelt ist bislang noch wenig bekannt. Dies liegt zum Teil daran, dass geeignete Methoden zum Aufspüren und zur Charakterisierung von synthetisch hergestellten Nanopartikeln in komplexen Systemen, wie etwa im Wasser, im Boden, in Lebensmitteln oder in Kosmetika, noch in Entwicklung sind. Technische Methoden, die derzeit zur Verfügung stehen, umfassen v. a. solche der Mikroskopie (z. B. Atomkraftmikroskop (AFM), Transmissionselektronenmikroskop (TEM), Tomografie-Elektronenmikroskop, Raster-Transmissionselektronenmikroskop (STEM), Sekundärelektronenmikroskop (SEM)), dynamische Streulichtmessungen, Chromatografie, Spektroskopie, Zentrifugierung, Filtration und verwandte Methoden. Oftmals ist zur Analyse eine Kombination aus verschiedenen Verfahren notwendig (Greßler und Fries 2010).

Auch wenn in den letzten Jahren grosse Anstrengungen unternommen wurden, Analysemethoden für Nanopartikel entsprechend zu adaptieren und weiter zu entwickeln, scheitern Feldstudien und Umweltmonitoring von Nanomaterialien häufig nach wie vor noch an methodologischen Problemen bei der Analytik. So ist die Detektion und Charakterisierung von Nanomaterialien in Umweltmedien, bedingt durch die oftmals niedrige Partikelkonzentration, eine grosse Herausforderung (Kaegi et al. 2008).

Auch die Unterscheidung zwischen natürlich vorkommenden und synthetischen Nanopartikeln in einer komplexen Probe stellt eine Schwierigkeit dar. Ein weiteres Problem ist das Fehlen von standardisierten Referenzmaterialien. Verfügbar sind nur kommerziell erhältliche Nanopartikel, die oftmals nicht ausreichend charakterisiert sind (Tiede et al. 2010).

### 8.3 Zwischenfazit

Im Zuge der Intensivierung der Risikoforschung in den letzten Jahren existiert mittlerweile eine Vielzahl an Studien und Reviews zu den Auswirkungen von Nanomaterialien auf Mensch und Umwelt. Dabei konzentrieren sich die vorliegenden Studien bisher vor allem auf akute (öko-)toxikologische Effekte unbehandelter Nanomaterialien.

Aus dieser Vielzahl der vorliegenden Ergebnisse lassen sich bislang nur wenig generell gültige Aussagen zu Eigenschafts- und Wirkungszusammenhängen von Nanopartikeln ableiten. Es lässt sich aber schliessen, dass die Nanostrukturierung eines Materials für sich allein nicht grundsätzlich als Gefährdungsmerkmal im Hinblick auf toxikologische Eigenschaften einzuordnen ist, wenngleich in vielen Studien nachgewiesen wurde, dass die Nanostrukturierung eines Stoffes dessen toxikologische Wirkung erhöhen kann. Eine Risikobewertung im Hinblick auf eine Gefährdung von Mensch und Umwelt muss daher notwendigerweise substanz- und anwendungsspezifisch erfolgen. Hinsichtlich humantoxischer Wirkungen zeigen die vorliegenden Studien, dass beispielsweise bei bestimmten Kohlenstoffnanoröhren (CNTs), Industrieruss und TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel kanzerogene Effekte nachgewiesen werden können. Das Gefährdungspotenzial von CNTs reduziert sich aber dadurch, dass CNTs in den derzeit bekannten Anwendungen fest in die Produktmatrix eingebunden sind und dadurch kaum freigesetzt werden können. Bei Industrieruss und TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel wurden die kanzerogenen

Effekte ausschliesslich bei sehr hohen Expositionsdosen beobachtet, die von Expertinnen und Experten teilweise als eher unrealistisch betrachtet werden.

Wichtige Hinweise auf human- und ökotoxische Wirkungen können die beiden im Moment laufenden Forschungsprogramme SPP1313 (Schwerpunktprogramm) der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) und das NFP 64 (Nationales Forschungsprogramm) des Schweizer Nationalfonds liefern. In beiden wird die Interaktion von Nanomaterialien mit biologischen Systemen und den möglichen Folgen für Umwelt und Gesundheit untersucht. Es sei hier auch mit Nachdruck darauf hingewiesen, dass sich Nanopartikel in biologischen Systemen grundsätzlich anders als Mikropartikel verhalten. Nanopartikel sind in der Lage, leicht Zellen und Gewebe zu durchdringen (Rothen-Rutishauser et al. 2007; Semmler et al. 2004; Wang et al. 2012). So können Nanopartikel nach Inhalation in die Lunge und durch Ablagerung in den Lungenbläschen (Alveolen) durch die Luft-Blut-Schranke in Blutgefässe gelangen und dann mit dem Blut im ganzen Organismus verteilt werden (Rothen-Rutishauser et al. 2007).

Es ist wegen dieses besonderen Verhaltens von Nanopartikeln in biologischen Systemen wichtig, bei der Diskussion der physikalisch-chemischen Eigenschaften von Nanopartikeln auch die Biologie, d. h. das Verhalten von Nanopartikeln in Zellen und Geweben zu erwähnen. Diese Fragestellung ist auch Gegenstand der Forschung im NFP 64 (Gehr 2012).

In Bezug auf die Exposition von Arbeitnehmer/innen mit Nanomaterialien liegt mittlerweile eine Vielzahl von Studien vor. Aus Ergebnissen von Arbeitsplatzuntersuchungen lässt sich ableiten, dass für einige Arbeitsprozesse bei der Herstellung und Verarbeitung pulverförmiger Nanomaterialien ein reales Expositionsrisiko besteht. In vielen Fällen war es allerdings messtechnisch nicht möglich, einen signifikanten Anstieg von Nanoobjekten gegenüber der Hintergrundkonzentration festzustellen (Kuhlbusch et al. 2011). Hinsichtlich möglicher negativer Effekte auf die Umwelt sind vor allem Silber- und Zinkoxid-Nanopartikel zu nennen. Für  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel liegen zum Teil sehr konträre Testergebnisse zur Ökotoxikologie vor, die je nach Autor und Testdesign von wenig toxisch bis toxisch reichen. Hinzu kommt, dass chronische Tests mit  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel zum Teil deutliche Effekte auf Gewässerorganismen zeigen.

Für eine fundierte Risikobewertung von Nanomaterialien reichen die vorliegenden Daten in der Regel allerdings noch nicht aus, auch wenn für einzelne Nanomaterialien bereits erste Abschätzungen der Risikoquotienten vorliegen. Es fehlen für die meisten Nanomaterialien quantitative Abschätzungen zur Freisetzung und der daraus resultierenden Exposition sowie Daten zur Exposition und

längerfristigen Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt. So gibt es kaum Informationen darüber, ob die in Kurzeittests beobachteten Reaktionen und Effekte über einen längeren Zeitraum anhalten, ob womöglich andere Effekte ausgelöst werden oder ob die beobachteten Reaktionen mit der Zeit wieder abklingen. Wissenslücken gibt es auch hinsichtlich der Folgen von Langzeitexpositionen wie z. B. einer kontinuierlichen Exposition gegenüber geringen Nanopartikelkonzentrationen.

Dennoch lassen sich mit dem gegenwärtigen Wissensstand verschiedene Kategorien von Nanomaterialien bilden, die hinsichtlich der möglichen Risikopotenziale prioritär zu beobachten sind. Als kritisch in Bezug auf mögliche Gefährdungseigenschaften sind folgende Typen von Nanomaterialien einzuordnen (Packroff et al. 2011):

- Nanomaterialien aus Stoffen mit bekannter spezifischer Toxizität wie z. B. Cd, Ni oder Co,
- Nanomaterialien mit einer biobeständigen faserförmigen Gestalt wie z. B. Kohlenstoffnanoröhren,
- Granuläre, biobeständige ultrafeine Stäube (GBS) z. B. Industrieruss, Metalloxide.

Von den kommerziell relevanten Nanomaterialien sind die meisten in die Kategorie der biopersistenten Stäube einzuordnen. Bei einigen Varianten der Kohlenstoffnanoröhren (CNT) ist zudem die Fasermorphologie zu beachten, die vor allem bei längeren, starren CNT zum Tragen kommt.

Die Datenbasis in Bezug auf chronische und systemische Effekte wird derzeit allerdings noch als zu gering erachtet. Aus aktuellen Untersuchungen wird deutlich, dass neben den oben beschriebenen Parametern wie der Partikelgröße und der Morphologie vor allem die Oberflächeneigenschaften einen starken Einfluss auf die Toxizität von Nanomaterialien ausüben können (OECD 2010). Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch die Beschichtung der Nanopartikel mit Proteinen (Coating). Obwohl die Untersuchungen dazu erst am Anfang stehen, scheint Coating aber sowohl für die Interaktion von Nanopartikeln mit biologischen Systemen als auch für deren Wirkung eine wichtige Rolle zu spielen (Gehr 2012). Die Oberflächenmodifikation und Funktionalisierung von Nanopartikeln sollte daher bei toxikologischen Studien ausreichend charakterisiert werden. Zusammenstellungen einzelner (öko-)toxikologischer Eigenschaften und Studienergebnisse von den relevantesten Nanomaterialien sind in den letzten Jah-

ren in verschiedenen Reviewstudien und Informationsportalen zusammengestellt worden.<sup>133, 134, 135, 136, 137, 138, 139</sup>

Risikobewertungen von Nanomaterialien werden gegenwärtig v. a. dadurch erschwert, dass die überwiegende Anzahl von toxikologischen und ökotoxikologischen Studien bisher mit unbehandelten Nanomaterialien durchgeführt wird. In den meisten realen Anwendungen und Produkten werden aber oberflächenbehandelte bzw. -funktionalisierte Nanomaterialien eingesetzt. Zudem unterliegen die Nanomaterialien und nanohaltigen Produkte während ihres Lebenszyklus verschiedensten Transformationsprozessen, welche dazu führen, dass die Nanomaterialien ihre Form und chemische Zusammensetzung (bei der Produktherstellung, während der Nutzungsphase des Produkts und/oder nach der Freisetzung) ändern und dass in der Umwelt letztlich transformierte Nanomaterialien zu finden sind, die sich zum Teil grundlegend von den Originalformen unterscheiden und unter Umständen völlig andere Auswirkungen auf Mensch und Umwelt haben können als die unbehandelten Nanomaterialien.

Weitergehenden Forschungsbedarf gibt es somit vor allem im Hinblick auf oberflächenmodifizierte Nanomaterialien, Freisetzung von Nanomaterialien aus Produkten, Langzeitverhalten und -wirkungen in Mensch und Umwelt sowie zu dem Verhalten von Nanomaterialien unter realen Freilandbedingungen. Im Zusammenhang mit den Wirkungen von Nanomaterialien gibt es zudem Forschungsbedarf hinsichtlich der Dosiseffekte in Tierexperimenten und der Extrapolation von in vitro auf in vivo.

---

<sup>133</sup> SRU 2011.

<sup>134</sup> Dechema 2011.

<sup>135</sup> Informationsportal [www.nanopartikel.info](http://www.nanopartikel.info).

<sup>136</sup> Department of Health and Ageing: Review of 2007–09 literature on toxicological and health-effects relating to six nanomaterials, Department of Health and Ageing, Government of Australia 2009.

<sup>137</sup> LUBW 2010.

<sup>138</sup> ENRHES-Project 2009: Engineered Nanoparticles – Review of Health and Environmental Safety, final report; [http://ihcp.jrc.ec.europa.eu/whats-new/enhres-final-report/at\\_multi\\_download/file?name=ENRHES\\_review.pdf](http://ihcp.jrc.ec.europa.eu/whats-new/enhres-final-report/at_multi_download/file?name=ENRHES_review.pdf).

<sup>139</sup> Danish EPA: Survey on basic knowledge about exposure and potential environmental and health risks for selected nanomaterials, Endbericht Environmental Project No. 1370 2011, August 2011.



## 9 Betrachtung der End-of-Life-Aspekte

Angesichts der vielen verschiedenartigen Anwendungen von Nanomaterialien ist die Analyse der End-of-Life-Aspekte sehr komplex. Im vorliegenden Kapitel werden daher besonders relevante Nanomaterialien ausgewählt und die Entsorgungswege bestimmter Produkte beleuchtet, die diese Nanomaterialien enthalten. Diese Produkte finden Eingang in verschiedene Entsorgungspfade und durchlaufen mitunter mehrere Stationen auf ihrem Entsorgungsweg, ehe sie bzw. Anteile von ihnen schliesslich Kehrichtverbrennungsanlagen erreichen. Kehrichtverbrennungsanlagen werden daher in einem eigenen Kapitel behandelt (Kapitel 9.3.2). Da die in den Produkten enthaltenen Nanomaterialien sowohl bei der Nutzung als auch in den verschiedenen Stationen des jeweiligen Entsorgungswegs ins Abwasser und damit in Kläranlagen gelangen können, werden auch diese separat betrachtet (Kapitel 9.3.1). Ebenso getrennt betrachtet wird die Entsorgungszwischenstation Schredderanlage, da sie nicht nur von Metallabfällen, sondern auch von zahlreichen grossen und komplexen Produkten durchlaufen wird, die Nanomaterialien enthalten (Kapitel 9.3.3). Für jedes der exemplarischen Produkte werden bei der Beschreibung der Entsorgungswege auch mögliche Expositionspfade durch die enthaltenen Nanomaterialien aufgezeigt und erläutert.

### 9.1 Auswahl der betrachteten Nanomaterialien und Produkte

Zur Auswahl der betrachteten Nanomaterialien bzw. der betrachteten Produkte wurden insbesondere folgende Kriterien herangezogen:

- Ein Risikopotenzial durch das Nanomaterial ist gegeben oder kann derzeit nicht ausgeschlossen werden.
- Die in Produkten eingesetzte Masse des Nanomaterials hat insgesamt einen relevanten Umfang.

- Mit den betrachteten Produkten sollten möglichst viele Entsorgungswege abgedeckt werden.

Anhand dieser Kriterien wurden folgende Nanomaterialien bzw. Produkte ausgewählt:

- Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ): enthalten in Sonnencremes, Farben/Lacken und Textilien.
- Silber (Ag): enthalten in Textilien und Farben/Lacken.
- Zinkoxid ( $\text{ZnO}$ ): enthalten in Textilien und Farben/Lacken.<sup>140</sup>
- Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ): enthalten in Textilien und Farben/Lacken.<sup>141</sup>
- CNT: enthalten in Sportgeräten (Tennis- und Golfschläger, Rennräder) und Elektronik.
- Fullerene: enthalten in Elektronik wie organischen Solarzellen.

## 9.2 Exposition von Mensch und Umwelt entlang der Entsorgungswege ausgewählter Produkte

Im Folgenden werden für die ausgewählten Produkte Sonnencremes, Textilien, Farben und Lacke sowie Sportgeräte und Elektronik die Entsorgungswege exemplarisch dargestellt. Weiterhin wird aufgezeigt, an welchen Stellen der jeweiligen Entsorgungswege Einträge der in den Produkten enthaltenen Nanomaterialien in die Umwelt stattfinden oder stattfinden können. Dabei werden auch Einträge in Abwässer berücksichtigt. Da die in den Produkten enthaltenen Nanomaterialien bereits bei der Nutzung direkt oder indirekt sowohl in unterschiedliche Abfallarten als auch ins Abwasser gelangen können, wird die Nutzung mitbetrachtet. Kläranlagen, Kehrlichtverbrennungsanlagen und Schredderanlagen werden aus den

---

<sup>140</sup> Zinkoxid ist in der Schweiz als UV-Filter für Sonnencremes nicht zugelassen, wird daher hier nicht mitbetrachtet; siehe [www.baselland.ch/fileadmin/baselland/files/docs/vsd/labor/aktuell/kamp/sonnenschutzmittel\\_2006.pdf](http://www.baselland.ch/fileadmin/baselland/files/docs/vsd/labor/aktuell/kamp/sonnenschutzmittel_2006.pdf).

<sup>141</sup> Siliziumdioxid ist auch in Lebensmitteln enthalten. Im Rahmen dieser Studie können aber nicht die Entsorgungswege aller Produkte, die Siliziumdioxid enthalten, betrachtet werden.



oben bereits genannten Gründen in eigenen Kapiteln separat behandelt (s. Kapitel 9.3.1 bis 9.3.3).

### 9.2.1 Sonnencremes

Das in Sonnencremes enthaltene Titandioxid gelangt beim Duschen und Baden über das häusliche Abwasser oder das Abwasser von Schwimmbädern in Kläranlagen. Darüber hinaus erfolgt eine direkte Freisetzung in Oberflächengewässer beim Baden in Seen und Flüssen.

Die Behältnisse mit noch enthaltenen Sonnencremeresten werden mit dem Hausmüll über Kehrlichtverbrennungsanlagen entsorgt.

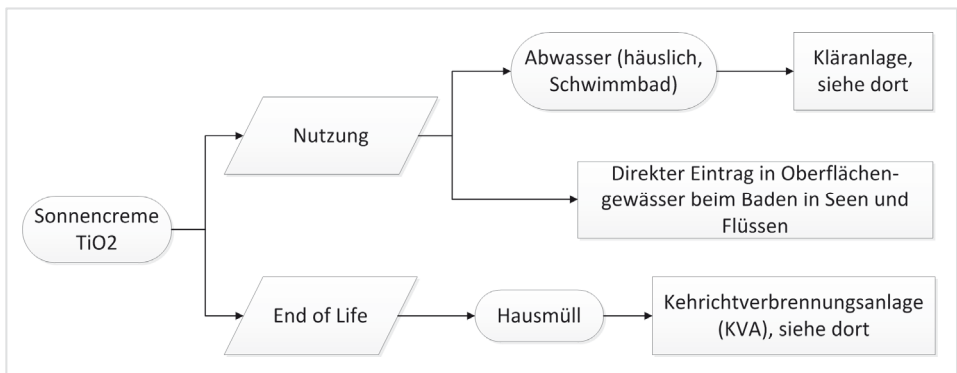


Abbildung 11 Sonnencremes: Abfallanfall und Entsorgungswege während der Nutzung und am Ende des Produktlebenszyklus

### 9.2.2 Textilien

Mit Nanomaterialien (Ag, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, ZnO) ausgestattete Textilien werden während der Nutzung entweder mit Wasser gewaschen oder in chemischen Reinigungen gesäubert. Bei der Wäsche mit Wasser werden die Nanomaterialien über

das Abwasser in Kläranlagen eingetragen. Untersuchungen zum Verhalten beim Waschvorgang liegen bisher nur für Silber vor.

Das in Textilien enthaltene Silber (Ag) gelangt während der Nutzungsphase beim Waschen mit Wasser als Silber oder Silberionen über das Abwasser in Kläranlagen und führt dort zu Freisetzungen in die Umwelt. Die beim Waschen ins Abwasser ausgetragenen Mengen sind recht unterschiedlich. Die im Abwasser des Waschvorgangs maximal enthaltene Menge betrug bei Versuchen 1,3 mg/l oder 68 µg/g Textilien (Benn und Westerhoff 2008). Die Autoren führten diese Unterschiede auf die verschiedenen Techniken zur Ausrüstung der Textilien zurück. Bei Versuchen unter Zugabe von Wasch- und Bleichmitteln wurden bis zu 377 µg/g Material ins Abwasser der Wäsche ausgetragen. Während der Nutzungsphase mehrmals gewaschene Textilien sollten nur noch sehr geringe Mengen an Silber enthalten, da die Silbergehalte der Textilien nach jedem Waschvorgang geringer werden. Bei Versuchen konnte gezeigt werden, dass die ausgetragene Menge bereits beim zweiten Waschvorgang mit Wasch- und Bleichmitteln abnahm (Geranio et al. 2009). Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass die weniger fest im Gewebe gebundenen Partikel bereits beim ersten Waschgang ausgewaschen werden. Der Hauptteil des ausgetragenen Silbers hatte dabei eine Grösse von über 450 nm. Die Grösse der Silber-Nanopartikel in den betrachteten Textilien wurde aber nur bei einigen Proben angegeben. Die kleinsten Partikel wiesen dabei eine Grösse von etwa 100 nm auf.

Darüber, ob Titandioxid (TiO<sub>2</sub>), Siliziumdioxid (SiO<sub>2</sub>) und Zinkoxid (ZnO) ebenfalls mit Wasser oder unter Zugabe von Wasch- und Bleichmitteln ausgewaschen werden können und dann in Kläranlagen zu Freisetzungen in die Umwelt führen, liegen derzeit keine Erkenntnisse vor.

Die bei der chemischen Reinigung anfallenden Abfälle, z. B. Flusenreste, können ebenfalls Nanomaterialien enthalten. Sie werden in Kehrlichtverbrennungsanlagen entsorgt. Zum Austrag von Nanopartikeln während dieses Prozesses wurden bisher keine Untersuchungen durchgeführt. Findet ein Austrag statt, können Nanopartikel über das Abgas der chemischen Reinigung in die Luft freigesetzt werden. Gebrauchte Textilien werden zum einen mit dem Hausmüll über Kehrlichtverbrennungsanlagen entsorgt und die noch enthaltenen Nanopartikel können dort freigesetzt werden (s. Kapitel 9.3.2). Zum anderen werden sie als Altkleider gesammelt und in der Schweiz, vor allem aber im Ausland von Hand sortiert. Die noch tragbare Gebrauchtkleidung (55 Prozent der gesammelten Altkleider) gelangt zum überwiegenden Teil nach Osteuropa und Russland, Afrika und Asien (BAFU 2012). Der übrige Teil der gesammelten Alttextilien wird

als Rohstoff zur Herstellung von Putzlappen (15 Prozent) und Reisswolle (15 Prozent) sowie in der Papier- und Pappeindustrie (5 Prozent) verwendet; 10 Prozent werden als Abfall verbrannt (BAFU 2012).

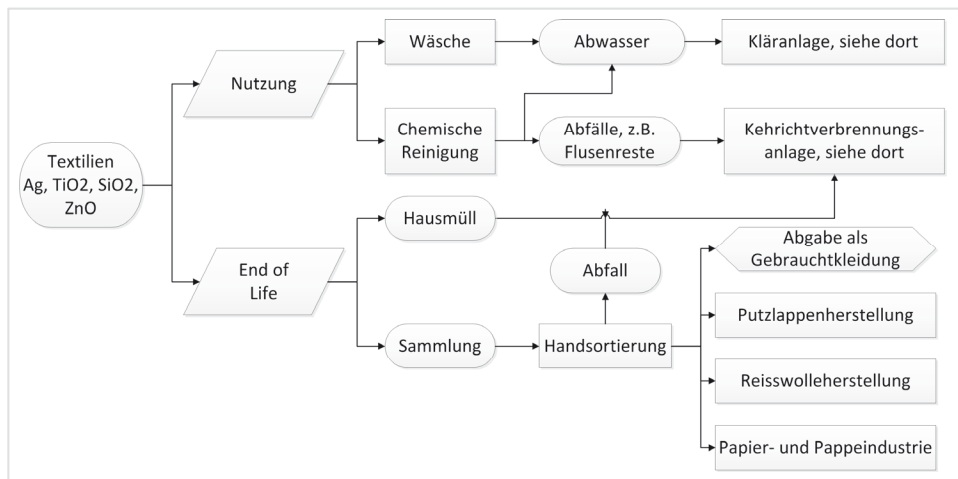


Abbildung 12 *Textilien: Abfallanfall und Entsorgungswege während der Nutzung und am Ende des Produktlebenszyklus*

### 9.2.3 Farben und Lacke

Bei den Nanomaterial (Ag, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, ZnO) enthaltenden Farben und Lacken sind zwei Nutzungen zu unterscheiden. Zum einen werden die Behältnisse mit Restinhalt nach der Aufbringung der Farbe oder des Lacks auf Produkte und Bauteile etc. über den Hausmüll, den Sondermüll oder die Baustellenabfälle in Kehrichtverbrennungsanlagen entsorgt. Zum anderen können Nanomaterialien während der Nutzung der gestrichenen Produkte und Bauteile etc. aus diesen ausgewaschen werden, beispielsweise aus Fassadenfarben, und gelangen dann über das Regenwasser in Boden oder Gewässer, oder aber über die Kanalisation in Kläranlagen.

Der direkte Eintrag von  $\text{TiO}_2$  aus Fassadenbeschichtungen in Fließgewässer konnte in einem Siedlungsgebiet, in dem der Regenwasserabfluss nicht über die Kläranlage erfolgte, nachgewiesen werden (Burkhardt et al. 2009).

Eine Untersuchung, in der an einem der Witterung ausgesetzten Modellhaus u. a. die Auswaschung von Nanosilber und  $\text{TiO}_2$  aus Fassadenfarben ermittelt wurde (Burkhardt et al. 2009), zeigte, dass Nanosilber und  $\text{TiO}_2$ -Partikel rasch ausgewaschen werden. Beim Nanosilber fanden sich zu Anfang bis zu  $145 \mu\text{g/l}$  im Fassadenabfluss, nach zehn Monaten lag die Konzentration unterhalb der Bestimmungsgrenze von  $0,08 \mu\text{g/l}$ . Beim  $\text{TiO}_2$  betrug die Konzentration anfangs  $8500 \mu\text{g/l}$  und lag nach sechs Monaten unterhalb der Bestimmungsgrenze von  $9 \mu\text{g/l}$ .

Im Laufe eines Jahres wurden rund 30 Prozent des in der Fassade enthaltenen Nanosilbers im Fassadenabfluss wiedergefunden. Dabei lag das Nanosilber als Einzelpartikel und in Form von grösseren Ansammlungen, vielfach aber mit organischen Matrixpartikeln (vermutlich Bindemittel der Farbe) assoziiert vor (Burkhardt et al. 2009). Die Beobachtung, dass Nanosilber vor allem aus neuen Anstrichen ausgewaschen wird, konnte durch Einzeluntersuchungen an einem zweieinhalb Jahre alten Gebäude bestätigt werden. Hier konnte im Fassadenabfluss kein Nanosilber mehr nachgewiesen werden (Burkhardt et al. 2009).

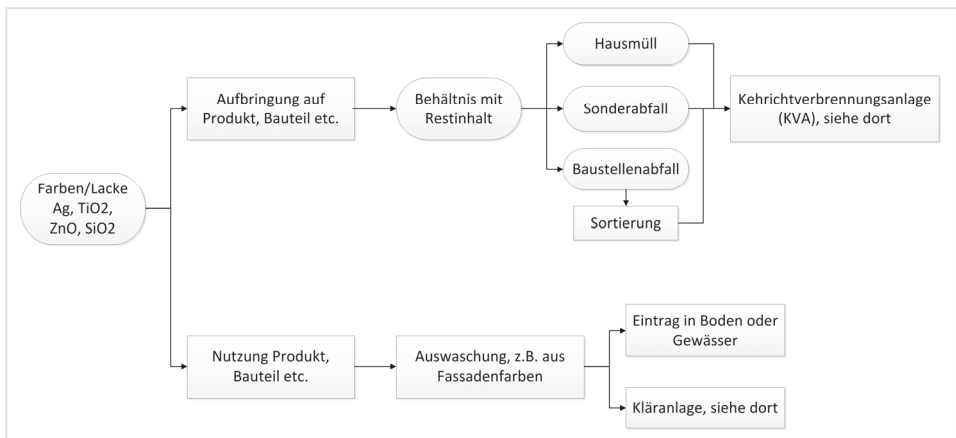
Auch wenn die Auswaschung von  $\text{TiO}_2$ -Partikeln rasch abnimmt, ist sie über die Jahre hinweg nicht endlich, da durch die sogenannte Kreidung an Fassadenbeschichtungen generell  $\text{TiO}_2$ -Partikel kontinuierlich in geringen Mengen aus der Beschichtungsmatrix freigewittert und abgewaschen werden (Burkhardt et al. 2009).

Die Auswaschung von  $\text{TiO}_2$ -Partikeln aus Fassadenanstrichen wurde auch in einer anderen Untersuchung nachgewiesen (Kägi et al. 2008). Dabei fanden sich  $\text{TiO}_2$ -Partikel in der Grösse von 20 bis 300 nm im Regenwasserablauf. Auch hier zeigte sich ein ähnlicher Verlauf der Auswaschung. Im Regenwasserablauf einer neu gestrichenen Fassade wurden  $500 \mu\text{g/l}$   $\text{TiO}_2$ , im Ablauf eines zwei Jahre alten Fassadenanstrichs  $9 \mu\text{g/l}$ , gefunden.

Eine Simulationsstudie über den Einfluss von Sonnenlicht, Wind und mechanischer Belastung (Reiben mit Gummimesser) auf die Freisetzung von  $\text{TiO}_2$ -Partikeln aus beschichteten anderen Materialien, wie Holz und Tonziegel (Hsu und Chein 2007), zeigte nur geringe Austräge. Die höchste Freisetzungsrate bei der Windsimulation betrug  $22 \text{ Partikel/cm}^3$  bei einer Partikelgrösse von 55 nm.

Unter Einfluss von UV-Licht und mechanischer Belastung wurden Partikel mit einer Grösse von  $< 200$  nm freigesetzt (Hsu und Chein 2007).

Zur Freisetzung von ZnO und SiO<sub>2</sub> durch Witterungseinflüsse und mechanische Belastungen liegen keine Erkenntnisse vor.



**Abbildung 13** Farben und Lacke: Abfallanfall und Entsorgungswege bei der Nutzung

Die gestrichenen Produkte, Bauteile oder Materialien werden als Abfall (Bau-, Holz-, Metallabfall, Hausmüll) auf verschiedenen Wegen entsorgt. Bei den Bauabfällen sind drei Fraktionen, die bei Anfall getrennt gehalten werden sollen (BAFU 2006), zu unterscheiden:

- mineralische Bauabfälle, z. B. Beton, Steine, Ziegel, Keramik etc.,
- brennbare Bauabfälle, z. B. Holz und Tapeten,
- andere Bauabfälle, z. B. Metalle.

### Mineralische Bauabfälle

Die mineralischen Bauabfälle werden, wenn das Recycling wirtschaftlich nicht tragbar ist und die erforderlichen Bedingungen erfüllt sind, direkt auf Inertstoffdeponien abgelagert. Ansonsten werden sie einer Aufbereitung unterzogen

(Sortieren, Brechen, Klassieren). Hierzu kann eine Zwischenlagerung erforderlich sein. Nach der Aufbereitung werden die erhaltenen Recyclingbaustoffe in Materiallagern gelagert, die nicht verwertbaren Reste werden als Abfall – wenn die Bedingungen erfüllt sind – ebenfalls auf Inertstoffdeponien abgelagert. Die Abwässer aus der Zwischenlagerung und der Aufbereitung der mineralischen Bauabfälle werden in Kläranlagen abgeleitet. Auch im Materiallager können Abwässer entstehen, wenn die Recyclingbaustoffe Witterungseinflüssen ausgesetzt sind. Dabei möglicherweise ausgewaschene Nanopartikel werden dann in Kläranlagen eingetragen.

Die Freisetzungen von Nanopartikeln in die Umwelt aus der mineralischen Bauabfallfraktion können auf verschiedenen Wegen erfolgen:

- Beim Brechen und Klassieren können sie mit dem entstehenden Staub in die Luft freigesetzt werden.
- Bei der Zwischenlagerung können sie durch Auswaschungen ins Abwasser und damit in Kläranlagen gelangen und dort zu Freisetzungen führen.
- Beim Aufbereitungsprozess können sie ebenfalls ins Abwasser gelangen und zu Freisetzungen über die Abwasserreinigung führen.
- Durch die Ablagerung auf Inertstoffdeponien können sie durch Witterungseinflüsse in den Boden freigesetzt werden und so gegebenenfalls auch ins Grundwasser gelangen.
- Bei der Lagerung von Recyclingbaustoffen können sie ebenfalls in den Boden freigesetzt werden und ins Grundwasser gelangen, wenn die Recyclingbaustoffe Witterungseinflüssen ausgesetzt sind und keine Regenwassererfassung und Ableitung in Kläranlagen erfolgt. Bei der Ableitung und Reinigung des Abwassers in Kläranlagen kann es in diesen zu Freisetzungen in die Umwelt kommen (vgl. Kapitel 9.3.1).

Über die Höhe der Freisetzungen von in mineralischen Bauabfällen enthaltenen Nanopartikeln in die Luft und den Boden sowie über den Umfang von Auswaschungen liegen keine Erkenntnisse vor. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass zumindest aus den mineralischen Bauabfällen, die jahrelang Witterungsprozessen ausgesetzt waren, keine nennenswerten Freisetzungen und Auswaschungen von Silber und Titandioxid erfolgen, solange sie keinen mechanischen Belastungen ausgesetzt werden, die zu neuen oberflächennahen Farbschichten führen, z. B. durch Abrieb. Bei Recyclingbaustoffen kann die Freisetzung von Silber und Titandioxid durch Witterungseinflüsse kurzfristig

höher sein, da bei ihrer Herstellung durch Brechen und Klassieren neue oberflächennahe Farbschichten entstehen können.

#### *Holzabfälle/brennbare Bauabfälle*

Brennbare Bauabfälle werden sortiert. Aussortiertes Holz wird je nach Qualität im Spanplattenwerk geschreddert und eingesetzt sowie im Zementwerk oder in der Altholzfeuerung als Brennstoff genutzt. Die Reste werden in der Kehrlichtverbrennung entsorgt. Die im Zementwerk anfallenden Abgasreinigungsrückstände werden in den Produktionsprozess zurückgeführt und so im Zementklinker eingebunden.

Freisetzungen von Nanopartikeln in die Luft können über das Abgas der Zementwerke, die Holz als Brennstoff nutzen, oder über das Abgas der Schredderanlagen in Spanplattenwerken erfolgen. Erkenntnisse über die Höhe dieser Freisetzungsmöglichkeiten liegen nicht vor.

#### *Metallabfälle/andere Bauabfälle*

Die «anderen Bauabfälle» werden ebenfalls einer Sortierung unterzogen. Aussortierte Metalle werden entweder direkt an Metallschmelzen abgegeben oder gelangen nach dem Schreddern in Schredderanlagen dorthin. Die Sortierreste werden als Abfall auf entsprechende Deponien oder zu Kehrlichtverbrennungsanlagen verbracht. Die beim Schreddern anfallende Schredderleichtfraktion wird ebenfalls in Kehrlichtverbrennungsanlagen verbrannt.

Freisetzungen von Nanopartikeln in die Umwelt aus dieser Fraktion, daraus aussortierter Metalle oder getrennt angefallener oder gesammelter Metalle können bei der Verbrennung in Kehrlichtverbrennungsanlagen erfolgen. Freisetzungen in die Luft können über das Abgas der Schredderanlagen und der Metallschmelzen stattfinden. Untersuchungsergebnisse zur Höhe der Freisetzungen sind nicht bekannt. Wenn die Deponierung nicht auf Inertstoffdeponien erfolgt, sollten Freisetzungen in den Boden nicht möglich sein, da das Sickerwasser bei Reststoff- und Reaktordeponien erfasst und behandelt wird.

## Hausmüll

Auch über den Hausmüll werden gestrichene Produkte, Bauteile oder Materialien entsorgt. Sie werden dann in Kehrichtverbrennungsanlagen verbrannt, mit den bereits genannten Risiken der Freisetzung.

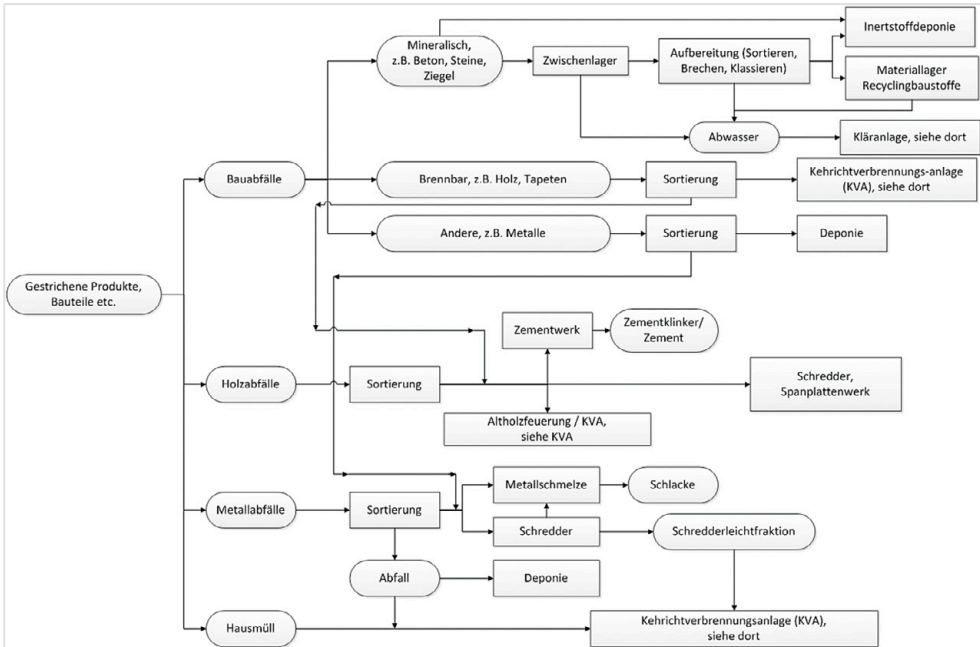


Abbildung 14 Farben und Lacke: Abfälle und ihre Entsorgungswege am Ende des Lebenszyklus



### 9.2.4 Sportgeräte, Hochleistungsbauteile und Elektronik

Weil CNTs die Herstellung von extrem leichten und widerstandsfähigen Kompositmaterialien ermöglichen, werden sie nicht nur in der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrttechnik und der Energietechnologie eingesetzt, sondern auch für die Herstellung von endbenutzernahen Sportgeräten wie Fahrrädern, Tennis- und Golfschlägern und Ähnlichem. Diese Kompositmaterialien finden je nach Grösse ihren Weg in den Hausmüll oder in die Mülldeponie. Während ihrer Lebenszeit ist nicht mit einer Freisetzung der CNTs zu rechnen, da diese integrale Bestandteile der Kompositmaterialien sind. Erst bei der schlussendlichen Entsorgung werden sie der Kehrichtverbrennungsanlage zugeführt.

Der Verbleib von CNTs unter den Bedingungen der Kehrichtverbrennungsanlagen ist unklar. Die Wahrscheinlichkeit, dass sie dort zerstört werden, ist hoch, da die Temperaturen deutlich über den Selbstentzündungstemperaturen der CNTs liegen (Mueller und Nowack 2008). Einige Szenarien sind vorstellbar, in denen die CNTs nicht vollständig verbrennen. Fries et al. (2011) schätzen, dass in einem solchen Fall etwa 0,1 Prozent der CNTs in den Abgasen nicht von den Filtern zurückgehalten werden. Über das Verhalten von CNTs auf Mülldeponien liegen keine Studien vor.

Fullerene finden nach und nach Eingang in modernste elektronische Bauteile und werden z. B. für Solarzellen genutzt. Auch hier ist der Endverbraucher mit der abschliessenden Entsorgung betraut, und sie werden, ähnlich den CNTs, in Kehrichtverbrennungsanlagen vernichtet.

Für Fullerene existieren bisher keine Angaben über den Verbleib nach Entsorgungsprozessen, aber aufgrund ihrer Kohlenstoffbasis und der Verbrennungstemperaturen in Kehrichtverbrennungsanlagen sind Überlegungen zu ihrem Verbleib ähnlich gelagert wie bei CNTs.

## 9.3 Behandlungsanlagen für Abwässer und Abfälle

Im Folgenden werden die Vorgänge in Kläranlagen, Kehrichtverbrennungsanlagen und Schredderanlagen sowie die Entsorgungswege der in diesen Anlagen anfallenden Abfälle näher betrachtet.

### 9.3.1 Kläranlagen

Mit dem Abwasser der Kläranlagen können Nanopartikel in Gewässer freigesetzt werden. Der in Kläranlagen als Abfall anfallende Klärschlamm wird in Kehrichtverbrennungsanlagen oder industriellen Feuerungen, z. B. Schlammverbrennungsanlagen, verbrannt und führt dort zu Freisetzungen von Nanopartikeln. Ausserdem wird er in Zementwerken als Brennstoff eingesetzt. Hierfür muss er vorher einer Trocknung unterzogen werden, die in Wirbelschichttrocknern durchgeführt wird. Freisetzungen können über das Abgas des Wirbelschichttrockners und des Zementwerks erfolgen. Die im Zementwerk anfallenden Abgasreinigungsrückstände werden in den Produktionsprozess zurückgeführt und so im Zementklinker eingebunden.

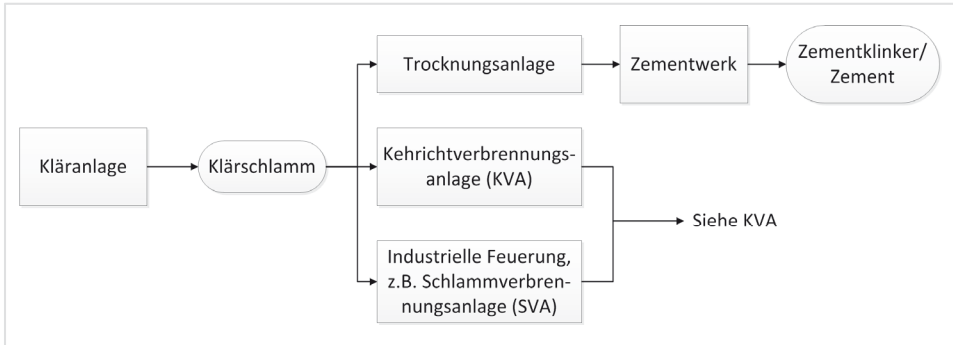


Abbildung 15 Entsorgungswege der Klärschlämme

Versuche an einer Pilot-Kläranlage und einer realen Kläranlage, der ARA Kloten/Opfikon, haben ergeben, dass sich 93 bis 99 Prozent des eingetragenen Silbers nach der Klärung, gebunden an die Schlammflocken, im Klärschlamm befinden und 1–7 Prozent über die Nachklärung in Gewässer freigesetzt werden (Burkhardt et al. 2010). Dabei wurden in der Pilot-Kläranlage kolloidales Nano-silber und partikuläres Silberchlorid eingesetzt. In die reale Kläranlage wird das Silber vor allem durch ein Unternehmen kontinuierlich eingeleitet. Nähere Angaben zur Form des eingetragenen Silbers sind in der Studie nicht enthalten. Sowohl die Resultate zur Bindungsform des Silbers an der Pilot-Kläranlage als auch die Untersuchungen mit abzentrifugiertem Abwasser vom Zufluss Opfikon und Faulschlamm der ARA Kloten/Opfikon deuten darauf hin, dass Silber fast

vollständig mit Schwefel koordiniert vorliegt (organisch oder anorganisch) (Burkhardt et al. 2010). Sollte es sich dabei um schwerlösliches Silbersulfid handeln, so die Autoren, würde sich die Frage der Freisetzung von Silberionen nicht stellen.

Die Versuche mit fünf verschiedenen Silberformen (Silbernitratlösung, kolloidales Nanosilber, Nanosilber und Mikro-Nanosilber als Pulver, partikuläres Silberchlorid) zeigen im Gegensatz zu einer anderen Studie (Choi et al. 2008) überdies, dass eine Hemmung der Nitrifikation durch Silber im Belebtschlamm auch bei hohen Silberkonzentrationen im Zulauf von Kläranlagen nicht auftritt (Burkhardt et al. 2010). Die Autoren gehen davon aus, dass ihre Ergebnisse unmittelbar auf die Praxis übertragbar sind, da bei den Versuchen von Choi et al. (2008) aufgereinigter Belebtschlamm ohne Chloride und Sulfide verwendet wurde.

Dies hat zwei wichtige Konsequenzen: Zum einen ist zu erwarten, dass die Nitrifikanten in den Versuchen von Choi et al. (2008) wesentlich empfindlicher auf Silber reagierten als das in realem Belebtschlamm der Fall wäre. Zum anderen lagen bei den Versuchen von Choi et al. (2008) freie Silberionen vor. Dies entspricht nach der Einschätzung von Burkhardt et al. (2010) nicht den realen Bedingungen.

Zur Frage der Agglomeration von Ag-Nanopartikeln und damit zur Ausfällung in der Kläranlage gehen Forscher davon aus, dass es dabei auf die Beschichtung der Ag-Nanopartikel ankommt (Som et al. 2010). Denn durch Beschichtung stabilisierte Ag-Nanopartikel agglomerieren nicht und scheinen nur zu einem geringen Teil aus dem Abwasser eliminiert zu werden. Trifft dies zu, können in solchen Fällen auch mehr als 1 bis 7 Prozent des Silbers mit dem Abwasser aus Kläranlagen in Gewässer freigesetzt werden. Modellrechnungen haben gezeigt, dass Ag-Nanopartikel im geklärten Abwasser in Konzentrationen im Bereich von 30–130 ng/l vorkommen könnten (Som et al. 2010).

Zum Verhalten von ZnO-Nanopartikeln in Kläranlagen oder im Wasser liegen keine Untersuchungsergebnisse vor. Som et al. (2010) gehen aber davon aus, dass sie sich ähnlich verhalten wie Ag-Nanopartikel, sodass sie im entsprechenden Umfang aus dem Abwasser entfernt bzw. in Gewässer freigesetzt werden. Modellierte Konzentrationen von ZnO im geklärten Abwasser liegen bei 0,3 bis 1,3 µg/l (Som et al. 2010).

Messungen in Kläranlagen haben gezeigt, dass sich SiO<sub>2</sub>-Nanopartikel nur relativ schwer aus dem Abwasser entfernen lassen (Som et al. 2010). Somit dürften die Freisetzungen von SiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln in Gewässer aus Kläranlagen höher sein als bei Ag-Nanopartikeln.

Erkenntnisse über die Elimination von  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln in Kläranlagen liegen nicht vor. Som et al. (2010) gehen aber davon aus, dass sie zu ca. 95 Prozent aus dem Abwasser entfernt werden. Wenn dies zutrifft, dürften etwa 5 Prozent der eingetragenen  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikel über die Kläranlagen in Gewässer freigesetzt werden. Im gereinigten Abwasser werden Konzentrationen von 3–16  $\mu\text{g/l}$  für wahrscheinlich gehalten (Som et al. 2010).

Untersuchungsergebnisse über die Freisetzung von Nanopartikeln in die Luft mit den Abgasen der Klärschlamm-trocknung und der Zementwerke sind nicht bekannt.

### 9.3.2 Kehrlichtverbrennungsanlagen

In Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) fällt Schlacke als Verbrennungsrückstand an. Diese wird entweder direkt auf Reaktordeponien abgelagert oder einer Metallrückgewinnung unterzogen. Die so erhaltenen Metalle werden an die metallurgische Industrie abgegeben. Die übrig bleibende Restschlacke wird ebenfalls auf Reaktordeponien verbracht.

Bei der Rauchgasreinigung fallen Filteraschen und andere Rauchgasreinigungsrückstände an. Beide werden zum Teil direkt in Untertagedeponien in Deutschland verbracht oder mit Zement verfestigt und auf Reststoffdeponien abgelagert. Ausserdem werden Filteraschen einer Schwermetallentfrachtung unterzogen. Die dabei anfallenden schwermetallhaltigen Filtrate werden behandelt und die bei dieser Behandlung entstehenden schwermetallhaltigen Schlämme werden der Verhüttung zugeführt. Die schwermetallentfrachteten Filteraschen werden der Schlacke zugemischt.

Die Abwässer aus Kehrlichtverbrennungsanlagen werden entweder direkt oder nach einer Vorbehandlung in Kläranlagen eingeleitet. Die bei der Vorbehandlung anfallenden Schlämme werden entweder wieder in der Kehrlichtverbrennungsanlage verbrannt oder an Schlammverbrennungsanlagen und nach Durchlaufen der Trocknung an Zementwerke als Brennstoff abgegeben. Die im Zementwerk anfallenden Abgasreinigungsrückstände werden in den Produktionsprozess zurückgeführt und so im Zementklinker eingebunden.

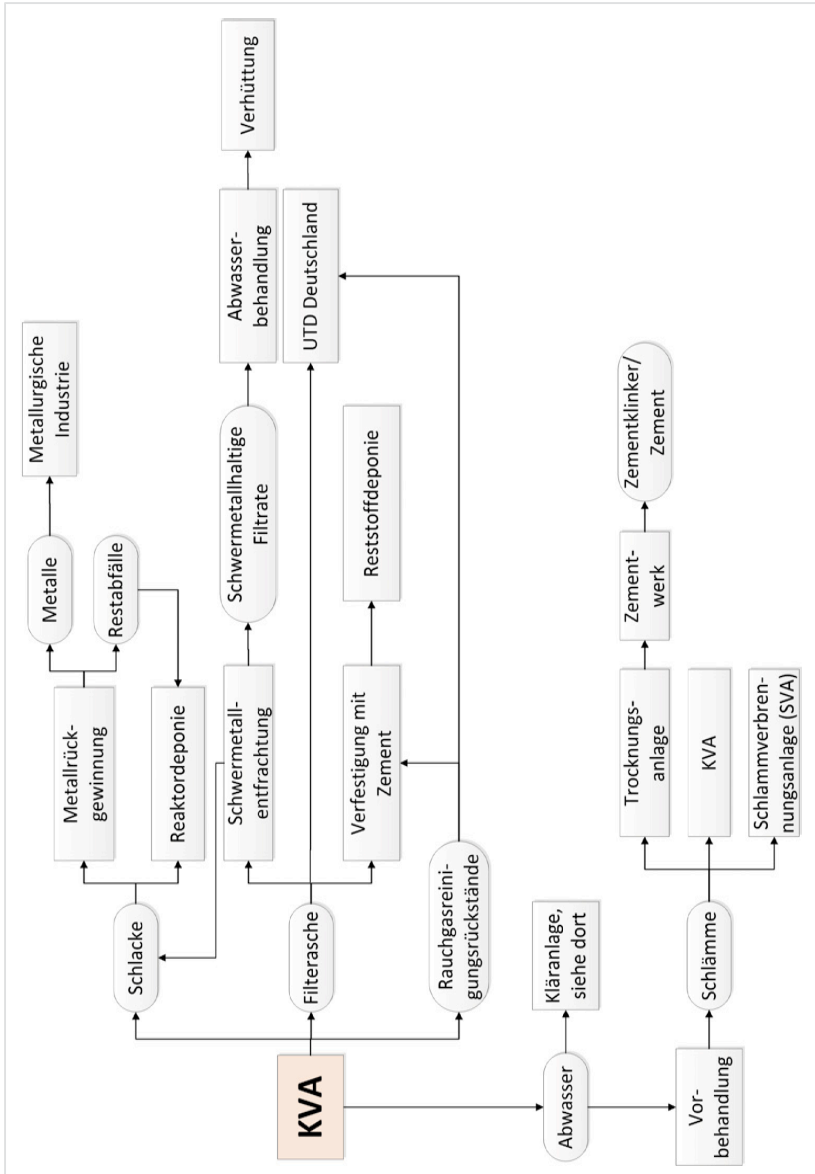


Abbildung 16 Kehrichtverbrennungsanlagen: Anfallende Abfälle und ihre Entsorgungswege

Freisetzungen von Nanopartikeln in Folge der Abfallbehandlung in Kehrichtverbrennungsanlagen sind sowohl direkt als auch indirekt möglich. Direkte Freisetzungen können über das Abgas der Kehrichtverbrennung in die Luft erfolgen. Indirekte Freisetzungen in Gewässer können stattfinden über

- die Abwasservorbehandlung der in der KVA anfallenden Abwässer,
- die in Kläranlagen abgeleiteten Abwässer und
- die Abwasserbehandlung der schwermetallhaltigen Filtrate aus der Schwermetallentfrachtung.

Indirekte Freisetzungen in die Luft sind möglich über die Abgase

- der Wirbelschichttrocknungen, in denen die anfallenden Schlämme aus der Abwasserbehandlung getrocknet werden,
- der Zementwerke, die die getrockneten Schlämme als Brennstoff nutzen, und
- der metallurgischen Industrie (Verhüttung, Metallschmelzen etc.), in der die zurückgewonnenen Metalle eingesetzt werden.

Direkte Freisetzungen von Nanopartikeln über das Abgas von Kehrichtverbrennungsanlagen werden als gering angesehen (Som et al. 2010), obwohl es bis vor Kurzem keine Untersuchungen über das Verbrennen von Produkten, die Nanopartikel enthalten, in Kehrichtverbrennungsanlagen gab und damit der Nachweis fehlte, wie effektiv die Rauchgasreinigungsanlagen der Kehrichtverbrennungen neben dem Feinstaub auch Nanopartikel aus dem Abgas herausfiltern. Diese Kenntnislücke wurde aber inzwischen zum Teil geschlossen.

Drei Forschergruppen der ETH Zürich haben Untersuchungen mit Ceroxid in der Solothurner KVA durchgeführt (Walser et al. 2012), die über moderne Filter und Flugasche-Abscheidungssysteme verfügt, die auf elektrostatischen Filtern und Nassabscheidung basieren. Dabei haben sie in einem ersten Experiment zehn Kilogramm Ceroxidpartikel mit einem Durchmesser von 80 nm auf zu verbrennenden Müll versprüht und so einen partikelreichen Abfall modelliert. In einem zweiten Experiment wurden die Partikel direkt in den Verbrennungsraum gesprüht, um einen Worst Case mit massiver Partikelfreisetzung in der Verbrennung zu simulieren.

Diese Experimente und die anschliessenden Untersuchungen haben gezeigt, dass sich Ceroxid-Nanopartikel durch die Verbrennung nicht sehr verändern. Die Vorrichtungen zur Flugascheabscheidung erwiesen sich aber als äusserst effizient, denn im Abgas der Kehrichtverbrennungsanlage konnten keine Ceroxid-Nanopartikel nachgewiesen werden. Dafür blieben die Nanopartikel jedoch lose auf den Verbrennungsrückständen in der Anlage und teilweise auch im Verbrennungssystem haften. Auch die aus dem Rauchgas abgeschiedene Flugasche enthielt Ceroxid-Nanopartikel (Walser et al. 2012).

In der Schweiz sind bei der Reinigung von Abgasen aus Kehrichtverbrennungsanlagen weitgehend einheitliche Lösungen umgesetzt (Elektrofilter, zweistufige Wäsche, Entstickung) (Martin 2010). Daher sollte die Flugascheabscheidung in den meisten Schweizer Kehrichtverbrennungsanlagen ebenso effizient sein wie in der Solothurner KVA.

Die den Verbrennungsrückständen anhaftenden Ceroxid-Nanopartikel gelangen damit über die Metallrückgewinnung aus der Schlacke und über die Schwermetallentfrachtung der Filterasche in die metallurgische Industrie. Dort kann es zur Freisetzung in die Luft kommen. Erkenntnisse über Freisetzungen von Nanopartikeln mit dem Abgas dieses Industriezweigs liegen nicht vor. Gleiches gilt für die Frage, ob sich andere Nanopartikel wie Ag, ZnO, TiO<sub>2</sub> und SiO<sub>2</sub> in der Kehrichtverbrennung ähnlich oder anders verhalten als Ceroxid.

Untersuchungsergebnisse zu Freisetzungen von Nanopartikeln in Gewässer über die Abwasservorbehandlung der in der KVA anfallenden Abwässer und über die Abwässer der Abwasserbehandlung der schwermetallhaltigen Filtrate aus der Schwermetallentfrachtung sind nicht bekannt. Ebenso fehlt es an Wissen über Freisetzungen von Nanopartikeln in die Luft über die Abgase der Schlamm-trocknung, der Zementwerke und der Schlammverbrennungsanlagen.

### 9.3.3 Schredderanlagen

In Schredderanlagen werden nicht nur Metallabfälle aus dem Baubereich zerkleinert, sondern vor allem auch grössere, komplexe Produkte, wie Kraftfahrzeuge, Elektrogeräte (z. B. Kühlschränke, Herde, Waschmaschinen) und Maschinenteile. Diese werden z. T. bereits mit nanomaterialhaltigen Lacken versehen (z. B. Autos). Vor allem kann aber davon ausgegangen werden, dass in ihnen zunehmend Nanomaterial enthaltende Bauteile Verwendung finden. Aus diesem Grund werden auch sie an dieser Stelle gesondert betrachtet.

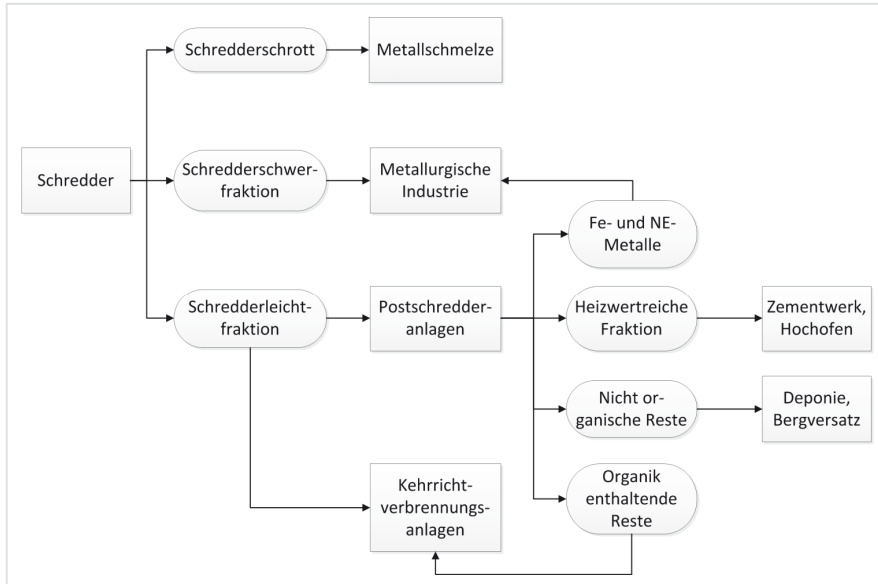
Nach dem Schreddern wird das Schreddergut grundsätzlich in drei Fraktionen separiert:

- den Schredderschrott; er enthält vor allem die Fe-Metalle,
- die Schredderschwerfraktion; in ihr sind die (NE)-Metalle (Nichteisen) enthalten, und
- die Schredderleichtfraktion; in ihr befinden sich neben kleinen Metallteilen die Kunststoffe und andere leichte Materialien, aber auch Verunreinigungen wie Sand.

Der Schredderschrott wird üblicherweise in Metallschmelzen eingesetzt. Die Schredderschwerfraktion wird zur weiteren Aufbereitung und Verwertung an die metallurgische Industrie abgegeben. Die Schredderleichtfraktion wird – falls die Deponierung verboten ist – in der Regel in Kehrichtverbrennungsanlagen verbrannt. In jüngerer Zeit werden auch sogenannte Post-Schredderanlagen gebaut und betrieben, in denen die Schredderleichtfraktion weiter separiert wird. Hier entstehen Fraktionen, die Fe- und NE-Metalle enthalten und an die metallurgische Industrie abgegeben, sowie heizwertreiche Fraktionen, die in Zementwerken und Hochöfen eingesetzt werden. Die nach diesen Anlagen übrig bleibenden Restabfälle werden, wenn sie organisches Material enthalten, in Kehrichtverbrennungsanlagen verbrannt oder, wenn sie kein organisches Material enthalten, auf Deponien abgelagert oder im Bergversatz verwendet.

Über das Verhalten und den Verbleib der in den geschredderten Produkten enthaltenen Nanomaterialien liegen keine Erkenntnisse vor. Dies gilt sowohl für den Schredder selbst als auch für die nachfolgenden Stationen mit Ausnahme der Kehrichtverbrennungs- und Kläranlagen (siehe dort).





**Abbildung 17** Schredderanlagen: anfallende Fraktionen und Abfälle sowie ihre Entsorgungswege (Ableitungen von Abwässern bei den einzelnen Stationen sind nicht dargestellt)

## 9.4 Zwischenfazit

Nanomaterialien können – abhängig von ihrer jeweiligen Anwendung – sowohl während der Gebrauchs- als auch der Entsorgungsphase in die Umwelt eingetragen werden. Umweltoffene Anwendungen wie Kosmetika, Farben und Lacke können direkt in die Umwelt gelangen oder, zusammen mit Nanomaterialien aus Textilien, leicht in das Abwasser und damit in die Kläranlagen gelangen. In anderen Anwendungen sind die Nanomaterialien fest in eine Matrix eingebunden und während der herkömmlichen Anwendung mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht freisetzbar (z. B. CNTs in Sportgeräten, Kompositwerkstoffen etc.)

Unabhängig von ihrer jeweiligen Anwendung werden alle Nanomaterialien früher oder später entsorgt und durchlaufen in ihrer Nachgebrauchsphase eine oder mehrere Stationen der Abfallbehandlung, z. B. Sortieranlagen, Kehrichtverbren-

nungsanlagen, Schredderanlagen, Zementwerke etc. Bei jeder dieser Stationen kann es grundsätzlich zu Freisetzungen von Nanomaterialien kommen.

Kehrichtverbrennungsanlagen stellen in diesem Zusammenhang einen zentralen Prozess dar, der von den meisten Nanomaterialien durchlaufen wird. Erste Experimente in Kehrichtverbrennungsanlagen zeigen, dass bei Weitem nicht alle Nanomaterialien während des Prozesses vernichtet werden. Ceroxid z. B. wird zwar von den Filtern einer Kehrichtverbrennungsanlage zurückgehalten, liegt jedoch frei im Verbrennungsraum und auf den Verbrennungsprodukten vor. In dieser Form kann es nicht nur beim Transport zur Freisetzung kommen, sondern es wird über die Metallrückgewinnung aus der Schlacke und über die Schwermetallentfrachtung der Filterasche in die metallurgische Industrie überführt. Dort kann es gegebenenfalls in die Luft freigesetzt werden.

Kläranlagen haben sich in ersten Experimenten als effizient z. B. in der Rückhaltung von Silberionen erwiesen. Demnach liegen 93 bis 99 Prozent des in Kläranlagen eingetragenen Silbers nach der Klärung gebunden an den Schlammflocken im Klärschlamm vor. In Kläranlagen eingetragenes Siliziumdioxid lässt sich jedoch nur schwer entfernen, sodass Freisetzungen in Gewässer höher sein dürften als bei Silber.

Für die Mehrzahl der Nanomaterialien sowie einige bedeutende Prozesse in der Nachgebrauchsphase liegen derzeit noch keine Daten zum Verhalten und Verbleib vor. Dies gilt insbesondere für die Behandlung von Nanomaterialien in Schredderanlagen, die für das Recycling von Produkten einen zentralen Prozessschritt darstellen. Hier müssen noch bedeutende Wissenslücken geschlossen werden.

## 10 Evaluierung der öffentlichen Debatte und Charakterisierung der Stakeholder

Mit Nanomaterialien verbunden sind einerseits Erwartungen hinsichtlich der Verbesserung zum Beispiel von Pharmazeutika, Medizintechnik, Energie- und Umwelttechnik sowie auch von Produkten im Konsumgüterbereich (vgl. Kapitel 5). Andererseits zeigen manche Erfahrungen mit anderen Technologien, wie beispielsweise vor einigen Jahren mit der grünen Gentechnik, dass neue Technologien durch eine angemessene Risikoforschung zu begleiten sind, die die Risiken abklärt und damit angemessene Entscheidungen im Umgang mit einer Technologie erleichtern kann (vgl. Kapitel 6). Die Risikoforschung sollte spätestens dann beginnen, wenn es plausible Anhaltspunkte für ein Schadenspotenzial für die Gesellschaft gibt (BfR 2010).

Neben der Risikoforschung nimmt der Bereich der Risikowahrnehmung und -kommunikation eine relevante Rolle im Diskurs über Nanomaterialien ein. Risikoforschung und Risikowahrnehmung/Risikokommunikation stellen nach Grimm et al. (2011) zwei unterschiedliche Teilbereiche des Umgangs mit (Un-)Sicherheiten von Nanomaterialien sowohl in Forschung und Entwicklung als auch in der Produktion und Nutzung dar. Beide Aspekte bauen aufeinander auf und stehen meist in enger Verbindung zueinander. Während die Risikoforschung zur Risikoidentifikation, -bearbeitung und -bewertung beiträgt, widmet sich die Risikowahrnehmung/Risikokommunikation Aspekten wie der öffentlichen Debatte oder dem öffentlichen Dialog. Dabei kommt der subjektiven Sichtweise und Wahrnehmung von Risiken eine besondere Bedeutung zu.

Im folgenden Kapitel wird zunächst analysiert, welche Stakeholder sich an der öffentlichen Debatte über Chancen und Risiken von Nanomaterialien in der Schweiz massgeblich beteiligen. Die Stakeholder wurden im Rahmen einer Internetrecherche ermittelt, d. h., die hier erfassten Stakeholder haben sich öffentlich und schriftlich zur Debatte über Chancen und Risiken der Nanomaterialien geäußert. Die Landschaft der Stakeholder in der Schweiz setzt sich aus recht unterschiedlichen Akteuren zusammen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wer-

den in einem ersten Arbeitsschritt ausschliesslich die sichtbaren Stakeholder<sup>142</sup> einzelnen Kategorien (Unternehmen, Wirtschaftsverbände, Nichtregierungsorganisationen, Beratungsorganisationen, Medien)<sup>143</sup> zugeordnet (Kapitel 10.1). In einem weiteren Arbeitsschritt sind ausschliesslich öffentliche, schriftlich dokumentierte Positionen der massgeblichen Stakeholder und der Schweizer Parteien erfasst. Die Positionen wurden zudem über eine Internetrecherche und insbesondere über die Webseiten der Stakeholder ermittelt. Die Positionen der erfassten Stakeholder werden synoptisch in drei Themenclustern dargestellt (Kapitel 10.2). Überdies wird diskutiert, wie der derzeitige Wissensstand in der Bevölkerung der Schweiz zum Thema Nanotechnologie/Nanomaterialien<sup>144</sup> ist und unter welchen Aspekten dieses Thema in der Bevölkerung wahrgenommen wird. Für diese Diskussion wurden – neben aktueller Sekundärliteratur – Daten des Eurobarometers<sup>145</sup> ausgewertet, die einen ersten Vergleich zwischen der Schweiz, Deutschland, Frankreich, Italien, Österreich und der EU ermöglichen.

## 10.1 Sichtbare Stakeholder in der öffentlichen Debatte

Der Bundesrat hält in seinem Bericht über den Stand der Umsetzung, die Wirkung und den Regulierungsbedarf in Verbindung mit dem «Aktionsplan Synthetische Nanomaterialien» fest, dass die Kommunikation und Förderung des öffentlichen Dialogs über Chancen und Risiken der Nanotechnologien nach den Dialogveranstaltungen in den Jahren 2008 bis 2011 «sehr viel stärker gefördert

---

<sup>142</sup> An dieser Stelle sei noch darauf verwiesen, dass im politischen System der Schweiz prinzipiell jeder dieser Akteure ein Referendum gegen eine Gesetzesvorlage anregen kann.

<sup>143</sup> Akteure aus der Wissenschaft, die ebenfalls Stakeholder in der Debatte sind, wie die Empa oder die ETH Zürich, werden im Rahmen dieses Kapitels nicht berücksichtigt, da ihnen aufgrund ihrer Vielfältigkeit (z. B. unterschiedliche Departemente und Institute, unterschiedliche Fächer, unterschiedliche Forschungsschwerpunkte) keine eindeutige Position zugeordnet werden kann.

<sup>144</sup> In den Umfragen zur Wahrnehmung der Nanotechnologie in der Bevölkerung wird der Begriff in der Regel nicht weiter präzisiert. Der Begriff «Nanomaterialien» findet sich in solchen Studien gar nicht oder eher selten.

<sup>145</sup> Bei der Datenerhebung durch den Eurobarometer wurde der Oberbegriff «Nanotechnologie» benutzt.

werden soll, als dies bis anhin geschehen ist» (EDI/EVD/UVEK 2012, S. 31). Deshalb fordert der Aktionsplan auch, dass «Debatten um Chancen und Risiken der Nanotechnologie [...] ein fester Bestandteil bei der Weiterentwicklung der Nanotechnologie sein» sollen (EDI/EVD/UVEK 2012, S. 21). Zur Förderung des öffentlichen Dialogs um Chancen und Risiken gehört aus dieser Sicht auch, dass die zuständigen Bundesbehörden Informationen für die Bevölkerung erarbeiten und bereitstellen. Zu diesem Zweck werden bereits heute bestehende Plattformen (z. B. NanoConvention, Nanopublic, NanoRegulation-Konferenz) oder die Behördendialoge der Länder Schweiz, Deutschland, Österreich und Liechtenstein<sup>146</sup> unterstützt.

An der öffentlichen Debatte über Nanomaterialien sind in der Schweiz folgende Stakeholder beteiligt (Details zur Kategorisierung vgl. Anhang, Kapitel 16.2):

**Kategorie «Unternehmen»:**

- Bühler AG
- Credit Suisse
- General Reinsurance
- Novartis
- SUVA
- Swiss Re

**Kategorie «Wirtschaftsverbände»:**

- Economiesuisse
- Interessengemeinschaft Detailhandel Schweiz (IG DHS)
- Interpharma
- Scienceindustries/SGCI Chemie Pharma, Schweiz
- Swissmem
- Textilverband Schweiz

**Kategorie «Beratungsorganisationen»:**

- Ethik im Diskurs
- Die Innovationsgesellschaft
- International Risk Governance Council (IRGC)

---

<sup>146</sup> Informationen zum 6. Behördendialog, der in der Schweiz stattgefunden hat, finden sich unter: [www.innovationsgesellschaft.ch/index.php?section=news&cmd=details&newsid=607&teaserId=5](http://www.innovationsgesellschaft.ch/index.php?section=news&cmd=details&newsid=607&teaserId=5).

- Stiftung Risiko-Dialog
- Temas AG

Kategorie «**Nichtregierungsorganisationen**»:

- Basler Appell gegen Gentechnologie
- WWF Schweiz
- Stiftung für Konsumentenschutz – für starke Konsumenten
- Pro Natura
- Praktischer Umweltschutz Schweiz PUSCH
- Naturschutz CH
- Greenpeace Schweiz
- Gen Suisse
- Fédération romande des consommateurs
- ETC Group (international)
- Friends of the Earth (international)

Zusätzlich berücksichtigt werden die **Parteien** (vgl. Anhang, Kapitel 16.3) in der Schweiz, sofern sie eine öffentlich dokumentierte Haltung zur Debatte über Nanomaterialien einnehmen. Diskutiert wird weiter die Rolle der Medien, die sich mit dem Thema Nanotechnologie bzw. Nanomaterialien in ihrer Berichterstattung auseinandersetzen. Dazu zählen Printmedien wie überregionale Tageszeitungen (z. B. Tages-Anzeiger, Neue Zürcher Zeitung, Blick am Abend), regionale Tageszeitungen (St. Galler Tagblatt, Südostschweiz oder die BaZ), Wochenzeitungen und Zeitschriften (z. B. WOZ Die Wochenzeitung, der Beobachter), Konsument/innenmagazine wie der K-Tipp sowie Radio- und Fernsehsender.

## 10.2 Positionen in der öffentlichen Debatte

Vor allem der unterschiedlichen Sichtweise und Interpretation von Nutzen und Risiken beziehungsweise den differierenden Handlungslogiken der einzelnen Stakeholder kommt eine besondere Bedeutung in der öffentlichen Debatte zu. Allgemein feststellbar ist gegenwärtig eine zunehmende Internationalisierung der Stakeholder-Debatte in Ländern wie Deutschland und Grossbritannien, insbesondere bei Nanomaterialien wie Nanosilber und Kohlenstoffnanoröhren (Grimm

et al. 2011). Des Weiteren interessiert die Frage, welche Positionen die Stakeholder in der Schweiz einnehmen und inwieweit die Internationalisierung der Debatte Einzug in die Debatte in der Schweiz gefunden hat. Die Schweizer Parteien und Medien werden dabei als Sonderfall betrachtet.

### 10.2.1 Positionen der Stakeholder

In diesem Kapitel werden die schriftlich dokumentierten Positionen der Stakeholder im Rahmen von 3 Clustern synoptisch dargestellt und analysiert.

In Cluster 1, «Schwerpunkt auf den **Nutzen von Nanomaterialien**», finden sich aufgrund ihrer öffentlich bekannten Positionen folgende Stakeholder:

- Economiesuisse
- Novartis
- Swissmem

Cluster 2, «Schwerpunkt auf **Chancen und Risiken von Nanomaterialien**», lassen sich folgende Stakeholder – wiederum aufgrund ihrer öffentlich vertretenen Positionen – zuordnen:

- Interessengemeinschaft Detailhandel Schweiz (IG DHS)
- Textilverband Schweiz
- Fédération romande des consommateurs
- Gen Suisse
- Naturschutz CH
- Organisation Praktischer Umweltschutz Schweiz PUSCH
- Stiftung für Konsumentenschutz – für starke Konsumenten
- WWF Schweiz
- Bühler AG
- Credit Suisse
- Interpharma
- Scienceindustries/SGCI Chemie Pharma, Schweiz

- Swiss Re
- Ethik im Diskurs
- Die Innovationsgesellschaft
- Stiftung Risiko-Dialog
- Tamas AG

In Cluster 3, «Schwerpunkt eher auf **Risiken von Nanomaterialien**», können folgende Stakeholder aufgrund ihrer Positionen eingestuft werden:

- Basler Appell gegen Gentechnologie
- Greenpeace Schweiz
- Pro Natura
- General Reinsurance
- SUVA
- International Risk Governance Council (IRGC)

Während im Cluster 1 ausschliesslich ein Grosskonzern und zwei Wirtschaftsverbände zu finden sind, sehen die allermeisten Unternehmen, Wirtschaftsverbände, Beratungsorganisationen und NGOs sowohl Chancen als auch Risiken in Nanomaterialien. Risikofokussiert sind in erster Linie Versicherungen sowie NGOs, wobei auffällt, dass gerade die grossen, international tätigen Umweltorganisationen sich in der Schweiz bislang kaum mit dem Thema Nanomaterialien auseinandergesetzt haben. Aufgrund der bis heute öffentlich geäusserten Positionen lassen sich zurzeit keine deutlich sichtbaren verhärteten «Frontlinien» ausmachen.<sup>147</sup> Bislang scheint die Debatte in der Schweiz vor allem auf den fachlichen Austausch unter den wichtigsten Stakeholdern fokussiert – und dazu zählen, zusätzlich zu den in den Clustern, auch Konsumentenschutzorganisationen sowie Bund und Kantone. Diese Debatte fand bislang weitgehend in Fachkreisen statt und war sachlich und faktenorientiert. Initiativen zur Miteinbeziehung

---

<sup>147</sup> Die Frage, ob der geplante und von Schweizer Behörden vereitelte Anschlag vom 15.04.2010 auf das IBM-Forschungszentrum in Rüschlikon ZH als ein Anzeichen für eine Radikalisierung der Opposition gegen Nanotechnologie und Nanomaterialien betrachtet werden kann, ist im Rahmen der vorliegenden Studie nicht hinreichend beantwortbar. Nach Mediendarstellung handelte es sich bei den Tätern um Mitglieder der italienischen Öko-Terrorgruppe «Il Silvestre», die bereits für frühere Anschlagsserien unabhängig vom Themenfeld Nanotechnologie verantwortlich gemacht wurden (vgl. <http://nanotrends.eu/Nanoshop/tinc?key=mjwXIT8u&id=65>).



einer breiteren Öffentlichkeit gingen von einzelnen Organisationen wie dem Basler Appell gegen Gentechnologie und TA-SWISS aus.<sup>148</sup>

## 10.2.2 Haltung der Parteien als Sonderfall

Von den Parteien in der Schweiz (siehe Tabelle «Parteien» im Anhang, Kapitel 16.3), die als Teil des politischen/parlamentarischen Systems der Schweiz nicht als Stakeholder im engeren Sinne betrachtet werden können, haben gegenwärtig nur vier eine mittels Internetrecherche identifizierbare Haltung zu Nanotechnologie bzw. Nanomaterialien eingenommen. Die FDP votiert eindeutig gegen Kürzungen «für den vielversprechenden Mikro- und Nanotechnologischen Wirtschaftsbereich». Daraus lässt sich ableiten, dass sich diese Partei pro Nanotechnologie einsetzt. Die Christlichdemokratische Volkspartei nimmt ebenfalls eine Pro-Haltung ein, indem sie darauf hinweist: «Wir bauen die Grundlagenforschung aus und fördern den Technologietransfer in den zukunftsorientierten Bereichen (Nanotechnologie, Mikroelektronik [...]).» Diese beiden Haltungen lassen sich Cluster 1 zuordnen («Eindeutiger Schwerpunkt auf den Nutzen von Nanomaterialien»).

Die Evangelische Volkspartei ist ausgerichtet auf Chancen und Risiken der Nanotechnologie: «In der Forschung bringen Gen-, Bio- oder Nanotechnologie neue Chancen, aber auch neue Gefahren, die es sehr sorgsam gegeneinander abzuwägen gilt.» Die Grüne Partei der Schweiz betont in ihrer Haltung die Risiken der Nanotechnologie noch etwas stärker als die Evangelische Volkspartei: «Die Grünen fordern Massnahmen zum Schutz von Gesundheit und Umwelt vor Nanopartikeln und nanotechnologischen Anwendungen. Nanotech-Produkte sind neu. Sie werden mit grossen Versprechungen angepriesen. Doch erste Erfahrungen zeigen, dass die Technologie auch Risiken birgt. Anwendungen der Nanotechnik müssen nachhaltig sein und dürfen weder die Umwelt noch die Gesundheit gefährden. Den Anwendungsbereichen Landwirtschaft, Lebensmittel,

---

<sup>148</sup> Nanomedizin: Invasion der Zwerge (2010), vgl.

[www.baslerappell.ch/index.php/download\\_file/view/207/88/brosch\\_nanomedizin.pdf?file=brosch\\_h\\_nanomedizin.pdf](http://www.baslerappell.ch/index.php/download_file/view/207/88/brosch_nanomedizin.pdf?file=brosch_h_nanomedizin.pdf); TA-Swiss-Studie zu Nanotechnologie in der Medizin (2003); TA-Swiss-Studie zu Nanotechnologie im Bereich der Lebensmittel (2009); Publifocus Nanotechnologien der TA-Swiss (2006), inkl. Podiumsveranstaltungen dazu (2007), vgl. [www.ta-swiss.ch/publifocus-nanotechnologien/](http://www.ta-swiss.ch/publifocus-nanotechnologien/).

Textilien, Haushalt, Kosmetik und Medizin soll besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.» Diese beiden Haltungen lassen sich Cluster 2 zuordnen («Schwerpunkt auf Nutzen und Risiken»).

Bezüglich der Haltungen der Parteien lässt sich somit festhalten, dass diese bisher – mit Ausnahme der Grünen – noch wenig differenziert sind. Dies deutet darauf hin, dass die Parteien in der öffentlichen Debatte über Nanotechnologie/Nanomaterialien wenig in Erscheinung treten. Eine Ausnahme bilden auch hier wiederum die Grünen, die den Schweizer Bundesrat verpflichten wollten, gesetzliche Regulierungen für die Nanotechnologie einzuleiten, eine Deklarationspflicht einzuführen und ein Produktregister aufzubauen. Diese Motion wurde jedoch abgelehnt.<sup>149</sup>

### 10.2.3 Die Rolle der Medien

In der öffentlich geführten Debatte über Chancen und Risiken der Nanotechnologie bzw. Nanomaterialien ist ein weiterer wichtiger Akteur als zusätzlicher relevanter Stakeholder zu berücksichtigen: die Medien. In seiner Medienanalyse kommt Bonfadelli (2012) zum Ergebnis, dass die Berichterstattung über Nanotechnologie in der Schweiz in den Jahren 2005 bis 2007 angestiegen und danach wieder ein quantitativer Rückgang zu verzeichnen ist. Insgesamt sei die Häufigkeit der Berichterstattung zur Nanotechnologie in der Schweiz auf einem eher niedrigen Niveau. Im Durchschnitt finde sich nur in etwa jeder 20. Ausgabe ein Beitrag zur Nanotechnologie. Nach dieser Analyse ist die Berichterstattung in der Schweiz über Nanotechnologie überwiegend positiv. Seit 2007 nimmt dabei allerdings sowohl die Anzahl als auch der Anteil an Artikeln mit chancenorientierter Bewertung der Nanotechnologie in der Schweiz kontinuierlich ab. In den vergangenen fünf Jahren lassen sich in der Schweizer Mediendatenbank SMD unter dem Stichwort «Nanomaterialien» nur knapp hundert Artikel finden in den 16 selektierten Zeitungen, welche die Deutschschweiz abdecken – 2012 war es sogar nur gerade ein Dutzend. Diese sporadischen Berichte zu Nanomaterialien betonen im Fokus gegenüber früher verstärkt die Risiken.

---

<sup>149</sup> Vgl. Innovationsgesellschaft: «Bundesrat bleibt Strategie treu: Gesetzliche Regulierung und Deklaration für Nanotechnologie in der Schweiz aktuell nicht im Fokus», Newsletter vom 17. März 2009 ([www.innovationsgesellschaft.ch](http://www.innovationsgesellschaft.ch)).

Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Medien bestimmte Themenaspekte durch ihre Selektion zu dringlichen Themen machen können. Als Beispiel ist das Anfang 2011 ausgelöste Medienecho zu nennen, welches infolge der Veröffentlichung einer toxikologischen Studie mit Beteiligung der Universität Lausanne zu Wirkungen von nanoskaligem Titandioxid entstanden ist.<sup>150</sup> Dabei wurden die toxikologischen Wirkungen von Titandioxid mit Asbest verglichen und ein Bezug zu Alltagsprodukten hergestellt, in denen Titandioxid eingesetzt wird (Zahnpasta, Sonnenschutzmittel, Farben).<sup>151, 152</sup> Die Meldung fand ein breites Echo, nicht nur in der Schweizer, sondern auch in der ausländischen Medienberichterstattung. Dies ist allerdings nicht der erste Fall, bei denen durch die Medien eine überwiegend negative Resonanz hinsichtlich der Anwendung von Nanomaterialien ausgelöst worden ist. In Deutschland gab es ähnliche Konstellationen im Zusammenhang mit Gesundheitsbeeinträchtigungen durch einen Versiegelungsspray («Magic-nano», vgl. Kapitel 5) oder der Veröffentlichung einer Studie des Umweltbundesamtes im Jahr 2009 (UBA 2009), die von den Medien als generelle Warnung vor der Nanotechnologie dargestellt worden ist.<sup>153</sup> Gemeinsam ist diesen Beispielen, dass Einzelaspekte aus Studien oder Befunden herausgegriffen und die Nanotechnologie z. T. auf wissenschaftlich nicht nachvollziehbare Weise in einen Kontext mit akuten Gesundheitsgefahren gesetzt wurde. Auch die Öffentlichkeitswirkung war in den genannten Beispielen ähnlich, in der Weise, dass zunächst eine hohe Aufmerksamkeit in der Öffentlichkeit, verbunden mit entsprechendem Rechtfertigungsdruck seitens öffentlicher Behörden, zu verzeichnen war. Nachdem die Darstellung durch Stellungnahmen von Behörden und weiteren Expertinnen und Experten relativiert bzw. entkräftet worden waren, flaute das Medieninteresse wieder auf das vorgehende Ausmass ab. Ob diese Medienberichterstattung nachhaltigen Einfluss auf die Wahrnehmung der Nanotechnologie in der Bevölkerung hat, lässt sich im Rahmen der Studie nicht beantworten. Die abnehmende Berichterstattung hinsichtlich der Nutzenaspekte der Nanotechnologie korreliert allerdings mit den Ergebnissen einer Bevölkerungs-

---

<sup>150</sup> Die Berichterstattung bezog sich auf den Artikel Yazdi et al. (2010); [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1008155107](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1008155107).

<sup>151</sup> «Inhaltsstoffe von Zahnpasta sind offenbar so gefährlich wie Asbest», Tageszeitung vom 18.1.2011.

<sup>152</sup> «Nano-Titandioxid hat Auswirkungen wie Asbest», Blick am Abend vom 18.1.2011.

<sup>153</sup> Z.B. «Umweltamt warnt Bürger vor Nanotechnik», Stern, online-Ausgabe vom 21.10.2009; [www.stern.de/gesundheit/gesundheitsgefahren-umweltamt-warnt-buerger-vor-nanotechnik-1515918.html](http://www.stern.de/gesundheit/gesundheitsgefahren-umweltamt-warnt-buerger-vor-nanotechnik-1515918.html).

umfrage in der Schweiz, nach der die Nutzenwahrnehmung der Nanotechnologie in der Bevölkerung in den letzten Jahren abgenommen hat und diffuser geworden ist (vgl. Grobe et al. 2012, Kapitel 10.2.5).

#### 10.2.4 Die internationale Ebene

Der International Risk Governance Council (IRGC) hat im Jahr 2008 eine Reihe von internationalen Studien zur Kenntnis und Risikowahrnehmung von Nanotechnologie<sup>154</sup> zusammengefasst (IRGC 2008). Mit dem IRGC-Bericht wird ersichtlich, dass es aus internationaler Perspektive Länder mit einem hohen Wissensstand in der Nanotechnologie (Deutschland 2004 und 2007) und ebenso mit einem niedrigen Wissensstand gibt (UK 2004; USA 2004 und 2007). Dennoch fällt die Risikowahrnehmung überwiegend positiv aus; noch am kritischsten ist diese in den USA (2007) und Deutschland (2007). Ableitungen bezüglich der Schweiz sind nicht möglich, da die Situation in der Schweiz in den vom International Risk Governance Council (IRGC) ausgewerten Studien nicht erhoben wurde. Unbekannt ist auch, ob sich die Risikowahrnehmung, ähnlich wie am Beispiel der Deutschschweizer Medien aufzeigbar, seit 2007 verschoben hat.

Weltweit liegt eine Reihe von Studien zum Kenntnisstand zur Wahrnehmung der Risiken von Nanotechnologie vor. Die wesentlichen Ergebnisse von Studien aus den Jahren 2004 bis 2007 werden im Folgenden dargestellt. Für die USA zeigen die folgenden quantitativen Studien zum einen, dass Nanotechnologien in der Bevölkerung oft nicht bekannt sind, zum anderen, dass sowohl bei informierten als auch nicht informierten Personen die Beurteilung von Emotionen beeinflusst wird (vgl. Cobb und Macoubrie 2004; Einsiedel 2005; Kahan et al. 2007; Smith et al. 2008). So wird in der Studie von Kahan et al. (2007) konstatiert, dass die Einstellung zur Nanotechnologie massgeblich von emotionalen Reaktionen bestimmt wird, wenn die Informationslage gering ist. Je mehr eine Person über Nanotechnologie weiss, desto stärker wird ihre Wahrnehmung der Technologie von Werten beeinflusst. Besonders interessant ist der Befund Kahans et al. (2007), dass ein grösseres Wissen nicht zwangsläufig zu einer positiveren Einstellung gegenüber der Nanotechnologie führt. Zwar ergeben Befragungen

---

<sup>154</sup> In der Regel wird der Begriff «Nanotechnologie» in diesen Studien benutzt.

grundsätzlich, dass besser informierte Befragte eine positivere Einstellung zur Nanotechnologie haben. Kahan et al. (2007) stellen jedoch fest, dass die Bereitstellung von Information an zuvor nicht informierte Befragte im Anschluss sehr unterschiedliche Bewertungen hervorruft.

## 10.2.5 Die Schweiz im europäischen Vergleich

### *Auswertung des Eurobarometers*

Seit einigen Jahren gibt es im EU-Raum Erhebungen zur Kenntnis und Risikowahrnehmung von Nanotechnologie, die einen ersten Vergleich zwischen der Schweiz, Deutschland, Frankreich, Italien, Österreich und der EU zulassen.<sup>155</sup> Im Rahmen erster Befragungen des Eurobarometers wird festgestellt, dass sich das Interesse für die Nanotechnologie in Europa von 2001 bis 2005 von 4 Prozent auf 8 Prozent verdoppelt hat. Betrachtet man im Eurobarometer 2005 die EU15,<sup>156</sup> die auch im Eurobarometer 2001 abgefragt wurden, so liegt diese Zahl sogar bei 9 Prozent. Die Schweiz liegt mit 12 Prozent zusammen mit einigen anderen Ländern wie Deutschland (11 Prozent) in der Spitzengruppe. Österreich kommt in dieser Umfrage auf einen Wert von 8 Prozent (EC 2005a, S. 13 ff.). Die Einschätzung zu Chancen und Risiken der Nanotechnologie wurden in der EU25<sup>157</sup> wie folgt bewertet: 48 Prozent der Befragten erwarten einen positiven Effekt. In der Schweiz liegt der Wert mit 46 Prozent geringfügig niedriger, während er in Österreich mit 35 Prozent deutlich unter dem Durchschnitt der EU25 liegt. In Deutschland erwarten im Jahr 2005 demgegenüber 53 Prozent der Befragten einen positiven Effekt der Nanotechnologie (EC 2005b, S. 74 f.).

---

<sup>155</sup> Auch in den Datensätzen des Eurobarometers wird mit dem Begriff «Nanotechnologie» gearbeitet. Dieser Aspekt ist in Bezug auf eine Analyse der Chancen und Risiken von Nanomaterialien im Kontext der Schweiz zu berücksichtigen und relativiert die Ergebnisse der vorliegenden Studie. Hinzu kommt, dass hier – wie in allen Studien dieser Art – die subjektive Wahrnehmung der Befragten eruiert wird. Wie sich diese Wahrnehmung bei den Befragten entwickelt hat, wurde in der Regel mittels solcher Umfragen nicht hinreichend rekonstruiert. Ausserdem sind die Fragen sehr allgemein formuliert worden.

<sup>156</sup> Bei EU15 handelt es sich um die 15 Mitgliedsstaaten der Europäischen Union bis einschliesslich April 2004.

<sup>157</sup> Bei EU25 handelt es sich um die 25 Mitgliedsstaaten der Europäischen Union bis einschliesslich 2006.

Das Eurobarometer zur Biotechnologie aus dem Jahr 2010 untersucht fünf Jahre später ebenfalls Aspekte der Nanotechnologie, ist allerdings aufgrund unterschiedlicher Fragestellungen keine direkte Fortschreibung der vorhergehenden Befragungen.<sup>158</sup> Die Bekanntheit der Nanotechnologie (siehe Abbildung 18) steigt dabei für die EU27<sup>159</sup> insgesamt auf 46 Prozent an, für die EU15 liegt der Wert bei 51 Prozent. In der Schweiz hingegen haben bereits 76 Prozent der Befragten von der Nanotechnologie gehört. Damit liegt die Schweiz deutlich vor Deutschland mit 65 Prozent und Frankreich mit 54 Prozent. Österreich hingegen liegt mit 47 Prozent in etwa beim Durchschnittswert der EU27. Italien fällt in der EU deutlich vom Durchschnittswert ab, wo nur 37 Prozent der Befragten von Nanotechnologie schon einmal gehört haben.

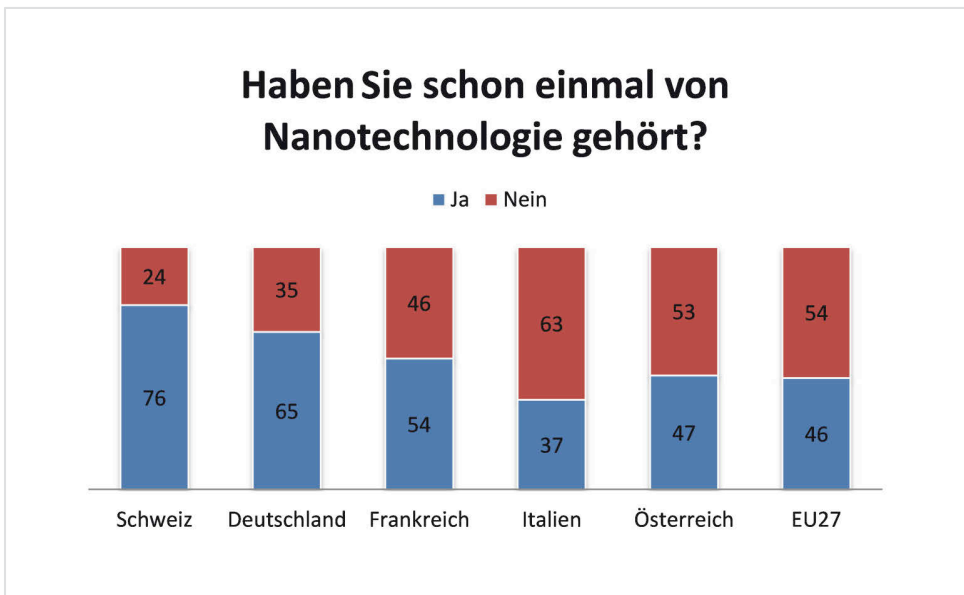


Abbildung 18 Bekanntheitsgrad der Nanotechnologie (Quelle: EC 2010)

<sup>158</sup> Im Rahmen des Eurobarometers wurden fast 27 000 Personen in Europa befragt. Die Eurobarometerdaten gelten damit als repräsentativ.

<sup>159</sup> Bei EU27 handelt es sich um die 27 Mitgliedsstaaten der Europäischen Union seit 2007.

Darüber hinaus ist der Austausch mit anderen Menschen über Nanotechnologie in der Schweiz recht häufig. 66 Prozent der Befragten in der Schweiz gaben an, dass sie schon mal mit jemanden über Nanotechnologie gesprochen haben. Damit liegt die Schweiz sehr deutlich über dem Durchschnittswert der EU27 mit 51 Prozent und dem Wert für Deutschland (59 Prozent). In Österreich wird nach dieser Untersuchung allerdings noch häufiger über Nanotechnologie gesprochen. Österreich kommt hier auf einen Wert von 71 Prozent. Italien kommt immerhin auf einen Wert von 61 Prozent. In Frankreich hingegen liegt der Wert mit 44 Prozent unter dem Durchschnittswert in der EU.

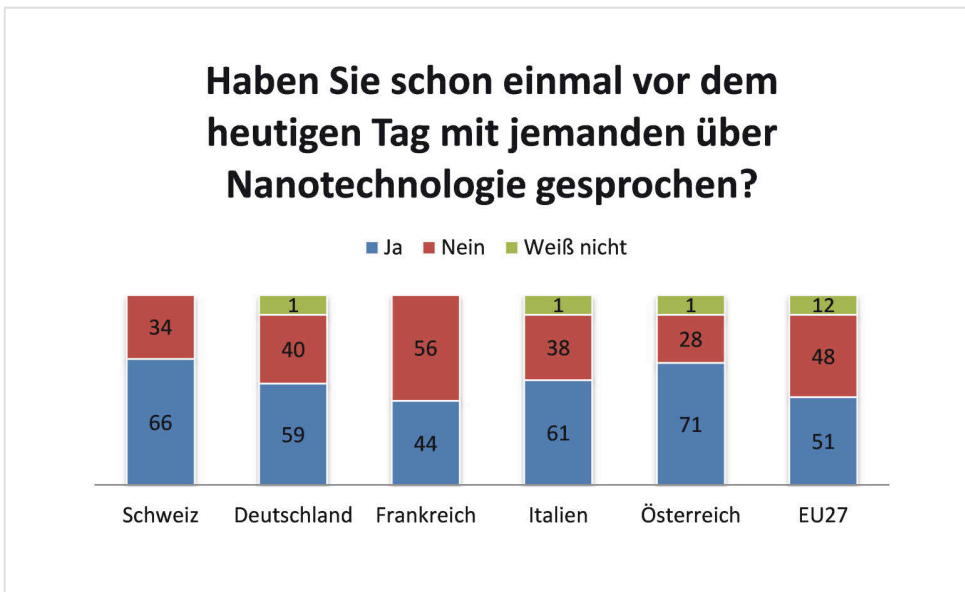


Abbildung 19 Gespräch über Nanotechnologie (Quelle: EC 2010)

Die Akzeptanz der Nanotechnologie kann beispielsweise über die Unterstützung der Nanotechnologieforschung durch öffentliche Fördermittel erhoben werden kann. Die Förderung von Nanotechnologie wird in der EU27 von 40 Prozent befürwortet bzw. von 25 Prozent abgelehnt. Im Vergleich zur EU27 ist in der Schweiz (44 Prozent) und Deutschland (46 Prozent) der Wert für die Unterstützung etwas höher. Abgelehnt wird die öffentliche Förderung von 26 Prozent der Befragten in der Schweiz und von 29 Prozent in Deutschland. In Österreich liegt

mit einem Wert von 36 Prozent die Ablehnung deutlich höher. Hier ist sogar die Ablehnung stärker als die Befürwortung (33 Prozent) öffentlicher Fördermittel für die Nanotechnologie. Für alle drei Länder gilt es zu berücksichtigen, dass zwischen 25 Prozent und 31 Prozent der Befragten zu dieser Frage keine Einschätzung haben. In Italien liegt dieser Wert sogar noch etwas höher: 36 Prozent der Befragten haben hier keine Einschätzung.

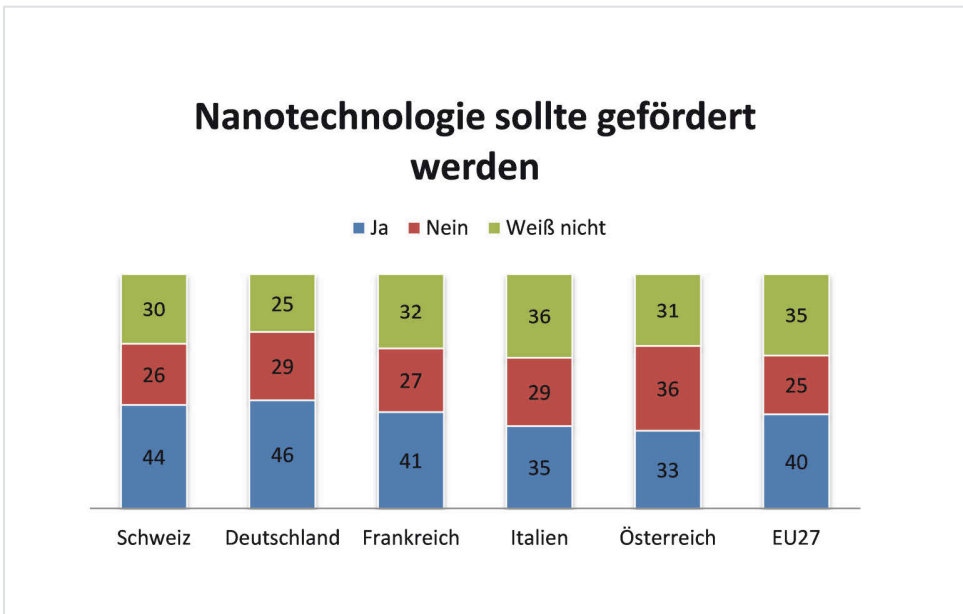


Abbildung 20 Förderung der Nanotechnologie (Quelle: EC 2010)

Die Akzeptanz der Nanotechnologie in der Bevölkerung kann zudem über das Beispiel «Förderlich für die Wirtschaft» erfasst werden. Die Mehrheit der Befragten in der EU27 sehen die Nanotechnologie als förderlich für die (nationale) Wirtschaft an (45 Prozent). 19 Prozent sehen sie nicht als förderlich in diesem Bereich an. In der Schweiz gibt es eine deutliche Abweichung. Hier schätzen 52 Prozent die Nanotechnologie als förderlich ein, während 15 Prozent sie als nicht förderlich betrachten. Noch deutlicher ist die Abweichung in Deutschland: Hier äussern sich 57 Prozent der Befragten positiv, während der Wert von 18 Prozent nur geringfügig vom Durchschnittswert der EU27 abweicht. In Österreich hinge-



gen gibt es sowohl in Bezug auf die positive Einschätzung (35 Prozent) als auch auf die negative Beurteilung (27 Prozent) eine deutliche Abweichung zur EU27. Bei der positiven Einschätzung liegen auch Italien (41 Prozent) und Frankreich (44 Prozent) unter dem Durchschnitt in der EU. Der Anteil derjenigen, die diese Frage mit «Weiss nicht» beantwortet haben, liegt recht hoch und bewegt sich zwischen 25 Prozent und 38 Prozent.

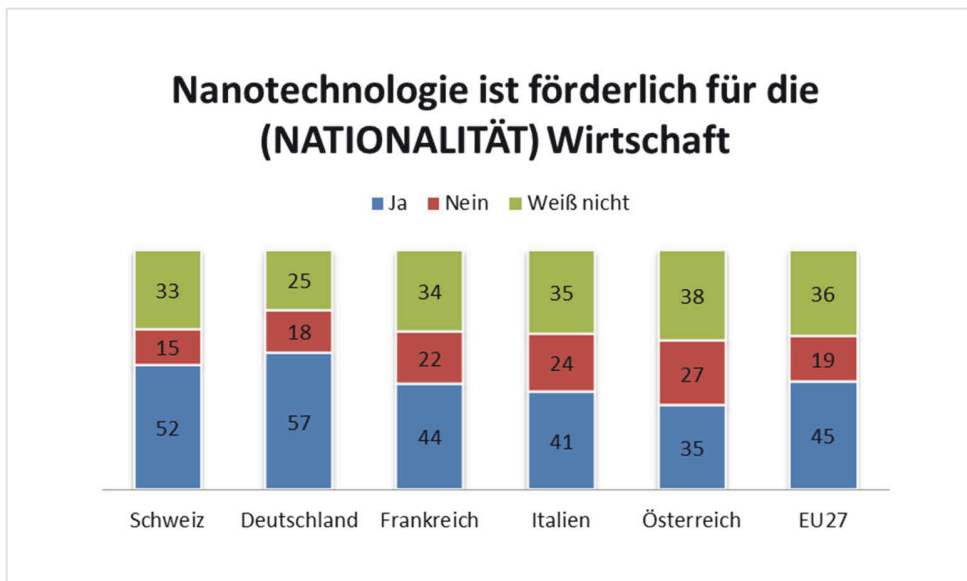


Abbildung 21 Nanotechnologie förderlich für Wirtschaft (Quelle: EC 2010)

Ein weiteres Beispiel für die Erfassung der Akzeptanz ist die Frage nach dem Unbehagen, das Nanotechnologie bei den Menschen hervorrufen kann. In der Schweiz ruft die Nanotechnologie bei 49 Prozent der Befragten kein Unbehagen hervor; in Frankreich sind es sogar 50 Prozent. Unbehagen fühlen in der Schweiz 34 Prozent. Damit wird die Nanotechnologie in der Schweiz deutlich positiver eingeschätzt als in Deutschland (45 Prozent), Italien (42 Prozent), Österreich (32 Prozent) und in der EU27 (43 Prozent). In Österreich hingegen geben 50 Prozent der Befragten an, dass die Nanotechnologie bei ihnen Unbehagen hervorruft.

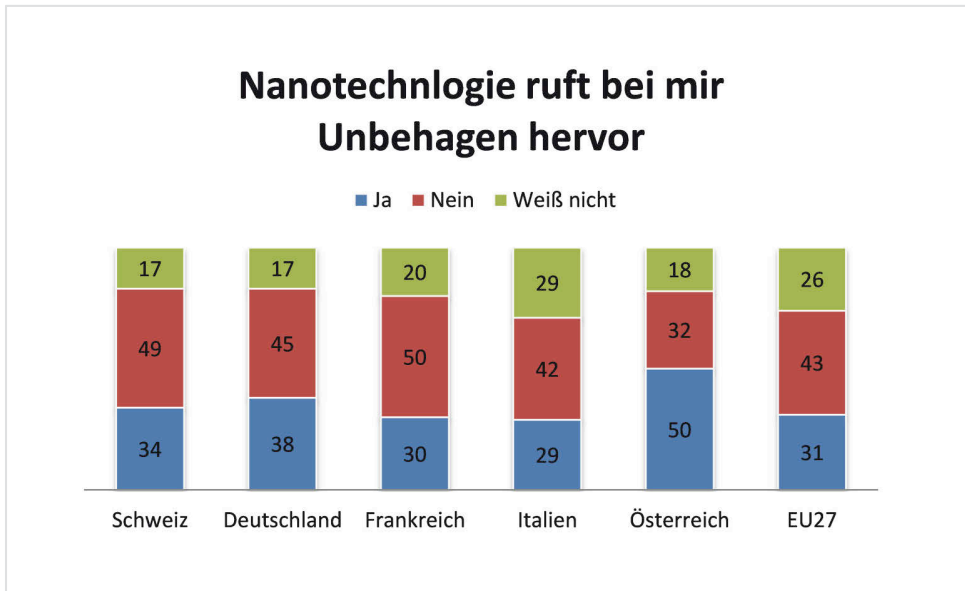


Abbildung 22 Unbehagen bei Nanotechnologie (Quelle: EC 2010)

Hinsichtlich der möglichen Belastung der Umwelt durch die Nanotechnologie besteht zum gegenwärtigen Zeitpunkt viel Unklarheit. In der EU27 sehen sich 44 Prozent der Befragten nicht in der Lage, diese Frage zu bejahen oder zu verneinen. In der Schweiz sind es 41 Prozent, die die Frage mit «Weiss nicht» beantworten, in Frankreich ebenfalls 41 Prozent, in Italien 45 Prozent, in Deutschland 35 Prozent und in Österreich 36 Prozent. Nach der Meinung von 42 Prozent der Befragten in der Schweiz stellt Nanotechnologie für die Umwelt eine Belastung dar. Nur 17 Prozent stimmen der Aussage zu, dass Nanotechnologie keine Belastung für die Umwelt darstellt. Dies gilt auch für Frankreich. Damit ist dieser Wert der niedrigste im Vergleich mit der EU27 (33 Prozent), Österreich und Italien (26 Prozent) und Deutschland (22 Prozent).

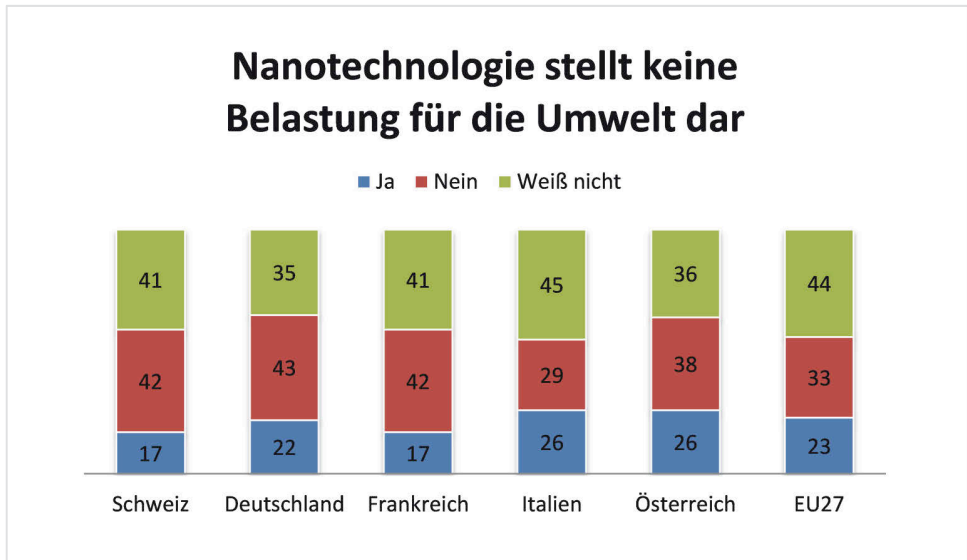


Abbildung 23 Nanotechnologie und Umweltbelastung (Quelle: EC 2010)

Sowohl in der Schweiz als auch in Deutschland und Österreich gehen über 40 Prozent der Befragten davon aus, dass Nanotechnologie für sie und ihre Familie gesundheitlich nicht unbedenklich ist. In Frankreich liegt dieser Wert mit 47 Prozent am höchsten. In der EU27 liegt er deutlich niedriger (33 Prozent), in Italien (32 Prozent) ebenfalls. In der Schweiz gehen – ähnlich wie in Österreich und Deutschland (beide 26 Prozent) – lediglich 24 Prozent der Befragten davon aus, dass Nanotechnologie für sie unbedenklich ist. Hervorzuheben bei dieser Frage ist, dass sich in den drei genannten Ländern ca. ein Drittel der Befragten für die Antwortmöglichkeit «Weiss nicht» entschied. In der EU27 und in Italien waren es sogar 40 Prozent.

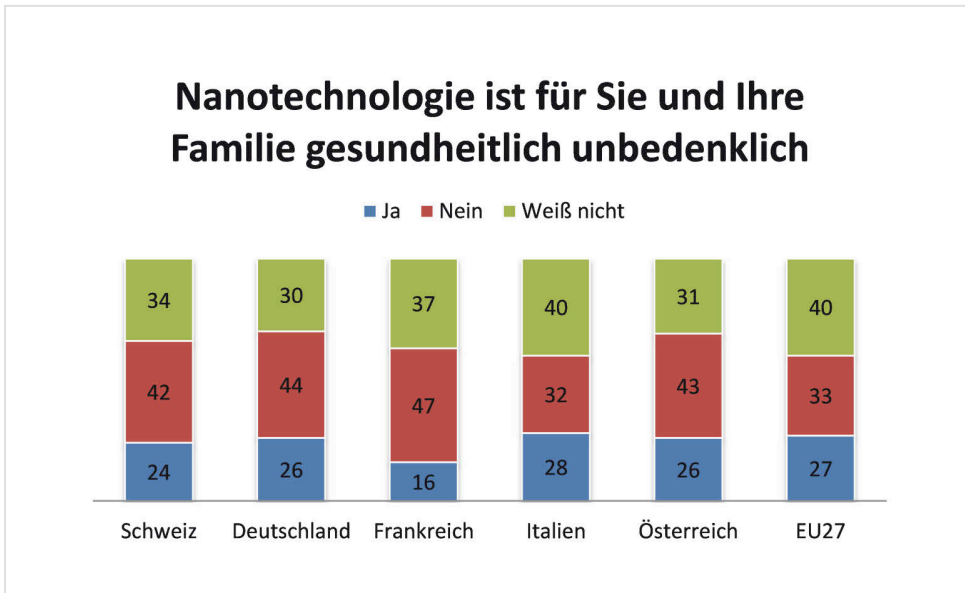


Abbildung 24 Nanotechnologie und Gesundheit (Quelle: EC 2010)

Zusammenfassend lässt sich an dieser Stelle festhalten, dass das Thema Nanotechnologie in der Schweiz sehr bekannt ist im Vergleich zu anderen europäischen Ländern wie Deutschland, Frankreich und Österreich. Darüber hinaus tauschen sich die Menschen in der Schweiz recht häufig über das Thema aus. Die öffentliche Wahrnehmung von Nanotechnologie ist zum Zeitpunkt der Eurobarometerbefragung in der Schweiz recht positiv, gemessen z. B. an der Unterstützung für die öffentliche Förderung der Nanotechnologie. Ausgeprägt ist indes die Unsicherheit über mögliche negative Folgen für Mensch und Umwelt.

#### *Einordnung der Ergebnisse des Eurobarometers*

Eine Stabilität der Wahrnehmung lässt sich aufgrund der Neuigkeit und Dynamik des Themas aus den Daten des Eurobarometers nicht zwingend ableiten, da es sich bei derartigen Umfragen um Momentaufnahmen handelt. Zudem liegen die Ergebnisse der Eurobarometerbefragung schon drei Jahre zurück. Zur Einordnung werden die Ergebnisse daher in Relation zu aktuelleren Schweizer bzw.

internationalen Studien gesetzt. Grobe et al. (2012) haben im Rahmen einer kürzlich veröffentlichten empirischen Studie qualitative Interviews in der Schweiz (50) und Deutschland (53) durchgeführt. Sie untersuchen «Nanotechnologien aus der Sicht der Konsumenten» und kommen u. a. zu dem Ergebnis, dass «die Konsumentinnen und Konsumenten grosse Schwierigkeiten (haben), die Vor- und Nachteile des gesamten Technologiefeldes oder eben einzelner Anwendungen abzuschätzen» (S. 100).<sup>160</sup> Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den Befunden der vorliegenden Studie des Eurobarometers. Gegenwärtig gibt es in der Bevölkerung der Schweiz noch eine ausgeprägte Unklarheit bezüglich der Belastung von Umwelt und Gesundheit durch Nanotechnologie. Diese Unklarheit findet sich auch in anderen europäischen Ländern wie Deutschland, Frankreich, Italien und Österreich. Weiterhin hängt die Einstellung in der Bevölkerung wesentlich vom Anwendungsbereich der Nanotechnologie ab. Anwendungen im Konsumentenbereich, speziell bei Lebensmitteln, würden von der Mehrheit der Bevölkerung kritisch beurteilt werden.

Bezüglich der zukünftigen Akzeptanz der Nanotechnologie in der Schweiz sollten Befunde aus den USA berücksichtigt werden (Kahan et al. 2007). Hier wurde festgestellt, dass ein grösseres Wissen über Nanotechnologie nicht automatisch zu einer positiveren Einstellung führt. Emotionale Reaktionen in Verbindung mit eigenen Werthaltungen steuern die Einstellung. Mithin ist auf Grundlage der hier ausgewerteten Quellen nicht gänzlich auszuschliessen, dass sich ein in der Bevölkerung wahrgenommenes Risikopotenzial durch Nanotechnologie kurzfristig hemmend auf die weitere Entwicklung von Nanotechnologie/Nanomaterialien und nanotechnologiebasierten Produkten auswirken kann. Einen neuen Aspekt haben kürzlich Reisch und Bitz (2011, S. 4) zur Diskussion gestellt. Sie weisen darauf hin, dass die gegenwärtige Debatte zu Nanotechnologie/Nanomaterialien im Allgemeinen stark auf Risiken fokussiert ist. Aus ihrer Sicht sollte der Dialog erweitert werden um die Fragen, wie Produktwissen und Marktransparenz hergestellt werden können und wie der Nutzen der Nanotechnologie für die Konsumenten deutlich wird. Ein systematischer erster Dialog über Chancen und Risiken von Nanotechnologie bzw. Nanomaterialien ist in der Schweiz im Jahr 2006 über den von TA-SWISS organisierten Publifokus «Nanotechnologien und ihre Bedeutung für Gesundheit und Umwelt» angestossen worden (TA-SWISS 2006).

---

<sup>160</sup> Darüber hinaus konstatieren die Autoren im Rahmen ihrer Studie ein leicht abnehmendes Interesse in der Bevölkerung am Thema «Nanotechnologie». Auch an dieser Stelle ist einschränkend darauf hinzuweisen, dass es sich bei dieser Befragung – wie bei den anderen empirischen Befragungen – um eine sogenannte Momentaufnahme handelt.

Eine zweite für die Schweiz relevante Aktivität ist im Jahr 2009 unter dem Titel «Nanopol: Nanotechnologiepolitiken der deutschsprachigen Länder im Vergleich» von der Universität Basel gestartet worden.

### 10.3 Zwischenfazit

Die Akteurslandschaft der Stakeholder in der Schweiz setzt sich aus recht unterschiedlichen Akteuren zusammen. Die im Rahmen einer Internetrecherche als besonders sichtbar identifizierten Stakeholder können v. a. den Unternehmen, Wirtschaftsverbänden, Nichtregierungsorganisationen und Beratungsorganisationen zugeordnet werden. Eine weitere wichtige Stakeholdergruppe stellen die Medien dar.

Im Rahmen der Analyse wurden öffentliche, schriftlich dokumentierte Positionen der massgeblichen Stakeholder und der Schweizer Parteien zusammengestellt.

Dabei lassen sich die Positionen im Wesentlichen in drei Gruppen einteilen. Eine kleine Gruppe von Stakeholdern positioniert sich sehr positiv gegenüber Nanotechnologien, indem sie überwiegend die Nutzenaspekte hervorhebt. Die weitaus grösste Gruppe siedelt sich in der Debatte eher mittig an, indem sie die Chancen und Risiken mit einer gewissen Ausgewogenheit beleuchtet. Die dritte Gruppe von Stakeholdern positioniert sich in der öffentlichen Debatte mit einem klaren Schwerpunkt auf allfällige Risiken, die mit der Nutzung von Nanomaterialien einhergehen können.

Von den vier Schweizer Parteien, die klar zum Thema Nanotechnologie Stellung beziehen, positionieren sich zwei eindeutig als «pro-nano» indem sie einen Schwerpunkt auf die Betrachtung der Chancen und Nutzenaspekte legen. Eine Partei wägt Chancen gegen Risiken ab und eine weitere legt ihren Schwerpunkt auf die Betrachtung der Risiken der Nanotechnologie.

Aus den Ergebnissen des Eurobarometers wird insgesamt in der Schweiz in der breiten Öffentlichkeit gegenwärtig eine eher positive Einstellung gegenüber Nanotechnologien erkennbar. Immerhin empfinden laut Eurobarometer 2010 aber 34 Prozent aller Schweizerinnen und Schweizer beim Thema Nanotechnologie ein Unbehagen. Damit ist die Akzeptanz in der Schweiz immer noch höher als in Deutschland, Italien, Österreich und in der EU. Diese Einschätzung geht mit einem vergleichbar hohen Wissensstand zum Thema einher. So haben in der Schweiz schon mehr als drei Viertel aller Befragten von Nanotechnologien gehört

und rund zwei Drittel aktiv über das Thema diskutiert. Damit liegt der Kenntnisstand signifikant über anderen europäischen Ländern wie Frankreich oder Italien. Diese Momentaufnahme aus dem Jahr 2010 hat jedoch nur begrenzte Aussagekraft für die derzeitige Situation. Zudem bezog sich das Eurobarometer generell auf das Thema Nanotechnologie und nicht auf Nanomaterialien.

Allerdings hängt die Einstellung in der Bevölkerung wesentlich vom Anwendungsbereich der Nanotechnologie ab. Anwendungen von Nanomaterialien im Konsumentenbereich, speziell in Lebensmitteln, werden von der Mehrheit der Bevölkerung kritisch gesehen. Aufgrund der nur sehr sporadischen Thematisierung von Nanotechnologie in den Medien scheint es vordringlich, Informationen über Chancen und Risiken von Nanomaterialien mittels verschiedener Initiativen verstärkt in die Öffentlichkeit zu tragen.





# 11 Nanotechnologie als ethische Herausforderung

In den kommenden Abschnitten werden zuerst die wesentlichen Grundströmungen in der Risikoethik erläutert. Darauf folgt ein Überblick über die ethische Debatte in der Schweiz zur Regulierung von Nanomaterialien. Da bei der öffentlichen Diskussion zur Regulierung von Nanomaterialien immer wieder die Gentechnikdebatte als Vergleich dient, werden nachfolgend wesentliche ethische Aspekte in beiden Debatten verglichen. Mit diesem Wissen wird dann eine Empfehlung für einen risikoethischen Ansatz ausgesprochen, der für das Risikomanagement von Nanomaterialien/Nanoprodukten als Grundlage dienen soll.

Die Nanotechnologie wird von vielen Kommentatoren als «Schlüsselindustrie des 21. Jahrhunderts»<sup>161</sup> beschrieben. Ihr wird das Potenzial zugeschrieben, verschiedenste Bereiche der Wirtschaft und auch der Gesellschaft tiefgreifend zu verändern. Während in wissenschaftlicher Hinsicht nicht in jedem Fall klar ist, welche Versprechen die Nanotechnologie in den kommenden Jahren und Jahrzehnten wird einlösen können und welche als Science Fiction in die Wissenschaftsgeschichte eingehen,<sup>162</sup> stellen die potenziell weitreichenden Herstellungs- und Anwendungsmöglichkeiten dieser Technologie die Ethik bereits heute vor grosse Herausforderungen. Bachmann (2006, S. 5) benennt als Themenfelder seiner «ethischen Landkarte» der Nanotechnologie insbesondere die mögliche militärische Nutzung, das Problem des Datenschutzes, die Nanomedizin und «Human Enhancement» sowie die Gerechtigkeitsdimension (insbes. im Hinblick auf «Nord-Süd-Gerechtigkeit» – Stichwort «Nano-Divide»). Der Schwerpunkt der folgenden Betrachtung konzentriert sich auf die **risikoethische Bewertung** der Nanomaterialien. Ausgangspunkt ist dabei die Erkenntnis, dass sowohl Wissenslücken bei der Ermittlung einer möglichen Schädlichkeit von Nanomaterialien für Mensch und Umwelt als auch bei dem konkreten Nutzen der Materialien bestehen. Auf eine ausführliche Darstellung des Stands der Risikoforschung

---

<sup>161</sup> Auf diese allgemein vertretene Position hinweisend: Bachmann (2006), S. 5.

<sup>162</sup> Man denke nur an Drexlers Vision eines «Nanobots», einer beliebig programmierbaren nanoskaligen Konstruktionsmaschine, die eine beliebige künstliche Struktur herstellen können sollte; siehe Bachmann (2006), S. 13.

sowie der Ermittlung des Nutzens von Nanomaterialien soll an dieser Stelle verzichtet werden.<sup>163</sup> hinzuweisen ist auf die Ausführungen in Kapitel 6 und 7. Fehlt es an belastbaren wissenschaftlichen Daten, die es erlauben, die konkrete Gefährlichkeit einzelner Nanomaterialien einzuschätzen, stellt sich in dieser Situation der Ungewissheit aus ethischer Sicht insbesondere die Frage, welchen Risiken die Gesellschaft wie auch die Umwelt ausgesetzt werden dürfen, um potenziell vorteilhafte Materialien in den Markt einzuführen: Gebietet es die Ethik, die Risiken zu eliminieren oder auf ein akzeptables Mass zu reduzieren? Wie viel Raum ist im Bereich potenziell gefährlicher Hochtechnologie für «Environmental Learning» nach «Trial-and-Error»-Manier? Dürfen Risiken gegen Chancen aufgewogen werden? Mit diesen Fragestellungen beschäftigt sich die Risikoethik.

## 11.1 Grundströmungen in der Risikoethik

Innerhalb der Risikoethik lassen sich drei Grundströmungen identifizieren, die eine Antwort auf die Frage der ethischen Zulässigkeit riskanter Handlungen zu geben suchen, namentlich die **bayesianische Entscheidungstheorie**, das **Maximin-Kriterium** sowie das **Vorsorgeprinzip**.<sup>164</sup>

Als zwei Gegenpole stehen sich dabei **konsequentialistische** und **deontologische Sichtweisen** gegenüber:

- Konsequentialisten bemessen die Richtigkeit einer Handlung alleine anhand der Folgen, die diese Handlung mit sich bringt. Vereinfachend lässt sich sagen, dass konsequentialistische Ansätze stets ein Zwischritt zugrunde liegt. In einem ersten Schritt wird ein «Gut» definiert, das als erstrebenswert angesehen wird und das es zu maximieren gilt.<sup>165</sup> Moralisch

<sup>163</sup> Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Bundesamt für Gesundheit (BAG): Synthetische Nanomaterialien – Risikobeurteilung und Risikomanagement: Grundlagenbericht zum Aktionsplan, Bern 2007.

Für einen Überblick sei verwiesen auf Umweltbundesamt, S. 9 ff.; LUBW (2010), S. 5 ff.

<sup>164</sup> Diese Aufzählung ist freilich nicht abschliessend, siehe nur Shrader-Frechette (1991), S. 77 ff.

<sup>165</sup> Hier ergeben sich im Detail Unterschiede zwischen verschiedenen konsequentialistischen Ansätzen. Im Utilitarismus ist das zu maximierende Gut z. B. das «Glück» (siehe dazu näher Abschnitt «Bayesianische Entscheidungstheorie», S. 220).

richtig ist – in einem zweiten Schritt – diejenige Handlungsoption, die das Maximierungsziel am besten verwirklicht.

- Deontologische Sichtweisen messen eine Handlung hingegen an einer zuvor festgelegten Regel. Wie die Stanford Encyclopedia of Philosophy schreibt: «*Roughly speaking, deontologists of all stripes hold that some choices cannot be justified by their effects — that no matter how morally good their consequences, some choices are morally forbidden. On deontological accounts of morality, agents cannot make certain wrongful choices even if by doing so the number of wrongful choices will be minimized [...]. For deontologists, what makes a choice right is its conformity with a moral norm.*»<sup>166</sup>

Zur Verdeutlichung kann das sogenannte Trolley-Beispiel dienen (Alexander und Moore 2008). Es unterstellt, dass eine ausser Kontrolle geratene Strassenbahn auf eine Gruppe von fünf Personen zurast. Greift man nicht ein, so sterben diese fünf Menschen. Leitet man die Bahn um, so kann man die fünf retten; dabei kommt jedoch ein Bahnarbeiter um, der sonst unbeschadet bliebe. Eine Betrachtung der Konsequenzen gebietet es, die Weiche umzustellen und den Tod des Bahnarbeiters in Kauf zu nehmen (*ein Toter ist weniger schlimm als fünf Tote*). Deontologische Sichtweisen können eine solche Quantifizierung jedoch nicht so einfach vornehmen. So gilt bei ihnen als Ausgangspunkt eine einschlägige ethische Regel: Im Trolley-Beispiel das Tötungsverbot, wonach ein Umleiten keine Alternative zur Rettung der fünf Menschen ist, wenn dadurch der Tod eines anderen Menschen in Kauf genommen wird.

So unterschiedlich die verschiedenen Entscheidungstheorien in ihren Gedankengängen auch sein mögen, als Grundlage der Risikoethik kann gelten: «*Anderere durch Handeln einem Risiko auszusetzen, ist grundsätzlich rechtfertigungsbedürftig, weil ihnen hierdurch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ein Schaden entsteht. Dies gilt unabhängig davon, ob es zu einer Schädigung kommt.*»<sup>167</sup>

Im Folgenden werden in einem ersten Schritt die unterschiedlichen Grundströmungen der Risikoethik beschrieben und die vorgebrachten Kritikpunkte vorgestellt. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem Vorsorgeprinzip, welches in der risikoethischen Debatte um Nanomaterialien eine prominente Stellung einnimmt. Es werden die Argumentationsstrukturen offengelegt, derer sich Ak-

<sup>166</sup> Alexander und Moore (2008); Hervorhebung des Autors.

<sup>167</sup> Bachmann (2007), S. 10.

teure in der Nano-Debatte bedienen. Sodann werden die konkreten Auswirkungen dieser Argumente auf die Schweizer Debatte zum Umgang mit Nanomaterialien aufgezeigt.

### 11.1.1 Bayesianische Entscheidungstheorie

#### *Risikoentscheidung nach der bayesianischen Entscheidungstheorie*

Grundlage der bayesianischen Entscheidungstheorie ist der **Utilitarismus**,<sup>168</sup> dessen Grundannahmen deshalb kurz vorgestellt werden.

Die ethische Massschnur des Utilitaristen ist das **Nützlichkeitsprinzip**. Anhand dieses Prinzips lässt sich die ethische Richtigkeit einer Handlung feststellen. Handlungen sind moralisch richtig, sofern sie *«dazu tendieren, das Glück zu befördern»*, und falsch *«in dem Grade wie sie dazu tendieren, das Gegenteil von Glück hervorzubringen.»*<sup>169</sup> Der Utilitarismus lässt sich mithin auf die **Grundmaxime** reduzieren: *«Handle so, dass das grösstmögliche Mass an Glück entsteht!»* Dabei wird unter Glück das Vorhandensein von *«Lust und das Fehlen von Schmerz verstanden, unter Unglück Schmerz und die Verhinderung von Lust»*.<sup>169</sup> Ist die Beförderung des Glücks als Ziel moralisch richtig, so sind Handlungen, die diesem Zwecke dienen, ebenfalls moralisch anerkennenswert, wenn auch nur als Mittel.

Der Utilitarist fordert dabei stets eine situationsbezogene Abwägung: Bei einer Handlungsalternative ist stets diejenige Variante zu wählen, welche unter Berücksichtigung aller Umstände und Folgen insgesamt zum grössten Glück bzw. zum grössten Nutzen führt.<sup>170</sup> Bezugspunkt der Abwägungsentscheidung ist dabei das Glück der gesamten Gesellschaft, das Glück in der Summe, und nicht alleine dasjenige des Handelnden.<sup>170</sup> Der Utilitarismus ist daher eine Spielart des **Konsequentialismus** – im Gegensatz zu deontologischen Sichtweisen.

Der Utilitarismus verlangt also eine Quantifizierung der Folgen einer Handlung. Die «Währung» ist dabei das Glück. Zwingende Voraussetzung ist, dass die Folgen einer Handlung überhaupt bezifferbar sind. Der Utilitarist setzt – anders ausgedrückt – einen Zustand vollständiger Informiertheit als Ausgangspunkt

<sup>168</sup> Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf den klassischen Utilitarismus.

<sup>169</sup> Mill (2006), S. 12.

<sup>170</sup> Rath (2008), S. 66.

voraus. Im Falle neuer Technologien ist, wie das Beispiel der Nanotechnologie zeigt, diese Voraussetzung jedoch nicht immer erfüllt. An dieser Stelle setzt die **Bayesianische Entscheidungstheorie** an.<sup>171</sup> Sie schafft den Übergang von einer Betrachtung von Situationen der Sicherheit hin zu der Betrachtung von Risikosituationen.<sup>172</sup>

Rath (2008) fasst die zentralen Aussagen der **bayesianischen Entscheidungstheorie** wie folgt zusammen: «[I]n diesem Konzept ist [...] nicht der Nutzen zu maximieren, sondern der erwartete Nutzen.» Moralisch geboten sind Handlungen, wenn «sie zur Maximierung des Durchschnittsnutzens aller Mitglieder einer Gesellschaft führen; andernfalls müssen sie als inakzeptabel bezeichnet werden».<sup>173</sup>

Der Erwartungsnutzen kann quasi mathematisch ermittelt werden. Er ist definiert als das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Konsequenz (Schadensausmass). Die Variablen sind in der Regel nicht vollständig bekannt, sodass Annahmen gebildet werden müssen. Es müssen, anders ausgedrückt, subjektive Eintrittswahrscheinlichkeiten, erwartete Konsequenzen oder beides angenommen werden.<sup>174</sup> Hat eine Technologie beispielsweise einerseits einen hohen potenziellen Nutzen für die Gesellschaft, bringt aber andererseits eine erhebliche Gefahr für Leib und Leben mit sich, so soll sie dennoch ausgeführt werden, wenn die Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts als gering angesehen wird.

Die bayesianische Entscheidungstheorie ist also ebenfalls eine Ethik, die einen **Maximierungsansatz** verfolgt. Die Handlungsmaxime dieser Entscheidungstheorie lautet:

*«Handle so, dass der Erwartungsnutzen der Folgen deines Tuns maximal ist.»*

---

<sup>171</sup> Dazu allg. Shrader-Frechette (1991), S. 101 ff.

<sup>172</sup> Die bayesianische Entscheidungstheorie weist freilich Abweichungen bzw. Präzisierungen auf gegenüber utilitaristischem Ideengut. Für eine ausführliche Darstellung ist zu verweisen auf Rath (2008), S. 71 ff.

<sup>173</sup> Rath (2008), S. 74 und S. 76.

<sup>174</sup> Dazu im Detail Rath (2008), S. 79.

### *Kritik im Schrifttum*

Gegen die bayesianische Entscheidungstheorie werden im Kern die Einwände vorgetragen, die auch gegen den Utilitarismus vorgebracht werden.<sup>175</sup>

Utilitaristische Theorien streben nach dem grösstmöglichen Glück in der Summe. Es sind Fälle denkbar, in denen eine Handlung als moralisch richtig zu bewerten ist, obwohl sie für die handelnde Einzelperson selbst mehr Nachteile als Vorteile bringt. Im Utilitarismus ist es – zugespitzt ausgedrückt – angelegt, dass das Wohl des Einzelnen auf dem Altar des grösstmöglichen Glücks der Allgemeinheit geopfert wird. Hier merken manche Kommentatoren an, es sei fragwürdig, ob solche Handlungen moralisch gerechtfertigt seien.<sup>176</sup> Aus einem stärker juristisch angehauchten Blickwinkel handelt sich der Utilitarismus insofern schnell den Vorwurf der Missachtung grundlegender Menschenrechte ein.

Zweitens wird eingewendet, dass Aspekte der Gerechtigkeit keinen Niederschlag in der quasi mathematischen situativen Betrachtungsweise finden. Die blosserhöhung des sozialen Nutzens, so wird vorgebracht, sei kein ausreichendes Argument, um diesen Aspekt zu entkräften.<sup>177</sup>

Kritik entzündet sich auch daran, dass im Utilitarismus das handelnde Individuum die zentrale Abwägungs- und Entscheidungsinstanz sein soll. Dabei soll die Einzelperson als neutraler und wohlwollender Zuschauer auftreten. Der Utilitarismus kann jedoch nicht sicherstellen, dass *«das entscheidende und handelnde Individuum die eigenen Interessen und diejenigen aller anderen betroffenen Individuen in einem gleichen Maße gewichtet. [Hier] besteht ein Anreiz für das handelnde Individuum dem eignen Interesse ein stärkeres Gewicht zu geben.»*<sup>178</sup>

Möchte man sich der Ethik als Grundlage zur Entwicklung konkreter Rechtsinstrumente bedienen, so steht man bei konsequentialistischen Ansätzen vor dem Problem, dass diese – wie bereits dargestellt – eine situationsbezogene Abwägung erfordern und keine abstrakt-generelle Normierung von Handlungspflichten erlauben. Dieser Ausgangspunkt kollidiert jedoch mit rechtsstaatlichen Grundsätzen wie dem der Rechtssicherheit und dem des Vertrauensschutzes. Auch in wirtschaftlicher Hinsicht könnten die Akteure den Mangel an Planungssicherheit als Nachteil empfinden.

---

<sup>175</sup> Siehe dazu allgemein: Alexander und Moore (2008). Zur Erwidern auf viele dieser Einwände siehe Rath (2008), S. 86 ff.

<sup>176</sup> Rath (2008), S. 70.

<sup>177</sup> Siehe Rath (2008), S. 85.

<sup>178</sup> Rath (2008), S. 70.

Ein spezifisches Problem der bayesianischen Entscheidungstheorie ist schliesslich das methodische Problem der Berechnung von Erwartungswerten. Wie bereits dargestellt, müssen in der Regel Annahmen gebildet werden, die *subjektive* Eintrittswahrscheinlichkeiten und *erwartete* Konsequenzen betreffen. Will man die Entscheidungstheorie nicht der Beliebigkeit preisgeben, so müssen an dieser Stelle taugliche Kriterien zur Ermittlung dieser Werte konzipiert werden. Dies dürfte sich jedoch als ein sehr schwieriges Unterfangen darstellen.<sup>179</sup>

### 11.1.2 Maximin-Prinzip

#### *Risikoentscheidung nach dem Maximin-Prinzip*

Eine zweite Entscheidungsregel, auf die im risikoethischen Diskurs Bezug genommen wird, ist das Maximin-Prinzip.<sup>180</sup> Bedeutsamer Vertreter dieses Ansatzes ist Rawls. Das Maximin-Prinzip ist eine Entscheidungsregel, die sicherstellen soll, dass im schlechtesten aller denkbaren Fälle noch das beste aller möglichen Ergebnisse (lat.: **maximum minimorum**) erzielt wird. Die Handlungsanweisung des Maximin-Ansatzes lässt sich folgendermassen umreissen:

*«Handle so, dass der grösste denkbare Schaden am kleinsten ist!»*

Zur Verdeutlichung lässt sich das Prinzip in mehrere Gedankenschritte unterteilen:

1. Zunächst werden alle Handlungsoptionen aufgelistet.
2. Sodann werden die möglichen Konsequenzen (positiver wie negativer Art) gewichtet.
3. Bei jeder Handlungsoption muss der grösstmögliche Schaden ermittelt werden.
4. Diejenige Variante, bei der der grösstmögliche Schaden am geringsten ist, ist ethisch richtig.

---

<sup>179</sup> Diese Kritik lässt sich – in leicht abgewandelter Form – gegen jede konsequentialistische Ansicht vorbringen: *«Finally, consequentialism is criticized on the ground that it gives little or no guidance to persons' practical reasoning. The consequences of any act stretch into the distant future, making them essentially unknowable. Although end-of-history assessments are not impossible, the guidance of practically reasoning agents becomes problematic»* (Alexander und Moore 2008).

<sup>180</sup> Dazu allg. Shrader-Frechette (1991), S. 116 ff.

Das Maximin-Prinzip ordnet die Handlungsoptionen also nach ihren schlechtestmöglichen Ergebnissen (z. B. ein synthetisches Nanomaterial ist ubiquitär in den Umweltmedien vorhanden, kann nur schwer entfernt werden und führt zu starken Gesundheitsgefährdungen) und hält dazu an, diejenige zu wählen, deren schlechtestmögliches Ergebnis besser ist als das jeder anderen. Anders als utilitaristische Sichtweisen definiert das Maximin-Prinzip also kein Ziel, das erstrebenswert ist, sondern wählt als Ausgangspunkt ein Ereignis, dessen Eintritt vermieden werden soll. Der Kern des Maximin-Prinzips ist folglich die **Vermeidung des Worst-Case-Szenarios**.<sup>181</sup> Hervorzuheben ist, dass das Prinzip dabei auf der Feststellung beruht, dass in den wenigsten Fällen umfassende Informationen zur Verfügung stehen, um eine fundierte Wahrscheinlichkeitsberechnung zu bewerkstelligen. Der Maximin-Ansatz stellt daher primär auf das potenzielle Schadensausmass ab und erklärt Eintrittswahrscheinlichkeiten für irrelevant.<sup>182</sup> Anders als Vertreter bayesianischer Ansätze hält Rawls es für unvernünftig zu versuchen, unklare Eintrittswahrscheinlichkeiten zu quantifizieren und zur Entscheidungsmaxime zu erheben.<sup>183</sup> Insofern sind neue, risikobehaftete Technologien ein Paradebeispiel für die Anwendung des Maximin-Prinzips.<sup>181</sup> Übertragen auf die Nanotechnologie müssten zunächst die potenziellen Höchstschäden bei Fortentwicklung und Nutzung dieser Technologie dargestellt werden. Ergäbe sich, dass diese grösser sind als diejenigen, die entstehen würden, wenn man von der Forcierung der Nanotechnologie absehen würde, so würde das Maximin-Prinzip dafür plädieren, die Fortentwicklung der Nanotechnologie zu unterlassen. Nach Rawls (2005) soll Maximin nicht in jeder denkbaren Entscheidungssituation Anwendung finden.<sup>184</sup> Situationen des sozialen Risikos benennt er jedoch ausdrücklich als Anwendungsfall. Die Begründung dafür lautet wie folgt: Im Gegensatz zu individuellen Risikokonstellationen ist es eine Eigenart des sozialen Risikos, dass es meist ohne Zustimmung übertragen wird. Risiken, die das Individuum eigenverantwortlich eingeht und die nicht in die Sphäre Dritter ausstrahlen, sind vorwiegend nach dem Einwilligungskriterium zu bewerten. Wie Shrader-Frechette (1991) schreibt: «*Situations of individual risk are voluntarily chosen, whereas situations of societal risk typically are involuntarily imposed.*»<sup>185</sup>

---

<sup>181</sup> Shrader-Frechette (1991), S. 102.

<sup>182</sup> Rawls (2005), S. 196 ff.

<sup>183</sup> So Rath (2008), S. 105.

<sup>184</sup> Eine Auflistung findet sich bei Rath (2008), S. 104.

<sup>185</sup> Shrader-Frechette (1991), S. 105.



Diese zwei Dimensionen des Risikos sind auch im Kontext der Nanotechnologie anzutreffen, wobei die Grenzen freilich verschwimmen können.

Ethische Grundlage des Maximin-Prinzips sind vertragstheoretische Erwägungen. Ausgangspunkt bei *Rawls* ist ein fiktiver Zustand des Nichtwissens («veil of ignorance»). Gehüllt in diesen «Schleier des Nichtwissens», sind die Einzelnen im Unklaren über die Faktoren, die ihre spätere Handlungsfreiheit entscheidend beeinflussen, wie ihre Stellung in der Gesellschaft, ihren Einkommensstand, ihre Intelligenz und körperliche Tüchtigkeit. Dieses Nichtwissen soll dafür sorgen, dass jeder Einzelne beim Entwurf gesellschaftlicher Regeln nicht von eigennützigen Motiven geleitet wird. Käme die Menschheit in dieser Situation zusammen, um sich auf eine Regel zu einigen, wie in einer Risikosituation zu verfahren ist, so würde jeder – so *Rawls*' Annahme – diejenige Entscheidungsregel wählen, nach der er im schlimmstmöglichen Fall einen möglichst geringen Schaden erleiden würde – Maximin.

### *Kritik im Schrifttum*<sup>186</sup>

Als zentraler Kritikpunkt wird gegen den Ansatz von *Rawls* vorgetragen, dass Worst-Case-Szenarien sich bei fast jeder neuen Technologie denken lassen – insbesondere solange die Technologie noch an ihren Anfängen steht. Dies gelte umso mehr, so tragen Kritiker vor, als die Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts keinen Eingang in die Risikobetrachtung findet. Das Prinzip steht folglich im Verdacht, zu irrationalen Entscheidungen zu führen.<sup>187</sup> Harsanyi (1975) schreibt dazu: «*It is extremely irrational to make your behavior wholly dependent on some highly unlikely unfavorable contingencies, regardless of how little probability you are willing to assign them.*»<sup>188</sup>

---

<sup>186</sup> Zur allgemeinen Kritik deontologischer Ansätze siehe Alexander und Moore (2008).

<sup>187</sup> Siehe Shrader-Frechette (1991), S. 129.

<sup>188</sup> Harsanyi, zit. nach Shrader-Frechette (1991), S. 104.

### 11.1.3 Das Vorsorgeprinzip

#### *Die ethischen Grundlagen des Vorsorgeprinzips*

Ein drittes Instrument «*verantwortungsethische[r] Risikooptimierung*»<sup>189</sup> ist das Vorsorgeprinzip.<sup>190, 191</sup> Gerade die Diskussion um die Nanotechnologie wird sehr häufig unter ausdrücklichem Verweis auf das Vorsorgeprinzip geführt.<sup>192</sup> Deshalb soll diesem Ansatz vertieft nachgegangen werden.

Bachmann (2007)<sup>193</sup> führt als ethische Grundlage des Vorsorgeprinzips zwei Erwägungen an:

1. Es liege im Interesse eines jeden Einzelnen, ein gewisses Risiko auf sich zu nehmen, da sonst eine allgemeine Handlungsblockade drohe.
2. Unter dem Stichwort der Risikosituation als «asymmetrische Situation»<sup>193</sup> wird angeführt: Jeder Einzelne darf seine Mitmenschen in vielen Situationen einem Risiko aussetzen (z. B. beim Autofahren oder beim Rauchen). Dies müssen die Risikoexponierten (z. B. andere Autofahrer oder Passivraucher) aber nur dann akzeptieren, wenn der Risikoexponent selbst einwilligt, in bestimmten Situationen einem Risiko ausgesetzt zu werden, also wenn er ebenso wie andere mit dem Auto am Strassenverkehr teilnimmt oder ebenso wie andere in einem Raum raucht. Insofern liegt es im individuellen Interesse eines jeden Einzelnen, in diesen Fällen kein Nullrisiko zu fordern.<sup>194</sup>

---

<sup>189</sup> Rath (2008), S. 114.

<sup>190</sup> Bisweilen bedienen sich insbesondere private Interessensgruppen griffigerer Formulierungen, beispielsweise «*better safe than sorry*» oder «*no data – no market*», ohne in der Sache jedoch neue Anforderungen aufzustellen.

<sup>191</sup> Im wissenschaftlichen Diskurs hat sich der Begriff des Vorsorgeprinzips (engl.: precautionary principle) eingebürgert. Keine Stellung soll mit dieser Begrifflichkeit bezogen werden in Hinblick auf die in der Rechtswissenschaft anzutreffende Unterscheidung zwischen Prinzip und Regel.

<sup>192</sup> Das Vorsorgeprinzip ist bspw. das zentrale Thema bei Rippe (2001); Bachmann (2007) und SRU (2012).

<sup>193</sup> Bachmann (2007), S. 10 f.

<sup>194</sup> Das entscheidende Kriterium ist jenes der Zumutbarkeit. Als Passivraucher darf man nicht deshalb ein Nullrisiko fordern, weil man selber Nichtraucher ist, sondern nur, wenn man zeigen kann, dass die Exposition mit Passivrauch nicht zumutbar ist. Dies kann man sogar dann fordern, wenn man selber Raucher ist.

Aufbauend auf dieser Erkenntnis wird die Idee eines **ethisch akzeptablen Risikos** entwickelt, bei welcher der Risikoexponent bei Bedarf Vorsichtsmaßnahmen ergreift, die aber nicht zu dem Ausschluss jeglichen Risikos führen. Dieses Rechtfertigungsmodell funktioniert indes nur, wenn alle Variablen bekannt sind, wenn also die Schadenseintrittswahrscheinlichkeit sich zuverlässig bestimmen lässt. Das Problem, vor dem die Risikobeurteilung im Falle der Nanotechnologie steht, ist – wie bereits erwähnt – die wissenschaftliche Unsicherheit hinsichtlich der Schadenswahrscheinlichkeit und des Schadensumfangs. An dieser Stelle kommt das Vorsorgeprinzip ins Spiel.

Ergänzen liesse sich diese Aufzählung um ein Argument, das in der Wissenschaft als «option value» bezeichnet wird. Das Vorsorgeprinzip soll ein möglichst breites Spektrum an wünschenswerten zukünftigen Handlungsalternativen gewährleisten, indem irreversible Konsequenzen, die eine bedeutende Option vernichten, vermieden werden. Insofern kann das Prinzip auch als Vehikel zur Durchsetzung intergenerationaler Gerechtigkeit verstanden werden: Es ist auch Ausdruck der «Verantwortung gegenüber zukünftigen Generationen».<sup>195</sup>

Im risikoethischen Diskurs wird das Vorsorgeprinzip als «Mittelposition» zwischen Maximin-Prinzip und bayesianischer Entscheidungstheorie umschrieben.<sup>196</sup> Vergleichbar dem Maximin-Prinzip versucht das Vorsorgeprinzip nicht, die wissenschaftliche Unsicherheit hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts zu quantifizieren, sondern betont im Ausgangspunkt das Nichtwissen. Der Unterschied zwischen beiden Ansätzen besteht v. a. darin, dass das Vorsorgeprinzip lediglich provisorische Antworten bieten möchte, die – mit zunehmendem wissenschaftlichem Input – revidiert und angepasst werden können. Das Vorsorgeprinzip versteht sich demnach mehr als Entscheidungsprozess.<sup>197</sup>

### *Die Anwendungsbedingungen des Vorsorgeprinzips*

Eine allgemein anerkannte Formulierung des Vorsorgeprinzips gibt es im risikoethischen Diskurs nicht. Im Kern besagt das Prinzip nach *Bachmann* jedoch, «dass der Staat die Verantwortung für die Ergreifung derjenigen Vorsorgemaß-

---

<sup>195</sup> Rath (2008), S. 133.

<sup>196</sup> Rath (2008), S. 114.

<sup>197</sup> Die EU-Kommission schlägt vor, das Vorsorgeprinzip als einen dreistufigen Entscheidungsprozess zu verstehen, welcher bestehen soll aus (1) Risikobewertung, (2) Risikomanagement und (3) Risikoinformation; siehe dazu Europäische Kommission 2001, S. 9.

*nahmen trägt, die erforderlich sind, um schwerwiegende oder irreversible Schäden an der Umwelt und/oder am Menschen, die durch neue Technologien und die durch sie hervorgebrachten Produkte einzutreten drohen, zu verhindern; und dies auch dann, wenn es noch keine wissenschaftlich hinreichend fundierte Risikoabschätzung gibt.»<sup>198</sup>*

Im rechtswissenschaftlichen Diskurs wird das «Ob» der Vorsorge in der Regel an das Vorliegen eines sogenannten Vorsorgeanlasses geknüpft. Ein solcher Vorsorgeanlass liegt vor, wenn der Verdacht besteht, dass eine bestimmte Handlung abträgliche Folgen für ein schützenswertes Gut haben kann.<sup>199</sup> Eine Beschränkung auf potenziell schwerwiegende und irreversible Folgen wird in der Rechtswissenschaft jedoch nicht vorgenommen. Beispielhaft sei der Ansatz der EU-Kommission erwähnt:

*«Ob das Vorsorgeprinzip herangezogen werden soll, ist eine Entscheidung, die dann gefaßt wird, wenn die wissenschaftlichen Informationen unvollständig sind oder keine eindeutigen Schlüsse zulassen und wenn es Anzeichen dafür gibt, daß die möglichen Folgen für die Umwelt oder die Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen potentiell gefährlich und mit dem angestrebten Schutzniveau unvereinbar sein könnten.»<sup>200</sup>*

Bedeutsam ist, dass das Vorsorgeprinzip die Schwelle, ab der staatliches Handeln zulässig sein kann, vorverlegt. Im Gefahrenabwehrrecht wird Sicherheit traditionell als Abwesenheit von Gefahren verstanden. Eine Gefahr bezeichnet jedoch nur eine Situation, in der ein Schaden in absehbarer Zeit mit hinreichender Wahrscheinlichkeit eintritt, wenn nicht Massnahmen zu seiner Abwehr ergriffen werden. Auf eine Situation, in der über das Schadensausmass und seine Eintrittswahrscheinlichkeit keine oder nicht ausreichende Kenntnisse vorhanden sind, bietet das Gefahrenabwehrrecht keinen hilfreichen Handlungsmaßstab. Eine sehr griffige Darstellung der Idee der Vorsorge in Abgrenzung zur Gefahrenabwehr liefert der SRU:<sup>201</sup>

---

<sup>198</sup> Bachmann (2006), S. 85; vgl. auch Bachmann (2007), S. 12.

<sup>199</sup> Vgl. im Detail Calliess (2008), S. 36.

<sup>200</sup> Europäische Kommission 2001, S. 10.

<sup>201</sup> SRU (2011), S. 31.

«Vorsorge bedeutet dem Wortsinn nach die Schaffung eines Vorrats für die Zukunft durch Verzicht in der Gegenwart. In Gegenüberstellung zur Gefahrenabwehr kann man den Zweck der Vorsorge so konkretisieren: Die ‹Sorge› betrifft die Abwehr konkreter Gefahren, die ‹Vor-Sorge› hingegen Maßnahmen, die vor der Entstehung von Gefahren liegen. Es geht mithin um einen ‹Vorrat an Sicherheit› in Gestalt eines unterhalb der Gefahrenschwelle liegenden Bereichs der abstrakten Besorgnis, der mangels hinreichender Wahrscheinlichkeit nur die Möglichkeit eines Umweltschadens begründen kann.»

Wie sich aus den zitierten Definitionsansätzen ergibt, lässt sich das Vorsorgeprinzip auf zwei Elemente reduzieren, die gleichsam als «Tatbestandsvoraussetzungen» für die Anwendung des Prinzips verstanden werden können:

1. Wissenschaftliche Unsicherheit als Anlass und
2. langfristig drohende schwerwiegende oder irreversible Schäden (juristische Diskussion) bzw. Inakzeptabilität der Folgen (risikoethische Diskussion).

Den Begriff der wissenschaftlichen Unsicherheit verstehen die Kommentatoren im Detail auf unterschiedliche Weise.<sup>202</sup> Die verschiedenen Ansätze lassen sich jedoch auf folgenden gemeinsamen Nenner bringen: «Einfach ausgedrückt ist jede Situation, in der die potentiellen Konsequenzen und die korrespondierenden Eintrittswahrscheinlichkeiten nicht zweifelsfrei angegeben werden können, ein Kandidat für die Anwendung des Precautionary Principle.»<sup>203</sup>

In der ethischen Debatte wird als Voraussetzung für die Anwendung des Vorsorgeprinzips oft die Inakzeptabilität potenzieller Konsequenzen gefordert, also die Gefahr schwerwiegender und irreversibler Schäden.<sup>204</sup> Die Rechtswissenschaft nimmt diese Einschränkung – wie bereits gesehen – nicht auf Tatbestandsebene vor. In Bezug auf die Nanomaterialien wirkt sich dieser Unterschied jedoch nicht aus. Bereits an dieser Stelle sei erwähnt, dass ein breiter Konsens besteht, dass angesichts möglicher Folgen der Nanotechnologie Vorsorgemaßnahmen angezeigt sind. Keine Einigkeit besteht hingegen bezüglich der Frage, wie diese Massnahmen ausgestaltet sein sollen.

---

<sup>202</sup> Siehe dazu Rath (2008), S. 118 f.; Bachmann (2007), S. 12 f.

<sup>203</sup> Rath (2008), S. 119.

<sup>204</sup> Bachmann (2007), S. 13 mit weiteren Nachweisen, auch zur Gegenmeinung.

### *Rechtsrahmen für das Vorsorgeprinzip*

Rath (2008) stellt fest, dass *«Prinzipien, die den Reaktionen im Sinne des Precautionary Principle einen festen Rahmen geben und näher definieren, wie geeignete Reaktionen aussehen, [...] sich in der theoretischen Literatur eher selten [finden]»*.<sup>205</sup> Die EU-Kommission schlägt in ihrer Mitteilung über die Anwendbarkeit des Vorsorgeprinzips aus dem Jahr 2000 jedoch fünf Prinzipien vor, an denen sich Massnahmen aufgrund des Vorsorgeprinzips messen lassen sollen. Diese sind:

1. der Verhältnismässigkeitsgrundsatz,
2. das Diskriminierungsverbot,
3. das Kohärenzgebot,
4. der Grundsatz der Abwägung der mit einem Tätigwerden bzw. Nicht-tätigwerden verbundenen Vor- und Nachteile,
5. der Grundsatz der Verfolgung der wissenschaftlichen Entwicklung.<sup>206</sup>

Was den Grundsatz der Verhältnismässigkeit angeht, so führt die Kommission aus, dass *«die Maßnahmen auf das angestrebte Schutzniveau zugeschnitten sein müssen. Ein Risiko lässt sich nur selten auf Null reduzieren, doch kann eine unvollständige Risikobewertung das Spektrum der Optionen wesentlich verringern, die den für das Risikomanagement Verantwortlichen zur Verfügung stehen. Ein völliges Verbot ist möglicherweise nicht in allen Fällen eine verhältnismässige Reaktion auf ein potentielles Risiko. In manchen Fällen kann es jedoch die einzig mögliche Reaktion auf ein bestimmtes Risiko sein.»*<sup>207</sup>

Zur Konkretisierung der «Rechtsfolgen» des Vorsorgeprinzips wird in der Literatur häufig zwischen dem starken und dem schwachen Vorsorgeprinzip unterschieden.<sup>208</sup>

---

<sup>205</sup> Rath (2008), S. 123.

<sup>206</sup> Europäische Kommission 2001, S. 21.

<sup>207</sup> Europäische Kommission 2001, S. 5; vgl. dazu auch Rath (2008), S. 124.

<sup>208</sup> Siehe z. B. Rippe (2001), S. 6 ff.

*In dubio pro securitate – Das starke Vorsorgeprinzip*

Bachmann<sup>209</sup> bringt die starke Lesart des Vorsorgeprinzips auf folgende Formel:

1. **«Umkehr der Beweislast.** Nicht der Staat, sondern der Befürworter (Produzent) einer riskanten Technologie muss ihre Ungefährlichkeit beweisen (wie etwa im Bereich Arzneimittel oder Lebensmittelzusätze).
2. **Betonung des Nicht-Wissens.** Das Prinzip der wissenschaftlichen Beweisbarkeit wird abgelehnt. Ökologische und biologische Zusammenhänge sind zu komplex, um mit den Mitteln der Wissenschaft vollständig erklärt werden zu können.
3. **Enthalte Dich im Zweifel!** Jede Tätigkeit, die die Umwelt oder den Menschen langfristig gesehen schwerwiegend schädigen könnte, muss verboten werden.»

Zentraler Punkt des starken Vorsorgeprinzips ist die Umkehr der Beweislast. Abweichend von der konventionellen Regel, dass der Staat bei der Einschränkung eines Grundrechts Gründe dafür anzuführen hat und diese gegebenenfalls wissenschaftlich untermauern muss, führt das Nichtwissen nach der starken Lesart nicht zu einer Handlungssperre der regulierenden Stelle. Im Gegenteil obliegt es derjenigen Person, die von einem risikobehafteten Material oder Verfahren Gebrauch machen möchte, die Ungefährlichkeit zu beweisen. An dieser Stelle sollte betont werden, dass auch Verfechter des starken Vorsorgeprinzips keine «risikofreie» Gesellschaft fordern. Die Umkehr der Beweislast bedeutet nicht, dass ein absoluter Sicherheitsnachweis erforderlich ist. Welche Kriterien erfüllt werden müssen, damit der Beweis der Ungefährlichkeit als erbracht angesehen werden kann, müsste für Nanoprodukte vielmehr eigens und gesondert bestimmt werden.<sup>210</sup> Zwingend erforderlich wäre es, dass der Inverkehrbringer eines jeden Produkts, das nanoskalige Bestandteile enthält, in einem **Zulassungsverfahren** belastbare Informationen<sup>211</sup> anführt, welche die Ungefährlichkeit des Produkts zu einem bestimmten Grad belegen; zudem betrachten

---

<sup>209</sup> Bachmann (2006), S. 85; Hervorhebungen des Autors.

<sup>210</sup> Bachmann (2007), S. 17.

<sup>211</sup> Hinsichtlich der Belastbarkeit der Informationen wäre zu klären, inwieweit die Daten vom Inverkehrbringer selbst erhoben werden dürfen oder von einem unabhängigen Dritten zu erheben sind.

viele Stimmen es als sinnvoll, ein Monitoring einzuführen, um Langzeitfolgen zugelassener Nanoteilchen überwachen zu können.

Verkürzt lässt sich das starke Vorsorgeprinzip mit der Formel «Nein, aber» umreissen: Die risikobehaftete Technologie ist verboten; der Betreiber kann jedoch den Beweis erbringen, dass sie ungefährlich ist und damit die Voraussetzungen des Verbots entfallen lassen.

### *In dubio pro libertate – Das schwache Vorsorgeprinzip*

Die **schwache** Variante des Vorsorgeprinzips fasst *Bachmann*<sup>212</sup> wie folgt zusammen:

1. «Beibehalten der Beweislast. Gemäss der allgemeinen Regel «im Zweifel für die Freiheit» darf der Staat erst dann regulierend eingreifen, wenn ihm der Nachweis der Gefährlichkeit einer Technologie oder eines Produkts gelungen ist.
2. Führe eine sorgfältige Risikoanalyse durch. Deren Ziel ist es, die Risiken einer Technologie – Wahrscheinlichkeit und Schadensausmass – wissenschaftlich zu bestimmen.
3. Sorge vor, aber handle! Auch wenn der wissenschaftliche Beweis der Ungefährlichkeit einer Technologie aussteht, ist es erlaubt, diese zu entwickeln. Allerdings hat der Staat das Recht bzw. die Pflicht, deren Befürwortern Vorsichtsmassnahmen aufzuzwingen, die die Risiken minimieren.»

Nach der schwachen Lesart des Vorsorgeprinzips ist es demnach zulässig, eine Technologie auch angesichts einer wissenschaftlichen Unsicherheit zu betreiben. Der Staat ist jedoch auch hier nicht zu Untätigkeit verdammt; er kann vielmehr **verhältnismässige Vorsichtsmassnahmen** vorschreiben, vor allem solche Massnahmen, die das Risiko für Mensch und Umwelt minimieren. Wie *Rippe* schreibt, legt das schwache Vorsorgeprinzip *«Befürwortern potentiell riskanter Produkte, Techniken oder Tätigkeiten also nur auf, technische Vorsorgemaßnahmen zu treffen und die Handlung wie ein Experiment zu verfolgen und zu*

---

<sup>212</sup> Bachmann (2006), S. 85; Hervorhebungen des Autors. Siehe auch Rath (2008), S. 128 f.



*kontrollieren*».<sup>213</sup> In Kürze besagt das schwache Vorsorgeprinzip **«Ja, aber»**: Bei überwiegendem Nutzen der Technologie soll sie betrieben werden, flankiert durch Sicherheitsmassnahmen.

### *Einwände im Schrifttum gegen das Vorsorgeprinzip*

Argumentativ untermauert wird die Ablehnung eines Moratoriums in der Regel mit der These, es sei unmöglich, wissenschaftlich zu beweisen, dass eine Substanz langfristig keine schwerwiegenden schädlichen Folgen hat. Insofern führe ein starkes Vorsorgeprinzip zu einer Lähmung und sei technologiefeindlich.<sup>214</sup> In *Rippes* Worten:<sup>215</sup> *«Sollen alle Entwicklungen verhindert werden, die zukünftig schwerwiegende und irreversible Folgen nach sich ziehen können, müsste man nahezu alles verbieten. [...] Niemand würde nach [dem starken Vorsorgeprinzip] eine Reise antreten können. Denn stets sind hohe und irreversible Schäden für Leib und Leben denkbar.»*

Die Stichhaltigkeit dieser Argumentation wird seitens der Befürworter eines starken Vorsorgeprinzips bestritten. Sie argumentieren, dieser Kritikpunkt beruhe auf einer Missinterpretation des starken Vorsorgeprinzips. Um die Hürde hin zur Zulässigkeit einer mit einem ungewissen Risiko behafteten Tätigkeit zu überschreiten, müsse keine absolute Gewissheit vorliegen, dass ein bestimmtes Produkt unschädlich ist; ausreichend sei vielmehr – wie bereits dargetan – ein bestimmtes Mass an Evidenz.<sup>216</sup> Zudem sei nicht ersichtlich, wieso im Falle der Nanotechnologie eine Politik per se unmöglich sein solle, die z. B. im Bereich des Arzneimittelrechts erfolgreich praktiziert wird.

Die Verfechter eines starken Vorsorgeprinzips erkennen jedoch an, dass eine Unterlassungspflicht ein starker Eingriff ist, der ethisch nur unter besonderen Voraussetzungen gerechtfertigt ist. Für einen solchen Eingriff bedarf es einer Situation, die man als «qualifizierte» Risikosituation bezeichnen könnte. Nach *Rippe* ist es *«falsch, das Vorsorgeprinzip so zu interpretieren, dass jede potentielle umweltschädigende Handlung verboten werden kann. [...] Der Grundsatz ‹Im Zweifel, enthalte Dich› kann nur in den Fällen angewandt werden, wo erstens der zu erwartende Schaden sehr hoch und schwerwiegend ist bzw. wo irreversib-*

---

<sup>213</sup> Rippe (2001), S. 8.

<sup>214</sup> Nachweise bei Rippe (2001), S. 9.

<sup>215</sup> Rippe (2001), S. 14.

<sup>216</sup> Rippe (2001), S. 9.

*le Folgen drohen, die bedeutende Optionen zerstören, und wo zweitens sehr gute Gründe dafür sprechen, dass diese negativen Entwicklungen eintreten.»<sup>217</sup>*

Verglichen mit der Ausgangssituation der Ungewissheit, in der das Vorsorgeprinzip zur Anwendung gelangen kann, scheinen erhöhte Anforderungen aufgestellt zu sein. *Bachmann* sieht die Voraussetzungen für eine Beweislastumkehr als erfüllt an:

*«Angesichts des Risikopotenzials zumindest bestimmter Nanopartikel und der dafür bereits vorhandenen wissenschaftlichen Indizien scheint die vom starken Vorsorgeprinzip geforderte Beweislastumkehr gerechtfertigt zu sein. [...] Bereits erhältliche Produkte mit gebundenen synthetischen Nanopartikeln sollten zwar nicht vom Markt genommen werden, da die Menge der Partikel wohl zu klein ist, um im Fall einer Freisetzung großen Schaden anrichten zu können. [...] Aber dennoch sollten diese Artikel meldepflichtig sein.»<sup>218</sup>*

Weiterhin ist ein häufiger Vorwurf gegen das Vorsorgeprinzip, dass es sich dabei um ein selektives Prinzip handelt, welches dazu anhält, nur bestimmte Risiken ins Auge zu fassen und vergleichbaren Risiken nicht zwingend auch die gleiche Aufmerksamkeit zu widmen.<sup>219</sup> Angesprochen ist der Vorwurf der **Vernachlässigung von Systemeffekten:**<sup>220</sup>

Das Vorsorgeprinzip, so wird argumentiert, verfolge einen situationsbezogenen Ad-hoc-Ansatz, welcher das anzugehende Risiko nicht in Bezug setzt zu anderen Risiken, sondern den Blickwinkel verengt auf das konkret vorliegende Problem. Das Prinzip sei konzeptionell blind gegenüber Drittrisikosituationen und zwar in zweierlei Hinsicht:

- Erstens könne das Vorsorgeprinzip als eine Art Katalysator fungieren, welcher eine gesellschaftliche Debatte aufgreift und beschleunigt und letztendlich dazu führt, dass ein bestimmtes Problem als besonders wichtig empfunden wird und andere Risikoszenarien an den Rand gedrängt wer-

<sup>217</sup> Rippe (2001), S. 14; vgl. auch Bachmann (2007), S. 19: «Wenn es vernünftige Gründe gibt anzunehmen, dass synthetische Nanopartikel [...] Mensch und Umwelt schwerwiegend schädigen können, dann ist es gerechtfertigt, die Beweislast umzukehren [...]»

<sup>218</sup> Bachmann (2007), S. 16 f.

<sup>219</sup> Rath (2008), S. 124.

<sup>220</sup> Sunstein (2005), S. 56 ff.

den, obwohl sie möglicherweise nicht minder bedrohlich sind.<sup>221</sup> Der «einseitige Fokus auf ein Risiko kann folglich [...] potentiell ein anderes inakzeptables Risiko unreguliert oder zumindest vernachlässigt lassen».<sup>222</sup>

- Zweitens wird dem Vorsorgeprinzip vorgehalten, dass es eine einseitige Risikostrategie sei. Denn es bringe Lösungen hervor, die zwar adäquat sind im Lichte des konkret angegangenen Risikos; damit sei jedoch lange nicht ausgeschlossen, dass Effekte bestehen können, die eine Drittrisiko-konstellation negativ beeinflussen.

Sandin et al. halten dieser Kritik entgegen, dass die mangelnde Berücksichtigung von Systemeffekten in der Tat ein Fehler sei. Dieser Fehler gehe jedoch weniger auf eine konzeptionelle Schwäche des Vorsorgeprinzips zurück, als auf eine schlechte Implementierung des Prinzips.<sup>223</sup> Denn das Vorsorgeprinzip schliesst nicht per se aus, ein Risiko in einen breiteren Kontext einzubetten und die Auswirkungen auf andere Politikfelder zu berücksichtigen.

Als zweiter Hauptkritikpunkt am Vorsorgeprinzip wird vorgebracht, dass es zu einem **fehlgeleiteten Einsatz von Ressourcen** führe, weil es dazu tendiere, das angegangene Risiko zu überschätzen.<sup>224</sup> Zur Verdeutlichung dieses Kritikpunkts verwendet Sunstein (2005)<sup>225</sup> die Unterscheidung zwischen «false negative» und «false positive». «False negative» bezeichnet eine Situation, in der ex ante angenommen wird, es bestehe kein Risiko, was sich jedoch rückblickend als falsch erweist. «False positive» meint hingegen die umgekehrte Situation, in der fälschlicherweise davon ausgegangen wurde, es drohe ein Risiko. Bei «false negative» tritt also ein Schaden ein, der vermeidbar gewesen wäre, während bei «false positive» Schutzvorkehrungen getroffen werden, die sich nachträglich als unnötig erweisen. Kritiker des Vorsorgeprinzips weisen an dieser Stelle darauf hin, das Prinzip führe zu einer Überstrapazierung der «False-positive»-Situation und werfen die Frage auf, weswegen dem damit verbundenen fehlgeleiteten Ressourceneinsatz per se eine geringere Bedeutung zukommen solle als der Vermeidung einer möglichen Gefahr.<sup>226</sup>

---

<sup>221</sup> Siehe dazu bereits Cross 1996, S. 862.

<sup>222</sup> Rath (2008), S. 133.

<sup>223</sup> Sandin et al., zit. nach Rath (2008), S. 139 f.

<sup>224</sup> Siehe dazu auch Shrader-Frechette (1991), S. 129 f.

<sup>225</sup> Sunstein (2005), S. 56 ff.

<sup>226</sup> Siehe Rath (2008), S. 136.

Diesem Kritikpunkt ist entgegenzuhalten, dass ein Vorrang des «false negative» eine ebenso schlechte Lösung wäre. Es sollte also weder den einem noch dem anderen per se ein Vorrang eingeräumt werden. Aus ethischer Hinsicht ist insbesondere darauf hinzuweisen, dass in der Regel der Einzelne das Risiko eines «false negative» tragen dürfte. Gibt man risikobehafteten Technologien grünes Licht und erlässt nur geringe Vorsichtsmassnahmen, so führt dies dazu, dass die Technologie relativ leicht am Markt etabliert werden kann. Ist die Technologie risikobehaftet, so tritt der eintretende Schaden an den Rechtsgütern des Einzelnen (Konsumenten/Allgemeinheit) auf. Zugespielt formuliert führt ein «false positive» also zu einem Schaden an Körper und Gesundheit, während ein «false negative» nur wirtschaftliche Konsequenzen bei den Anwendern der Technologie hat.<sup>227</sup> Möchte der Einzelne diesen Schaden nun bei demjenigen, der die Technologie zum Einsatz brachte und somit den wirtschaftlichen Vorteil daraus ziehen konnte, geltend machen, so trägt er dafür – rechtlich gesehen – die Beweislast. Faktisch liegt in der Situation des «false negative» also eine Überwälzung der Beweislast bezüglich der Schädlichkeit einer Substanz auf den Einzelnen vor. Schliesslich wird der Vorwurf erhoben, das Vorsorgeprinzip führe dazu, «dass alle Handlungen verboten werden müssten, welche zu einer Risikosituation mit einer inakzeptablen Konsequenz und einer geringeren Eintrittswahrscheinlichkeit führen».<sup>228</sup> Kritiker werfen dem Vorsorgeprinzip vor, es führe (ähnlich wie das Maximin-Prinzip) zu einer Lähmung des technischen Fortschritts. Aus rechtlicher Sicht beruht diese Kritik jedenfalls auf einer Missinterpretation des Vorsorgeprinzips: Schon die Kriterien der EU-Kommission zur Anwendung des Vorsorgeprinzips (siehe oben) zeigen, dass ein Verbot als *ultima ratio* der Ausnahmefall bleibt.

#### 11.1.4 Zwischenfazit

- 1.) Die Risikoethik bietet drei zentrale Ansätze, anhand derer eine Risikoentscheidung getroffen werden kann. Der **bayesianische Ansatz** steht in der Tradition des Utilitarismus und verfolgt das Ziel der Maximierung des Nutzens der Allgemeinheit. Eine Handlung ist ethisch richtig, sofern sie den kol-

---

<sup>227</sup> Siehe dazu Cross 1996, S. 852.

<sup>228</sup> Rath (2008), S. 138.

lektiven Erwartungsnutzen maximiert. Ziel des **Maximin**-Prinzips ist die Vermeidung des Worst-Case-Szenarios. Zu wählen ist danach diejenige Handlungsalternative, die – im schlechtesten aller denkbaren Fälle – den geringsten Schaden hervorruft. In der Regel wird der Streit um die ethischen Grenzen der Nutzung der Nanotechnologie jedoch im Kontext des **Vorsorgeprinzips** geführt.

- 2.) Es gibt zwei Lesarten des Vorsorgeprinzips. Vertreter des **starken** Vorsorgeprinzips fordern insbesondere eine Umkehr der Beweislast. Konsequenz ist, dass derjenige, der die Allgemeinheit einer neuen und risikobehafteten Technologie aussetzen möchte, zuerst den Nachweis der Ungefährlichkeit erbringen muss. Dieser Nachweis soll erbracht sein, sofern ein gewisses Mass an Beweisdichte erreicht wird; ein endgültiger und abschliessender Beweis, dass ein Produkt auch in Zukunft keine Schäden anrichten wird, wird nicht gefordert (zumal dieser Nachweis in wissenschaftlicher Hinsicht kaum zu erbringen wäre). Das **schwache** Vorsorgeprinzip belässt es hingegen bei der «traditionellen» Rollenverteilung zwischen Staat und Individuum: Möchte der Staat eine bestimmte Tätigkeit untersagen, so muss er den Beweis der Gefährlichkeit führen. Generell zulässig sind bei einer schwachen Umsetzung des Vorsorgeprinzips verhältnismässige Vorsorgemassnahmen.

## 11.2 Analyse der ethischen Debatte in der Schweiz

Grundlage für die folgende Analyse der ethischen Debatte über Nanomaterialien in der Schweiz sowie auf internationaler Ebene sind die Darstellungen zu den grundsätzlichen ethischen Strömungen in der Risikoethik und zum Vorsorgeprinzip in Kapitel 11.1. Dazu werden die Positionen der Schweizer Akteure (und ausgewählter internationaler Akteure) zu bestimmten Instrumenten analysiert. Die Instrumente wiederum werden einer schwachen oder starken Umsetzung des Vorsorgeprinzips zugeordnet.

Der Ausgangspunkt zum Meinungsstand bei der ethischen Diskussion über Nanomaterialien in der Schweiz kann nach *Bachmann*<sup>229</sup> wie folgt zusammengefasst werden:

*«In informierten Kreisen ist [...] unumstritten, dass besonders die Verwendung von ungebundenen Nanopartikeln mit Risiken für Mensch, Tier, Pflanzen und Umwelt verbunden ist. Hinsichtlich der Frage, wie diese Risiken zu gewichten sind und was daraus praktisch folgt, gibt es allerdings keine Einigkeit. Die Positionen sind freilich nicht so weit auseinander, wie man vielleicht vermuten könnte (und wie die Protagonisten selbst bisweilen zu glauben scheinen). Mit Ausnahme einer kleinen Minderheit von Interessenvertretern aus Wissenschaft und Industrie, nach deren Ansicht die beschriebenen Risiken vernachlässigbar sind, vertreten nämlich alle Parteien, seien das staatliche Stellen, Expertengremien, NGOs oder Versicherungen, die Meinung, diese Risiken seien von einer Art, dass bestimmte Vorsorgemassnahmen ethisch geboten sind. Die Auseinandersetzung dreht sich dann vor allem darum, welche Massnahmen das sind.»*

Lediglich am Rande der Diskussion steht das ethisch gebotene Schutzniveau bezüglich Forschender und Mitarbeiter in Produktionsstätten im Nanotechnologiebereich.<sup>230</sup> Zentraler ist die Diskussion der Frage, inwiefern Dritte («die Bevölkerung») sowie die Umwelt (Luft, Boden, Wasser) potenziellen Gefahren der Nanotechnologie ausgesetzt werden dürfen. Die Diktion der an der Debatte beteiligten Akteure ist an dieser Stelle bisweilen etwas unscharf. Manche diskutieren das Problem unter dem Aspekt der **Beweislastumkehr**, andere bemühen das Konzept des **Moratoriums** bzw. ein **Inverkehrbringungsverbot** für Nanomaterialien generell oder für bestimmte Anwendungsfälle. Der Unterschied in der Sache dürfte jedoch gering sein, da eine Beweislastumkehr faktisch zumindest so lange zu einem Stillstand führt, bis der Risikoexponent die Ungefährlichkeit beweisen kann. Umgekehrt verfechten auch diejenigen, die nach einem Moratorium rufen, in der Regel nicht die unbedingte Einstellung der Nanotechnologie, sondern nur deren Stopp, bis sichergestellt ist, dass eine Gefahr nicht besteht. Die Debatte um ein Moratorium für Nanomaterialien wurde in einer frühen Phase durch internationale Stakeholder geprägt, insbesondere durch die kanadische Nichtregierungsorganisation ETC Group sowie die englische Royal Society and

---

<sup>229</sup> Bachmann (2006), S. 84.

<sup>230</sup> Hierzu sei verwiesen auf Bachmann (2007), S. 15 f.

Royal Academy of Engineering (RS/RAE). Als international anerkannte Institutionen haben diese nicht nur die internationale Debatte, sondern auch die Debatte in der Schweiz beeinflusst.<sup>231</sup>

Die **ETC Group** streitet für ein Moratorium unter Verweis auf das starke Vorsorgeprinzip:

*«Given the concerns raised over nanoparticle contamination in living organisms, ETC Group proposes that governments declare an immediate moratorium on commercial production of new nanomaterials and launch a transparent global process for evaluating the socioeconomic, health and environmental implications of the technology.»*<sup>232</sup>

Entlang der Leitlinien des starken Vorsorgeprinzips macht die ETC Group die Aufhebung des Moratoriums davon abhängig, dass der Nachweis erbracht wird, dass ein bestimmtes Nanoteilchen für Mensch und Natur unschädlich ist. Den Beweis soll dabei der Befürworter der Nanotechnologie erbringen müssen. Zu betonen ist nochmals, dass auch die nanokritische ETC Group keinen endgültigen Verzicht auf die Nanotechnologie fordert.<sup>233</sup>

Die britische **RS/RAE** lehnt hingegen ein Moratorium ab. Ihrer Ansicht nach mangelt es an den dafür erforderlichen Voraussetzungen:<sup>234</sup>

*«For a moratorium to be justified there would need to be either:*

- (i) a sufficiently robust body of scientific evidence already available to politicians and regulators to warrant such a major intervention; or*
- (ii) some kind of consensus among key protagonists that a moratorium should be imposed on a precautionary basis, given legitimate and cogently argued concerns about the risk of severe or irreversible damage to human health or the environment as a direct consequence of the continuing development of nanomaterials.»*

---

<sup>231</sup> Vgl. z. B. Bachmann (2006), S. 85 ff.

<sup>232</sup> Vgl. ETC Group 2003, S. 72.

<sup>233</sup> Bachmann (2006), S. 87.

<sup>234</sup> RS/RAE (2004), S. 77.

Vielmehr fordert die RS/RAE, ein schwaches Vorsorgeprinzip anzuwenden; so verlangt sie insbesondere die Intensivierung der Risikoforschung und Massnahmen zur Risikominimierung.

In der Schweiz strebt **Greenpeace Schweiz** generell ein Moratorium für Nanomaterialien und Nanoprodukte an.<sup>235</sup> Die **Schweizerische Arbeitsgruppe Gentechnologie (sag)** will ein Moratorium für Nanomaterialien im Lebensmittelbereich, bei Gebrauchsgegenständen und in der Landwirtschaft.<sup>235</sup> Als Bedingungen für die Beendigung des Moratoriums wird vorausgesetzt, dass «nanospezifische Regelungen in Kraft sind und Daten zur Risikobewertung vorliegen». Ferner fordert die sag, dass den Konsumenten die Wahlfreiheit gegeben wird, zwischen Produkte mit Nanomaterialien und ohne zu entscheiden. **Pro Natura** verlangt, «dass der Einsatz von Nanotechnologie in der Landwirtschaft so lange einem Moratorium unterstellt bleibt, bis deren ökologische Auswirkungen bekannt sind».<sup>235</sup> Aus der Sicht des Biolandbaus spricht sich **Bio Suisse** gegen jeglichen Einsatz von synthetischen Nanopartikeln in Bioprodukten mit dem Label der «Knospe» aus.<sup>236</sup> Das Forschungsinstitut **FIBL**<sup>237</sup> geht davon aus, dass bereits nach derzeitiger Rechtslage der Einsatz von Nanomaterialien und Nanopartikeln in der Produktion von biologischen Lebensmitteln verboten ist. Eine Ablehnung der Nanotechnologie in der ökologischen Lebensmittelverarbeitung fordert auch **Bio Austria** in Österreich, der Bund Ökologische Lebensmittelwirtschaft (**BÖLW**) in Deutschland<sup>238</sup> sowie die britische **Soil Association** in England.

Einen «Stopp für den Einsatz synthetischer Nanomaterialien in umweltoffenen und verbrauchernahen Anwendungen» fordern **Friends of the Earth Europe (FoEE)** bzw. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (**BUND**)<sup>239</sup>. Zu dieser Kategorie von Produkten zählt BUND: Lebensmittel und deren Zusatzstoffe, Lebensmittelverpackungen sowie Nahrungsergänzungsmittel, Küchenutensilien einschliesslich Kühlschränken, Kinderprodukte wie Teddybären sowie Pestizide und Dünger, Kosmetika, Textilien, Farben und Lacke für die private Anwendung, Waschmaschinen, Reinigungs- und Imprägniersprays. Ein Ende

---

<sup>235</sup> sag (2011), S. 14.

<sup>236</sup> Bio Suisse (2009).

<sup>237</sup> FiBL (2009), S. 4.

<sup>238</sup> Vgl. BOELW, unter: [www.boelw.de/.../Nanotechnologie\\_Stellungnahme\\_110623.pdf](http://www.boelw.de/.../Nanotechnologie_Stellungnahme_110623.pdf) (Abruf am 14.5.2012).

<sup>239</sup> Vgl. die BUND Broschüre «Nanomaterialien im Alltag», [www.bund.net/themen\\_und\\_projekte/nanotechnologie/nanomaterialien/](http://www.bund.net/themen_und_projekte/nanotechnologie/nanomaterialien/) (Abruf am 13.5.2012).



des Verbots wollen FoEE und BUND von den folgenden Massnahmen abhängig machen:

- dem Vorliegen von Risikobewertungsdaten, welche die Sicherheit vor Gesundheits- und Umweltschäden belegen;
- dem Inkrafttreten wirksamer nanospezifischer Regelungen sowie
- der Möglichkeit der Verbraucher, zwischen Produkten mit und ohne Nanomaterialien zu wählen (Wahlfreiheit).

In die gleiche Richtung wie FoEE und BUND geht die Forderung der **Stiftung Konsumentenschutz (SKS)** und der **Fédération romande des consommateurs (FRC)**, wonach die Industrie beweisen müsse, «dass jene Substanzen, die sie auf den Markt wirft, wirklich harmlos sind. Besonders, was kosmetische Produkte betrifft – oder generell all jene, die in Kontakt mit dem menschlichen Körper kommen.»<sup>240</sup>

Der Schweizer **publifocus** «Nanotechnologien und ihre Bedeutung für Gesundheit und Umwelt» kam im Jahr 2006 im Auftrag von TA-SWISS zu folgendem Fazit (TA-SWISS 2006):

*«Obschon etwa verschiedentlich Parallelen zur Gentechnik gezogen wurden, wurde in keiner Diskussionsrunde der Ruf nach einem Moratorium laut; etliche Teilnehmende waren vielmehr der Ansicht, die Schweiz solle ihre Spitzenposition in der nanotechnologischen Forschung nutzen, um auch bei der Risikoforschung und bei Fragen der Regulierung und international wegweisend zu sein.»*<sup>241</sup>

Ähnlich äussert sich der **Bundesrat** im Rahmen einer Interpellation im Jahr 2010.<sup>242</sup>

*«Nach Ansicht des Bundesrates würde die Verhängung eines Moratoriums für Nanopartikel in Konsumgütern klar die Innovation behindern und der Schweiz*

---

<sup>240</sup> Vgl. die Aussagen von Huma Khamis (Leiterin des Dossiers Nanotechnologie beim Westschweizer Konsumentenverband) in «Nanotechnologie unter der Lupe der Konsumenten» vom 11.11.2011, unter: [www.swissinfo.ch/ger/specials/jahr\\_der\\_chemie/Nanotechnologie\\_unter\\_der\\_Lupe\\_der\\_Konsumenten.html?cid=31515140](http://www.swissinfo.ch/ger/specials/jahr_der_chemie/Nanotechnologie_unter_der_Lupe_der_Konsumenten.html?cid=31515140) (Abruf am 15.5.2012).

<sup>241</sup> TA-SWISS (2006), S. 7.

<sup>242</sup> Interpellation 10.3825 «Sicherheit und Deklaration von Nanopartikeln»(Graf) vom 1.10.2010.

*wichtige technologische Fortschritte vorenthalten. Die Fragen, die durch die Nanotechnologien aufgeworfen werden, sollten differenziert angegangen werden. Somit erscheint ein Moratorium nicht angebracht. Während bestimmte Materialien und Anwendungen ein Risiko darstellen können, gilt dies nicht allgemein für alle Verwendungszwecke und alle Nanopartikel in Konsumgütern. Daher muss im Einzelfall eine Nutzen-Risiko-Analyse vorgenommen werden, um ein hohes Schutzniveau zu gewährleisten, ohne jedoch die zahlreichen positiven Aspekte ausser Acht zu lassen, die mit dieser Technologie verbunden sind, wie die Entwicklung von Materialien mit neuen Eigenschaften oder von neuen Therapien oder die Verringerung des Volumens der erforderlichen Rohstoffe.»*

Sinngemäß gegen ein Moratorium spricht sich auch der Verband der Schweizer Unternehmen **economiesuisse** aus, indem er auf das Marktpotenzial der Nanotechnologie hinweist.<sup>243</sup> Auch die **Akademien der Wissenschaften Schweiz** sprechen sich implizit gegen ein Moratorium aus. Vielmehr sind nach ihnen die Chancen für eine nachhaltige Entwicklung und für den Forschungs- und Industriestandort Schweiz zu unterstützen sowie die Risiken sorgfältig abzuklären.<sup>244</sup> Die Schweizer Rückversicherungsgesellschaft **Swiss Re** bewegt sich zwischen den Grenzen eines starken und schwachen Vorsorgeprinzips. In ihrem Bericht aus dem Jahr 2004 schreibt die Swiss Re:<sup>245</sup>

*«While one does not want to take costly protective measures that are not needed – especially if they might have a negative effect on continuing economic development – neither people nor the environment ought to be burdened with dangers that could have been avoided. [...]*

*The burden of research work must be shared by several parties. Neither industrial companies nor public institutions are able to acquire sufficient capacity to investigate these questions on their own. Although some individual institutions and companies are already conducting their own risk analyses and financing*

<sup>243</sup> Die economiesuisse bezieht zwar keine ausdrückliche Position. Nach ihrer Einschätzung wird die Nanotechnologie vielfältige Auswirkungen auf die Wirtschaft und die Gesellschaft haben und es sind Fortschritte bei der Entwicklung neuer Materialien, beim Energiesparen oder in der Spitzenmedizin und bei den Arzneimitteln zu erwarten  
[www.economiesuisse.ch/de/PDF%20Download%20Files/Studie-economiesuisse\\_FuE-Privatwirtschaft\\_2010.pdf](http://www.economiesuisse.ch/de/PDF%20Download%20Files/Studie-economiesuisse_FuE-Privatwirtschaft_2010.pdf) (Abruf am 18.5.2012).

<sup>244</sup> Akademien der Wissenschaften Schweiz.

<sup>245</sup> Swiss Re (2004), S. 47 f.

*them parallel to product development, it cannot be the task of any individual company to bear the burden of the certificate of non-objection alone. Furthermore, the efforts of individuals are hardly going to be enough to obtain a comprehensive picture of the risk landscape.»*

Neben der sehr einschneidenden und kontrovers diskutierten Frage, ob es für Nanomaterialien ein Moratorium/Verbot bzw. eine Umkehr der Beweislast geben soll, lässt sich die Diskussion um Vorsorgemassnahmen noch detaillierter anhand der im Folgenden aufgeführten **einzelnen rechtlichen Instrumente** führen. Die Instrumente werden grob in zwei Klassen eingeteilt: solchen mit einem stärkeren Eingriff in die Vermarktung von Nanomaterialien und solchen mit einem weniger starken Eingriff.

Bei den Instrumenten mit **stärkerem Eingriff** in die Vermarktung von Nanomaterialien lassen sich die Positionen in der Schweiz wie folgt zuordnen:

- Behandlung von Nanomaterialien als neue «Substanzklasse» sowie Einordnung als Neustoffe im Chemikalienrecht (sag<sup>246</sup>)
- Produktverbote für Anwendungen, die zu einer gefährdenden Exposition von Mensch und Umwelt führen können (sag<sup>247</sup>)
- Generelle Deklarationspflicht für Nanomaterialien:<sup>248</sup>
  - pro: sag<sup>247</sup>, Stiftung Konsumentenschutz (SKS)<sup>249</sup>, FRC und BUND
  - kontra: Akademien der Wissenschaften Schweiz<sup>250</sup>, zurückhaltend bislang die Schweizer Bundesregierung<sup>251</sup>

<sup>246</sup> sag (2011), wobei ein eigenes spezifisches Nanotechnologierecht geschaffen werden soll.

<sup>247</sup> sag (2011).

<sup>248</sup> Eine generelle Deklarationspflicht für Nanomaterialien in Produkten wird von vielen Akteuren als Warnhinweise verstanden und weniger als Information und ist deshalb in dieser Darstellung den stärkeren Eingriffen zugeordnet.

<sup>249</sup> Die Stiftung Konsumentenschutz SKS fordert eine strenge Beachtung des Vorsorgeprinzips gemäss Schweizer Umweltrecht und verlangt, dass gerade bei Nahrungsmitteln und Nahrungsmittelverpackungen eine Deklarationspflicht eingeführt wird, <http://konsumentenschutz.ch/kernthemen/lebensmittel/nanotechnologie/index.html> sowie <http://konsumentenschutz.ch/medienmitteilungen/archive/2010/03/12/klare-regeln-fuer-die-nanotechnologie-notwendig.html> (Abruf am 18.5.2012).

<sup>250</sup> Akademien der Wissenschaften Schweiz.

<sup>251</sup> BAFU/BAG (2007).

Zu den **weniger starken Eingriffen** in die Vermarktung von Nanomaterialien können gezählt werden:

- Schaffung einer Marktübersicht über Nanomaterialien und Produkte, die Nanomaterialien enthalten (sag<sup>247</sup>, FRC)
- Spezifische Deklarationspflichten für Lebens- und Futtermittel (Bio Suisse<sup>252</sup>, SKS) oder in Verpackungsmaterialien und Kosmetikprodukten (SKS<sup>253</sup>) sowie aller Produkte, die in Kontakt mit der Haut kommen (FRC)
- Monitoring der Gesundheits- und Umweltauswirkungen von Nanomaterialien (IRGC<sup>254</sup>)
- Vorsorgeprinzip im Arbeitsschutz anwenden (Novartis, VCI)
- Rücknahmemöglichkeiten für Nanomaterialien in Lebensmitteln und Lebensmittelverpackungen schaffen (IRGC<sup>255</sup>, sag<sup>247</sup>)
- Einstufungs- und Kennzeichnungskriterien für Nanopartikel im Chemikalienrecht (Schweizer Bundesregierung<sup>256</sup>)
- Unabhängige und integrierte Risikoforschung (ELSI-Forschung, Akademien der Wissenschaften Schweiz<sup>257</sup>) bzw. «generell» Risikoforschung (GEN SUISSE<sup>258</sup>)
- Freiwillige Nutzung eines «Vorsorgerasters für synthetische Nanomaterialien» (BAG/BAFU<sup>259</sup>)

---

<sup>252</sup> Bio Suisse (2009).

<sup>253</sup> <http://konsumentenschutz.ch/medienmitteilungen/archive/2010/03/12/klare-regeln-fuer-die-nanotechnologie-notwendig.html> (Abruf am 18.5.2012).

<sup>254</sup> IRGC (2009), S. 33 empfiehlt «[...] a risk management strategy of precautionary vigilance, [...] which includes [...] containment of effects in terms of space and time (to make sure that nanoscaled materials can be removed from the food processing stream if more severe risks become visible) [...]».

<sup>255</sup> IRGC (2009), S. 33 empfiehlt «[...] a risk management strategy of precautionary vigilance, which includes strict monitoring of effects [...]».

<sup>256</sup> BAFU/BAG (2007).

<sup>257</sup> Akademien der Wissenschaften Schweiz (2008).

<sup>258</sup> Siehe die Homepage von GEN SUISSE: [www.gensuisse.ch/de/themen/nanobiotechnologie](http://www.gensuisse.ch/de/themen/nanobiotechnologie) (Abruf am 27.4.2012).

<sup>259</sup> BAFU/BAG (2011).

- Freiwillige «codes of best practices»:
  - pro: Interessengemeinschaft Detailhandel Schweiz (IG DHS)<sup>260</sup>
  - kontra: sag

## 11.3 Vergleich der Debatte um Nanomaterialien mit der Gentechnikdebatte

In diesem Abschnitt wird die Gentechnikdebatte in der Schweiz mit der Debatte um die Nutzung von Nanomaterialien in Konsumentenprodukten unter den folgenden Gesichtspunkten verglichen:

### 11.3.1 Bekanntheitsgrad und Einstellung in der Bevölkerung

Der Bekanntheitsgrad gentechnisch veränderter Lebensmittel in der Schweiz ist mit 89 Prozent sehr hoch.<sup>261</sup> Dies ist ein Resultat des öffentlichen Diskussionsprozesses zu Gentechnik, der in der Schweiz seit Beginn der 90er-Jahre wegen unterschiedlicher Volksabstimmungsinitiativen sehr intensiv geführt wurde.<sup>262</sup> Zudem wurde insbesondere im Vorfeld der Volksabstimmung am 27. November 2005 über die Volksinitiative «Für Lebensmittel aus gentechnikfreier Landwirtschaft» sehr sachlich diskutiert.

Nach der Eurobarometerumfrage 2010 halten 52 Prozent der Schweizer gentechnisch veränderte Lebensmittel für nicht förderlich für ihre Wirtschaft.<sup>263</sup> Im Hinblick auf Nachhaltigkeitsaspekte von gentechnisch veränderten Lebensmitteln bewerten etwas mehr als die Hälfte der Schweizer (54 Prozent) diese Lebensmittel für nicht gut für ihre Familie,<sup>264</sup> 69 Prozent sehen sie als bedenklich für künftige

---

<sup>260</sup> [www.igdhs.ch/archiv/newsletter200901.html](http://www.igdhs.ch/archiv/newsletter200901.html).

<sup>261</sup> Eurobarometer (2010), S. 15.

<sup>262</sup> Bonfadelli et al. (2007).

<sup>263</sup> Eurobarometer (2010), S. 21.

<sup>264</sup> Eurobarometer (2010), S. 23.

ge Generationen an<sup>265</sup> und 64 Prozent sind der Meinung, dass diese Lebensmittel eine Belastung für die Umwelt darstellen.<sup>266</sup> Schliesslich sind 62 Prozent der Schweizer der Ansicht, dass gentechnisch veränderte Lebensmittel für einige Menschen Vorteile bringen, für andere aber ein Risiko darstellen.<sup>267</sup>

Nach der Eurobarometerumfrage ist der Bekanntheitsgrad der Nanotechnologie in der Schweizer Bevölkerung im Vergleich zu anderen europäischen Ländern mit 76 Prozent sehr hoch und bleibt hinter dem von gentechnisch veränderten Lebensmitteln in der Schweiz nur leicht zurück.<sup>268, 269</sup>

Nach der Umfrage im Jahr 2010 halten 52 Prozent der Schweizer die Nanotechnologie für förderlich für die Wirtschaft.<sup>270</sup> Im Gegensatz zur Gentechnik ergibt sich ein positives Bild. Im Hinblick auf Nachhaltigkeitsaspekte der Nanotechnologie bewerten 42 Prozent der Schweizer die Nanotechnologie als gut für ihre Familie,<sup>271</sup> 39 Prozent sehen sie als bedenklich für künftige Generationen an<sup>272</sup> und 42 Prozent sind der Meinung, dass diese eine Belastung für die Umwelt darstellen.<sup>273</sup> Bei den Nachhaltigkeitsaspekten schneiden die Nanotechnologien nach dem Eurobarometer 2010 im Vergleich zur Gentechnik besser ab, gleichwohl wird von ca. 40 Prozent der Bevölkerung die Nachhaltigkeit negativ bewertet. Wie aktuelle Zahlen aus dem Jahr 2011 belegen, steigt dabei die Erwartung von Risiken der Nanotechnologie bei den Konsumenten und Konsumentinnen. 67 Prozent befürchten Gesundheitsrisiken (im Jahre 2008 waren es noch 55 Prozent); 40 Prozent sehen Risiken für die Umwelt (im Jahr 2008 waren es noch 29 Prozent).<sup>274</sup> Schliesslich sind 57 Prozent der Schweizer der Ansicht, dass die Nanotechnologie für einige Menschen Vorteile bringt, für andere aber ein Risiko darstellt.<sup>275</sup> Hier ähnelt sich das Bild der Wahrnehmung zur Gentechnik.

---

<sup>265</sup> Eurobarometer (2010), S. 26.

<sup>266</sup> Eurobarometer (2010), S. 35.

<sup>267</sup> Eurobarometer (2010), S. 28.

<sup>268</sup> Eurobarometer (2010), S. 38.

<sup>269</sup> Der Bekanntheitsgrad der Nanotechnologie bei den Europäern liegt im Durchschnitt bei nur 46 Prozent.

<sup>270</sup> Eurobarometer (2010), S. 46.

<sup>271</sup> Eurobarometer (2010), S. 48.

<sup>272</sup> Eurobarometer (2010), S. 50.

<sup>273</sup> Eurobarometer (2010), S. 57.

<sup>274</sup> Grobe et al. (2012).

<sup>275</sup> Eurobarometer (2010), S. 28.

### 11.3.2 Moratorium

Seit dem Jahr 2005 ist in der Schweiz aufgrund eines Volksentscheids ein Moratorium in Kraft, wonach keine gentechnisch veränderten Tiere gehalten oder Pflanzen in Verkehr gebracht werden dürfen. Das Moratorium galt zunächst fünf Jahre und wurde vom Parlament um weitere drei Jahre bis 2013 verlängert. Im Februar 2012 wurde eine von Nationalrat Markus Ritter eingebrachte Motion zur Verlängerung des Moratoriums von 121 Ratsmitgliedern unterschrieben. Am 15. August 2012 hat die nationalrätliche Kommission für Wirtschaft und Abgaben (WAK-N) den Bericht über die Agrarpolitik 2014–2017 gutgeheissen, der ein Moratorium bis Ende 2017 vorsieht.<sup>276</sup> Auf Antrag von Nationalrat Hansjörg Walter wurde die Thematik der Motion Ritter anlässlich der Prüfung der Agrarpolitik 2014–2017 aufgenommen, die eine Verlängerung des Moratoriums bis Ende 2017 vorsieht. Am 26. September 2012 stimmte der Nationalrat der Verlängerung des Moratoriums um vier Jahre zu, am 12. Dezember 2012 folgte der Ständerat dem Entscheid des Nationalrats. Zahlreiche Stakeholder in der Schweiz sehen bei der Anwendung von Nanomaterialien Chancen und Risiken und sprechen sich explizit oder implizit gegen ein Moratorium oder eine Beweislastumkehr aus. Hingegen wird von einer grossen Zahl von Schweizer Stakeholdern (Ökologische Landbau, SKS<sup>277</sup> und FoEE) ein generelles oder anwendungsbezogenes Moratorium bzw. die Umkehr der Beweislast gefordert.

### 11.3.3 Deklarationspflicht und Wahlfreiheit

Bei der Gentechnik wurde das Argument der Wahlfreiheit für die Konsumentinnen und Konsumenten von der Politik in der Schweiz und der EU aufgenommen. Ziel ist es, die Konsumentinnen und Konsumenten vor Täuschung zu schützen und ihnen die Wahlfreiheit zwischen herkömmlichen und gentechnisch veränderten Lebensmitteln zu ermöglichen. Zur Zielerreichung wurde für die Verwendung von GVO-Erzeugnissen in Lebensmitteln in der Schweiz eine umfassende Kennzeichnungspflicht vorgeschrieben. Grundsätzlich sind alle Erzeugnisse, d. h.

---

<sup>276</sup> Siehe [www.parlament.ch/d/mm/2012/seiten/sda-wak-n-2012-08-15.aspx](http://www.parlament.ch/d/mm/2012/seiten/sda-wak-n-2012-08-15.aspx) (abgerufen am 22.11.2012).

<sup>277</sup> Die FRC fordert kein Moratorium.

Lebensmittel, Zusatzstoffe und Verarbeitungshilfsstoffe, die von einem GVO stammen, zu kennzeichnen.

Auch bei der Verwendung von Nanomaterialien wird von Schweizer Stakeholdern die Wahlfreiheit eingefordert. Als Mittel wird ebenfalls eine Kennzeichnung der Produkte diskutiert. Zudem wird über Nanoproduktregister als Mittel zur Verbraucherinformation diskutiert. In der Schweiz existieren bislang keine nanospezifischen Kennzeichnungsvorschriften; für Kosmetikprodukte werden sie diskutiert. In der EU wird in den nächsten Jahren die Kennzeichnung für Kosmetika und Lebensmittel in der Zutatenliste mit dem Zusatz «(nano)» hinter der betreffenden Zutat eingeführt.

#### **11.3.4 Nutzen-Risiken-Abwägung**

In gentechnisch veränderten Lebensmitteln sieht die Mehrheit der Schweizer Bevölkerung keinen Nutzen, sondern ein Risiko für die Gesellschaft (siehe die Ergebnisse der Eurobarometerumfrage 2010 in Abschnitt 10.3). Die ethische Akzeptanz ist bei gentechnisch veränderten Lebensmitteln gering. Gentechnisch veränderte Nutzpflanzen gelten bei den Konsument/innen als mässig nützlich, aber als sehr risikoreich (Bonfadelli et al. 2007). So wird der Nutzen von gentechnisch veränderten Lebensmitteln bei den Firmen gesehen, die das Saatgut vermarkten, während die Risiken die Konsument/innen und die Umwelt zu tragen haben (Marris et al. 2001). Die Nutzen-Risiken-Bewertung fällt bei der Nanotechnologie nach der Eurobarometerumfrage nicht so schlecht aus wie bei der Gentechnik (s. Kapitel 10.3) und ergibt ein gleich starkes Bild der Bewertung von Chancen und Risiken.

#### **11.3.5 Ergebnis zum Vergleich zwischen der ethischen Debatte bei Nanomaterialien und der Gentechnik**

Es besteht weitgehend Übereinstimmung zwischen allen Stakeholdern, dass die Anwendung von Nanomaterialien unter Anwendung von Vorsorgemassnahmen erfolgen soll. Dabei sind im Unterschied zur Gentechnik die Stimmen für ein generelles Moratorium für Nanomaterialien gering. Befürwortet wird vielmehr von



einigen Stakeholdern ein Moratorium der Anwendung von Nanomaterialien in konsumentennahen Produkten oder umweltoffenen Anwendungen. Mehrere Stakeholder beziehen gegen ein Moratorium Stellung und fordern ein Fortschreiten der Forschung wie auch der Vermarktung von Nanoprodukten, solange eine Situation der Unsicherheit bezüglich des Schädigungspotenzials einzelner Materialien besteht. Begleitet werden soll diese Entwicklung durch eine fortschreitende Risikermittlung (Risikoforschung) und -bewertung.

Ebenso wie bei der Gentechnik wird von einzelnen Stakeholdern gefordert, den Konsumenten die Wahlfreiheit zwischen Produkten mit und ohne Nanomaterialien zu geben. Dazu soll eine (generelle) Deklarationspflicht der Nanoprodukte eingeführt werden.

Bei der Einschätzung des Nutzens von Nanomaterialien ergibt sich ein sehr heterogenes Bild. Während von Stakeholdern aus der Wirtschaft und Forschung der Nutzen der Nanotechnologie für die Wirtschaft, Forschung und Förderung der Nachhaltigkeit in der Schweiz hervorgehoben wird, wird der Nutzen für die Konsumenten von Stakeholdern aus dem Konsumenten- und Umweltbereich in Zweifel gezogen.

## 11.4 Schlussfolgerungen

Nunmehr wird diskutiert, welche der beschriebenen Grundströmungen in der Risikoethik als Entscheidungshilfe für die staatliche Regulierung von Nanomaterialien angewendet werden sollte.

Legt man bei der Regulierung der Vermarktung von Nanomaterialien den bayesianischen Ansatz zugrunde, ist das Inverkehrbringen von Nanomaterialien ethisch richtig, sofern dies den Erwartungsnutzen der Allgemeinheit maximiert. Für eine staatliche Regulierung des Inverkehrbringens von Nanomaterialien ist der bayesianische Ansatz nicht empfehlenswert, da er eine situationsbezogene Abwägung erfordert und keine abstrakt-generelle Normierung von Handlungspflichten erlaubt. Er kollidiert mit rechtsstaatlichen Grundsätzen wie dem der Rechtssicherheit und dem des Vertrauensschutzes der Inverkehrbringer, da sie nicht ohne Weiteres erkennen können, wann sie mit einem Nanomaterial den Erwartungsnutzen maximieren. Zudem besteht die Gefahr, dass das Recht auf körperliche Unversehrtheit verletzt wird, wenn die Verwendung eines Nanomaterials für die Allgemeinheit einen hohen Nutzen verspricht, aber für einzelne

Personen oder die Umwelt Schäden hervorrufen kann. So könnte beispielsweise die Anwendung von Silber-Nanopartikeln in Konsumgütern einen hohen Nutzen für die Allgemeinheit versprechen, weil sich durch die antibakterielle Wirkung das Ansteckungsrisiko für die Allgemeinheit vermindern könnte. Erkrankt ein Mensch an einer bakteriellen Infektion und wirken silberhaltige Antibiotika bei ihm nicht, weil die Bakterien Resistenzen gebildet haben, so wäre nach dem bayesianischen Ansatz nicht klar, ob dies einer Anwendung von Silber-Nanopartikeln in Konsumgütern widerspricht oder nicht.

Nach dem Maximin-Prinzip müsste der Gesetzgeber die Verwendung eines Nanomaterials so regulieren, dass das grösste vorstellbare Schadensausmass vermieden wird (Vermeidung des Worst-Case-Szenarios). Im Fall eines Nanopartikels, der zwar als freier Partikel gesundheitsgefährdend ist, aber als solcher nicht in einem Produkt vorliegt, wäre das Inverkehrbringen des Produkts nach dem Maximin-Prinzip zu untersagen. Da die Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts bei dem Prinzip keinen Eingang in die Risikobetrachtung findet, kann als Worst-Case-Szenario nicht ausgeschlossen werden, dass der Partikel freigesetzt wird und die Gesundheit schädigt. Die Orientierung des Worst-Case-Szenarios am möglichen Schadensausmass unter Ausserachtlassung seiner Eintrittswahrscheinlichkeit würde die Verwendung von Nanomaterialien wohl weitestgehend unterbinden.

Bei der staatlichen Regulierung von Nanomaterialien sollte sich der Gesetzgeber vom Vorsorgeprinzip als einer umsetzungsorientierten Entscheidungshilfe im Bereich der Risikoethik leiten lassen. Denn das Vorsorgeprinzip eröffnet einerseits staatliche Handlungsoptionen beim Vorliegen eines Besorgnisanlasses – und damit auch ohne den Nachweis einer schädlichen Wirkung von Nanomaterialien. Andererseits bietet es provisorische Antworten, die – mit zunehmender wissenschaftlicher Erkenntnis – revidiert und angepasst werden können; also die Regulierung eines schrittweisen Vorgehens ermöglichen. Ob der Gesetzgeber sich von einem starken oder schwachen Vorsorgeprinzip leiten lassen soll, ist von dem konkreten Nanomaterial abhängig zu machen.

## 12 Darstellung und Bewertung des bestehenden Rechtsrahmens in der Schweiz

In wissenschaftlichen Untersuchungen und Stellungnahmen wird darauf hingewiesen, dass der bestehende Rechtsrahmen für die Schweiz<sup>278</sup> Nanomaterialien «prinzipiell» reguliert. Gleichzeitig wird auch betont, dass neuartige Eigenschaften von Nanomaterialien auch neue potenzielle Risiken für Mensch und Umwelt bergen können. Die bestehenden Rechtsvorschriften müssten deshalb durch nanospezifische Regelungen angepasst oder durch untergesetzliche Rechtsvorschriften ergänzt werden. Dieser Anpassungsprozess ist in der Schweiz oder auch in der EU<sup>279</sup> im Gange. Der Fahrplan für die Anpassung des Rechtsrahmens in der Schweiz wird durch den Aktionsplan «Synthetische Nanomaterialien» aus dem Jahr 2008<sup>280</sup> vorgegeben, der entlang des Lebensweges von Nanomaterialien und Nanoprodukten den nanospezifischen Regelungsbedarf aufzeigt. Die Schaffung eines regulatorischen Rahmens soll in folgenden Stufen erfolgen:

- In der ersten Stufe soll kurz- und mittelfristig die Eigenverantwortung der Industrie durch verschiedene freiwillige Instrumente gestärkt werden, die von den Bundesämtern BAFU, BAG und SECO unter Einbeziehung von Stakeholdern erarbeitet wurden, aber keinen rechtlich verbindlichen Charakter haben.<sup>281</sup> Es sind dies ein Vorsorgeraster, Vollzugshilfe, Selbstkontrolle, Unterstützung von privatwirtschaftlichen Vereinbarungen (Codes of Conduct), Leitfaden für nanospezifische Sicherheitsdatenblätter, bessere Informationen für Konsument/innen und die Wegleitung Entsorgung.
- In der zweiten Stufe sollen mittel- und langfristig rechtliche Rahmenbedingungen für einen sicheren Umgang mit synthetischen Nanomaterialien er-

---

<sup>278</sup> BAFU/BAG (2007), S. 121.

<sup>279</sup> Für die EU: EC (2012).

<sup>280</sup> BAFU/BAG (2007), S. 120 ff.

<sup>281</sup> Zu den Wirkungen im Zusammenhang mit Sorgfaltspflichten und Produkthaftung, siehe Kapitel 14.3.

arbeitet werden, die über die heutigen Bestimmungen hinausgehen und mit der Rechtsentwicklung im Ausland, insbesondere der EU, abgestimmt werden. Es ist dabei zu erwarten, dass die bisherige Praxis der nanospezifischen Anpassung der Schweizer Vorschriften im Chemikalien- und Produktrecht im Wege des autonomen Nachvollzugs bzw. der Übernahme selektiver Regelungen beibehalten wird.<sup>282</sup>

Der Rechtsrahmen in der Schweiz entlang des Lebenswegs von Nanomaterialien und Nanoprodukten berührt die unterschiedlichsten stoffrechtlichen und produktrechtlichen Vorschriften, Rechtsvorschriften zum Schutz der Arbeitnehmer/innen oder zum Schutz der Umwelt sowie weitere Rechtsbereiche, wie z. B. das Produkthaftungsrecht. Bei der Fülle der zu untersuchenden Rechtsvorschriften können im Rahmen der Studie nur einige Bereiche vertieft untersucht werden, die sich aus dem Zwischenbericht des Bundesrates vom 25.04.2012 herleiten. Der Zwischenbericht hatte das Ziel, die Umsetzung des Aktionsplans in dem Zeitraum von 2008 bis 2011 zu bewerten und hat die folgenden Vertiefungsfelder für die nächste Periode bis 2015 beschlossen:<sup>283</sup>

- Schaffung methodischer Grundlagen zur Prüfung von Nanomaterialien
- Schaffung der Rahmenbedingungen für einen verantwortungsvollen Umgang mit synthetischen Nanomaterialien
- Kommunikation und Förderung des öffentlichen Dialogs über Chancen und Risiken der Nanotechnologie

Der Zwischenbericht kommt für die Schweiz zu dem Fazit, dass auch im Jahr 2012 «*die Voraussetzungen für eine nanospezifische Ergänzung der bestehenden rechtlichen Anforderungen an die Prüfung und Beurteilung von Nanomaterialien [...] nach wie vor nicht gegeben [ist]*».<sup>283</sup> Dies wird mit den bislang fehlenden methodischen Voraussetzungen begründet. An diesen wird in der OECD WPMN in verschiedenen Arbeitsgruppen seit sechs Jahren gearbeitet (siehe zur Arbeit der OECD WPMN in Abschnitt 6.2 und 8). Einer Zwischenbilanz zufolge können bestimmte Testrichtlinien der OECD auch für Nanomaterialien unverändert übernommen werden, während andere geändert werden müssen und neue Testricht-

---

<sup>282</sup> Siehe auch die Ausführungen zu den Anpassungen des Schweizer Chemikalienrechts an REACH in Kapitel 12.1.

<sup>283</sup> EDI/EVD/UVEK (2012), S. 35.

linien zu erstellen sind.<sup>284</sup> Sofern rechtliche Anpassungen schon jetzt vorzunehmen sind, betrifft dies nach dem Zwischenbericht die Information der Behörden über Art und Einsatzbereich von Nanomaterialien.<sup>283</sup> So wird die Möglichkeit angesprochen, Meldepflichten für Betriebe einzuführen, welche Nanomaterialien herstellen, weiterverarbeiten oder verwenden. Diese Meldepflichten sollen in Ergänzung zu möglichen Meldepflichten im Produktbereich den Behörden und dem Gesetzgeber einen Überblick über Betriebe geben, die mit Nanomaterialien umgehen. Zielsetzung dieser Regelung soll auch die Nachverfolgbarkeit von Nanomaterialien sein, um z. B. ex post untersuchen zu können, ob eine Umweltbelastung auf Nanomaterialien zurückzuführen ist.<sup>285</sup> Hintergrund für eine mögliche Meldepflicht für Nanoprodukte ist, dass die Schweizer Behörden oder die Öffentlichkeit nur einen begrenzten Einblick in Art und Verwendung von Nanomaterialien haben.<sup>286</sup> Welche Informationspflichten für das Herstellen und Inverkehrbringen von Nanomaterialien die Schweizer Vorschriften bereits jetzt vorsehen und welcher Anpassungsbedarf gesehen wird, ist die zentrale Frage in der folgenden Untersuchung. Sie wird anhand der chemikalienrechtlichen Vorschriften und ausgewählten produktrechtlichen Regelungen untersucht. Denn die Stoffinformationen über Nanomaterialien sind in der Regel am «Lebensanfang» beim Inverkehrbringen von Stoffen nach dem Chemikalienrecht oder Produkten zu erbringen und zu übermitteln. In der Untersuchung wird zudem ein Vergleich mit entsprechenden EU-Vorschriften gezogen.

Das Chemikalienrecht wird in der Schweiz auf der Gesetzes- und Verordnungsebene im Wesentlichen durch folgende Vorschriften geregelt:

- das Chemikaliengesetz (ChemG),<sup>287</sup> dessen Ziel es ist, die Gesundheit der Menschen vor schädlichen Einwirkungen durch Stoffe und Zubereitungen zu schützen, und das die Rechtsgrundlage für die Chemikalienverordnung bildet,

---

<sup>284</sup> OECD (2010).

<sup>285</sup> Siehe die Ausführungen in EDI/EVD/UVEK (2012), S. 33.

<sup>286</sup> Vgl. die Aussage auf der Homepage des BAG: «Der Bund hat keine vollständige Übersicht über die auf dem Markt vorhandenen Produkte mit Nanomaterialien», unter [www.bag.admin.ch/nanotechnologie/faq/index.html?lang=de#faq\\_anker\\_612](http://www.bag.admin.ch/nanotechnologie/faq/index.html?lang=de#faq_anker_612) (Abruf am 20.11.2012).

<sup>287</sup> Bundesgesetz über den Schutz vor gefährlichen Stoffen und Zubereitungen (Chemikaliengesetz, ChemG) vom 15. Dezember 2000 (Stand am 13. Juni 2006), SR 813.1.

- das Umweltschutzgesetz (USG),<sup>288</sup> dessen Ziel der Schutz der Menschen, der Umwelt und ihrer Lebensgrundlagen ist und das ebenfalls die Rechtsgrundlage für die Chemikalienverordnung bildet,
- die Chemikalienverordnung (ChemV),<sup>289</sup> die Gesundheit und Umwelt als Schutzziele hat und die «Zulassung» von Neu- und Altstoffen, die stoffbezogenen Informationspflichten sowie die Einstufung und Kennzeichnung von Stoffen und Zubereitungen regelt,
- die Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV),<sup>290</sup> die ebenfalls die Schutzziele Umwelt und Gesundheit verfolgt und Stoffbeschränkungen und -verbote regelt.

Auf der Ebene des EU-Rechts sind die REACH<sup>291</sup>- und die CLP-Verordnung<sup>292</sup> zu nennen.

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass die Schweiz die REACH-Verordnung bislang nicht als Ganzes übernommen hat, sondern immer wieder

---

<sup>288</sup> Umweltschutzgesetz vom 7. Oktober 1983 (USG), SR 814.01.

<sup>289</sup> Chemikalienverordnung (ChemV), SR 813.11.

<sup>290</sup> Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV), SR 814.81.

<sup>291</sup> Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission, Abl. L 396 vom 30.12.2006, S. 1; zuletzt geändert durch Verordnung (EU) Nr. 412/2012 der Kommission vom 15. Mai 2012 zur Änderung von Anhang XVII der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe, Abl. L 128 vom 16.5.2012, S. 1. der Kommission vom 20. Mai 2011 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH) hinsichtlich Anhang XVII (Cadmium), Abl. der EU L 134 vom 21.5.2011, S. 2.

<sup>292</sup> Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, Abl. der EU Nr. L 353 vom 31.12.2008, S. 1, zuletzt geändert durch die Berichtigung der Verordnung (EG) Nr. 286/2011 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 vom 23. September 2011, Abl. der EU Nr. L 83 vom 30. März 2011.

einzelne Regelungsaspekte angepasst hat, so wurden z. B. in zurückliegenden Teilrevisionen der ChemV die Anforderungen für die Anmeldung von neuen Stoffen an die Vorschriften zur REACH-Registrierung adaptiert oder die Pflicht zur Erarbeitung und Kommunikation von Expositionsszenarien für alle Stoffe als solche mit einer Gesamtmenge von mehr als 10 Tonnen pro Jahr und Hersteller eingeführt. In der jüngsten 4. Teilrevision der ChemV,<sup>293</sup> die auf den 1. Dezember 2012 in Kraft getreten ist, wird z. B. die Kandidatenliste zur Aufnahme von Stoffen in das Verzeichnis der zulassungspflichtigen Stoffe (Anhang XIV REACH) in das Schweizer Chemikalienrecht übernommen.

Im Hinblick auf Nanomaterialien sieht REACH bislang keine nanospezifischen Regelungen vor. Mit der 4. Teilrevision der ChemV wurde hingegen eine Definition für Nanomaterialien eingeführt sowie Artikel 64 und Anhang 3 der ChemV wurden geändert, um mehr Informationen über gefährliche alte Stoffe und neue Stoffe zu erhalten, die in Form von «Nanomaterialien» hergestellt werden. Spezifische Prüf- und Kennzeichnungspflichten für Nanomaterialien sind in der Revision nicht enthalten. Die zusätzlichen Informationen erlauben es der Behörde aber, Nanomaterialien als solche zu erkennen und fallweise zusätzliche Angaben einzufordern.

Bei den produktrechtlichen Vorschriften auf EU-Ebene ist der Revisionsprozess zur Anpassung an Nanomaterialien für einzelne Regelungsbereiche abgeschlossen, vgl. z. B. die Änderungen der EU-Kosmetikverordnung<sup>294</sup> und der EU-Biozidverordnung<sup>295</sup> (s. Kapitel 12.2.3). Auch in der Schweiz befinden sich nanospezifische Anpassungen von produktrechtlichen Vorschriften in der Vorbereitung. So prüft das BAG die Einführung von nanospezifischen Kennzeichnungsvorschriften in der Schweizer Kosmetikverordnung und der Biozidprodukteverordnung (s. Kapitel 12.2.3).<sup>296</sup>

---

<sup>293</sup> Die 4. Teilrevision der Chemikalienverordnung (ChemV, SR 813.11) trat am 1. Dezember 2012 in Kraft, siehe [www.admin.ch/ch/d/sr/813\\_11/index.html](http://www.admin.ch/ch/d/sr/813_11/index.html).

<sup>294</sup> Verordnung (EG) Nr. 1223/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. November 2009 über kosmetische Mittel, ABl. L 342 vom 22.12.2009, S. 59 – im Folgenden «EU KosmetikVO» genannt.

<sup>295</sup> Die Biozidverordnung wird die bislang geltende Biozid-Richtlinie im September 2013 ablösen. Verordnung (EU) Nr. 528/2012 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Mai 2012 über die Bereitstellung auf dem Markt und die Verwendung von Biozidprodukten, ABl. der EU L 167 vom 27.6.2012, S. 1.

<sup>296</sup> Siehe: [www.bag.admin.ch/nanotechnologie/faq/index.html?lang=de#faq\\_anker\\_612](http://www.bag.admin.ch/nanotechnologie/faq/index.html?lang=de#faq_anker_612) (Abruf am 22.11.2012).

## 12.1 Informationen über Nanomaterialien im Chemikalienrecht

In diesem Abschnitt werden die Regelungen zur Informationsgewinnung und -bereitstellung nach der Schweizer Chemikalienverordnung (ChemV)<sup>297</sup> auf allfällige Verbesserungsmöglichkeiten bei der Regulierung von Nanomaterialien als Stoffe und Gemische untersucht. Berücksichtigt werden auch die Änderungen für Nanomaterialien durch die 4. Teilrevision der ChemV.

Ziel der Chemikalienverordnung ist es, die Gefahren und Risiken, die von Stoffen und Zubereitungen für das Leben und die Gesundheit von Menschen sowie die Umwelt ausgehen können, zu ermitteln und zu beurteilen. Ferner werden die Voraussetzungen für das Inverkehrbringen und den Umgang mit gefährlichen Stoffen und Zubereitungen geregelt (Art. 1 ChemV). Ganz ausgenommen vom Anwendungsbereich der ChemV sind Lebens-, Heil- und Futtermittel, sofern sie als Fertigerzeugnisse an den Endverbraucher abgegeben werden (Art. 1 Abs. 5 Bst. c ChemV). Für diese gelten eigene Regelwerke.

Nach dem Prinzip der Selbstkontrolle tragen die Hersteller die Verantwortung für das Inverkehrbringen von Stoffen und Zubereitungen und werden von den zuständigen Behörden dabei kontrolliert. Je nachdem, ob es sich um einen neuen oder alten Stoff handelt, sind unterschiedliche Vorschriften einzuhalten. Zu den alten Stoffen zählen all diejenigen, welche im Europäischen Verzeichnis der auf dem Markt vorhandenen chemischen Stoffe vom 15. Juni 1990 (EINECS) aufgeführt sind.<sup>298</sup> Neustoffe sind in Abgrenzung zu Altstoffen nicht im EINECS-Verzeichnis gelistet.

Für Neustoffe schreibt die ChemV vor, dass die Hersteller (erfasst sind nach Art. 2 Abs. 1 Bst. c auch Importeure) diese bei der Anmeldestelle Chemikalien anmelden, bevor sie diese selbst oder in einer Zubereitung erstmals in Verkehr bringen (Art. 16 Abs. 1 ChemV). Zur Anpassung an die Mengenschwellen in REACH wurde die Meldepflicht von bisher 10 kg/a je Hersteller auf 1 t/a erhöht. Hersteller unterliegen nach Art. 61 ChemV einer Meldepflicht für gefährliche Altstoffe und gefährliche Zubereitungen aus Altstoffen sowie von PBT<sup>299</sup> oder

---

<sup>297</sup> Verordnung über den Schutz vor gefährlichen Stoffen und Zubereitungen (Chemikalienverordnung, ChemV) vom 18. Mai 2005 (Stand am 1. Januar 2012), SR 813,11.

<sup>298</sup> Die im EINECS-Verzeichnis gelisteten Stoffe können unter <http://esis.jrc.ec.europa.eu/> eingesehen werden.

<sup>299</sup> «PBT» steht für Stoffe, die als persistent, bioakkumulierend und toxisch eingestuft sind.



vPvB-Stoffen<sup>300</sup> innert drei Monaten nach deren erstmaligen Inverkehrbringen, wenn deren Jahresmenge 100 Kilo je Hersteller übersteigt sowie von Altstoffen oder Zubereitungen, die sehr giftig, giftig, krebserzeugend, erbgutverändernd, fortpflanzungsgefährdend oder als PBT- oder vPvB-Stoffe beurteilt werden oder in Anhang 4 der ChemV<sup>301</sup> gelistet sind und deren Jahresmenge 10 Kilo übersteigt.<sup>302</sup>

Vom Stoffbegriff der Verordnung (siehe Art. 2 Abs. 1 Bst. a ChemV) sind nach einheitlicher Ansicht auch Nanomaterialien erfasst, sodass alle Regelungen der ChemV prinzipiell auch für Nanomaterialien anwendbar sind.<sup>303</sup> Unabhängig von der Frage, ob es sich bei dem Nanomaterial um einen Neu- oder Altstoff handelt, sind Informationen über die physikalisch-chemischen Eigenschaften eines Nanomaterials sowie seiner human- und ökotoxikologischen Eigenschaften für den Umwelt- und Gesundheitsschutz wichtig. Mit der 4. Revision der ChemV müssen deshalb von den Herstellern folgende zusätzliche Angaben über Nanomaterialien sowohl im Fall von gefährlichen Altstoffen als auch bei Neustoffen gemeldet werden:<sup>304</sup>

- die Zusammensetzung,
- die Teilchenform und
- die mittlere Korngrösse

sowie, soweit vorhanden,

- die Anzahlgrössenverteilung,
- das spezifische Oberflächen-Volumen-Verhältnis,
- die Kristallstruktur,
- der Aggregationsstatus,

---

<sup>300</sup> «vPvB» steht für Stoffe, die als sehr persistent und sehr bioakkumulierend eingestuft sind.

<sup>301</sup> Es handelt sich um Stoffe, die nach REACH zulassungspflichtig sind und in Anhang XIV REACH gelistet werden.

<sup>302</sup> Mit der 4. Revision der ChemV soll die Meldepflicht für Altstoffe in Art. 61 ChemV geändert werden. Die Meldepflicht soll unabhängig von Mengenschwellen erfolgen, wenn für die Stoffe ein Sicherheitsdatenblatt nach Art. 52 ChemV zu erstellen ist.

<sup>303</sup> So die Position der EU-Kommission: Europäische Kommission (2008). Dieser Ansicht folgende Positionen in der Literatur: Calliess und Stockhausen (2011), S. 924; Führ et al. (2006), S. 25.

<sup>304</sup> Vgl. die Änderungen der 4. ChemV für Neustoffe in Anhang 3 Ziffer 2 Bst. b und Ziffer 7 Bst. a Nr. 2 sowie für Altstoffe in Art. 64 Bst. c Nr. 4<sup>quater</sup> und Art. 64 Bst. d Nr. 8.

- die Oberflächenbeschichtung und
- die Oberflächenfunktionalisierung.

### **Exkurs: Internationale und europäische Definition des Begriffs «Nanomaterial»**

Eine rechtsverbindliche Definition des Begriffs «Nanomaterial», die international akzeptiert oder gar reguliert ist, existiert bislang nicht. Hinzuweisen ist auf die Definition der ISO TC 229 in der Norm ISO/TS 80004-4:2011 (s. Kapitel 4) und die Definitionsempfehlung der EU-Kommission vom 18.10.2011,<sup>305</sup> die aber beide keinen rechtsverbindlichen Charakter haben. Da die Kommissionsempfehlung in Art. 3 lit. z der EU Biozid-Verordnung bereits Eingang gefunden hat und auch zu erwarten ist, dass sie in weiteren EU-Vorschriften Eingang finden wird, sollen zwei wesentliche Komponenten der Empfehlung ausgeführt werden:

Nr. 2: *«Nanomaterial ist ein natürliches, bei Prozessen anfallendes oder hergestelltes Material, das Partikel in ungebundenem Zustand, als Aggregat oder als Agglomerat enthält, und bei dem mindestens 50% der Partikel in der Anzahlgrößenverteilung ein oder mehrere Außenmaße im Bereich von 1 nm bis 100 nm haben. In besonderen Fällen kann der Schwellenwert von 50% für die Anzahlgrößenverteilung durch einen Schwellenwert zwischen 1% und 50% ersetzt werden, wenn Umwelt-, Gesundheits-, Sicherheits- oder Wettbewerbserwägungen dies rechtfertigen.»*

Nr. 3: *«Abweichend von Nummer 2 sind Fullerene, Graphenflocken und einwandige Kohlenstoff-Nanoröhren mit einem oder mehreren Außenmaßen unter 1 nm als Nanomaterialien zu betrachten.»*

Mit der 4. Teilrevision der ChemV wurde bereits die EU-Definition für Nanomaterialien eingeführt sowie Artikel 64 und Anhang 3 der ChemV geändert, um mehr Informationen über gefährliche alte Stoffe sowie neue Stoffe zu erhalten, die in nanoskaliger Form hergestellt werden. Seit dem Inkrafttreten der 4. Revision der ChemV gehören dann zu den meldepflichtigen Stoffen<sup>306</sup> und Zubereitungen<sup>307</sup>

<sup>305</sup> Europäische Kommission (2011), S. 38.

<sup>306</sup> Vgl. Art. 64 Bst. c Nr. 4<sup>quater</sup> des 4. Revisionsentwurfs.

<sup>307</sup> Vgl. Art. 64 Bst. d Nr. 8 des 4. Revisionsentwurfs.

auch «absichtlich hergestellte Stoffe der Grösse 1 bis 100 Nanometern in zwei oder drei Dimensionen».

### 12.1.1 Mengenschwellenabhängige Informationsanforderungen bei Neustoffen

Die Hersteller eines Bulk- und Nanomaterials, das als Neustoff angemeldet werden soll, unterliegen nach den Artikeln 16, 16a, 18 und 60 ChemV den in der folgenden Tabelle aufgeführten mengenabhängigen Informationsanforderungen:

*Tabelle 15 Mengenabhängige Informationsanforderungen bei der Neustoffanmeldung*

<b>Mengenschwelle</b>	<b>Informationsanforderungen</b>
Ab 1 t/a	Alle physikalisch-chemischen, toxikologischen und ökotoxikologischen Informationen, welche in den entsprechenden Ziffern des Anhangs VII der REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 gefordert sind (Art. 16, 17 ChemV i.V.m. Anhang 3 Ziffer 7 Bst. a, Ziffer 8 Bst. a und Ziffer 9 Bst. a)
Ab 10 t/a	Zusätzlich zu vorheriger Mengenschwelle: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Angabe unter den entsprechenden Ziffern in Anhang VIII REACH</li> <li>• Stoffsicherheitsbeurteilung und -bericht nach (Art. 18 Abs. 2 Bst. c i.V.m. Art. 18a ChemV)</li> </ul>
Ab 100 t/a	Zusätzlich zu vorherigen Mengenschwellen: Versuchsvorschläge zur Gewinnung von Informationen nach Anhang IX REACH (Art. 16 ChemV i.V.m. Anhang 3 Ziffer 7 Bst. c, Ziffer 8 Bst. c und Ziffer 9 Bst. c)
Ab 1000 t/a	Zusätzlich zu vorherigen Mengenschwellen: Angaben nach Anhang X Ziffer 8 REACH (Art. 16 ChemV i.V.m. Anhang 3 Ziffer 7 Bst. d, Ziffer 8 Bst. d und Ziffer 9 Bst. d)

Wie die obige Tabelle zeigt, müssen Hersteller in der Schweiz ein Nanomaterial als Neustoff erst ab 1 t/a anmelden und der Behörde Informationen über die physikalisch-chemischen, toxikologischen und ökotoxikologischen Eigenschaften des Nanomaterials vorlegen. Die Informationsanforderungen steigen zudem in

Abhängigkeit von der Herstellungsmenge. Die Ermittlung von (grundlegenden) Informationen über Stoffe in Abhängigkeit von den vorgegebenen Mengenschwellen trifft bei Nanomaterialien gegenüber den Bulkmaterialien auf ein spezifisches Problem. So können sich Nanomaterialien durch ihre geringe Grösse und der daraus resultierenden grossen spezifischen Oberfläche sowohl hinsichtlich ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften als auch hinsichtlich ihrer Toxizität, Ökotoxizität und ihres Umweltverhaltens von Bulkmaterialien unterscheiden. Zudem weisen Nanomaterialien eine geringe Schüttdichte<sup>308</sup> auf und können damit bereits in geringen Mengen in einer grossen Anzahl von (Verbraucher-)Produkten Anwendung finden. Diese Besonderheit von Nanomaterialien begünstigt ihre weitverbreitete Verwendung («wide dispersive use»). Ferner ist für die Erreichung der Mengenschwellen von der Gesamtmenge des anzumeldenden Stoffes eines Herstellers auszugehen. Meldet dieser ein Nanomaterial an, das er als stoffgleich mit einem Bulkmaterial betrachtet, zählt die Gesamtmenge aus Nanomaterial und Bulkmaterial für das Erreichen der mengenabhängigen Informationsanforderungen. Will ein Anmelder aber nur ein Nanomaterial registrieren, wird dieses – je nach Produktions- bzw. Importmenge – niedrigeren Tonnage-Bändern und damit auch keinen oder niedrigeren Registrierungsanforderungen unterliegen. Dies kann insbesondere in den Fällen zum «Unterlaufen» der Mengenschwellen führen, in denen für ein Nanomaterial kein chemisch identisches Bulkmaterial existiert, wie z. B. bei Fullerenen.

Nach der Wertung des europäischen Gesetzgebers in Art. 58 Abs. 3 REACH – welche mit der 4. Revision der ChemV implizit auch in die ChemV übernommen wurde<sup>309</sup> – ist die weitverbreitete Verwendung von Stoffen neben anderen Kriterien ein Grund für die vorrangige Aufnahme als Kandidatenstoffe für den Anhang XIV REACH. Auch wenn der Begriff «weitverbreitete Verwendung» weder in der ChemV noch in REACH ausdrücklich definiert wird, können nach Anhang III REACH solche Stoffe darunter verstanden werden, die in Gemischen für Verbraucher oder als Bestandteil von Erzeugnissen für Verbraucher verwendet werden.

---

<sup>308</sup> Bei pulver- und granulatförmigen Stoffen ist die Schüttdichte das Mass aus der Masse und dem eingenommenen Volumen.

<sup>309</sup> Nach der 4. Revision der ChemV sollen zu der Liste der besonders besorgniserregenden Stoffe in Art. 83b ChemV auch die Stoffe der Kandidatenliste in Anhang XIV REACH zählen. Stoffe auf der Kandidatenliste sollen zukünftig in Anhang 1.17 der ChemRRV aufgenommen werden.

### **Exkurs: Internationale Erfahrungen zu den Herstellungsmengen von Nanomaterialien**

Aus den wenigen öffentlich zugänglichen Informationen über die tatsächlichen Herstellungsmengen von Nanomaterialien ist zu vermuten, dass Nanomaterialien die Schwellenwerte der ChemV von 1 t, 10 t, 100 t und 1000 t für die Anmeldung bzw. für die Ermittlung von Stoffdaten in vielen Fällen nicht erreicht werden. So geben nach einer internationalen OECD-Umfrage zur Herstellung von Nanomaterialien die meisten der befragten 106 Firmen ein Produktionsvolumen von weniger als 10 kg/a an. Gleichwohl gibt es aber auch auf dem Markt befindliche Nanomaterialien (wie z. B. Titandioxid, Carbon Black, Siliziumdioxid, Aluminiumoxide, Zinkoxide und Eisenoxide), die die 1-t-Schwelle überschreiten; so gaben in der OECD-Umfrage 28 Firmen an, die vorgenannten Nanomaterialien über 1 t/a herzustellen.<sup>310</sup>

Die vorgenannten Besonderheiten von Nanomaterialien und die bestehenden bzw. zu erwartenden Herstellungsmengen sprechen dafür, die Mengenschwellen der ChemV für Nanomaterialien anzupassen. Eine modifizierte Mengenschwelle für die Charakterisierung des Nanomaterials sollte deshalb deutlich unter 1 t/a, z. B. bei 100 kg/a liegen.<sup>311</sup> Diese neue Schwelle entspräche der Meldepflicht für alte gefährliche oder PBT- oder vPvB-Stoffe und gefährlichen Zubereitungen in Art. 61 lit. a ChemV der derzeit noch geltenden Fassung vom 1.1.2012.

Zwar wäre es auch denkbar, statt massebezogenen Mengenschwellen die Ermittlung von Stoffeigenschaften an oberflächenbezogene Kriterien zu knüpfen,<sup>312</sup> aber dieser Ansatz bringt auch entscheidende Nachteile mit sich. Für Nanomaterialien müsste ein solches System zusätzlich zu dem bestehenden massebezogenen Registrierungssystem für alle anderen Stoffe eingeführt werden. Ferner setzt ein solches System ein eindeutiges Kriterium zur Bestimmung der oberflächenbezogenen Eigenschaften sowie der dazu notwendigen Mess- und Prüfmethoden voraus, das so bislang noch nicht existiert. Bereits damit könnte es bei der Registrierung von Nanomaterialien zu Rechtsunsicherheit kommen, ob ein Stoff zu registrieren ist. Die Überprüfung, ob ein oberflächenbezogenes Kriterium

<sup>310</sup> Vgl. das Ergebnis der OECD-Umfrage in: OECD (2011), S. 17 ff. und S. 21.

<sup>311</sup> Vgl. zur Anpassung von Mengenschwellen auch: SRU (2011), S. 339 ff.; Hermann et al. (2012), S. 21.

<sup>312</sup> Der SRU spricht von einer spezifischen Oberfläche zwischen 20 und 60 m<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>, siehe: SRU 2011, S. 339.

von einem Nanomaterial erfüllt wird, ist zudem aufwendiger zu vollziehen als die Verwendung von Mengenschwellen. Deshalb wird die Absenkung der Registrierungsmengenschwelle als einfachere Lösung angesehen.

### **Exkurs: Position der EU-Kommission zur Anpassung der Mengenschwellen für Nanomaterialien**

Die Kommission hält bislang eine Anpassung der Mengenschwelle für die Registrierung und die Erstellung eines Stoffsicherheitsberichts für nicht notwendig, da die meisten in der wissenschaftlichen Diskussion befindlichen Nanomaterialien in Mengen von über einer Tonne hergestellt oder importiert werden. Ferner ist die Kommission der Ansicht, dass Nanomaterialien den Bulkmaterialien insoweit entsprechen, als manche toxisch sind und andere nicht.<sup>313</sup>

#### **12.1.2 Stoffsicherheitsbericht**

Der Anmelder eines neuen Stoffs hat im Rahmen der Selbstkontrolle ab einer Menge von 10 t/a die Pflicht, eine Stoffsicherheitsbeurteilung durchzuführen und einen Stoffsicherheitsbericht zu erstellen (Art. 18 Abs. 2 Bst. c i.V.m. Art. 18a ChemV). Für den Stoffsicherheitsbericht sind schädliche Wirkungen durch chemisch-physikalische Eigenschaften, schädliche Wirkungen auf die Gesundheit des Menschen und die Umwelt sowie PBT- und vPvB-Eigenschaften des Stoffs gemäss Anhang I der REACH zu ermitteln (Art. 18a ChemV). Hat der Stoff PBT- und vPvB-Eigenschaften, sind zusätzlich ein Expositionsszenario und eine Risikobeschreibung zu erstellen, in denen alle identifizierten Verwendungen zu behandeln sind (Art. 18a Bst. e ChemV).

Wendet man die Vorschriften zum Stoffsicherheitsbericht auf Nanomaterialien an, zeigen sich folgende Probleme:

Zahlreiche Nanomaterialien weisen eine geringe Schüttdichte auf und können damit bereits in geringen Mengen in einer grossen Anzahl von (Verbraucher-) Produkten eingesetzt werden («wide dispersive use»). Es ist zu erwarten, dass die Mengenschwelle für die Erstellung eines Stoffsicherheitsberichts von 10 Tonnen pro Jahr und Anmelder von vielen Nanomaterialien nicht erreicht wird,

---

<sup>313</sup> EC (2012), S. 8 und 11.

insbesondere dann, wenn es für die Nanomaterialien keine entsprechenden Bulkmaterialien gibt, die für die Erreichen der 10-t-Schwelle hinzugezählt werden können (siehe auch die Ausführungen in Abschnitt 12.1.1). In diesem Fall finden umfassendere Tests zur Ermittlung von gefährlichen Eigenschaften von Nanomaterialien nicht statt, sondern es sind von den Herstellern «nur» grundlegende Informationen im Rahmen der Anmeldung zu ermitteln (siehe die obigen Ausführungen). Deshalb sollte erwogen werden, die Mengenschwelle zur Erstellung von Stoffsicherheitsberichten bei Nanomaterialien zu senken.

### **Exkurs: Erfahrungen in der EU mit Stoffsicherheitsberichten nach REACH**

Weiterhin zeigen die bisherigen Erfahrungen mit der Erstellung von Stoffsicherheitsberichten nach REACH, dass bei der gemeinsamen Registrierung eines Bulkmaterials mit einem chemisch identischen Nanomaterial die nanospezifischen Aspekte im Stoffsicherheitsbericht nicht ausreichend berücksichtigt werden. So ist bislang in Anhang I REACH nicht ausdrücklich klargestellt, dass die Verwendungen von Nanomaterialien vom Registranten zu identifizieren sind und gegebenenfalls vom Bulkmaterial bzw. von anderen Nanomaterialien getrennte Stoffsicherheitsbeurteilungen, Expositionsbeurteilungen und Risikobeschreibungen zu erfolgen haben, wenn es Anhaltspunkte für abweichende Expositionen und/oder Risiken gibt.<sup>314</sup>

Das gleiche Problem wie bei REACH ist beim Stoffsicherheitsbericht nach Art. 18a ChemV zu erwarten. Zwar sind nach Art. 18a ChemV «alle identifizierten Verwendungen zu berücksichtigen» – also auch Verwendungen als Nanomaterialien –, aber aufgrund der vorgenannten Erfahrungen mit REACH ist auch bei der Anmeldung nach ChemV zu erwarten, dass nanospezifische Anwendungen nicht eindeutig genug beschrieben werden. Deshalb sollte in Art. 18a ChemV der Verweis auf Anhang I REACH um folgende Vorgaben ergänzt werden: Unterschiedliche Stoffsicherheitsbeurteilungen für eine oder mehrere Nanoformen eines chemisch identischen Bulkmaterials sollten entweder durch getrennte Stoffsicherheitsberichte bei der Anmeldung «eines» Stoffes erfolgen oder in einem Stoffsicherheitsbericht, in dem die verschiedenen Nanomaterialien einzeln berücksichtigt werden. Werden keine getrennten Beurteilungen für Nanomaterialien

<sup>314</sup> Vgl. Europäische Kommission (2012), S. 129.

lien durchgeführt, sollte der Anmelder ferner begründen müssen, warum er für bestimmte Formen oder Partikelgrößenverteilungen gleiche Daten verwendet.

### 12.1.3 Sicherheitsdatenblatt

Das Sicherheitsdatenblatt (SDB) ist das zentrale Kommunikationsinstrument zwischen Lieferanten und Abnehmern eines Stoffes oder einer Zubereitung, indem es über Stoffeigenschaften informiert und Sicherheitshinweise für Personen enthält, die beruflich oder gewerblich mit gefährlichen Substanzen umgehen (Art. 51 i.V.m. Art. 54 ChemV). Damit das SDB diese Rolle auch bei Nanomaterialien spielen kann, stellt sich insbesondere aus Transparenzgründen die Frage, ob ein Nanomaterial, das die Voraussetzungen des Art. 52 ChemV erfüllt, im gleichen SDB mit einem chemisch identischen Bulkmaterial aufgeführt werden soll, oder ob ein gesondertes SDB für das Nanomaterial erstellt wird. Eine Pflicht, ein eigenes SDB für das Nanomaterial zu erstellen, sieht die ChemV – wie auch REACH – nicht vor. Die Hersteller können sich also entscheiden, wie sie die Informationen zu dem Nanomaterial in der Lieferkette kommuniziert. Zudem enthält Art. 53 i.V.m. Anhang 2 ChemV keine Anforderungen zur Angabe nanospezifischer Eigenschaften im SDB.

In der Wegleitung zum Nano-SDB<sup>315</sup> werden zwei Alternativen empfohlen: Entweder sollen die Hersteller in einem bestehenden SDB nanospezifische Daten ergänzen oder sie sollen ein eigenes SDB für die betrachteten Nanomaterialien erstellen. In beiden Fällen wird davon ausgegangen, dass die Hersteller bei Beachtung der Wegleitung ihrer Informationspflicht gemäss dem Stand der Technik nachkommen.<sup>316</sup> Als «notwendig» erachtet werden in der Wegleitung Nano-SDB zusätzliche Informationen für Nanomaterialien in den Rubriken:

Stoff-, Zubereitungs- und Firmenbezeichnung,  
Mögliche Gefahren,  
Zusammensetzung/Angaben zu Bestandteilen und  
physikalisch-chemische Eigenschaften.

---

<sup>315</sup> Staatssekretariat für Wirtschaft (Seco) (2012): Sicherheitsdatenblatt (SDB): Leitfaden für synthetische Nanomaterialien, S. 1, [www.bag.admin.ch/nanotechnologie/12171/12176/index.html?lang=de](http://www.bag.admin.ch/nanotechnologie/12171/12176/index.html?lang=de).

<sup>316</sup> EDI/EVD/UVEK (2012), S. 16.



Dies deckt sich mit den Empfehlungen der EU-Kommission, wonach in einem gemeinsamen SDB für Bulk- und Nanomaterial gesonderte Überschriften für Nanomaterialien in den folgenden Rubriken des SDB gemacht werden sollen: Zusammensetzung, Handhabung, Begrenzung und Überwachung der Exposition, physikalische und chemische Eigenschaften und toxikologische Angaben.<sup>317</sup>

Als dritte Empfehlung der Wegleitung soll für *alle* Nanomaterialien – also nicht nur für die gemäss ChemV ein SDB zu erstellen ist – ein SDB erstellt werden.<sup>318</sup>

Bereits jetzt wird der Umfang der SDB für Bulkmaterialien von den Anwendern als zu gross wahrgenommen. Werden in dem SDB für das Bulkmaterial auch noch verschiedene Formen von Nanomaterialien aufgenommen, wird dies den Umfang weiter steigern und die Übersichtlichkeit des SDB beeinträchtigen.<sup>319</sup>

Ferner können für ein Bulkmaterial die Voraussetzungen des Art. 52 ChemV nicht erfüllt sein, während dies für das chemisch identische Nanomaterial aufgrund der nanospezifischen Eigenschaften der Fall ist. Ein getrenntes SDB für Nanomaterialien, welche die Voraussetzungen des Art. 52 ChemV erfüllen, sollte deshalb verbindlich vorgeschrieben werden. Die nachgeschalteten Anwender würden dann immer (nur) das SDB bekommen, das für den Stoff, mit dem sie umgehen, relevant ist. Zudem sollten die in der Wegleitung Nano-SDB empfohlenen zusätzlichen Informationen für Nanomaterialien (siehe oben) als verbindliche Angaben in den Anhang 2 ChemV aufgenommen werden.

Die Empfehlung der Wegleitung, für alle Nanomaterialien ein SDB zu erstellen, unabhängig vom Vorliegen der Voraussetzungen in Art. 52 ChemV, kann als freiwillige Umsetzung des Vorsorgeprinzips bei der Risikokommunikation zu Nanomaterialien angesehen werden. Eine generelle Pflicht, für jedes Nanomaterial ein Sicherheitsdatenblatt zu erstellen, würde gegen das Prinzip der Selbstkontrolle und die bisherige Regelungssystematik der ChemV sprechen, das vorsieht, nur Stoffe mit gefährlichen Eigenschaften in der Lieferkette zu kommunizieren – und bedürfte deshalb einer besonderen Begründung. Diese könnte darin zu sehen sein, dass über die Gefährdungen, die von vielen Nanomaterialien für die Umwelt und den Menschen ausgehen, nur begrenzte Informationen

---

<sup>317</sup> Europäische Kommission (2008), S. 15.

<sup>318</sup> Staatssekretariat für Wirtschaft (Seco) (2012): Sicherheitsdatenblatt (SDB): Leitfaden für synthetische Nanomaterialien, S. 1; [www.bag.admin.ch/nanotechnologie/12171/12176/index.html?lang=de](http://www.bag.admin.ch/nanotechnologie/12171/12176/index.html?lang=de)

<sup>319</sup> «Im Markt beobachtet werden können Grössenordnungen von etwa 50 Seiten bis hin zu mehreren hundert Seiten.», so: Arbeitskreis Chemikalienpolitik (2011), S. 22.

vorliegen.<sup>320</sup> So könnte die Pflicht, ein SDB für Nanomaterialien zu erstellen, zusätzlich in Fällen eingeführt werden, in denen die vorliegenden Stoffinformationen nicht ausreichen, um die Ungefährlichkeit des Nanomaterials zu belegen, und in denen die Freisetzung des Nanomaterials beabsichtigt oder zu erwarten ist, weil dieses z. B. nicht in einer Matrix fest eingebunden ist.<sup>321</sup>

#### 12.1.4 Prüfpflicht für Altstoffe im Rahmen der Selbstkontrolle

Im Rahmen der Selbstkontrolle nach Art. 7 ChemV müssen die Hersteller eines Altstoffes oder einer Zubereitung unabhängig von einer Mengenschwelle diesen entsprechend seiner gefährlichen Eigenschaften einstufen, – soweit notwendig – kennzeichnen und spezifische Sicherheitsinformationen zur Verfügung stellen. Die Einstufung erfolgt nach den Kriterien des Anhangs VI der Richtlinie 67/548/EWG (Art. 8 Abs. 2 Buchst. b i.V.m. Art. 7 Abs. 3 ChemV). Die Hersteller müssen «alle zugänglichen Daten beschaffen», die für die Einstufung notwendig sind (Art. 7 Abs. 3 ChemG). Diese Verpflichtungen der ChemV können aber eine Ermittlung von Stoffeigenschaften, wie sie bei Neustoffen vorgesehen sind (siehe oben), nicht ausgleichen. Zweck der Einstufung und Kennzeichnung nach der Richtlinie 67/548/EWG und der CLP-Verordnung ist es, zu bestimmen, welche Eigenschaften von Stoffen und Gemischen zu einer Einstufung als gefährlich führen sollten, damit die Gefahreigenschaften korrekt ermittelt und die Gefahren entsprechend benannt werden können. Es sollen sowohl die physikalischen Gefahren als auch die Gefahren für die menschliche Gesundheit und die Umwelt angegeben werden. Es besteht jedoch keine Pflicht, Nanomaterialien systematisch und umfassend hinsichtlich möglicher von ihnen ausgehender Gefahren für Mensch und Umwelt zu betrachten. Das Fehlen dieser Verpflichtung kann durch die Normen der ChemV nicht kompensiert werden, da die ChemV ihrerseits unter anderem auf den Ergebnissen des originären Stoffrechts aufbaut, welches Nanomaterialien bislang nicht spezifisch adressiert. So sind die Hersteller nach Art. 7 Abs. 3 ChemV verpflichtet, «zugängliche Daten» zu beschaffen. Eine Pflicht der Hersteller, z. B. eigene Tests durchzuführen, um zu prüfen, ob mit einem

---

<sup>320</sup> Siehe SRU (2011), Rn 391 ff.

<sup>321</sup> Der deutsche Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) stellt die noch weitergehende Forderung auf, Sicherheitsdatenblätter für alle Nanomaterialien verbindlich zu machen, siehe: SRU (2011), Rn 478.

Stoff oder einer Zubereitung eine Gesundheits- oder Umweltgefahr verbunden ist, besteht demnach nicht (Art. 7 Abs. 1 ChemV).

## 12.2 Informationen über Nanomaterialien in Verbraucherprodukten

Die Bereitstellung von Informationen über die Herstellung, Weiterverarbeitung und Verwendung von Nanomaterialien in Produkten, wie sie in der Schweiz auf dem Markt erhältlich sind, gehört zu den Zielen und Handlungsfeldern für die nächste Periode des Schweizer «Aktionsplan Synthetische Nanomaterialien».<sup>322</sup> Zunächst geht es im Folgenden zum Status quo der Informationsgewinnung und -übermittlung über Stoffe in Gegenständen (Produkten):

### 12.2.1 Chemikalienrechtliche Vorgaben für Stoffe in Gegenständen

Mithilfe der chemikalienrechtlichen Vorschriften sollen gefährliche Eigenschaften von Stoffen und Zubereitungen – quasi am Anfang ihres Lebenswegs – ermittelt werden, sodass u. a. produktrechtliche Vorschriften im Autorisierungsverfahren oder die Hersteller im Rahmen ihrer Selbstkontrolle darauf «aufbauen» können. Das Chemikalienrecht reguliert aber nicht nur Stoffe und Zubereitungen selbst, sondern in den folgenden Fällen auch Stoffe, die in Gegenständen<sup>323</sup> enthalten sind:

1. Sollen neue Stoffe in Verkehr gebracht werden, die in einem Gegenstand enthalten sind und aus diesem «unter normalen oder vernünftigerweise vorhersehbaren Verwendungsbedingungen freigesetzt werden sollen», so unterliegen diese Stoffe einer Anmeldepflicht nach Art. 16 ChemV. In Anwendung des Art. 16 i.V.m. Art. 17 ChemV gilt diese Anmeldepflicht nur für neue Stoffe in einem Gegenstand, die mindestens in einer Menge von

---

<sup>322</sup> Siehe EDI/EVD/UVEK (2012), S. 33.

<sup>323</sup> «Der Begriff «Gegenstand» nach der ChemV entspricht der in REACH verwendeten Terminologie des «Erzeugnisses»» (siehe Art. 2 Abs. 2 Bst. a ChemV).

- 1 t/a von einem Hersteller in Verkehr gebracht werden sollen. Ein Nanomaterial, das als Neustoff in einem Spray zugelassen werden soll, wäre danach nach Art. 16 ChemV nur dann zu melden, wenn der Hersteller eine Anzahl von Sprays in Verkehr bringen will, bei der das darin enthaltene Nanomaterial mindestens eine Jahrestonne erreicht.
2. Der Selbstkontrolle nach Art. 26 USG, Art. 5 ChemG und Art. 7 ChemV unterliegen Gegenstände, die gefährliche Stoffe (gefährliche Inhaltsstoffe) sowie als PBT oder als vPvB geltende Stoffe beinhalten. Im Rahmen der Selbstkontrolle haben die Hersteller zu beurteilen, ob durch die bestimmungsgemässe oder zu erwartende Verwendung des Gegenstands die Umwelt oder Menschen gefährdet werden können; diese Pflicht umfasst auch Gefährdungen im Zusammenhang mit der vorschriftsmässigen Entsorgung des Gegenstands (Art. 7 Abs. 2 ChemV). Die Hersteller eines Kleidungsstücks haben in Ausübung der Selbstkontrolle demnach zu ermitteln, ob z. B. in dem Kleidungsstück, das sie in Verkehr bringen wollen, gefährliche Inhaltsstoffe enthalten sind. Wenn ja, müssen sie entsprechende Gefährdungen der Umwelt oder Menschen, die davon ausgehen können, beurteilen.

Nach dem Chemikalienrecht besteht aber keine Pflicht zur Anmeldung von Neustoffen in Gegenständen oder zur Selbstkontrolle bei Altstoffen in Gegenständen, wenn der Stoff bei Gebrauch nicht freigesetzt werden soll oder eine Gefährdung von Menschen oder Umwelt einschliesslich der Entsorgung des Gegenstandes ausgeschlossen werden kann.

Die Anmeldepflicht für Stoffe in Gegenständen bzw. die Regelungen über die Selbstkontrolle sowie die Funktion der Sicherheitsdatenblätter sind deshalb nicht geeignet, den zuständigen Behörden oder Konsumenten einen umfassenden Überblick über die in der Schweiz hergestellten Nanomaterialien, ihre Weiterverarbeitung oder die auf dem Markt befindlichen Nanoprodukte zu liefern. Denn Ziel der Anmeldepflicht nach Art. 16 ChemV für neue Stoffe in Gegenständen ist nicht die Erfassung der Gegenstände, sondern der darin enthaltenen Stoffe (z. B. Nanomaterialien). So ist im Rahmen der Anmeldung des Stoffs in einem Gegenstand (hier eines Nanomaterials) nicht die Verwendung in einem konkreten Produkt (z. B. Spray mit dem Herstellernamen X) zu beschreiben, sondern eine abstrakte Verwendung (z. B. Verwendung in Haarsprays).

## **12.2.2 Informationen im Sicherheitsdatenblatt**

Ein Sicherheitsdatenblatt ist nur für einen Stoff oder eine Zubereitung zu erstellen – nicht bei einem Gegenstand (vgl. Art. 52 ChemV). Eine Pflicht zur Erstellung und Weitergabe eines Sicherheitsdatenblatts besteht ferner nur, wenn der Stoff oder die Zubereitung bestimmte in Art. 52 ChemV genannte Gefahrstoffeigenschaften aufweist. Schliesslich besteht eine Abgabepflicht für Sicherheitsdatenblätter nur in der Lieferkette und an berufliche oder gewerbliche Verwender (Art. 54 ChemV), nicht aber gegenüber dem privaten Endkunden.

Konsumenten können den Inhalt nur erfahren, wenn die Datenblätter z. B. im Internet veröffentlicht werden.

## **12.2.3 Kennzeichnungs- und Deklarationspflichten für Nanomaterialien im Produktbereich**

Nunmehr soll untersucht werden, ob durch Kennzeichnungs- und Deklarationspflichten im Produktbereich Behörden oder Konsumenten in der Schweiz Informationen über Nanomaterialien in Produkten erhalten können. Das Inverkehrbringen der folgenden Produkte unterliegt einem Zulassungs- oder Anmeldeverfahren oder der Selbstkontrolle nach den Rechtsvorschriften der Schweiz: Lebens- und Futtermittel, Lebensmittelzusatzstoffe, Gebrauchsgegenstände, Kosmetika, Arzneimittel, Pflanzenschutzmittel oder Biozidprodukte. Für diese Produkte bestehen auch unterschiedliche Deklarations- und Kennzeichnungsvorschriften.

Bevor auf die Schweizer Rechtslage zur Kennzeichnung von Nanomaterialien in den zuvor genannten Produkten eingegangen wird, sollen im folgenden Exkurs die Regelungen auf EU-Ebene dargestellt werden:

### **Exkurs: Kennzeichnungsvorschriften für Nanomaterialien in Produkten im EU-Recht**

Auf der Ebene der europäischen Regelungen werden zunehmend Kennzeichnungsvorschriften erlassen. So werden beispielsweise zum Schutz der menschlichen Gesundheit durch die neue EU-KosmetikVO Hersteller, Importeure und Händler bestimmten Informationspflichten unterworfen. Die Betroffenen müssen der Kommission sechs Monate vor dem Inverkehrbringen folgende Angaben zu kosmetischen Mitteln, die Nanomaterialien enthalten, auf elektronischem Weg übermitteln (Art. 16 Abs. 3 EU-KosmetikVO):

- die Identifizierung des Nanomaterials, einschliesslich seiner chemischen Bezeichnung (IUPAC) und anderer Beschreibungen, wie sie in Abs. 2 der Präambel der Anhänge II bis VI EU-KosmetikVO vorgegeben sind,
- die Spezifikation des Nanomaterials, einschliesslich der Grösse der Partikel und der physikalischen und chemischen Eigenschaften,
- eine Schätzung der Menge an Nanomaterial, die pro Jahr auf dem Markt bereitgestellt werden soll,
- das toxikologische Profil des Nanomaterials,
- die Sicherheitsdaten des Nanomaterials bezogen auf die Kategorie des kosmetischen Mittels, in dem es verwendet wird,
- die vernünftigerweise vorhersehbaren Expositionsbedingungen.

Auf Basis dieser Daten erstellt die EU-Kommission einen Katalog aller Nanomaterialien in kosmetischen Mitteln einschliesslich solcher, die als Farbstoffe, UV-Filter und Konservierungsstoffe genutzt werden (Art. 16 Abs. 10 Buchstabe a EU-KosmetikVO). Den Katalog aktualisiert die Kommission regelmässig und macht ihn danach öffentlich zugänglich. In dem Katalog werden die Kategorien der kosmetischen Mittel und die vernünftigerweise vorhersehbaren Expositionsbedingungen aufgeführt. Die Kommission muss den Katalog erstmals 48 Monate nach Inkrafttreten der EU-KosmetikVO erstellen.

Neben dem Katalog erarbeitet die Kommission einen Sachstandsbericht, den sie dem Europäischen Parlament und dem Rat einmal im Jahr vorlegt. Der Sachstandsbericht informiert über die Entwicklungen bei der Verwendung von Nanomaterialien in kosmetischen Mitteln in der EU, einschliesslich solcher, die als Farbstoffe, UV-Filter und Konservierungsstoffe verwendet werden. Der aktualisierte Bericht umfasst insbesondere neu gemeldete Nanomaterialien in Pro-

duktkategorien, die Anzahl der Meldungen, den Fortschritt bei der Entwicklung spezifischer Bewertungsverfahren für Nanomaterialien und Leitlinien für die Sicherheitsbewertung sowie Informationen über internationale Kooperationsprogramme. Erstmals zu erstellen ist der Sachstandsbericht 54 Monate nach dem Inkrafttreten der EU-KosmetikVO.

Schliesslich sieht die EU-KosmetikVO vor, dass kosmetische Mittel nur auf den Markt gebracht werden dürfen, wenn bestimmte Informationen für Verbraucher/innen auf den Behältnissen und Verpackungen angebracht sind (Art. 19 EU-KosmetikVO). So müssen unter anderem alle Bestandteile, die in der Form von Nanomaterialien enthalten sind, eindeutig in der Liste der Bestandteile aufgeführt werden. Den Namen dieser Bestandteile muss das Wort «Nano» in Klammern folgen. Diese Verpflichtung gilt allerdings erst 42 Monate nach dem Inkrafttreten der EU-KosmetikVO – also frühestens Mitte 2013.

Die europäische Biozidverordnung (EG) Nr. 528/2012<sup>324</sup> schreibt eine Deklarationspflicht von mit Bioziden behandelten Waren und Biozidprodukten vor, wobei nach Art. 58 Abs. 3 Buchstabe d und Art. 69 Abs. 2 Buchstabe b die Inhaltsstoffe durch den Zusatz «(Nano)» zu kennzeichnen sind. Diese Kennzeichnungspflicht tritt zum 1. September 2013 in Kraft.

Bei Lebensmitteln ist im Zutatenverzeichnis nach Art. 18 Abs. 3 der Verordnung zur Information der Verbraucher über Lebensmittel (EG) Nr. 1169/2011<sup>325</sup> eine Kennzeichnung von Nanomaterialien mit dem Zusatz «(Nano)» ab dem 13. Dezember 2014 vorgeschrieben.

In allen drei Produktbereichen können Konsument/innen und Behörden in Zukunft an dem Zusatz «nano» bei dem jeweiligen Inhaltsstoff erkennen, welcher Stoff im Produkt nanopartikulär vorliegt.

---

<sup>324</sup> Die Biozidverordnung wird die bislang geltende Biozid-Richtlinie ablösen. Verordnung (EU) Nr. 528/2012 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Mai 2012 über die Bereitstellung auf dem Markt und die Verwendung von Biozidprodukten, Abl. der EU L 167 vom 27.6.2012, S. 1.

<sup>325</sup> Verordnung (EU) Nr. 1169/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2011 betreffend die Information der Verbraucher über Lebensmittel und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1924/2006 und (EG) Nr. 1925/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung der Richtlinie 87/250/EWG der Kommission, der Richtlinie 90/496/EWG des Rates, der Richtlinie 1999/10/EG der Kommission, der Richtlinie 2000/13/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 2002/67/EG und 2008/5/EG der Kommission und der Verordnung (EG) Nr. 608/2004 der Kommission, Abl. der EU Nr. L 304 vom 21.11.2011, S. 18.

### *Kennzeichnung in der Kosmetikverordnung*

Welche Inhaltsstoffe in Kosmetikartikeln enthalten sein dürfen und wie die Produkte zu kennzeichnen sind, wird in der Kosmetikverordnung (VKos)<sup>326</sup> geregelt. Dazu enthält die VKos Positivlisten der in kosmetischen Mitteln zugelassenen Farbstoffe (Anhang 2) sowie der antimikrobiell wirksamen Stoffe, UV-Filtersubstanzen (Anhang 3). Anhang 4 enthält eine Negativliste der in kosmetischen Mitteln verbotenen Stoffe. Nanomaterialien, die als neue Wirkstoffe in Kosmetika verwendet werden, müssen in den Positivlisten aufgeführt werden. Nach Art. 3 VKos muss zwar auf der Verpackung kosmetischer Mittel für den Konsumenten die Zusammensetzung des Mittels angegeben werden, aber eine nanospezifische Kennzeichnung der Inhaltsstoffe in kosmetischen Mittel ist nicht vorgeschrieben.

Das BAG prüft gegenwärtig die Möglichkeit der Einführung einer solchen Regelung und gegebenenfalls der Anpassung der diesbezüglichen Verordnungen.<sup>327</sup> Derzeit können Konsument/innen und Behörden nicht erkennen, ob ein kosmetisches Mittel Nanomaterialien enthält.

### *Kennzeichnung in Lebensmitteln (Zusatzstoffverordnung – ZuV)*

Die Zusatzstoffverordnung<sup>328</sup> regelt die in der Schweiz in Lebensmitteln zulässigen Zusatzstoffe, deren erlaubte Anwendungen und Höchstwerte sowie die entsprechenden Deklarationsvorschriften.

Nach dem «Positivprinzip», das gemäss Art. 1 ZuV für das Inverkehrbringen von Zusatzstoffen gilt, dürfen von den Herstellern nur die ausdrücklich in der Zusatzstoffverordnung zugelassenen Zusatzstoffe in Lebensmitteln verwendet werden. Die Beschreibung der bereits nach der Zusatzstoffverordnung zugelassenen Zusatzstoffe in Anhang 1 ZuV benennt diese mit Stoffnamen, ohne auf ihre Partikelgrösse Bezug zu nehmen. Für nicht zugelassene Stoffe gilt ein Verwendungsverbot. Ist ein Zusatzstoff nicht auf der Positivliste geführt, so können die Hersteller die Zulässigkeit der Verwendung in einem Bewilligungsverfahren anstreben. Nanomaterialien, die im Rahmen eines Produktionsprozesses ein-

---

<sup>326</sup> Verordnung des EDI über kosmetische Mittel (VKos) vom 23. November 2005 (Stand 1. November 2010), SR 817.023.31.

<sup>327</sup> Siehe [www.bag.admin.ch/nanotechnologie/faq/index.html?lang=de#faq\\_anker\\_612](http://www.bag.admin.ch/nanotechnologie/faq/index.html?lang=de#faq_anker_612) (abgerufen am 22.11.2012).

<sup>328</sup> Vgl. die Verordnung des EDI über die in Lebensmitteln zulässigen Zusatzstoffe (Zusatzstoffverordnung, ZuV) vom 23. November 2005, AS 2005 6191.



gesetzt werden, aber nicht ins Lebensmittel gelangen, müssen nicht gemeldet werden, da Konsumentinnen und Konsumenten nicht mit ihnen in Kontakt kommen.

Eine vollständige Liste der Firmen, die nanomaterialhaltige Lebensmittel oder Verpackungen herstellen oder verwenden, liegt dem Bundesamt für Gesundheit (BAG) nicht vor.<sup>329</sup>

Die Konsument/innen in der Schweiz können derzeit am konkreten Produkt nicht erkennen, ob es Nanomaterialien enthält. Die Positivliste der zulässigen Lebensmittelzusatzstoffe beschreibt nur abstrakt, welche Zusatzstoffe in Lebensmitteln zugelassen sind, führt aber nicht zu einer Kennzeichnung auf dem jeweiligen Produkt, wie sie in der EU in Zukunft vorgeschrieben ist.

### *Kennzeichnung in der Biozidprodukteverordnung*

Die Biozidprodukteverordnung<sup>330</sup> schreibt für Biozidprodukte vor, dass sie nur in Verkehr gebracht werden dürfen, wenn sie zugelassen, registriert oder anerkannt sind. Von der Biozidprodukteverordnung sind Nanomaterialien prinzipiell auch erfasst. Gesonderte Voraussetzungen für Nanomaterialien sind in der derzeit geltenden Verordnung aber nicht geregelt. Nach Art. 21 hat die Inhaberin einer Zulassung, Registrierung oder Anerkennung alle neuen Informationen über ihr Biozidprodukt der Anmeldestelle unaufgefordert und unverzüglich mitzuteilen, wenn diese sich auf den Fortbestand der Zulassung, der Registrierung oder der Anerkennung auswirken können. Dies betrifft insbesondere Änderungen in der Zusammensetzung jedes Wirkstoffs oder Änderungen in der Zusammensetzung des Biozidprodukts. Mit dieser Vorgabe ist die Inhaberin verpflichtet, z. B. den Ersatz eines zugelassenen Wirkstoffs durch einen nanoskaligen Wirkstoff oder andere Änderungen in der Zusammensetzung eines zugelassenen Biozidprodukts durch Hinzufügen von (nanoskaligen) Stoffen anzuzeigen. Die Vorschriften zur Kennzeichnung von Biozidprodukten finden sich in Art. 38 Biozidprodukteverordnung und sehen bislang keine gesonderte Kennzeichnung von Nanomaterialien z. B. als Wirkstoff in einem Biozidprodukt vor.

---

<sup>329</sup> Siehe: [www.bag.admin.ch/nanotechnologie/faq/index.htm.l?lang=de#faq\\_anker\\_612](http://www.bag.admin.ch/nanotechnologie/faq/index.htm.l?lang=de#faq_anker_612) (abgerufen am 10.11.2012).

<sup>330</sup> Verordnung über das Inverkehrbringen von und den Umgang mit Biozidprodukten (Biozidprodukteverordnung, VBP) vom 18. Mai 2005 (Stand am 1. November 2012, SR 813.12.).

Eine Änderung der Biozidprodukteverordnung ist gemäss Informationen des BAG in Vorbereitung und soll zukünftig bei der Zulassung von Biozidwirkstoffen zwischen Nanomaterialien und Bulkmaterialien unterschieden.<sup>331</sup>

Tritt die Änderung der Biozidprodukteverordnung in Kraft, können Behörden und Konsumenten Nanomaterialien in Biozidprodukten erkennen.

### *Andere Verbraucherproduktbereiche*

In einer Vielzahl von weiteren Verbraucherproduktgruppen existieren bislang keine Deklarations- und Kennzeichnungsvorschriften für Nanomaterialien.<sup>332</sup> Die Behörden oder Konsumenten können deshalb in der Regel nicht erkennen, ob in einem Produkt ein Nanomaterial enthalten ist und nicht zwischen Produkten mit und ohne Nanomaterialien wählen (siehe die folgende Tabelle 16):

*Tabelle 16 Verbraucherproduktbereiche, in denen keine Kennzeichnungs- und Deklarationspflichten für enthaltene Nanomaterialien bestehen*

<b>Produktgruppe</b>	<b>Beispiele</b>
Spielwaren und Scherzartikel	Bausteine, Spielzeugautos, Puppen, Kuscheltiere, Malfarben, Knete, Gesellschaftsspiele, Kartenspiele, Nies- und Juckpulver, Stinkbomben und Tränengas, das nur den Zweck eines Scherzartikels erfüllt und keine schädlichen Stoffe enthält
Gegenstände, die dazu bestimmt sind, nicht nur vorübergehend mit dem menschlichen Körper in Berührung zu kommen	Bekleidung, Bettwäsche, Matratzen, Masken, Perücken, Haarteile, künstliche Wimpern, Schmuck, Armbänder, Brillengestelle, Windeln
Reinigungs- und Pflegemittel für den häuslichen Bedarf	Putzmittel, Möbelpflege, Autopflege sowie Geschirrspülmittel, Silberputzmittel, Entkalkungsmittel, Fleckentferner, Waschmittel
Imprägnierungsmittel und sonstige Ausrüstungsmittel für Bedarfsgegenstände im Sinne der Nr. 6, die für den häuslichen Bedarf bestimmt sind	Schuhcreme, Imprägniersprays, optische Aufheller

<sup>331</sup> Siehe: [www.bag.admin.ch/nanotechnologie/faq/index.html?lang=de#faq\\_anker\\_612](http://www.bag.admin.ch/nanotechnologie/faq/index.html?lang=de#faq_anker_612) (abgerufen am 10.11.2012).

<sup>332</sup> EDI/EVD/UVEK (2012), S. 27.

Produktgruppe	Beispiele
Mittel und Gegenstände zur Geruchsverbesserung in Räumen, in denen sich Menschen aufhalten sollen	Raumduftsprays, Beckensteine, ätherische Öle für Duftlampen

Angesichts in der Schweiz bislang weitgehend fehlender Deklarations- und Kennzeichnungsvorschriften wurde von Nationalratspräsidentin Maya Graf am 23.12.2011 die Motion 11.4201 «Nanotechnologie. Gesetzliche Regulierungen und Deklarationen» eingereicht. In dieser Motion wird gefordert, gemäss dem Vorsorgeprinzip gesetzliche Regulierungen für die Nanotechnologie einzuleiten und angesichts der bestehenden Intransparenz auf dem Markt insbesondere eine Deklarationspflicht für Produkte mit Nanopartikeln bei Lebensmitteln und Kosmetika einzuführen. Darüber hinaus wird auch angeregt, ein Register der hergestellten, importierten und in Verkehr gebrachten Nanomaterialien und -produkte in der Schweiz aufzubauen. Der Bundesrat beantragte am 02.03.2012 die Ablehnung der Motion, wies jedoch darauf hin, dass analog der bereits bestehenden EU-Regularien die Einführung von Kennzeichnungspflichten auf der Verpackung für nanohaltige Kosmetika und Lebensmittel geprüft werden soll.<sup>333</sup>

#### 12.2.4 Informationen nach dem Schweizer Produkteregister

Für Hersteller in der Schweiz existiert – wie auch in anderen Ländern<sup>334</sup> – gemäss Art. 61 ff. ChemV eine Meldepflicht für das Inverkehrbringen bestimmter gefährlicher Stoffe und Zubereitungen, PBT- und vPvB-Stoffe und bestimmte neue Stoffe. Die Daten werden in einem Produkteregister gespeichert und sollen es den Behörden ermöglichen, für den Fall, dass von einem gefährlichen Stoff oder einer Zubereitung ein nicht vertretbares Risiko für die menschliche Gesundheit oder die Umwelt ausgeht, präventive Massnahmen zu ergreifen. Zudem hat die Auskunftsstelle für Vergiftungen (Schweizerisches Toxikologisches Informationszentrum STIZ) Zugriff auf die Daten, um bei Vergiftungen und Unfällen im Zusammenhang mit den registrierten Produkten schnell und zielgerichtet helfen

<sup>333</sup> Vgl. [www.parlament.ch/d/suche/seiten/geschaefte.aspx?gesch\\_id=20114201](http://www.parlament.ch/d/suche/seiten/geschaefte.aspx?gesch_id=20114201) (abgerufen am 13.02.2013).

<sup>334</sup> Vgl. den Überblick in Ahrens et. al. (2001), S. 16.

zu können. Die meldepflichtigen Inhalte hängen von der Einstufung des Stoffes ab.

Zu den meldepflichtigen Daten zählen Name und Adresse des Herstellers in der Schweiz sowie, bei gefährlichen alten Stoffen oder bei PBT- oder vPvB-Stoffen sowie für bestimmte neue Stoffe, die chemische Bezeichnung, die CAS-Nr., die EG-Nr., die Einstufung und die Kennzeichnung, gegebenenfalls die Identifizierung als PBT- oder vPvB-Stoff. Weitere Informationen sind entsprechend der Stoffeigenschaften zu melden.

Die Informationen im Produktregister sind im Hinblick auf Produkte, die Nanomaterialien enthalten, aber insofern begrenzt, als nur solche Stoffe und Zubereitungen erfasst werden, die als gefährlich eingestuft sind bzw. die andere Einstufungsmerkmale erfüllen. Die Einstufung wiederum setzt voraus, dass Stoffinformationen zu einem Nanomaterial überhaupt erhoben werden (siehe dazu die Kritik an der Mengenschwelle in Abschnitt 12.1.1) und dass die bestehenden Einstufungskriterien auch auf Nanomaterialien anwendbar sind. Ferner können die zuständigen Behörden und die Öffentlichkeit aufgrund des Schweizer Produktregisters keinen Überblick über die auf dem Markt befindlichen Nanoprodukte erlangen, da nicht gefährliche Nanoprodukte nicht zu melden sind.

### 12.2.5 Vereinbarkeit von Informationspflichten mit WTO-Recht

Abschliessend soll noch auf die WTO-rechtlichen Rahmenbedingungen für die nationale Einführung von freiwilligen oder verpflichtenden Standards sowie technischen Normen für Produkte eingegangen werden, die zu berücksichtigen sind bei der Einführung des Vorsorgerasters für synthetische Nanomaterialien durch staatliche Stellen wie dem BAG oder bei der verpflichtenden Kennzeichnung von Produkten, die Nanomaterialien enthalten.

Zu prüfen ist in erster Linie das Übereinkommen über technische Handelshemmnisse (TBT-Übereinkommen),<sup>335</sup> das am 1. Januar 1995 in Kraft trat.<sup>336</sup> Im TBT-Übereinkommen sind die Regeln festgelegt, die die staatlichen Stellen bei der Einführung technischer Vorschriften, Normen und Konformitätsbewertungsverfahren zu beachten haben. Inwieweit sie auch private Standards erfassen, ist

---

<sup>335</sup> Agreement on Technical Barriers to Trade, Annex 1A to the Marrakesh Agreement Establishing the World Trade Organization (Apr. 15, 1994).

<sup>336</sup> Hermann et al. (2007), Rn 541 und 571.

umstritten. Nach der Präambel soll kein Land daran gehindert werden, die notwendigen Massnahmen zum Schutz von Leben und Gesundheit von Menschen, Tieren oder Pflanzen sowie zum Schutz der Umwelt oder zur Verhinderung irreführender Praktiken zu ergreifen. Dabei dürfen die technischen Vorschriften und die Konformitätsbewertungsverfahren den Handel aber nicht stärker beschränken als notwendig, um ein berechtigtes Ziel zu erreichen (Art. 2.2 TBT-Übereinkommen). Sie müssen zudem transparent sein und dürfen nicht diskriminieren. Da das TBT-Übereinkommen ferner vorsieht, dass die Mitglieder einschlägige internationale Normen als Grundlage für ihre technischen Vorschriften zu verwenden haben, dient es der internationalen Harmonisierung. Die Regelungen des TBT-Übereinkommens gelten nur für bestimmte Massnahmentypen («limited class of measures»):

- Technische Vorschriften (technical regulations),
- Normen (standards),
- Konformitätsbewertungsverfahren (conformity assessment procedures).

Eine «technische Vorschrift» ist definiert als Vorgabe in einem «Dokument, das Merkmale eines Produkts oder die entsprechenden Verfahren und Produktionsmethoden einschliesslich der anwendbaren Verwaltungsbestimmungen festlegt, deren Einhaltung zwingend vorgeschrieben ist» (vgl. Art. 1.2 i.V.m. Anhang 1.1 TBT-Übereinkommen). Das Dokument kann unter anderem oder ausschliesslich Festlegungen über Terminologie, Bildzeichen sowie Verpackungs-, Kennzeichnungs- oder Beschriftungserfordernisse für ein Produkt, ein Verfahren oder eine Produktionsmethode enthalten. Die verpflichtende Kennzeichnung von Nanoprodukten ist als eine technische Vorschrift im Sinn des TBT-Übereinkommens zu werten. Im Gegensatz zur technischen Vorschrift handelt es sich bei «Normen» um rechtlich unverbindliche Regelungen (vgl. Art. 1.2 i.V.m. Anhang 1.2 TBT-Übereinkommen). Das Vorsorgeraster für «synthetische Nanomaterialien» ist in diesem Sinne rechtlich als unverbindliche nationale Norm einzustufen.<sup>337</sup>

Nach den Grundsätzen der Meistbegünstigung und Inländergleichbehandlung in Art. 2.1 TBT-Übereinkommen muss ein Importland solche technischen Anforderungen, die es an ein Importprodukt aus einem WTO-Mitgliedstaat oder an inländische Produkte stellt, auch an «vergleichbare Produkte» aus allen anderen WTO-Mitgliedstaaten stellen. Eine Diskriminierung von ausländischen und ein-

---

<sup>337</sup> Jost (2010).

heimischen Inverkehrbringern von Nanomaterialien wird durch das Vorsorgeraster nicht bewirkt.<sup>337</sup>

Entsprechend dem Ziel des TBT-Übereinkommens, den internationalen Handel durch die internationale Harmonisierung zu fördern, sind die WTO-Mitgliedstaaten nach Art. 2.4 TBT-Übereinkommen verpflichtet, einschlägige schon bestehende oder unmittelbar in der Entstehung befindliche internationale Normen als Grundlage für ihre technischen Vorschriften zu verwenden («based on the international standard»). Bei einer mit internationalen Normen übereinstimmenden Verwendung von technischen Vorschriften wird zudem nach Art. 2.5 S. 2 TBT-Übereinkommen vermutet, dass dies kein unnötiges Hemmnis für den internationalen Handel schafft. Von internationalen Standards darf nur dann abgewichen werden, wenn diese «unwirksame oder ungeeignete Mittel zur Erreichung der angestrebten berechtigten Ziele [wären]». Die Definitionsnormen der ISO TC 229 für Nanomaterialien sind entsprechend dieser Vorgabe im Vorsorgeraster und bei der Kennzeichnung von Nanoprodukten zu berücksichtigen. Das TBT-Übereinkommen verpflichtet die Mitgliedstaaten, bei technischen Vorschriften, Normen und Konformitätsbewertungsverfahren Massnahmen dahin gehend zu ergreifen, dass lokale Regierungen oder Verwaltungen und nicht staatliche Stellen die Vorgaben des TBT-Übereinkommen einhalten und inkonsistente Regelungen unterlassen (vgl. die Artikel 3, 4, 7 und 8 TBT-Übereinkommen). Hervorzuheben ist hier insbesondere der «Leitfaden für eine gute Praxis» («Code of Good Practice») in Anhang 3 TBT-Übereinkommen. Dieser enthält Vorgaben für die Erarbeitung, Annahme und Verwendung von Normen. Beachtet werden muss, dass das TBT-Übereinkommen den WTO-Mitgliedstaaten nicht erlaubt, ein höheres Schutzniveau anzustreben, als in der entsprechenden internationalen Norm erreicht. Ferner sind die WTO-Mitglieder nach Art. 2.6 TBT-Übereinkommen zur Mitarbeit in internationalen Normenorganisationen verpflichtet, wenn sie für betreffende Waren technische Vorschriften bereits angenommen haben oder vorsehen. Daraus hat das WTO-Panel abgeleitet, dass die Mitgliedstaaten verpflichtet sind, ihre technischen Vorschriften laufend an sich ändernde internationale Vorgaben anzupassen.

Schliesslich sind bei der Einführung von technischen Vorschriften Transparenzvorgaben des TBT-Übereinkommens einzuhalten. Durch ein Notifizierungsverfahren, das alle Mitglieder der Welthandelsorganisation (WTO) verpflichtet, den anderen Mitgliedern über das WTO-Sekretariat ihre Entwürfe von technischen Vorschriften oder Konformitätsbewertungsverfahren zu übermitteln, soll die Transparenz sichergestellt werden. Allen Vertragsparteien und den Wirtschafts-

akteuren wird damit Einblick in die von den übrigen Parteien geplanten technischen Vorschriften und Konformitätsbewertungsverfahren verschafft, bevor sie angenommen werden.

## 12.3 Schlussfolgerungen

Der Rechtsrahmen in der Schweiz entlang des Lebenswegs von Nanomaterialien und Nanoprodukten berührt die unterschiedlichsten stoffrechtlichen und produktrechtlichen Vorschriften und Rechtsvorschriften zum Schutz der Arbeitnehmer/innen oder zum Schutz der Umwelt sowie weitere Rechtsbereiche, wie z. B. das Produkthaftungsrecht. Bei der Fülle der zu untersuchenden Rechtsvorschriften konnten im Rahmen der vorliegenden Studie nur ausgewählte Bereiche vertieft untersucht werden (v. a. Chemikalienrecht sowie Informationen über Nanomaterialien in Verbraucherprodukten).

Nanomaterialien werden wie alle anderen chemischen Stoffe vom Stoffbegriff der ChemV und der REACH-Verordnung erfasst, und die bestehenden Regelungen zur Registrierung, Bewertung und Zulassung sind für Nanomaterialien zum grossen Teil anwendbar. Soweit sie geändert bzw. ergänzt werden müssen, z. B. hinsichtlich der Einführung einer Definition von «Nanomaterial» oder der Absenkung der Registrierungsmengenschwellen für Nanomaterialien, kann dies in der ChemV geschehen. Ein völlig neuer gesetzlicher Rahmen ist dafür nicht notwendig.

Mit der 4. Teilrevision der ChemV wurde bereits die EU-Definition für Nanomaterialien eingeführt sowie Artikel 64 und Anhang 3 der ChemV wurden geändert, um mehr Informationen über gefährliche alte Stoffe und neue Stoffe zu erhalten, die in nanoskaliger Form hergestellt werden. Spezifische Prüf- und Kennzeichnungspflichten für Nanomaterialien sind in der Revision nicht enthalten.

Bei der Anpassung des Schweizer Rechtsrahmens ist grundsätzlich die Europakompatibilität zu beachten. Es ist zu erwarten, dass die bisherige Praxis der nanospezifischen Anpassung der Schweizer Vorschriften im Chemikalien- und Produktrecht im Wege des autonomen Nachvollzugs bzw. der Übernahme selektiver Regelungen beibehalten wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Schweiz die REACH-Verordnung bislang nicht als Ganzes übernommen hat, sondern immer wieder einzelne Regelungsaspekte angepasst hat.

Bei der Harmonisierung an das EU-Recht sind auch die von der EU zunehmend eingeführten Informations- und Kennzeichnungspflichten für Verbraucherprodukte relevant. So werden beispielsweise zum Schutz der menschlichen Gesundheit durch die neue EU-KosmetikVO Hersteller, Importeure und Händler Informationspflichten unterworfen. Kennzeichnungsvorschriften für Nanomaterialien in europäischen Produktvorschriften sind ferner in der Biozidverordnung und der Verordnung zur Information der Verbraucher über Lebensmittel festgeschrieben. In allen drei Produktbereichen können Konsument/innen und Behörden in der EU am Zusatz «nano» bei dem jeweiligen Inhaltsstoff erkennen, welcher Stoff im Produkt nanopartikulär vorliegt. Entsprechende Vorschriften bei den Produktkennzeichnungen in den genannten Produktbereichen existieren in der Schweiz gegenwärtig nicht; allerdings ist geplant, diese einzuführen.

Weiterhin zeigen in der EU die bisherigen Erfahrungen mit der Erstellung von Stoffsicherheitsberichten nach REACH, dass bei der gemeinsamen Registrierung eines Bulkmaterials mit einem chemisch identischen Nanomaterial die nanospezifischen Aspekte im Stoffsicherheitsbericht nicht ausreichend berücksichtigt werden. Die EU-Kommission hält bislang allerdings eine Anpassung der Mengenschwelle für die Registrierung und die Erstellung eines Stoffsicherheitsberichts für nicht notwendig, da die meisten in der wissenschaftlichen Diskussion befindlichen Nanomaterialien in Mengen von mehr als einer Tonne hergestellt oder importiert werden. Daher ist bei der Harmonisierung mit dem EU-Recht im Bereich der Nanomaterialien zu prüfen, ob in bestimmten Punkten (z. B. bei Mengenschwellen für die Registrierung) aus Vorsorgegesichtspunkten über die Anforderungen des EU-Rechts hinausgegangen werden sollte.



## 13 Interdisziplinäre Gesamtbewertung

Im vorliegenden Kapitel wird auf Basis der Erkenntnisse aus den Recherchen und Analysen der einzelnen Disziplinen (vgl. Kapitel 5–12) eine interdisziplinäre Gesamtbewertung vorgenommen. Hierzu werden die in Kapitel 3 aufgeführten Module und Analyseperspektiven erneut aufgegriffen und die zugehörigen Resultate zusammengefasst (vgl. Kapitel 13.1) Als die bedeutendsten Nanomaterialien für den Schweizer Markt wurden Siliziumdioxid, Titandioxid, Zinkoxid sowie Kohlenstoffnanoröhren und Nanosilber identifiziert. Aus diesem Grund werden in Kapitel 13.2 für diese prioritären Nanomaterialien die wichtigsten Ergebnisse jeweils in Form eines interdisziplinären Stoffprofils zusammengefasst. Im Anschluss daran werden die konsolidierten Teilergebnisse in ihrer Gesamtheit betrachtet und ein Gesamtfazit erstellt (vgl. Kapitel 13.2), welches gewissermassen als «Kompass» für die anschliessende Formulierung von Empfehlungen dient.

### 13.1 Zusammenfassung der Resultate nach Analyseaspekten

Im Folgenden werden die Resultate der verschiedenen Analyseperspektiven aus den Modulen I und II der vorliegenden Studie zusammengefasst (vgl. Kapitel 3).

#### 13.1.1 Marktübersicht der relevanten Nanomaterialien sowie nanotechnologischer Produkte und Anwendungen

Abschätzungen für das Weltmarktvolumen von Nanomaterialien liegen derzeit in einer Spanne zwischen ca. 2 und 15 Milliarden US-Dollar. Bezüglich der weltweiten Produktionsmenge liegen die Abschätzungen zwischen einigen Zehntausend bis zu einigen Hunderttausend Tonnen pro Jahr. Die Zahl der im Labormassstab verfügbaren Nanomaterialien liegt wesentlich höher und umfasst derzeit über

250 chemische Substanzklassen mit einigen Tausend Nanomaterialmodifikationen.

Als relevanteste Nanomaterialien für den Schweizer Markt sind derzeit Siliziumdioxid-, Titandioxid- und Zinkoxid-Nanopartikel sowie Kohlenstoffnanoröhren und mit Bezug auf Konsumentenprodukte auch Nanosilber zu nennen. Darüber hinaus wird perspektivisch auch CNT und Fullerenen eine grosse Bedeutung zukommen, da diesen Nanomaterialien starke Wachstumsraten prognostiziert werden.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Schweiz im Gegensatz zu Ländern wie den USA (geschätzte Jahresproduktion von bis zu 40 000 Tonnen), Deutschland oder Japan keine Nanomaterialien im grossvolumigen Industriemassstab herstellt. Stattdessen überwiegt (mit einem Volumen von mindestens 2500 Tonnen) die Verarbeitung von Nanopartikeln für spezifische Anwendungsbereiche wie z. B. Beschichtungen, Konsumgüter oder Pharmaka. Im Konsumentenbereich konnten rund 100 Nanoprodukte identifiziert werden, die in der Schweiz hergestellt oder vertrieben werden. Rund drei Viertel der Produkte beziehen sich auf schmutz-, öl- und wasserabweisende Oberflächeneigenschaften («Nanoeffekt»), wobei eine Verwendung von Nanomaterialien nicht spezifiziert ist. Rund 20 Prozent der genannten Nanoprodukte enthalten nach Einschätzung der Handelsketten freie Nanopartikel, wobei vor allem titandioxidhaltige Sonnenschutz- und Pflegecremes, aber auch Versiegelungsprodukte betroffen sind. In Bezug auf Gefährdungsabschätzungen sind insbesondere die Anwendungen relevant, bei denen Nanopartikel in ungebundener Form im Produkt vorliegen (z. B. in Aerosolsprays oder Kosmetika), ferner auch Produkte, bei denen Nanopartikel im Verlauf des Produktlebenszyklus freigesetzt werden können (z. B. Textilien mit Nanosilber).

Für die Konsumentinnen und Konsumenten ist jedoch meist nicht ersichtlich, welche Produkte Nanomaterialien enthalten. Einerseits ist nicht überall, wo als verkaufswirksames Schlagwort «nano» draufsteht, auch «nano» drin, andererseits werden Produkte, die tatsächlich Nanomaterialien enthalten, nicht oder sehr uneinheitlich gekennzeichnet.

Für Details zu dieser Analyseperspektive wird auf Kapitel 5 verwiesen.

### **13.1.2 Produkte und Anwendungen mit hohem Nachhaltigkeitspotenzial**

Es konnte gezeigt werden, dass bereits einige nanomaterialhaltige Produkte und Anwendungen auf dem Markt existieren, die einen Entlastungseffekt auf die Umwelt besitzen. Das Spektrum der Anwendungen reicht von rollwiderstandsoptimierten Reifen über schnellhärtende Betone und hocheffiziente Dämmstoffe bis hin zu Lebensmittelverpackungen und Verbundwerkstoffen für den Flugzeugbau. Hervorzuheben ist, dass Forschungseinrichtungen in der Schweiz (z. B. Adolphe Merkle Institut der Universität Fribourg, Empa etc.) im Bereich der Verbundwerkstoffe stark engagiert sind, wobei auch alternative Rohstoffe (z. B. Nanozellulose) zum Einsatz kommen.

Für die Analyse der Umweltauswirkungen und des Energiebedarfs stehen mit den internationalen Normen für Ökobilanzierung und den CO<sub>2</sub>-Fussabdruck bereits etablierte methodische Ansätze zur Verfügung, die grundsätzlich auch für die Bewertung von Nanoprodukten geeignet sind. Ob diese Produkte tatsächlich nachhaltig sind, kann nur im Einzelfall und im Vergleich zu einem marktverfügbaren Referenzprodukt vergleichbarer Funktionalität ermittelt werden

Qualitative und quantitative Konkretisierungen zu den oben genannten Anwendungen und Produkten mit einem positiven Effekt in Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung befinden sich in Kapitel 7.

### **13.1.3 Überblick über die aktuelle Risikoforschung in Hinblick auf Nanomaterialien**

Die Forschung zu Sicherheitsaspekten von Nanomaterialien hat in der Schweiz eine langjährige Tradition. So hat der Nationale Forschungsschwerpunkt (NFS) «Nanowissenschaften – Impulse für Lebenswissenschaften, Nachhaltigkeit, neue Informations- und Kommunikationstechnologien» mit einem Fördervolumen von rund 50 Millionen Franken im Zeitraum von 2001 bis 2013 wesentlich dazu beigetragen, neue Ansätze, Fabrikationsmethoden und das Verständnis der Nanowissenschaften weiterzuentwickeln. Der NFS Nanowissenschaften bildet eine Schnittstelle zwischen Forschungsinstitutionen und der Industrie und hat das «Swiss Nanoscience Institute» (SNI) in Basel als führendes Nanotechnologie-Institut in der Schweiz begründet. Auch die Risikoforschung wird in der

Schweiz aktiv gefördert und umfasst sowohl Projektförderung im Rahmen staatlicher Förderprogramme als auch den Bereich der institutionellen und universitären Forschung. Einen Schwerpunkt bildet das aktuelle Nationale Forschungsprogramm «Chancen und Risiken von Nanomaterialien» (NFP 64) des Schweizer Nationalfonds, welches für eine Forschungsdauer von fünf Jahren mit insgesamt 12 Millionen Franken ausgestattet ist. Hervorzuheben ist die starke internationale Vernetzung der Risikoforschung zu Nanomaterialien in der Schweiz, die auf einer hohen Beteiligung von Schweizer Institutionen an den Forschungsrahmenprogrammen der EU, aber auch an ausländischen Forschungsaktivitäten wie dem Forschungsschwerpunkt 1313 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) begründet ist.

Auf europäischer Ebene sind innerhalb des 6. und 7. Forschungsrahmenprogrammes in mehr als 50 laufenden oder bereits abgeschlossenen Projekten in den letzten Jahren rund 140 Millionen Euro in die Risikoforschung investiert worden. Ausserhalb Europas tragen vor allem Forschungsaktivitäten in den USA wesentlich zur Identifizierung und Bewertung möglicher Risiken von Nanomaterialien für die Gesundheit und die Umwelt bei. Darüber hinaus ist auf internationaler Ebene die von der OECD eingerichtete «Working Party on Manufactured Nanomaterials» (WPMN) hervorzuheben.

Weitergehende Informationen zu dieser Analyseperspektive befinden sich in Kapitel 6.

Trotz dieser umfangreichen Risikoforschung bestehen nach wie vor kritische Wissenslücken, auf die im folgenden Unterkapitel eingegangen wird.

#### **13.1.4 Analyse der Exposition und des toxikologischen Gefährdungspotenzials von besonders marktrelevanten Nanomaterialien; Wissensstand und Wissenslücken**

Grundsätzlich können alle Nanomaterialien, die während der Herstellung emittiert, im Laufe der Anwendung oder am Ende ihres Lebensweges aus Produkten freigesetzt werden, mit dem Mensch und den verschiedenen Umweltmedien in Berührung kommen. Besonders hoch ist diese Exposition bei Nanomaterialien, die nicht fest in eine Produktmatrix eingebunden sind, sondern als freie Nanopartikel vorliegen.

Ob mit dieser Freisetzung auch ein toxikologisches Risiko verbunden ist, hängt auch entscheidend von dem spezifischen toxikologischen Gefährdungspotenzial der einzelnen Nanomaterialien ab. Hinsichtlich humantoxischer Wirkungen zeigen die vorliegenden Studien, dass beispielsweise bei bestimmten Kohlenstoffnanoröhren (CNTs), Industrieruss und TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel kanzerogene Effekte nachgewiesen werden können. Allerdings wurden die kanzerogenen Effekte meist bei sehr hohen Expositionsdosen beobachtet, die von Expertinnen und Experten teilweise als eher unrealistisch betrachtet werden. Hinsichtlich möglicher negativer Effekte auf die Umwelt sind vor allem Zinkoxid aufgrund toxischer Effekte in Ökosystemen sowie Nanosilber wegen der Gefahr möglicher Resistenzenbildung bei Bakterien zu nennen.

Für eine fundierte Risikobewertung von Nanomaterialien reichen die vorliegenden Daten in der Regel allerdings noch nicht aus, auch wenn für einzelne Nanomaterialien bereits erste Abschätzungen der Risikoquotienten existieren. Nach wie vor fehlen für die meisten Nanomaterialien quantitative Abschätzungen zur Freisetzung und der daraus resultierenden Exposition sowie insbesondere zu längerfristigen Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt.

Derzeit gibt es kaum Informationen darüber, ob die in Kurzzeittests beobachteten Reaktionen und Effekte über einen längeren Zeitraum anhalten, ob womöglich andere Effekte ausgelöst werden oder ob die beobachteten Reaktionen mit der Zeit wieder abklingen. Wissenslücken gibt es auch hinsichtlich der Folgen von Langzeitexpositionen wie z. B. einer kontinuierlichen Exposition gegenüber geringen Nanopartikelkonzentrationen.

Risikobewertungen von Nanomaterialien werden zudem dadurch erschwert, dass die überwiegende Anzahl von toxikologischen und ökotoxikologischen Studien bisher mit unbehandelten Nanomaterialien durchgeführt wird. In den meisten realen Anwendungen und Produkten werden aber oberflächenbehandelte bzw. -funktionalisierte Nanomaterialien eingesetzt. Zudem unterliegen Nanomaterialien und nanohaltige Produkte während ihres Lebenszyklus verschiedensten Transformationsprozessen, welche dazu führen, dass ihre Form und chemische Zusammensetzung (bei der Produktherstellung, während der Nutzenphase des Produkts und/oder nach der Freisetzung) sich verändern. Folglich sind in der Umwelt schlussendlich transformierte Nanomaterialien zu finden, die sich zum Teil grundlegend von den Originalformen unterscheiden und unter Umständen völlig andere Auswirkungen auf Mensch und Umwelt haben können als die unbehandelten Nanomaterialien.

Um die Untersuchungszeiträume in aufwendigen Freilandexperimenten zu verkürzen, wäre es daher erforderlich, Tests insbesondere auch mit definiert gealterten Nanomaterialien durchzuführen.

Angesichts der oben festgestellten Wissenslücken gestaltet sich die Charakterisierung und Detektierung von Nanomaterialien in realen Freilandstudien nach wie vor schwierig. Feldstudien und Umweltmonitoring von Nanomaterialien scheitern nach wie vor noch häufig an methodologischen Problemen bei der Analytik, da bisher wenige geeignete Methoden zum Aufspüren und zur Charakterisierung von synthetisch hergestellten Nanopartikeln in komplexen realen Systemen wie Oberflächengewässer und Boden existieren. Das liegt unter anderem an den oftmals niedrigen Partikelkonzentrationen in den Umweltmedien sowie an Matrixeffekten<sup>338</sup> und vorhandenen Hintergrundkonzentrationen in der Umwelt (z. B. bei Eisen- und Titandioxid). Hinzu kommt, dass die zahlreichen verschiedenen Oberflächenfunktionalisierungen und unbeabsichtigten Oberflächenmodifikationen der Nanomaterialien im Laufe ihres Lebenszyklus zu unzähligen potenziellen Wechselwirkungen zwischen (oberflächenbehandeltem) Nanomaterial und Umwelt/umgebendem Medium führen können, was die Charakterisierung und Detektierung von Nanomaterialien unter realen Feldbedingungen erheblich erschwert.

Für Details zu dieser Analyseperspektive wird auf Kapitel 8 verwiesen.

### **13.1.5 Verhalten und Verbleib der verwendeten Nanomaterialien bei den Behandlungsprozessen am Ende ihres Lebensweges**

Nanomaterialien werden zusammen mit den Produkten, in denen sie enthalten sind, früher oder später entsorgt und durchlaufen in ihrer Nachgebrauchsphase eine oder mehrere Stationen der Abfall- bzw. Abwasserbehandlung. Dazu gehören insbesondere Kehrlichtverbrennungsanlagen, Schredderanlagen und Abwasserreinigungsanlagen. Erste Experimente mit Ceroxid in Kehrlichtverbrennungsanlagen zeigen zwar, dass Nanomaterialien zusammen mit anderen Schadstoffen aus der Abluft herausgefiltert werden. Jedoch werden sie dabei nicht zerstört, sondern reichern sich dann beispielsweise in den Filterstäuben an und können über die Schwermetallentfrachtung der Filterasche in die metallurgi-

---

<sup>338</sup> Bei einem Matrixeffekt handelt es sich um den Einfluss einer Matrix (z. B. Boden, Sediment) auf die Bestimmung der unbekanntenen Komponente (hier: des Nanomaterials).

sche Industrie überführt werden. Dort kann eine erneute Freisetzung derzeit nicht ausgeschlossen werden.

Kläranlagen haben sich in ersten Experimenten mit Nanosilber als effizient erwiesen, wobei 93 bis 99 Prozent des in Kläranlagen eingetragenen Silbers nach der Klärung gebunden an den Schlammflocken im Klärschlamm vorliegen.

Für die Mehrzahl der Nanomaterialien sowie einige bedeutende Prozesse in der Nachgebrauchsphase liegen derzeit noch keine Daten zum Verhalten und Verbleib vor. Dies gilt insbesondere für unspezifisches Recycling von Nanomaterialien. In den meist offen gefahrenen Schredderanlagen, die üblicherweise einem Recyclingprozess als Vorbehandlung vorausgeschaltet sind, kann es möglicherweise zu Freisetzungen von Nanomaterialien kommen.

Weitergehende Informationen zu dieser Analyseperspektive beinhaltet Kapitel 9.

### **13.1.6 Evaluierung der öffentlichen Debatte um die Risiken des Einsatzes von Nanomaterialien sowie Identifizierung der wichtigsten Stakeholder und ihrer jeweiligen Rolle und Anliegen**

In der öffentlichen Wahrnehmung sind in der Schweiz v. a. Unternehmen, Wirtschaftsverbände, Nichtregierungsorganisationen, Beratungsorganisationen sowie Parteien sichtbar. Eine weitere wichtige Stakeholdergruppe stellen die Medien dar. Die schriftlich dokumentierten Positionen der massgeblichen Stakeholder lassen sich im Wesentlichen in drei Gruppen einteilen: Eine relativ kleine Gruppe von Stakeholdern positioniert sich sehr positiv gegenüber Nanotechnologien, indem sie überwiegend die Nutzenaspekte hervorhebt. Die weitaus grösste Gruppe beleuchtet Chancen und Risiken mit einer gewissen Ausgewogenheit, und eine dritte Gruppe von Stakeholdern positioniert sich in der öffentlichen Debatte mit einem klaren Schwerpunkt auf allfällige Risiken. Die Grüne Partei betont ebenfalls verstärkt die Risiken, während die wirtschaftsnahe FDP sowie die CVP auf die Chancen fokussieren. Andere Parteien, darunter die SP und die SVP, haben sich bislang zum Thema nicht geäussert.

Insgesamt besteht somit in der Schweiz sowohl in der Fach- als auch der allgemeinen Öffentlichkeit gegenwärtig eine eher positive Einstellung gegenüber Nanotechnologien. Eine allgemeine Ablehnung dieses Technologiefeldes ähnlich wie bei Gentechnik ist daher derzeit nicht zu erwarten. Allerdings hängt die Einstellung in der Bevölkerung wesentlich vom jeweiligen Anwendungsbereich

der Nanotechnologie ab. Applikationen im Konsumentenbereich, speziell in Lebensmitteln, werden von der Mehrheit der Bevölkerung kritisch gesehen. Aufgrund der nur sehr sporadischen Thematisierung von Nanotechnologie in den Medien scheint es vordringlich, Informationen über Chancen und Risiken von Nanomaterialien mittels verschiedener Initiativen verstärkt in die Öffentlichkeit zu tragen.

Kapitel 10 enthält weitergehende Informationen zu den Positionen der einzelnen Stakeholder sowie zur Chancen- und Risikowahrnehmung der Schweizer Bevölkerung im internationalen Vergleich.

### **13.1.7 Charakterisierung der ethischen Fragestellungen unter besonderer Berücksichtigung der Anwendbarkeit und Auslegungsmöglichkeiten des Vorsorgeprinzips**

Grundsätzlich wirft die Nanotechnologie, wie auch die Gentechnologie, risikoethische Fragestellungen auf. Im Unterschied zur Debatte um die Nanotechnologie spielt aber in der Gentechnikdebatte zusätzlich die Frage nach dem moralischen Status der Lebewesen, an denen die Technologie angewandt wird, eine zentrale Rolle. Je nach ethischer Grundsatzposition stellt ein Eingriff in ein Lebewesen eine unzulässige Handlung dar, und die risikoethische Frage stellt sich gar nicht. Falls doch, werden die Auswirkungen des Eingriffs auf ein Lebewesen aufgrund seiner metaphysischen Eigenschaften oder aufgrund seiner undurchdringlichen Komplexität als prinzipiell nicht erfassbar betrachtet. Eine Risiko-urteilung ist dann aus prinzipiellen Gründen nicht möglich.

In der gegenwärtigen Debatte werden die Risikoaspekte von Nanomaterialien differenzierter beurteilt, da, anders als bei der Gentechnik, nanotechnologische Anwendungen z. T. konkrete Nutzenaspekte für die Konsumentinnen und Konsumenten bieten (z. B. leichtere Getränkeverpackungen durch PET-Flaschen mit nanotechnologischer Beschichtung). Daher steht derzeit ein generelles Moratorium für alle Nanomaterialien nicht im Vordergrund, sondern könnte nur für einzelne Anwendungsfelder infrage kommen. Welche dies eventuell sind, hängt von der integrierten Betrachtung der Chancen und Risiken im jeweiligen Anwendungsfeld ab. Gemäss des deontologischen Ansatzes der Risikoethik sollten Anwendungsbereiche für Nanomaterialien ausgeschlossen werden, für die im Rahmen der Risikobeurteilung unzumutbare Risiken identifiziert wurden.



Um der Situation des Nicht- oder ungenügenden Wissens aus ethischer Sicht angemessen begegnen zu können, sollte sich der Gesetzgeber bei der Anpassung von bestehenden Rechtsvorschriften bzw. der Einführung von neuen Regeln für Nanomaterialien vom Vorsorgeprinzip leiten lassen. Dies erlaubt eine differenzierte und einzelfallbezogene (d. h. stoff- und anwendungsbezogene) Regulierung von Nanomaterialien, die trotzdem den Herstellern Rechtssicherheit für die Vermarktung bietet.

Für Details zu dieser Analyseperspektive wird auf Kapitel 11 verwiesen.

### **13.1.8      Aktueller Rechtsrahmen für Nanomaterialien in der Schweiz und auf europäischer Ebene nach geltendem Recht**

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde der Rechtsrahmen entlang des Lebenswegs von Nanomaterialien und Nanoprodukten v. a. in Hinblick auf das Chemikalienrecht sowie Informationen über Nanomaterialien in Verbraucherprodukten untersucht, wobei neben der Schweizer auch vertieft die EU-Perspektive beleuchtet wurde.

Die Untersuchung im Chemikalienrecht kommt zu dem Ergebnis, dass Nanomaterialien wie alle anderen chemischen Stoffe vom Stoffbegriff der Schweizer Chemikalienverordnung (ChemV) und der REACH-Verordnung der EU erfasst werden. Ein völlig neuer gesetzlicher Rahmen ist daher nicht notwendig. Allerdings müssen die bestehenden Regelungen zur Registrierung, Bewertung und Zulassung z. T. angepasst bzw. ergänzt werden. Mit der 4. Teilrevision der ChemV wurde bereits die EU-Definition für Nanomaterialien eingeführt sowie Artikel 64 und Anhang 3 der ChemV wurden geändert, um mehr nanospezifische Informationen über gefährliche alte Stoffe und neue Stoffe zu erhalten.

Bei der Anpassung des Schweizer Rechtsrahmens ist grundsätzlich die Europakompatibilität zu beachten. In diesem Zusammenhang sind die von der EU zunehmend eingeführten Informations- und Kennzeichnungspflichten für Verbraucherprodukte in den Bereichen Kosmetik, Lebensmittel und Biozide relevant. In allen drei Produktbereichen können Konsument/innen und Behörden in der EU an dem Zusatz «nano» bei dem jeweiligen Inhaltsstoff erkennen, welcher Stoff im Produkt nanopartikulär vorliegt. Entsprechende Vorschriften bei den Produktkennzeichnungen in den genannten Produktbereichen existieren in der Schweiz derzeit nicht; allerdings ist geplant, diese einzuführen.

Bei der Harmonisierung mit dem EU-Recht im Bereich der Nanomaterialien ist ferner zu prüfen, ob in bestimmten Punkten (z. B. bei Mengenschwellen für die Registrierung) aus Vorsorgegesichtspunkten über die Anforderungen des EU-Rechts hinausgegangen werden sollte (vgl. hierzu auch Kapitel 14.2). Detaillierte Informationen zum aktuell gültigen Rechtsrahmen in Hinblick auf Nanomaterialien befinden sich in Kapitel 12.

## 13.2 Zusammenfassung der Resultate für besonders relevante Nanomaterialien

Der folgende Abschnitt enthält die interdisziplinären Stoffprofile der für den Schweizer Markt besonders relevanten Nanomaterialien Siliziumdioxid, Titandioxid, Zinkoxid sowie Kohlenstoffnanoröhren und Nanosilber.

### 13.2.1 Siliziumdioxid

*Tabelle 17 Interdisziplinäres Stoffprofil für Siliziumdioxid*

Physikochemische Charakterisierung	Zwei unterschiedliche Nanoformen: durch Fällung hergestellte Partikel mit hoher spezifischer Oberfläche sowie pyrogen hergestellte, fast porenfreie Partikel
Funktionalität	Mechanische Eigenschaften sowie Barriereigenschaften
Marktvolumen	Jährliche Verarbeitungsmenge in der Schweiz: 75 t
Produkte	Präzisionspoliermittel; Zusatzstoff bei Kunststoffen/Gummi (z. B. Autoreifen), Farben und Pigmenten; Entschäumer in der Papierproduktion und Raffinierung von Lebensmitteln; Antireflexschichten (z. B. Solarzellen); Gasbarriere in PET-Flaschen und Trennmittel in Lebensmitteln
Chancen für die Nachhaltigkeit	Energieeinsparung durch Minimierung von Reibung; Steigerung der Effizienz von Solarzellen; Reduzierung des Ressourceneinsatzes bei Lebensmittelverpackungen und möglicherweise des Verderbs bei Lebensmitteln
Exposition des Menschen	Orale Exposition durch den Einsatz in Lebensmitteln und Lebensmittelkontaktmaterialien

Exposition der Umwelt	Substanzieller Eintrag aus dem Reifenabrieb des Autoverkehrs; Tendenz zur Agglomeration und damit zum Sedimentieren im aquatischen System
Humantoxizität	Akut toxische Effekte beim Menschen sind nicht dokumentiert, aber toxische Effekte in Tierexperimenten in Abhängigkeit vom Kontaminationsweg und Partikelgrösse; während orale Aufnahme zu keinen messbaren Problemen führt, verursachen inhalativ aufgenommene, sehr kleine Partikel (14 nm) Atemnot und Tod
Ökotoxizität	Kurzzeittests an aquatischen Organismen zeigen eine geringe Toxizität; bei sehr hohen Konzentrationen kann es zu Kieferfehlbildungen und embryonalen Deformationen bei Fischen kommen, bei Grünalgen wurden Wachstumsinhibition und Zellkoagulationen festgestellt
Langzeitverhalten	Langzeiteffekte lassen sich aufgrund der Datenlage nicht abschätzen; dringender Forschungsbedarf
Verhalten und Verbleib bei der Entsorgung	In Kläranlagen eingetragenes Siliziumdioxid lässt sich nur schwer entfernen, sodass Freisetzungen in Gewässern vermutlich höher sind als bei Silber (siehe dort)
Rechtlicher Rahmen	Chemikalienrecht (ChemG, ChemV etc.)

### 13.2.2 Titandioxid

*Tabelle 18 Interdisziplinäres Stoffprofil für Titandioxid*

Physikochemische Charakterisierung	Drei kristalline Formen: Anatas (tetragonale Kristalle), Brookit (orthorhombische Kristalle) und Rutil (tetragonale Kristalle), die sich zum Teil in ihren physikochemischen und (öko-)toxikologischen Eigenschaften erheblich unterscheiden
Funktionalität	Transparenter UV-Filter; fotokatalytische und dadurch antimikrobielle Eigenschaften (Anatas)
Marktvolumen	Jährliche Verarbeitungsmenge in der Schweiz: 440 t
Produkte	Kosmetikartikel (z. B. Sonnencreme); Aussenanstriche; selbstreinigende Oberflächen (z. B. Dachziegel, Zement, Fenster); Antibeschlag-Oberflächen (z. B. bei Brillen); Textilien
Chancen für die Nachhaltigkeit	Vermeidung von Hautkrebs; Einsparung von Reinigungsmitteln

Exposition des Menschen	Keine signifikante Freisetzung am Arbeitsplatz (bei der Herstellung); direkter dermaler Kontakt bei Sonnencremes, allerdings kein Eindringen in den Körper bei intakter Haut; weiterhin Forschungsbedarf bei geschädigter Haut
Exposition der Umwelt	Abwaschen von Sonnenschutzcreme (v. a. in Badegewässern); Verwitterung/Auswaschung aus Fassadenanstrichen und beschichteten Oberflächen; wasserunlöslich; im Wasser Bildung stabiler Aggregate, die absedimentieren
Humantoxizität	Nach Inhalation Verbleib im Lungengewebe und Verursachung von Entzündungsreaktionen in der Lunge; z. T. Eindringen in das Blutgefässsystem und dadurch Transport in andere Organe; auf Basis tiereperimenteller Langzeitinhalationsversuche als mögliches Kanzerogen für den Menschen eingestuft
Ökotoxizität	Effekte auf Wachstum und Nahrungsaufnahme sowie auf Mortalität und Reproduktion von Wasserflöhen; Hemmung von Algenwachstum; physiologische und morphologische Veränderungen in Kiemen und Darm von Fischen; mögliche Bioakkumulation in aquatischen Organismen
Langzeitverhalten	Daten über Langzeitwirkungen niedriger TiO <sub>2</sub> -Nanopartikeldosen und Expositionsszenarien sind nicht vorhanden; dringender Forschungsbedarf
Verhalten und Verbleib bei der Entsorgung	Wird in Kläranlagen nicht vollständig im Klärschlamm zurückgehalten, sondern passiert diesen teilweise und führt damit zu einer Exposition der aquatischen Umwelt (s.o.)
Rechtlicher Rahmen	Chemikalienrecht (ChemG, ChemV etc.)

### 13.2.3 Zinkoxid

*Tabelle 19 Interdisziplinäres Stoffprofil für Zinkoxid*

Physikochemische Charakterisierung	In wässriger Lösung Abgabe von Zn <sup>2+</sup> -Ionen, aus denen sich auch beobachtete toxische Effekte ableiten
Funktionalität	Transparenter UV-Filter; Antikratz-Beschichtung; antimikrobielle Wirkung
Marktvolumen	Jährliche Verarbeitungsmenge in der Schweiz: 70 t
Produkte	UV-Schutz in Textilien, Holz- und Kunststofflacken; Bestandteil von Halbleitern in Elektronikartikeln wie z. B. TFT-Bildschirmen

Chancen für die Nachhaltigkeit	Ressourcenschonung durch die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten
Exposition des Menschen	Hauptexposition von Mensch und Umwelt erfolgt durch den Einsatz als UV-Schutz (in der Schweiz bei Sonnenschutzmitteln und Kosmetika verboten)
Exposition der Umwelt	
Humantoxizität	Keine relevante Humantoxizität aufgrund der Morphologie; durch Hautkontakt keinerlei negative Effekte; allerdings zytotoxische Effekte durch gelöste $Zn^{2+}$ -Ionen
Ökotoxizität	Freie $Zn^{2+}$ -Ionen als Verursacher toxischer Effekte im Ökosystem, gilt sowohl für nanoskalige als auch nicht nanoskalige Partikel
Langzeitverhalten	Keine Daten vorhanden; dringender Forschungsbedarf
Verhalten und Verbleib bei der Entsorgung	Keine Daten vorhanden; dringender Forschungsbedarf
Rechtlicher Rahmen	Chemikalienrecht (ChemG, ChemV etc.)

### 13.2.4 CNT

Tabelle 20 Interdisziplinäres Stoffprofil für Kohlenstoffnanoröhren (CNT)

Physikochemische Charakterisierung	Röhrchen aus reinem Kohlenstoff; einwandig (SWCNT) oder mehrwandig (MWCNT); Durchmesser meist von 1 bis 50 nm; Länge bis zu mehreren 100 $\mu\text{m}$ ; unmodifiziert hydrophob; flexibel oder starr, verzweigt oder unverzweigt, gute elektrische und Wärmeleitfähigkeit, hohe chemische Reaktionsfähigkeit; Verunreinigungen und Oberflächenmodifikationen haben signifikanten Einfluss auf die physikochemischen Eigenschaften
Funktionalität	Mechanische Stabilisierung von Kompositmaterialien, Leitfähigkeit; Träger von Wirkstoffmolekülen
Marktvolumen	Jährliche Verarbeitungsmenge in der Schweiz: 1 t
Produkte	Kompositwerkstoffe (v. a. Automobilbau und Luftfahrt); Sportgeräte (z. B. Tennisschläger und Velorahmen), antistatische Verpackungsmaterialien, Medizinprodukte (Forschung zum Einsatz als Drug Carrier)
Chancen für die Nachhaltigkeit	Ressourcenschonung und Kraftstoffeinsparung aufgrund leichter Materialien; Leistungssteigerung von Windkraftanlagen

Exposition des Menschen	Bei sachgemäßem Umgang ist Freisetzung während der Produktion unwahrscheinlich, ebenso während der Nutzenphase wegen fester Matrixeinbindung im Produkt; allerdings ist Exposition durch Abrieb und Verwitterung aus Kompositmaterialien nicht auszuschliessen (z. B. bei einem Einsatz in Autoreifen)
Exposition der Umwelt	Abrieb und Verwitterung von Kompositmaterialien; unmodifiziert sind CNT nicht wasserlöslich, persistent und tendieren zur Bildung von Aggregaten und Agglomeraten; durch Interaktion mit organischen Molekülen gewinnen CNT hydrophilen Charakter; zudem können sich organische Bestandteile im Wasser MWCNT stabilisieren und so im Wasser halten
Humantoxizität	Geringe akute Toxizität durch oxidativen Stress; in Abhängigkeit von Morphologie (Durchmesser-Länge-Verhältnis) und Flexibilität kanzerogene Wirkung; Persistenz/Akkumulation in biologischen Systemen
Ökotoxizität	Datenlage zeigt widersprüchliche Ergebnissen und grosse Datenlücken; geringe bis keine festgestellten Effekte bei unmodifizierten CNT im aquatischen Kompartiment; Transport von Stoffen in den Umweltmedien ist nicht auszuschliessen; dringender Forschungsbedarf
Langzeitverhalten	Schlechter Abbau in der Umwelt; Bioakkumulation; Modifikation der Oberflächeneigenschaften über Zeit in Abhängigkeit vom Umfeld
Verhalten und Verbleib bei der Entsorgung	In Verbrennungsanlagen ist von einer Zerstörung auszugehen, da die Verbrennungstemperatur oberhalb der Entzündungstemperatur von CNTs liegt; dennoch Forschungsbedarf, ob CNTs vollständig verbrennen
Rechtlicher Rahmen	Chemikalienrecht (ChemG, ChemV etc.)

### 13.2.5 Nanosilber

*Tabelle 21 Interdisziplinäres Stoffprofil für Nanosilber*

Physikochemische Charakterisierung	Neigt zur Aggregation und wird deshalb häufig oberflächenmodifiziert (z. B. mit Dextran, Citrat, Polysacchariden oder Polyvinylpyrrolidon); in wässrigen Lösungen werden aus Nanosilber freie Silberionen freigesetzt
Funktionalität	Antimikrobielle Wirkung (bakterizid, fungizid)
Marktvolumen	Jährliche Verarbeitungsmenge in der Schweiz: 3 t

Produkte	Lebensmittelverpackungen; Kühlschränke und Waschmaschinen; Textilien (Unterwäsche, Socken, Sport- und Funktionstextilien etc.); medizinische Produkte (antimikrobielle Textilien, Wundpflaster etc.)
Chancen für die Nachhaltigkeit	In Konsumentenprodukten gering bzw. nicht vorhanden; möglicherweise Chancen bei Substitution von bestehenden antimikrobiellen Agentien mit spezifisch höherem toxikologischen Gefährdungspotenzial
Exposition des Menschen	Vor allem durch Umgang mit nanosilberhaltigen Produkten: dermale Exposition durch Kontakt mit nanosilberhaltigen Textilien, Kosmetikartikeln und medizinischen Produkten; orale Exposition durch Verwendung nanosilberhaltiger Hygieneartikel wie z. B. Zahncreme
Exposition der Umwelt	Direkter Eintrag durch den Einsatz in Antifoulingfarben; Gebrauch von Kosmetika und Reinigungsmitteln oder durch Waschen via Kläranlagen (s. u.); Auswaschung aus Fassadenfarben durch den Regen
Humantoxizität	Akute Toxizität wird als gering eingestuft; allerdings Verdacht auf ein neurotoxisches Potenzial sowie allergische Reaktionen; Aufnahme durch die Haut ist gering, selbst bei geschädigter Haut; bei Inhalation Transport über den Riechnerv in das Gehirn möglich
Ökotoxizität	Ökotoxikologische Wirkung durch Freisetzung von Silberionen; Verdacht auf chronische Folgen bei nachkommenden Generationen von Wasserflöhen; mögliche Resistenzbildung von Bakterien; dringender Forschungsbedarf
Langzeitverhalten	Datenlücken insbesondere hinsichtlich Aufnahme, Verteilung und Elimination der Partikel aus dem Organismus und ihrer Effekte nach chronischer Exposition
Verhalten und Verbleib bei der Entsorgung	In Kläranlagen wird ca. 90 Prozent in schlecht lösliches und nicht mehr antimikrobiell wirksames Silbersulfid umgesetzt; Anreicherung im Klärschlamm
Rechtlicher Rahmen	Chemikalienrecht (ChemG, ChemV etc.), Produktvorschriften, z. B. im Kosmetik- und Biozidprodukterecht

Die interdisziplinären Stoffprofile zeigen klar, dass Nanomaterialien in der Schweiz bereits in zahlreichen Produkten des Alltags Einzug gehalten haben. Bei allen aufgeführten Nanomaterialien bestehen grössere oder kleinere Potenziale für eine Entlastung der Umwelt und Schonung von Ressourcen sowie andererseits mehr oder weniger Risiken für Mensch und Umwelt. Allerdings fällt das Ausmass der Chancen und Risiken bei den einzelnen Nanomaterialien sehr unterschiedlich aus. Beispielsweise stehen bei Siliziumdioxid den Chancen für die Nachhaltigkeit vergleichsweise geringe human- und ökotoxikologische Risiken gegenüber, während sich für das gegenwärtige Anwendungsportfolio von

Nanosilber ein genau umgekehrter Sachverhalt ergibt. Relevante Risiken bestehen v. a. bei den Umweltauswirkungen. Kritisch zu bewerten ist bei Nanosilber die Gefahr möglicher Resistenzenbildung bei Bakterien. Bei Zinkoxid sind toxische Effekte in Ökosystemen hervorzuheben.

Gemeinsam ist allen Stoffprofilen, dass im Bereich der Risikoforschung nach wie vor wesentliche Fragen ungeklärt bleiben. Dies gilt insbesondere in Hinblick auf die Langzeitwirkungen für Mensch und Umwelt.

### 13.3 Gesamtfazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich der Wissensstand zu den Auswirkungen von Nanomaterialien auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt in den letzten Jahren deutlich verbessert hat. Dazu hat insbesondere die in der Schweiz sehr aktive Risikoforschung einen wichtigen Beitrag geleistet. Zusammen mit vergleichbaren Aktivitäten auf EU- und internationaler Ebene (z. B. OECD) ist heute deutlich mehr über die humantoxikologische Wirkung grossvolumig produzierter Nanomaterialien in ihren wichtigsten Anwendungsbereichen bekannt. **Dennoch verbleiben kritische Wissenslücken, v. a. bezüglich der Transformationsprozesse in der Umwelt sowie in Hinblick auf Langzeiteffekte auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt (z. B. durch eine mögliche Anreicherung von Titandioxid-Nanopartikeln aus Sonnenschutzmitteln in der Nahrungskette).** Hinzu kommt, dass laufend zusätzliche Produkte und Anwendungen, z. T. mit modifizierten (z. B. beschichteten) Nanomaterialien neu auf dem Markt kommen, während eine detaillierte Sicherheitsbewertung nur für die unmodifizierten Standard-Nanomaterialien vorliegt. Dennoch wäre es ebenfalls ein Risiko, die Chancen innovativer Produkte und Anwendungen, die durch den Einsatz von Nanomaterialien ermöglicht werden, grundsätzlich nicht zu nutzen und angesichts der vorhandenen Wissenslücken pauschal ein Moratorium für die Verwendung von Nanomaterialien zu fordern. Einige der zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts wie beispielsweise die Eindämmung des anthropogenen Treibhauseffekts erfordern in erheblichem Umfang den Einsatz innovativer Verfahren und Produkte. Vor diesem Hintergrund wäre es fahrlässig, Lösungsbeiträge aus bestimmten Technologiefeldern a priori auszuschliessen. Die deontologische Position verlangt jedoch, dass Lösungsbeiträge (Chancen) nur dann genutzt werden dürfen, wenn die mit ihnen



einhergehenden neuen Risiken für die Risikoexponierten zumutbar sind. Die deontologische Position schliesst in bestimmten Fällen eine reine Chancen-Risiken-Rechnung aus.

Daher muss bei dem Einsatz von Nanomaterialien in neuen Produkten und Anwendungen unbedingt beachtet werden, dass vorhandene Potenziale in Hinblick auf Umweltentlastung und andere positive Nachhaltigkeitsaspekte entlang des Lebenszyklus nicht durch Reboundeffekte kompensiert bzw. ins Gegenteil verkehrt werden. Um dies sicherzustellen, ist frühzeitig, d. h. während der Forschungs- und Entwicklungsphase der Produkte, eine möglichst umfassende Analyse der Risiken entlang des gesamten Lebensweges erforderlich. Dies muss explizit auch eine Berücksichtigung der Exposition während der Gebrauchs- und Nachgebrauchsphase mit einschliessen.

Ebenso kann aus dem Vorhandensein von positiven Effekten auf Umwelt und Gesundheit nicht von vornherein geschlossen werden, dass alle Entwicklungsrichtungen und -pfade nanomaterialhaltiger Produkte gleichermassen zu befürworten sind. Gemäss des deontologischen Ansatzes der Risikoethik (vgl. Kapitel 11.1) sind Lösungsbeiträge in dem Fall auszuschliessen, wenn eine Risiko-beurteilung ergibt, dass die Risiken inakzeptabel sind. Daher kann es aufgrund toxikologischer Daten und aus ethischen Gesichtspunkten geboten sein, bestimmte Produkte bzw. Anwendungsbereiche zu verbieten.



## 14 Empfehlungen

Dieses Kapitel greift die grundsätzlichen Überlegungen aus den vorangegangenen Kapiteln auf und übersetzt diese in zehn konkrete Empfehlungen für Entscheidungsträger/innen insbesondere in der Politik, aber auch in der Industrie und der Wissenschaft. Diese Empfehlungen haben in erster Linie eine kurz- bis mittelfristige Perspektive und können gewissermassen als «10-Punkte-Programm» direkt umgesetzt werden.

Im Einzelnen handelt es sich um folgende Empfehlungen, die sich in drei Gruppen einteilen lassen:

### **Wissenschaftliche Wissensgrundlagen konsolidieren** (Kapitel 14.1)

1. Interaktion der Nanomaterialien mit Mensch und Umwelt sowie Langzeitwirkungen erforschen.
2. Verhalten und Verbleib von Nanomaterialien in der Abfall- und Abwasserbehandlung untersuchen.
3. Standardisierte Testmethoden zur Identifizierung und Charakterisierung von Nanomaterialien entwickeln.

### **Ordnungsrecht zum Schutz der Arbeitnehmer/innen und der Bevölkerung anpassen** (Kapitel 14.2)

4. Vorsorgeprinzip konsequent berücksichtigen, Moratorium nicht angebracht.
5. Materiell-rechtliche Vorschriften der Chemikalienverordnung anpassen.
6. Nanoproduktregister einführen.
7. Deklarationspflicht bei konsumentennahen Anwendungsbereichen einführen.

### **Flankierende freiwillige Instrumente, Forschungsschwerpunkte und öffentliche Dialoge** (Kapitel 14.3)

8. Anwendung freiwilliger Instrumente zur Risikoabschätzung bei Unternehmen fördern und weiterentwickeln, Chancenaspekte berücksichtigen.
9. Forschungsschwerpunkt «Klimaschutz durch Nanotechnologie» einrichten.

10. Öffentliche Dialoge auf eine integrierte Chancen-Risiko-Betrachtung prioritärer Anwendungsfelder fokussieren, Entwicklungsrichtungen der Nanotechnologien thematisieren.

In den folgenden Abschnitten werden diese Empfehlungen erläutert und abschliessend nochmals tabellarisch und unter Nennung der jeweiligen Akteure und Umsetzungshorizonte zusammengefasst (vgl. Kapitel 14.4).

## 14.1 Wissenschaftliche Grundlagen konsolidieren

### **Empfehlung 1: Interaktion der Nanomaterialien mit Mensch und Umwelt sowie Langzeitwirkungen erforschen.**

In Hinblick auf die Risikoforschung und aufgrund der ungenügenden Daten für eine umfassende Abschätzung von allfälligen Risiken **sollte ein klarer Schwerpunkt auf ein besseres Verständnis der Interaktion (d. h. Wechselbeziehungen) zwischen Nanomaterialien und Menschen und Organismen (Biota) gelegt werden. Zudem sollten die notwendigen Werkzeuge für die chronische Risikobeurteilung entwickelt werden.** Angesichts der Vielzahl von Nanomaterialien kommen dabei Vorhersagemodellen, die auf einem mechanistischen Verständnis beruhen, sowie quantitativen Struktur-Wirkungs-Beziehungen (QSAR<sup>339</sup>) eine besondere Bedeutung zu.

Des Weiteren **müssen Langzeitstudien mit nicht modifizierten, «produktionsfrischen» und oberflächenmodifizierten Nanomaterialien durchgeführt werden.** Erstere sind wichtig, um ein Grundverständnis für das jeweilige Nanomaterial zu entwickeln. Letztere werden benötigt, weil Nanomaterialien in der Regel nicht in unmodifizierter Form in die Umwelt gelangen. Darüber hinaus verändern sich ihre Oberflächenmodifikationen häufig während des Lebenszyklus.

---

<sup>339</sup> QSAR (englisch für «Quantitative Structure-Activity Relationship») beschreiben die Beziehungen zwischen der toxikologischen Wirkung eines Stoffes (hier: eines Nanomaterials) mit seiner chemischen Struktur und seinen physikalischen Eigenschaften. Auf diese Weise können ausgehend von bereits untersuchten Nanomaterialien über bislang ungetestete Moleküle gute Vorhersagen erstellt werden.

**Aufgrund der hohen Diversität und der vielfältigen möglichen Oberflächenmodifikationen wäre es verfehlt, die Nanomaterialien mit hoher derzeitiger bzw. zukünftiger Marktrelevanz (z. B. Titandioxid, Carbon Nanotubes (CNT), Fullerene) besonders gegenüber anderen hervorzuheben.<sup>340</sup>**

**Daneben sind zudem quantitative Abschätzungen zur Freisetzung und der daraus resultierenden Exposition für eine fundierte Risikobewertung unerlässlich.** Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass für eine adäquate Risikobeurteilung durch die Zulassungsbehörde insbesondere auch Risikodaten aus unabhängiger Forschung benötigt werden. Die Beurteilung sollte sich nicht nur auf Daten stützen, die von dem jeweiligen Gesuchsteller stammen.

## **Empfehlung 2: Verhalten und Verbleib von Nanomaterialien in der Abfall- und Abwasserbehandlung untersuchen.**

**Angesichts erst punktuell vorliegender Forschungsergebnisse zu dem Verhalten und Verbleib von Nanomaterialien in den Prozessen der Abfall- und Abwasserbehandlung (z. B. Kehrichtverbrennung, Schredderanlagen und Abwasserreinigung) sollten bisher noch nicht untersuchte Nanomaterialien mit hoher derzeitiger bzw. zukünftiger Marktrelevanz (z. B. Titandioxid, Zinkoxid, CNT) prioritär überprüft werden.** Darüber hinaus ist auch zu untersuchen, ob und in welcher Form die Nanomaterialien in den dabei entstehenden Abfallfraktionen (z. B. Filterrückständen und Klärschlämmen) vorliegen.<sup>341</sup>

**Insbesondere bei Schredderanlagen besteht ein erhöhter Forschungsbedarf,** und zwar aus folgenden Gründen:

---

<sup>340</sup> Es ist jedoch sinnvoll, bei der Auswahl der Nanomaterialien für Experimente mit solchen zu beginnen, die in hohen Mengen produziert und/oder in hohen Mengen in umweltoffenen Anwendungen verwendet werden (z. B. Titandioxid-Nanopartikel). Darüber hinaus sollten auch Nanomaterialien wie CNTs und Fullerene prioritär berücksichtigt werden, bei denen grosse Wachstumsraten für die Zukunft zu erwarten sind.

<sup>341</sup> Wichtig in diesem Zusammenhang ist der Grundsatz im Entwurf des Konzeptpapiers «Umweltverträgliche und sichere Entsorgung von Abfällen aus der Herstellung sowie industrieller und gewerblicher Verarbeitung von synthetischen Nanomaterialien» (Tellenbach-Sommer (2010), Kap. 4.2). Dieser besagt, dass die Massnahmen für eine umweltverträgliche Entsorgung so gehalten werden sollen, dass die resultierenden Rückstände keine freien oder freisetzbaren Nanopartikel mehr aufweisen.

In grösseren komplexen Produkten (z. B. Kraftfahrzeugen, Elektrogeräten, Maschinen) werden zukünftig – neben der bereits z. T. vorhandenen «Nanolackierung» – zunehmend Bauteile Verwendung finden, die Nanomaterialien enthalten. Beim Schreddern entstehen grosse Staubmengen und Verpuffungen, in deren Folge z. T. erhebliche Mengen an Rauchgasen freigesetzt werden können.

Sofern eine Absaugung von Stäuben und Rauchgasen besteht, stellt sich nicht nur die Frage nach möglichen Emissionen von Nanomaterialien in die Umwelt, sondern vor allem auch nach einem ausreichenden Arbeitsschutz.

Die Abscheideleistungen der Abgasreinigungsanlagen sind deutlich geringer als bei Kehrlichtverbrennungsanlagen, sodass hier ein Austrag von Nanopartikeln, die aufgrund der mechanischen Scherkräfte aus der Produktmatrix freigesetzt werden sollten, nicht auszuschliessen ist.

Die Lagerung der Eingangs- und Ausgangsmaterialien erfolgt in der Regel offen, sodass Austräge von Nanopartikeln in Luft, Boden und Wasser nicht ausgeschlossen werden können.

Insgesamt ist die Komplexität der Wege und Stationen, über die Nanomaterialien enthaltene Produkte entsorgt werden, sehr hoch. **Daher sollten – ehe weitere Einzeluntersuchungen durchgeführt werden – in einem ersten Schritt die möglichen Stoffströme dieser Produkte bzw. der enthaltenen Nanomaterialien systematisch erfasst werden, um eine Prioritätensetzung für die weiteren Untersuchungen vornehmen zu können.**

Als Akteure für die Umsetzung der oben genannten Analysen bzw. Untersuchungen sind an erster Stelle die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) und die Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) zu nennen.

### **Empfehlung 3: Standardisierte Testmethoden zur Identifizierung und Charakterisierung von Nanomaterialien entwickeln.**

**Für den Vollzug und die Überprüfung von regulatorischen Vorgaben (s. Kapitel 14.2) sind standardisierte Verfahren und Messmethodiken zur Identifizierung und Charakterisierung von Nanomaterialien unerlässlich.** Da derartige Testroutinen derzeit nicht verfügbar sind, besteht dringender Handlungsbedarf im Hinblick auf eine Methodenentwicklung. **Dies gilt sowohl für einzelne Nanomaterialien als auch für Gemische und Produkte, in denen Nanomaterialien enthalten sind.**

Auf europäischer Ebene sind bereits einige Massnahmen in diese Richtung eingeleitet worden. Die europäische Kommission hat den Standardisierungsgremien CEN,<sup>342</sup> CENELEC<sup>343</sup> und ETSI<sup>344</sup> das Mandat zur Einrichtung einer entsprechenden Projektgruppe erteilt.<sup>345</sup> Auch im 7. Forschungsrahmenprogramm werden in der Bekanntmachung «Regulatory testing of nanomaterials» des NMP-Arbeitsprogramms 2012 entsprechende Fragestellungen adressiert.<sup>345</sup> Darüber hinaus sind eine Koordinierung nationaler Ansätze und die Einbeziehung der chemischen Industrie sowie weiterer betroffener Industriezweige erforderlich. Derzeit finden entsprechende Abstimmungsgespräche unter wissenschaftlicher Koordinierung des Joint Research Centers (JRC) in Ispra (Italien) statt. Eine aktive Beteiligung Schweizer Akteure im europäischen und weltweiten Abstimmungsprozess wird empfohlen. In diesem Zusammenhang sind die Aktivitäten der OECD Working Party on Manufactured Nanomaterials (WPMN) zu berücksichtigen, an der auch die Schweiz beteiligt ist. Dort beschäftigt sich die Steering Group (SG) 4 «Synthetische Nanomaterialien und Testrichtlinien» mit dem Thema der Überarbeitung und Anpassung von OECD-Testverfahren sowie der Identifizierung zusätzlicher Verfahren (vgl. Kapitel 6.2). Bei Methoden zur Prüfung einiger für Nanomaterialien wichtiger Eigenschaften (z. B. Redoxaktivität, Oberflächenladung, Agglomerationsverhalten) fehlen bislang internationale Standards. Diese sollten im Rahmen der OECD-Arbeiten entwickelt werden.

---

<sup>342</sup> Abkürzung für «Europäisches Komitee für Normung» (französisch: Comité Européen de Normalisation), siehe [www.cen.eu](http://www.cen.eu).

<sup>343</sup> Abkürzung für «Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung» (französisch: Comité Européen de Normalisation Électrotechnique), siehe [www.cenelec.eu](http://www.cenelec.eu).

<sup>344</sup> Abkürzung für «Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen» (englisch: European Telecommunications Standards Institute), siehe [www.etsi.org](http://www.etsi.org).

<sup>345</sup> [www.afnor.org/en/news/news/2012/mai-2012/nanotechnologies-and-nanomaterials-open-call-for-tenders-for-one-convenor-and-five-project-leaders](http://www.afnor.org/en/news/news/2012/mai-2012/nanotechnologies-and-nanomaterials-open-call-for-tenders-for-one-convenor-and-five-project-leaders).

## 14.2 Ordnungsrecht zum Schutz der Arbeitnehmer/innen und der Bevölkerung anpassen

### **Empfehlung 4: Vorsorgeprinzip konsequent berücksichtigen, Moratorium nicht angebracht.**

Bei der Anpassung von bestehenden Rechtsvorschriften bzw. der Einführung von neuen Regeln für Nanomaterialien sollte sich der Gesetzgeber grundsätzlich vom Vorsorgeprinzip leiten lassen.

**Dabei ist angesichts des derzeitigen Kenntnisstandes über die Auswirkungen von Nanomaterialien auf Umwelt und Gesundheit (s. Kapitel 8.3) eine generelle Umkehr der Beweislast oder ein Moratorium für die Verwendung sämtlicher Nanomaterialien nicht angebracht.**

**Die Behörden sollten allerdings die Selbstkontrolle<sup>346</sup> der Hersteller überprüfen und für die Beurteilung notwendige zusätzliche Daten verlangen.** Aufgrund des Bewertungsergebnisses zu den Umweltauswirkungen für Zinkoxidnanopartikel (s. Kapitel 8.3) sollten die Behörden die Selbstkontrolle von Produkten, die Zinkoxid-Nanopartikel enthalten, überprüfen. Im Rahmen des Zulassungsverfahrens für Biozidprodukte sollten die Beurteilungsstellen die nanospezifischen Eigenschaften miteinbeziehen.

**In bestimmten Fällen – namentlich bei dem unspezifischen Einsatz von Nanosilber in Konsumgütern – kann ein Inverkehrbringungsverbot erwogen werden.**

**Die Einführung einer generellen Umkehr der Beweislast für das Inverkehrbringen von Verbraucherprodukten, die Nanomaterialien enthalten, ist in der Schweiz allein deshalb nicht notwendig,** da Hersteller und nachrangig die Importeure und Händler nach geltendem Recht nur Produkte in Verkehr bringen dürfen, wenn diese bei normaler oder vernünftigerweise vorhersehbarer Verwendung die Sicherheit und die Gesundheit der Verwenderinnen und Verwender und Dritter nicht gefährden (gemäss Art. 3 Abs. 1 und 6 Produktesicherheitsgesetz<sup>347</sup>).

---

<sup>346</sup> Das Prinzip der Eigenverantwortung ist im Chemikalienrecht verankert. Im Rahmen der Selbstkontrolle sind Hersteller verpflichtet, die Sicherheit von Chemikalien, Zubereitungen und gewissen Gegenständen zu beurteilen und falls nötig Sicherheitsmassnahmen zu treffen (Art. 7 ChemV).

<sup>347</sup> Bundesgesetz über die Produktesicherheit (PrSG) vom 12. Juni 2009, SR 930.11.



### **Empfehlung 5: Materiell-rechtliche Vorschriften der Chemikalienverordnung anpassen.**

Grundsätzlich ist zunächst die EU-Kompatibilität der Anpassung zu beachten. Welche Anpassungen im europäischen Chemikalienrecht (REACH) zur Regulierung von Nanomaterialien vom europäischen Gesetzgeber letztlich erlassen werden, steht bislang allerdings noch nicht fest.<sup>348</sup> **Daher wird aus Gründen des Vorsorgeprinzips empfohlen, in der Schweiz punktuell über die EU-Anforderungen hinauszugehen. Um die Hersteller von Nanomaterialien dazu anzuhalten, mehr Stoffinformationen zu erheben und diese den Behörden zugänglich zu machen, sollte der Gesetzgeber die Mengenschwellen der Chemikalienverordnung (ChemV) für Nanomaterialien anpassen. Diese sollten deutlich unter dem derzeit in der Schweiz und der EU geltenden Wert von 1 t/a liegen, z. B. bei 100 kg pro Jahr und Hersteller.**

In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass mit der am 01.12.2012 in Kraft getretenen vierten Revision der ChemV für Nanomaterialien<sup>349</sup> im Rahmen existierender Meldepflichten und Anmeldeverfahren zusätzliche Informationspflichten für Stoffe, Zubereitungen sowie für neue Stoffe bestehen.

**Ferner sollte in Art. 18a ChemV – ebenfalls in Abweichung von den derzeitigen EU-Regelungen – der Verweis auf Anhang I REACH um folgende Vorgaben ergänzt werden:**

Anmelder müssen im Falle unterschiedlicher Stoffsicherheitsbeurteilungen für eine bzw. mehrere Nanoformen eines chemisch identischen Bulkmaterials getrennte Stoffsicherheitsberichte vorlegen.

Alternativ ist auch ein Stoffsicherheitsbericht möglich, in dem die verschiedenen Nanomaterialien einzeln berücksichtigt werden.

Werden keine getrennten Beurteilungen für Nanomaterialien durchgeführt, sollte der Anmelder begründen müssen, warum er für bestimmte Formen und Partikelgrößenverteilungen gleiche Daten verwendet.

---

<sup>348</sup> Nach der Mitteilung der Kommission vom 03.10.2012 (2nd regulatory review) beabsichtigt die Kommission die Anpassung in bestimmten REACH-Anhängen und den unverbindlichen Guidelines der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) zur Umsetzung der REACH-Vorschriften. Änderungen am eigentlichen Gesetzestext, wie z. B. die Anpassung der Registrierungsmengenschwellen für Nanomaterialien, sind nicht geplant.

<sup>349</sup> Die Definition des Begriffs «Nanomaterial» stützt sich dabei auf die Definitionsempfehlung der EU-Kommission.

Würden Bulkmaterialien und chemisch identische Nanomaterialien in einem gemeinsamen Stoffsicherheitsbericht behandelt, so wäre zu befürchten, dass die nanospezifischen Aspekte nicht ausreichend berücksichtigt würden.

Die nachgeschalteten Anwender sollten dann folglich immer (nur) denjenigen Stoffsicherheitsbericht erhalten, der für den Stoff, mit dem sie umgehen, relevant ist. Zudem sollten die in der Wegleitung zum Stoffsicherheitsbericht empfohlenen zusätzlichen Informationen für Nanomaterialien als verbindliche Angaben in den Anhang 2 ChemV aufgenommen werden.

Die Pflicht, einen eigenen Stoffsicherheitsbericht für Nanomaterialien zu erstellen, könnte zusätzlich in Fällen eingeführt werden, in denen die vorliegenden Stoffinformationen nicht ausreichen, um die Ungefährlichkeit des Nanomaterials zu belegen, oder in denen die Freisetzung des Nanomaterials beabsichtigt oder zu erwarten ist, weil es z. B. nicht in einer Matrix fest eingebunden ist.

**Ferner sollten die bestehenden Einstufungskriterien für Chemikalien auf ihre Relevanz für Nanomaterialien überprüft und falls nötig ergänzt werden, sodass gefährliche Nanomaterialien erkannt sowie entsprechend eingestuft und gekennzeichnet werden können.**

### **Empfehlung 6: Nanoproduktregister einführen.**

Vor dem Hintergrund der bestehenden Intransparenz, ob in einem bestimmten Produkt am Markt Nanomaterialien enthalten sind oder nicht (siehe hierzu auch Abschnitt 5.1.1), **sollte der Gesetzgeber ein neues, eigenes Nanoproduktregister einführen. Dies erfordert die Einführung einer Meldepflicht (s. unten).** Hauptanwender eines solchen Registers sollten Behörden sein. Auf Basis einer aktuellen und umfassenden Marktübersicht der wichtigsten Nanomaterialien und ihrer Anwendungen können sie potenzielle Belastungspfade für Mensch und Umwelt besser einschätzen und überprüfen. Auf dieser Basis können die Behörden frühzeitig betroffene Unternehmen informieren, um gemeinsam mit diesen Hinweisen zu vorhandenen Risiken nachzugehen und gegebenenfalls geeignete Risikomanagementmassnahmen zu ergreifen. Für die Konsumentinnen und Konsumenten bietet ein Nanoproduktregister darüber hinaus eine verbesserte Transparenz über die Verwendung von Nanomaterialien in Verbraucherprodukten und ermöglicht die Wahlfreiheit zwischen Produkten mit und ohne Nanomaterialien.

**Die Führung eines Produktregisters erfordert die Einführung einer Meldepflicht.** Diese sollte für die Hersteller beim erstmaligen Herstellen oder Inver-

kehrbringen von Stoffen und Zubereitungen im Sinne der ChemV gelten. Für Gegenstände sollte sie nur bestehen, wenn diese Nanomaterialien enthalten, welche unter normalen oder vernünftigerweise vorhersehbaren Verwendungsbedingungen freigesetzt werden sollen. Meldepflichtige Angaben sind:

- Name und Anschrift des Herstellers,
- Produktname und Handelsname des Nanomaterials/Nanoprodukts,
- Herkunftsland, wenn das Nanomaterial importiert wird,
- Verwendung des Nanomaterials oder Nanoprodukts,
- Funktion des eingesetzten Nanomaterials,
- Spezifikation des Nanomaterials, einschliesslich der Partikelgrösse und Korngrössenverteilung sowie der physikalischen und chemischen Eigenschaften, der äusseren Form und gegebenenfalls vorgenommener Oberflächenmodifikationen (Coatings),
- Schätzung der hergestellten oder importierten Menge des Nanomaterials.

**Um den Nutzen für die Konsumentinnen und Konsumenten zu verwirklichen und andererseits vertrauliche Daten<sup>350</sup> zu schützen, sollte das Produktregister aus einem öffentlichen und einem nicht öffentlichen Teil bestehen.**<sup>351</sup> Im öffentlichen Teil sollten mindestens Produkt- und Handelsname des Nanoprodukts, die Verwendung und Funktionalität der eingesetzten Nanomaterialien enthalten sein.

**Für die Umsetzung eines Nanoproduktregisters sollte ein neues, eigenes Register eingerichtet werden.** Grundsätzlich denkbar wäre auch die Integration des Nanoproduktregisters in das Schweizer Produktregister (s. Kapitel 12.2.4). Dies wird jedoch nicht als zweckdienlich erachtet: Schon bei der Anwendung der derzeitigen Vorgaben des Schweizer Produktregisters auf Produkte mit Nanomaterialien ist fraglich, ob die bestehenden Einstufungskriterien für gefährliche Stoffe auch für Nanomaterialien ausreichend sind oder um nanospezifische Kriterien ergänzt werden müssen. Eine Ausdehnung des Produktregisters auf

---

<sup>350</sup> Bei den vertraulichen Daten handelt es sich z. B. um die genaue Spezifikation des Nanomaterials hinsichtlich seiner physikalischen und chemischen Eigenschaften.

<sup>351</sup> Vgl. auch das Konzept des deutschen Umweltbundesamtes für ein europäisches Nanoproduktregister unter [www.umweltbundesamt.de/chemikalien/publikationen/information\\_konzept\\_nanoregister\\_npr.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/chemikalien/publikationen/information_konzept_nanoregister_npr.pdf) (abgerufen am 21.11.2012).

alle Produkte, die Nanomaterialien enthalten, würde Nanomaterialien und Nanoprodukte folglich als generell gefährlich stigmatisieren.

Dieses Nanoproduktregister sollte international harmonisiert werden oder zumindest auf bestehenden stoff- und produktrechtlichen Meldepflichten aufgebaut sein, um doppelte Meldepflichten zu vermeiden.<sup>352</sup>

### **Empfehlung 7: Deklarationspflicht bei konsumentennahen Anwendungsbereichen einführen.**

Für bestimmte Verbraucherproduktgruppen wie Kosmetika, Lebensmittel und Biozide sehen die jeweiligen Rechtsvorschriften der EU eine spezifische Kennzeichnung von Nanomaterialien bereits vor (s. Kapitel 12.2). Auch in der Schweiz ist geplant, die Kennzeichnung in den zuvor genannten Bereichen einzuführen.

**Darüber hinaus wird empfohlen, spezifische Kennzeichnungs- und Deklarationspflichten für Nanomaterialien in weiteren konsumentennahen Konsumgüterbereichen (z. B. Textilien, Spielwaren) einzuführen** (s. Kapitel 12.2.3). Dies würde den Konsumentinnen und Konsumenten die Freiheit einräumen, eigene Nutzen-Risiko-Abwägungen zu treffen und so die Wahlfreiheit sicherstellen.

In diesem Zusammenhang sollte der Gesetzgeber auch in Erwägung ziehen, **die Deklaration von Produkten mit Begrifflichkeiten wie «nano» oder «enthält Nanomaterialien» als geschützte Bezeichnung zu regeln**. Damit könnte gewährleistet werden, dass Produkte nicht als «nano» ausgelobt werden, die keine Nanomaterialien enthalten.

---

<sup>352</sup> Hierfür müsste eine Prüfung auf Vereinbarkeit mit dem «Cassis de Dijon»-Prinzip vorgenommen werden, wie es im Bundesgesetz über technische Handelshemmnisse normiert ist. Zur Vereinbarkeit der Regelung eines Nanoproduktregisters in Deutschland mit primärrechtlichen EU-Vorgaben der Warenverkehrsfreiheit, siehe: Hermann und Möller (2010), S. 85 ff.

## 14.3 Flankierende freiwillige Instrumente, Forschungsschwerpunkte und öffentliche Dialoge

### **Empfehlung 8: Anwendung freiwilliger Instrumente zur Risikoabschätzung bei Unternehmen fördern und weiterentwickeln, Chancenaspekte berücksichtigen.**

Angesichts der vorhandenen Wissenslücken in Hinblick auf die Auswirkungen von Nanomaterialien auf Mensch und Umwelt **sollten die Hersteller und Inverkehrbringer konsequent vorhandene freiwillige Instrumente zur Risikoabschätzung heranziehen und dabei auch Chancenaspekte berücksichtigen. Die Instrumente können direkte Auswirkungen auf die Versicherbarkeit oder die Haftungssumme beim Umgang mit Nanomaterialien haben (s. unten).** Diese bieten für die Akteure zudem eine Orientierung, um ihrer Eigenverantwortung nach Art. 5 ChemG und Art. 7 ChemV beim Inverkehrbringen von Nanomaterialien nachzukommen.

Freiwillige Instrumente, die auf der Basis aktueller Forschungsergebnisse von Behörden, Unternehmen und der Fachwelt entwickelt wurden, können zudem als Stand der Technik angesehen werden oder die Vorstufe dazu bilden. Berücksichtigt ein Unternehmen diesen Stand der Technik nicht, könnte dies z. B. als Verletzung einer Sorgfaltspflicht gewertet werden (s. Kapitel 11.2). **Es ist zudem zu erwarten, dass Versicherungen die Beachtung von freiwilligen Instrumenten einfordern, solange keine rechtsverbindlichen Regelungen existieren. Die Instrumente können damit direkte Auswirkungen auf die Versicherbarkeit oder die Haftungssumme beim Umgang mit Nanomaterialien haben.**

Freiwillige Instrumente haben zudem den Vorteil, dass sie bei Beachtung von klaren Vorgaben (Harmonisierung mit internationalen Normen, transparente Prozesse und keine Diskriminierung) entsprechend den Regelungen des TBT-Abkommens mit internationalem Recht vereinbar sind.<sup>353</sup>

Eines der bekanntesten freiwilligen Instrumente in der Schweiz ist das Vorsorge-raster «Synthetische Nanomaterialien».<sup>354</sup> Daneben existieren weitere Instru-

---

<sup>353</sup> Vgl. die Ergebnisse der Rechtsprüfung für das Vorsorge-raster «Synthetische Nanomaterialien» in Jost (2010).

<sup>354</sup> Vgl. [www.bag.admin.ch/nanotechnologie/12171/12174/index.html?lang=de](http://www.bag.admin.ch/nanotechnologie/12171/12174/index.html?lang=de) (abgerufen am 10.11.2012).

mente, z. B. der Kriterienkatalog der Themengruppe 2 und das Leitbild «Green Nano»<sup>355</sup> des NanoDialogs der Deutschen Bundesregierung<sup>356</sup> sowie der vom Öko-Institut entwickelte Nano-NachhaltigkeitsCheck<sup>357</sup>. Auf europäischer Ebene ist der «Code of Conduct for responsible nanosciences and nanotechnologies research» relevant.<sup>358</sup> Bewusst wird keines der bereits bestehenden Instrumente besonders vorgehoben, vielmehr soll es den Herstellern und Inverkehrbringern von nanotechnologischen Produkten freigestellt sein, das jeweils geeignete Werkzeug zu verwenden.

**Jenseits einer Aktualisierung<sup>359</sup> und Weiterentwicklung der betrachteten Risikoaspekte sollten die Entwickler/innen von freiwilligen Instrumenten prüfen, ob auch Chancenaspekte zu berücksichtigen sind, um eine integrierte Betrachtung von Chancen und Risiken zu ermöglichen.**<sup>360</sup> Dazu gehören beispielsweise (vgl. Kapitel 7.2):

- CO<sub>2</sub>-Fussabdruck (Product Carbon Footprint),
- Energieeffizienz,
- Ressourcenverfügbarkeit und -verbrauch,
- Gebrauchsnutzen,
- gesellschaftlicher Nutzen,
- Lebenszykluskosten,
- Beschäftigungswirkung.

<sup>355</sup> Für das Leitbild «Green Nano» wurden 13 konkrete Designprinzipien für die nachhaltige Gestaltung der Nanotechnologien erarbeitet (siehe von Gleich et al. (2010)).

<sup>356</sup> Vgl. [www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nano\\_abschlussbericht2\\_kriterienkatalog\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nano_abschlussbericht2_kriterienkatalog_bf.pdf) (abgerufen am 10.11.2012).

<sup>357</sup> Vgl. [www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/4276.html](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/4276.html) (abgerufen am 10.11.2012).

<sup>358</sup> Vgl. [http://ec.europa.eu/nanotechnology/pdf/nanocode-rec\\_pe0894c\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/nanotechnology/pdf/nanocode-rec_pe0894c_en.pdf) (abgerufen am 10.11.2012).

<sup>359</sup> Insbesondere müssen die Methoden zur Abschätzung der Risiken von Nanomaterialien regelmässig auf den aktuellen Stand des Wissens gebracht werden (vgl. hierzu auch Kapitel 14.1).

<sup>360</sup> Bei einer integrierten Betrachtung der Chancen und Risiken muss gewährleistet sein, dass die identifizierten Risiken zumutbar sind. Es soll vermieden werden, beispielsweise in der Schweiz Chancen zu schaffen und dafür unzulässige Risiken in anderen Ländern zu generieren. Dies wäre eine unzulässige Chancen-Risiken-Betrachtung.

### **Empfehlung 9: Forschungsschwerpunkt «Klimaschutz durch Nanotechnologie» einrichten.**

Angesichts des dringenden Bedarfs von innovativen technologischen Ansätzen zur Bekämpfung des Klimawandels (vgl. Kapitel 1 und 7.2.5) sollte seitens des Schweizerischen Nationalfonds (SNF) oder der Förderagentur für Innovation (KTI) geprüft werden, **bei vorhandenen bzw. zukünftigen Forschungsprogrammen für Nanotechnologien einen eigenen Schwerpunkt («Klimaschutz durch Nanotechnologie») einzurichten.**

Dies darf jedoch nicht zulasten der dringend erforderlichen Ausweitung der Risikoforschung gehen (vgl. Kapitel 14.1).

Vor diesem Hintergrund **ist es daher auch erforderlich, dass die geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekte neben dem üblicherweise geforderten ökonomischen Verwertungsplan auch entsprechende Szenarien für die zu erwartenden Klimaschutzpotenziale ausweisen. Im Rahmen eines Monitorings sollten dann die tatsächlich erzielten CO<sub>2</sub>-Einsparungen an diesen Zielen verglichen werden.** Lebenszyklusbasierte Untersuchungen mit einem systemischen Ansatz sind hierfür besonders gut geeignet. Eine Roadmap «Klimaschutz durch Nanotechnologie» könnte dabei den Prozess strukturieren, das Vertrauen in die Entwicklung von nanotechnologischen Lösungen mit hohem Nutzenpotenzial für Mensch und Umwelt stärken und somit die Dynamik bei der zielgerichteten Erschliessung der Einsparungspotenziale in prioritären Technologiefeldern erheblich vergrössern.

### **Empfehlung 10: Öffentliche Dialoge auf eine integrierte Chancen-Risiko-Betrachtung prioritärer Anwendungsfelder fokussieren, Entwicklungsrichtungen der Nanotechnologien thematisieren.**

Einen systematischen Dialog über Chancen und Risiken von Nanotechnologie bzw. Nanomaterialien hat in der Schweiz der TA-SWISS-publifocus «Nanotechnologien und ihre Bedeutung für Gesundheit und Umwelt» angestossen (TA-SWISS 2006). Der Dialog ist auch vom Bundesamt für Gesundheit BAG (z. B. mittels Interviews mit Konsumentinnen und Konsumenten) und den Akademien der Wissenschaften Schweiz (z. B. mittels öffentlichen Informationsveranstaltungen sowie gezielten Aktionen für Schülerinnen und Schüler) gefördert worden.

Mit dem Dialog NanoSafe Textiles hat die Empa erstmals einen fokussierten Dialog im Textilbereich durchgeführt.<sup>361</sup>

Diese vorhandenen Ansatzpunkte gilt es konsequent aufzugreifen und zukünftig in der Schweiz deutlich breiter in der Praxis anzuwenden. Notwendig ist dabei ein ausgewogener und sachbezogener Dialog über Chancen und Risiken von Nanomaterialien. Hier bieten sich entsprechende Formen und Aktionen auf Bundes- und Kantonsebene an, darüber hinaus aber auch in ausgewählten Betrieben sowie auf internationaler und europäischer Ebene. In diesem Zusammenhang kommt insbesondere den Nichtregierungsorganisationen (NGO) sowie den Medien eine wichtige Rolle zu.

**Zur Konkretisierung wird empfohlen, in stärkerem Umfang insbesondere anwendungsspezifische Dialoge zu veranstalten, da auf der Ebene von konkreten Anwendungsfeldern eine integrierte Diskussion der vorhandenen Chancen und Risiken besonders gut durchgeführt werden kann. Im Rahmen einer Prioritätensetzung sollten hier zunächst Anwendungsfelder in den Mittelpunkt gestellt werden, in denen Schweizer Unternehmen besonders stark engagiert sind. In Ergänzung dazu könnten, gegebenenfalls unter internationaler Beteiligung, auch Entwicklungsrichtungen der Nanotechnologien thematisiert werden, bei denen erhebliche Lösungsbeiträge in Hinblick auf die gesetzten Klimaschutzziele zu erwarten sind.** Dazu gehören in erster Linie Anwendungen in den Bereichen regenerative Energiebereitstellung, Wärmedämmung, Stromspeicher und neue Werk- und Baustoffe (vgl. Kapitel 1).

Die Fokussierung der Dialoge auf prioritäre Anwendungsfelder hat den Vorteil, dass anhand konkreter Applikationen bzw. Forschungsschwerpunkte eine integrierte Bewertung allfälliger Chancen und Risiken vorgenommen und auf diese Weise ein gesellschaftlicher Konsens darüber erzielt werden kann, ob die jeweilige Applikation von der Gesellschaft als wünschenswert erachtet wird oder nicht. Die Ergebnisse aus den einzelnen Dialogveranstaltungen sollten auf der Internetplattform der beteiligten Bundesbehörden zum Thema Nanotechnologien einer breiten Öffentlichkeit zugänglich sein.

Als wichtige Akteure zur Umsetzung kommen neben TA-SWISS v. a. die Akademien der Wissenschaften Schweiz, BAG, BAFU, Empa sowie auch die Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) in Zürich und Lausanne infrage.

---

<sup>361</sup> Vgl. [www.empa.ch/nanosafetextiles](http://www.empa.ch/nanosafetextiles).



## 14.4 Zusammenfassung der Empfehlungen

In der folgenden Tabelle werden die einzelnen Empfehlungen aus den vorherigen Abschnitten nochmals zusammengefasst und auch die für die Umsetzung erforderlichen Akteure und die anzustrebenden Umsetzungshorizonte aufgeführt.

*Tabelle 22 Zusammenfassung der Empfehlungen mit Angabe der verantwortlichen Akteure und anzustrebenden Umsetzungszeiträume*

Nr.	Was	Warum	Wer	Wann
<b>Wissenschaftliche Wissensgrundlagen konsolidieren</b>				
1	Interaktion der Nanomaterialien mit Mensch und Umwelt sowie Langzeitwirkungen erforschen	Über die chronischen Wechselwirkungen zwischen Nanomaterialien und Zellen und Geweben sowie Langzeitwirkungen liegen derzeit nur sehr wenige Erkenntnisse vor	Jeweilige Hersteller von Nanomaterialien; Unterstützung durch nationale Forschungsprogramme (NFP)	kurz- bis mittel- fristig
2	Verhalten und Verbleib von Nanomaterialien in den Abfall- und Abwasserströmen untersuchen	Über das Verhalten der Abfallströme aus den Behandlungsanlagen ist wenig bekannt und diese werden z. T. in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt; ausserdem besteht eine hohe Expositionswahrscheinlichkeit aufgrund umweltoffen betriebener Schredderanlagen	Empa; EAWAG	kurz- bis mittel- fristig
3	Standardisierte Testmethoden zur Identifizierung und Charakterisierung von Nanomaterialien entwickeln	Standardisierte Methoden sind zur Identifizierung, Charakterisierung und Regulierung von Nanomaterialien unerlässlich	OECD; Mitarbeit BAFU	kurzfristig

Nr.	Was	Warum	Wer	Wann
<b>Ordnungsrecht zum Schutz der Arbeitnehmer/innen und der Bevölkerung anpassen</b>				
4	Vorsorgeprinzip konsequent berücksichtigen, Moratorium nicht angebracht	Umweltveränderungen bzw. -schäden können frühzeitig erkannt werden	Schweizer Bundesgesetzgeber	kurz-, mittel- und langfristig
5	Materiell-rechtliche Vorschriften der Chemikalienverordnung anpassen (v. a. Mengenschwellen, getrennte Stoffsicherheitsberichte)	Aufgrund der geltenden Mengenschwellen für Stoffe und Zubereitungen in der ChemV werden nicht ausreichend Stoffinformationen für Nanomaterialien erhoben; auch bei der Weitergabe von nanospezifischen Informationen in der Herstellungskette bestehen Defizite	Schweizer Bundesgesetzgeber	kurz- bis mittel-fristig
6	Nanoproduktregister einführen	Behörden erhalten einen Überblick über die auf dem Markt befindlichen Nanoprodukte sowie deren Hersteller; dies ermöglicht u. a. eine schnellere Reaktion bei Gefahren	Schweizer Bundesgesetzgeber	kurz- bis mittel-fristig
7	Deklarationspflicht bei konsumentennahen Anwendungsbereichen einführen (z. B. Textilien, Spielwaren)	Eine spezifische Kennzeichnung relevanter Produktgruppen ermöglicht den Konsument/innen die Wahl-freiheit beim Kauf	Schweizer Bundesgesetzgeber	kurz- bis mittel-fristig

Nr.	Was	Warum	Wer	Wann
<b>Flankierende freiwillige Instrumente, Forschungsschwerpunkte und öffentliche Dialoge</b>				
8	Anwendung freiwilliger Instrumente zur Risikoabschätzung bei Unternehmen fördern und weiterentwickeln, Chancenaspekte berücksichtigen	Zukünftig werden Behörden und Versicherungen die Anwendung freiwilliger Instrumente stärker einfordern; eine integrierte Betrachtung der Chancen und Risiken steigert die Akzeptanz freiwilliger Instrumente	Anwendung: Unternehmen Weiterentwicklung Vorsorgeraster: BAFU; Fa. Temas Sanktionierung bei Nichtanwendung: Genehmigungsbehörden; Versicherungen	kurzfristig
9	Forschungsschwerpunkt «Klimaschutz durch Nanotechnologie» einrichten	Schwerpunktsetzung ermöglicht eine bessere Harmonisierung zwischen technologischen Anforderungen zum Schutz des Klimas und dem perspektivisch verfügbaren Nanotechnologieangebot	Schweizerischer Nationalfond (SNF); Förderagentur für Innovation (KTI)	mittelfristig
10	Öffentliche Dialoge auf eine integrierte Chancen-Risiko-Betrachtung prioritärer Anwendungsfelder fokussieren, Entwicklungsrichtungen der Nanotechnologien thematisieren	Anwendungsbezogene Dialoge haben den Vorteil, anhand konkreter Applikationen bzw. Forschungsschwerpunkte eine integrierte Bewertung allfälliger Chancen und Risiken vornehmen zu können	BAG; BAFU; ETH; Empa SCNAT; SAGW; SAMW; SATW TA-SWISS	kurz- bis mittelfristig



## 15 Referenzen

- Adams et al. (2006): Adams, L. K.; Lyon, D. Y.; Alvarez, P. J.: Comparative ecotoxicity of nanoscale TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, and ZnO water suspensions. *Water Research*, 2006, 40(19), S. 3527–3532.
- Ahrens et. al. (2001): Ahrens, A.; Oenicke, M.; Schenck, H.-P.; Siederer, W., Wenzel, F.: Vergleichende Untersuchung verschiedener europäischer und deutscher Produktregister für Chemikalien als Grundlage für die bevorstehende Entscheidung über die Einrichtung eines einheitlichen deutschen oder europäischen Produktregisters für Chemikalien, Umweltbundesamt FKZ 299 67 292, 2001.
- Aitken et al. (2009): Aitken, R. J.; Hankin, S. M.; Ross, B.; Tran, C. L.; Stone, V.; Fernandes, T. F.; Donaldson, K.; Duffin, R.; Chaudhry, Q.; Wilkins, T. A.; Wilkins, S. A.; Levy, L. S.; Rocks, S. A.; Maynard, A.: EMERG-NANO: A review of completed and near completed environment, health and safety research on nanomaterials and nanotechnology. Defra Project CB0409, Report TM/09/01, Institute of Occupational Medicine, Edinburgh 2009.
- Akademien der Wissenschaften Schweiz (2008): Akademien der Wissenschaften Schweiz (Hrsg.): Thesen zur Nanotechnologie, Herausforderungen einer interdisziplinären Nanotechnologie und eines proaktiven Dialogs, 2008, online verfügbar unter: [http://www.transdisciplinarity.ch/d/Publications/documents/Nanothesen\\_dt.pdf](http://www.transdisciplinarity.ch/d/Publications/documents/Nanothesen_dt.pdf) (abgerufen am 18.5.2012).
- Alexander und Moore (2008): Alexander, L.; Moore, M.: Deontological Ethics, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Stand 2008); online verfügbar unter: <http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/ethics-deontological/>
- Asbach et al. (2009): Asbach, C.; Dahmann, D.; Kaminski, H.; Kampmann, K. H.; Kuhlbusch, T. A. J.; Monz, C.; Rating, U.; Stahlmecke, B.; Voetz, M.; Wagener, S.: Exposure to Nanoparticles: Measurement, Modelling and Agglomerate Stability. In: Kuhlbusch, T. A. J.; Krug, H. F.; Nau, K. (Hrsg.): NanoCare. Health related Aspects of Nanomaterials. Final Scientific Report. Frankfurt am Main: DECHEMA, S. 74–88, 2009.
- Aschberger et al. (2010): Aschberger, K.; Johnston, H. J.; Stone, V.; Aitken, R. J.; Hankin, S. M.; Peters, S. a K.; Tran, C. L.; et al.: Review of carbon nanotubes toxicity and exposure – appraisal of human health risk assessment based on open literature. *Critical reviews in toxicology*, 2010, 40(9), S. 759–790, doi:10.3109/10408444.2010.506638.

- Aschberger et al. (2011): Aschberger, K.; Micheletti, C.; Sokull-Kluttgen, B.; Christensen, F. M.: Analysis of currently available data for characterising the risk of engineered nanomaterials to the environment and human health – Lessons learned from four case studies. *Environment International*, 2011, 37(6), S. 1143–1156.
- AVK 2011: AVK Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe (Hrsg.): Composites Marktbericht (2011): Marktentwicklungen, Trends, Herausforderungen und Chancen, September 2011, online verfügbar unter: [http://www.avk-tv.de/files/20110929\\_marktbericht\\_2011\\_\\_deutsch.pdf](http://www.avk-tv.de/files/20110929_marktbericht_2011__deutsch.pdf) (abgerufen am 29.5.2012).
- Baalousha (2009): Baalousha, M.: Aggregation and disaggregation of iron oxide nanoparticles: Influence of particle concentration, pH and natural organic matter. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(6), S. 2093–2101.
- Baalousha et al. (2008): Baalousha, M.; Manciuola, A.; Cumberland, S.; Kendall, K.; Lead, J. R.: Aggregation and surface properties of iron oxide nanoparticles: influence of pH and natural organic matter. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, 27(9), S. 1875–1882.
- Bachmann (2006): Bachmann, A.: Nanobiotechnologie – Eine ethische Auslegung, Bern 2006.
- Bachmann (2007): Bachmann, A.: Synthetische Nanopartikel und das Vorsorgeprinzip – Eine ethische Analyse, Ethik im Diskurs, 2007.
- Bachmann und Rippe (2008): Bachmann, A.; Rippe, K.-P.: Ethische Risikobewertung, Ethik im Diskurs, 2008.
- BAFU (2006): Bundesamt für Umwelt – BAFU (Hrsg.): Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle – Ausbruchsphalt, Strassenaufbruch, Betonabbruch, Mischabbruch, Umwelt-Vollzug Nr. 0631, Bern 2006, <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00030/index.html?lang=de&lang=de>
- BAFU (2012): Bundesamt für Umwelt – BAFU (Hrsg.): FAQ zur Verwertung von Textilien, <http://www.bafu.admin.ch/abfall/01472/01860/index.html?lang=de>
- BAFU/BAG (2007): Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Bundesamt für Gesundheit (BAG) (Hrsg.): Synthetische Nanomaterialien – Risikobeurteilung und Risikomanagement: Grundlagenbericht zum Aktionsplan, Bern 2007.
- BAFU/BAG (2011): Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Bundesamt für Gesundheit (BAG) (Hrsg.): Wegleitung zum Vorsorgeraster für synthetische Nanomaterialien, Bern 2011.

- Baker et al. (2008): Baker, G. L.; Gupta, A.; Clark, M. L.; Valenzela, B. R.; Staska, L. M.; Harbo, S. J.; Pierce, J. T.; Dill, J. A.: Inhalation toxicity and lung toxicokinetics of C60 fullerene nanoparticles and microparticles. *Toxicol Sci.*, 2008, 101(1), S. 122–131.
- Baroli et al. (2007): Baroli, B.; Ennas, M. G.; Loffredo, F.; Isola, M.; Pinna, R.; Lopez-Quintela, M. A.: Penetration of metallic nanoparticles in human full-thickness skin. *Journal of Investigative Dermatology*, 2007, 127(7), S. 1701–1712.
- Baumann et al. (2010): Baumann, J.; Bertrand, C.; Arndt, D.; Filser, J.: Ökotoxikologische Untersuchungen mit oxidischen Eisennanopartikeln: Toxizität, Kombinationseffekte und Bioakkumulation bei *Daphnia magna*. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 2010, 22(4), S. Nano\_P 06.
- BauNetz (2012): BauNetz GmbH (Hrsg.): Vakuumisolationspaneele (VIP), BauNetz Wissen Fassade, online verfügbar unter: [http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Fassade\\_Vakuumisolationspaneele-VIP-\\_154451.html](http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Fassade_Vakuumisolationspaneele-VIP-_154451.html) (abgerufen am 24.05.2012)
- Benn und Westerhoff (2008): Benn, T. M.; Westerhoff, P.: Nanoparticle silver released into water from commercially available sock fabrics. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(11), S. 4133–4139.
- BfR (2006): Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR): Nanopartikel waren nicht die Ursache für Gesundheitsprobleme durch Versiegelungssprays, Pressemitteilung des BfR vom 26.5.2006, [http://www.bfr.bund.de/de/presseinformation/2006/12/nanopartikel\\_waren\\_nicht\\_die\\_ursache\\_fuer\\_gesundheitsprobleme\\_durch\\_versiegelungssprays\\_-7839.html](http://www.bfr.bund.de/de/presseinformation/2006/12/nanopartikel_waren_nicht_die_ursache_fuer_gesundheitsprobleme_durch_versiegelungssprays_-7839.html)
- BfR (2010): Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) (Hrsg.): Wahrnehmung der Nanotechnologie in internetgestützten Diskussionen. Ergebnisse einer Onlinediskursanalyse zu Risiken und Chancen von Nanotechnologie und Nanoprodukten, Berlin, 2010.
- BfR (2011): Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) (Hrsg.): Beurteilung eines möglichen Krebsrisikos von Nanomaterialien und von aus Produkten freigesetzten Nanopartikeln; Stellungnahme Nr. 005/2011 des BfR und des UBA vom 15. April 2010, [http://www.bfr.bund.de/cm/343/beurteilung\\_eines\\_moeglichen\\_krebsrisikos\\_von\\_nanomaterialien\\_und\\_von\\_aus\\_produkten\\_freigesetzten\\_nanopartikeln.pdf](http://www.bfr.bund.de/cm/343/beurteilung_eines_moeglichen_krebsrisikos_von_nanomaterialien_und_von_aus_produkten_freigesetzten_nanopartikeln.pdf)
- BfR (2012): Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR): Fragen und Antworten zur Nanotechnologie, aktualisierte FAQ vom 28. August 2012, [http://www.bfr.bund.de/de/fragen\\_und\\_antworten\\_zur\\_nanotechnologie-8552.html](http://www.bfr.bund.de/de/fragen_und_antworten_zur_nanotechnologie-8552.html) (abgerufen am 23.10.2012).

- Bio Suisse (2009): Bio Suisse Verband (Hrsg.): Positionspapier Haltung von Bio Suisse gegenüber der Nanotechnologie, Basel 2009.
- Blaser et al. (2008): Blaser, S. A.; Scheringer, M.; Macleod, M.; Hungerbühler, K.: Estimation of cumulative aquatic exposure and risk due to silver: Contribution of nano-functionalized plastics and textiles. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(2-3), S. 396–409.
- BMBF (2009): Bundesministerium für Bildung und Forschung: nano.DE-Report 2009. Bonn/Berlin 2009.
- BMBF (2011): Bundesministerium für Bildung und Forschung: nano.DE-Report 2011. Bonn/Berlin 2011.
- Bonfadelli et al. (2007): Bonfadelli, H.; Dahin, U.; Leonarz, M.: Mass Media and Public Perceptions of Red and Green Biotechnology: a Case Study from Switzerland. In: Brossard, D. et al. (Hrsg.): *The Public, The Media and Agricultural Biotechnology*. CAB International, 2007.
- Bonfadelli (2012): Bonfadelli, H.: Nanotechnologie in den Medien – Medienrealität und Medienwirkung. Präsentation beim 6. Int. Behördendialog, 8./9. Mai 2012, Zürich, [www.innovationsgesellschaft.ch/media/archive2/Veranstaltungen/behoerdendialog\\_2012\\_zuerich/Bonfadelli.pdf](http://www.innovationsgesellschaft.ch/media/archive2/Veranstaltungen/behoerdendialog_2012_zuerich/Bonfadelli.pdf)
- Botta et al. (2011): Botta, C.; Labille, J.; Auffan, M.; Borschneck, D.; Miche, H.; Cabié, M.; Masion, A.; et al.: TiO<sub>2</sub>-based nanoparticles released in water from commercialized sunscreens in a life-cycle perspective: structures and quantities. *Environmental pollution*, 2011, 159(6), S. 1543–1550, doi:10.1016/j.envpol.2011.03.003.
- Boxall et al. (2007): Boxall, A. B.; Chaudry, Q.; Sinclair, C.; Jones, A.; Aitken, R.; Jefferson, B.; Watts, C.: *Current and future predicted environmental exposure to engineered nanoparticles*. York: Central Science Laboratory, 2007.
- Bregoli et al. (2009): Bregoli, L.; Chiarini, F.; Gambarelli, A.; Sighinolfi, G.; Gatti, A. M.; Santi, P.; Martelli, A. M.; Cocco, L.: Toxicity of antimony trioxide nanoparticles on human hematopoietic progenitor cells and comparison to cell lines. *Toxicology*, 2009, 262(2), S. 121–129.
- Brunner et al. (2006): Brunner, T. J.; Wick, P.; Manser, P.; Spohn, P.; Grass, R. N.; Limbach, L. K.; Bruinink, A.; Stark, W. J.: In vitro cytotoxicity of oxide nanoparticles: comparison to asbestos, silica, and the effect of particle solubility. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(14), S. 4374–4381.



- Burkhardt et al. (2009): Burkhardt, M.; Zuleeg, S.; Etter, B.; Marti, T.; Landert, J.; Eugster, J.; Boller, M.; Kägi, R.; Sinnet, B.; Siegrist, H.; Vonbank, R.; Brunner, S.; Simmler, H.; Wichser, A.; Ulrich, A.; Seiler, C.; Haag, R.; Schmid, P.; Gerecke, A.; Vonmont, H.: Nanosilber in Fassadenbeschichtungen – Auswaschungen im Vergleich mit Titandioxid und organischen Bioziden, Eawag und EMPA, Dübendorf 2009, <http://www.bafu.admin.ch/chemikalien/01389/01391/index.html?lang=de>
- Burkhardt et al. (2010): Burkhardt, M.; Zuleeg, S.; Boller, M.; Kägi, R.; Sinnet, B.; Eugster, J.; Siegrist, H.: Charakterisierung und Bilanzierung von Silberpartikeln in Abwasserreinigungsanlagen, Eawag, Dübendorf 2010, <http://www.bafu.admin.ch/chemikalien/01389/01391/index.html?lang=de>
- Burkhardt et al. (2011): Burkhardt, M., Englert, A., Iten, R., Schärer, S.: Entsorgung nanosilberhaltiger Abfälle in der Textilindustrie – Massenflüsse und Behandlungsverfahren, Forschungsbericht HSR Hochschule für Technik, Rapperswil 2011.
- Buzea (2007): Buzea, C.; Pacheco, I. I.; Robbie, K.: Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity. *Biointerphases*, 2007, 2(4), MR17. Retrieved from: <http://www.springerlink.com/content/p8348w158q22713h/>
- Cabot (2011): Cabot (Hrsg.): Lumira Aerogel, Der neue Standard für umweltfreundliche Tageslichtbeleuchtungs-Lösungen, online verfügbar unter: <http://www.cabot-corp.com/Aerogel/Downloads/DL201106231755PM1847/> (abgerufen am 24.5.2012).
- Calliess (2008): Calliess, C.: Das Vorsorgeprinzip und seine Auswirkungen auf die Nanotechnologie, Vortrag auf dem 24. Trierer Kolloquium zum Umwelt- und Technikrecht, August 2008, verfügbar über: [www.umweltrat.de](http://www.umweltrat.de)
- Calliess und Stockhausen (2011): Calliess, C.; Stockhausen, H.: Regulierung von Nanomaterialien – Reicht REACH? In: *Deutsches Verwaltungsblatt (DVBL)*, Bd. 126, 2011, 15, S. 921–929.
- Canesi et al. (2008): Canesi, L.; Ciacci, C.; Betti, M.; Fabbri, R.; Canonico, B.; Fantinati, A.; Marcomini, A.; Pojana, G.: Immunotoxicity of carbon black nanoparticles to blue mussel hemocytes. *Environment international*, 2008, 34(8), S. 1114–1119.
- Carlson et al. (2008): Carlson, C.; Hussain, S. M.; Schrand, A. M.; Braydich-Stolle, L. K.; Hess, K. L.; Jones, R. L.; Schlager, J. J.: Unique cellular interaction of silver nanoparticles: size-dependent generation of reactive oxygen species. *The Journal of Physical Chemistry*, 2008, B112(43), S. 13608–13619.

- Chen et al. (2012): Chen, Z.; Ma, L.; Liu, Y.; Chen, C.: Applications of functionalized fullerenes in tumor theranostics. *Theranostics*, 2012, 2(3), S. 238–250.
- Cheng et al. (2007): Cheng, J.; Flahaut, E.; Cheng, S. H.: Effect of carbon nanotubes on developing zebrafish (*Danio rerio*) embryos. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2007, 26(4), S. 708–716.
- Cho et al. (2009): Cho, M.; Cho, W. S.; Choi, M.; Kim, S. J.; Han, B. S.; Kim, S. H.; Kim, H. O.; Sheen, Y. Y.; Jeong, J.: The impact of size on tissue distribution and elimination by single intravenous injection of silica nanoparticles. *Toxicology Letters*, 2009, 189(3), S. 177–183.
- Choi et al. (2008): Choi, O.; Deng, K.; Kim, N.-M.; Ross, L.; Surampalli, R.; Hu, Z.: The inhibitory effects of silver nanoparticles, silver ions, and silver chloride colloids on microbial growth, *Water Research*, 2008, 42(12), S. 3066–3074.
- Choi und Hu (2008): Choi, O. K.; Hu, Z.: Impact of Silver Nano-particles on Wastewater Treatment, ACWA Annual Conference Presentation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Missouri, Columbia, 2008.
- Christensen et al. (2010): Christensen, F. M.; Johnston, H. J.; Stone, V.; Aitken, R. J.; Hankin, S.; Peters, S.; Aschberger, K.: Nano-silver – feasibility and challenges for human health risk assessment based on open literature. *Nanotoxicology*, 2010, 4(3), S. 284–295; doi:10.3109/17435391003690549.
- Clift et al. (2011): Clift, M. J. D.; Foster, E. J.; Vanhecke, D.; Studer, D.; Wick, P.; Gehr, P.; Rothen-Rutishauser, B.; Weder, C.: Investigating the interaction of cellulose nanofibers derived from cotton with a sophisticated 3D human lung cell coculture. *Biomacromolec.*, 2011, 12, S. 3666–3673.
- Cobb und Macoubrie (2004): Cobb, M.; Macoubrie, J.: Public perceptions about nanotechnology: Risks, benefits and trust. *Journal of Nanoparticle Research*, 2004, 6(4), S. 395–405.
- Crane und Handy (2007): Crane M.; Handy R. D.: An assessment of regulatory testing strategies and methods for characterizing the ecotoxicological hazards of nanomaterials, Report for Defra, London, 2007.
- Cross (1996): Cross, F. B.: Paradoxical Perils of the Precautionary Principle, *Washington and Lee Law Review*, 1996, S. 851–925.
- Cross et al. (2007): Cross, S. E.; Innes, B.; Roberts, M. S.; Tsuzuki, T.; Robertson, T. A.; McCormick, P.: Human skin penetration of sunscreen nanoparticles: in-vitro assessment of a novel micronized zinc oxide formulation. *Skin Pharmacology and Physiology*, 2007, 20(3), S. 148–154.

- Dabrunz et al. (2011): Dabrunz, A.; Düster, L.; Prasse, C.; Seitz, F.; Rosenfeldt, R.; Schilde, C.; Schaumann, G. E.; Schulz, R.: Biological Surface Coating and Molting Inhibition as Mechanisms of TiO<sub>2</sub> Nanoparticle Toxicity in *Daphnia magna*, PLoS ONE, 2011, 6(5), e20112.
- DaNa (2012): Erfassung, Bewertung und breitenwirksame Darstellung von gesellschaftlich relevanten **Daten** und Erkenntnissen zu **Nanomaterialien**: Eisen und Eisenoxide – Aufnahme, [http://nanopartikel.info/cms/Wissensbasis/Eisen/template/element2Category2ContainerList?catTitle=Aufnahme&containerID=398&queryPath=/content/jahia/dana/ContentPage\\_3/Wissensbasis/Eisen/element2Category2ContainerList/ContentContainer\\_398](http://nanopartikel.info/cms/Wissensbasis/Eisen/template/element2Category2ContainerList?catTitle=Aufnahme&containerID=398&queryPath=/content/jahia/dana/ContentPage_3/Wissensbasis/Eisen/element2Category2ContainerList/ContentContainer_398) (abgerufen am 8.5.2012).
- Dechema (2011): Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie (Dechema) (Hrsg.): 10 Jahre Forschung zu Risikobewertung, Human- und Ökotoxikologie von Nanomaterialien: Statuspapier der DECHEMA / VCI-Arbeitskreises «Responsible Production and Use of Nanomaterials», 2011.
- DFG 2008): Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe (MAK-Kommission) (Hrsg.): Liste aller Änderungen und Neuaufnahmen in der MAK- und BAT-Werte-Liste, Bonn 2008.
- EC (2005a): European Commission (Hrsg.): Europeans, Science and Technology. Special Eurobarometer 224, Brüssel 2005.
- EC (2005b): European Commission (Hrsg.): Social Values, Science and Technology. Special Eurobarometer 225, Brüssel 2005.
- EC (2010): European Commission (Hrsg.); Biotechnologie, Eurobarometer Spezial 341, Brüssel 2010.
- EC (2012): Communication from the European Commission to the European Council and the European Economic and Social Committee, Second Regulatory Review on Nanomaterials, 3.10.2012, COM(2012) 572 final.
- EDI/EVD/UVEK (2008): Eidgenössisches Departement des Innern (EDI) / Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement (EVD) / Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) (Hrsg.): Bericht des Bundesrates vom 9. April 2008 – Aktionsplan Synthetische Nanomaterialien, 2008.
- EDI/EVD/UVEK (2012): Eidgenössisches Departement des Innern (EDI) / Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement (EVD) / Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) (Hrsg.): Aktionsplan Synthetische Nanomaterialien: Bericht des Bundesrates über den Stand der Umsetzung, die Wirkung und den Regulierungsbedarf vom 24.5.2012.

- Einsiedel (2005): Einsiedel, E.: In the Public Eye: The Early Landscape of Nanotechnology among Canadian and U.S. Publics. AZojono: Journal of Nanotechnology online, 2005, online verfügbar unter: <http://www.azonano.com/Details.asp?ArticleID=1468> (abgerufen am 29.5.2012).
- EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (Internationale Norm ISO 14040:2006); deutsche und englische Fassung EN ISO 14040:2006.
- EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (Internationale Norm ISO 14044:2006); deutsche und englische Fassung EN ISO 14044:2006.
- Environment Agency (1998): Environment Agency UK (Hrsg.): Tyres and the environment. London 1998.
- EPA (2009): U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Office of Pollution Prevention and Toxics: Nanoscale Materials Stewardship Program – Interim Report, January 2009, <http://www.epa.gov/oppt/nano/nmsp-interim-report-final.pdf>
- ETC Group (2003): ETC Group (Hrsg.): The Big Down – Atomtech: Technologies Converging at the Nano-scale, 2003.
- Eurobarometer (2010): TNS Opinion & Social, Eurobarometer Spezial «Biotechnologie», im Auftrag der Generaldirektion Forschung der Europäischen Kommission, Brüssel 2010.
- Europäische Kommission (2001): Mitteilung der Europäischen Kommission über die Anwendbarkeit des Vorsorgeprinzips v. 2.2.2000, KOM (2000) 1 endg.
- Europäische Kommission (2008): Europäische Kommission (Hrsg.): Nanomaterials in REACH. Brüssel, CA/59/2008 Rev. 1.
- Europäische Kommission (2011): Europäische Kommission (Hrsg.): Empfehlung zur Definition von Nanomaterialien (2011/696/EU) vom 18. Oktober 2011, Abl. der EU L 275 vom 20.10.2011, online verfügbar unter: [http://ec.europa.eu/environment/consultations/pdf/recommendation\\_nano.pdf](http://ec.europa.eu/environment/consultations/pdf/recommendation_nano.pdf) (abgerufen am 10.5.2012).
- Europäische Kommission (2012): Europäische Kommission (Hrsg.): NANO SUPPORT Project – Scientific technical support on assessment of nanomaterials in REACH registration dossiers and adequacy of available information – Report on analysis and assessment of (Task I, step 3&4&5) and options for adapting REACH (Task II, step 1), prepared by JRC (Joint Research Center) and ECHA (European Chemicals Agency), Ispra 2012.
- Farré et al. (2009): Farré, M.; Gajda-Schranz, K.; Kantiani, L.; Barcelo, D.: Ecotoxicity and analysis of nanomaterials in the aquatic environment. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2009, 393(1), S. 81–95.

- Federici et al. (2007): Federici, G.; Shaw, B. J.; Handy, R. D.: Toxicity of titanium dioxide nanoparticles to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Gill injury, oxidative stress, and other physiological effects. *Aquatic Toxicology*, 2007, 84(4), S. 415–430.
- FiBL (2009): Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL) (Hrsg.): Diskussionspapier zum Einsatz von Nanotechnologien in der Bioproduktion, 2009.
- Fouqueray et al. (2012a): Fouqueray, M.; Noury, P.; Dherret, L.; Chaurand, P.; Abbaci, K.; Labille, J.; Rose, J.; et al.: Exposure of juvenile *Danio rerio* to aged TiO<sub>2</sub> nanomaterial from sunscreen. *Environmental science and pollution research international*, Oct 25 2012, [Epub ahead of print], doi:10.1007/s11356-012-1256-7.
- Fouqueray et al. (2012b): Fouqueray, M.; Dufils, B.; Vollat, B.; Chaurand, P.; Botta, C.; Abacci, K.; Labille, J.; et al.: Effects of aged TiO<sub>2</sub> nanomaterial from sunscreen on *Daphnia magna* exposed by dietary route. *Environmental Pollution*, 2012, 163, S. 55–61, doi:10.1016/j.envpol.2011.11.035.
- Franco et al. (2007): Franco, A.; Hansen, S. F.; Olsen, S. I.; Butti, L.: Limits and Prospects of the «Incremental Approach» and the European Legislation on the Management of Risks related to Nanomaterials. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2007, 48, S. 171–183.
- Fries et al. (2011): Fries, R.; Greßler, S.; Simkó, M.: Kohlenstoff-Nanoröhrchen (carbon Nanotubes) – Teil II: Risiken und Regulierung. Nano trust dossiers Nr. 024. Institut für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 2011.
- Führ et al. (2006): Führ, M.; Hermann, A.; Merenyi, S.; Moch, K.; Möller, M.; Rechtsgutachten Nano-Technologien – ReNaTe. Bestehender Rechtsrahmen, Regulierungsbedarf sowie Regulierungsmöglichkeiten auf europäischer und nationaler Ebene. Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA), 2006.
- Fujitani et al. (2008): Fujitani, Y.; Kobayashi, T.; Arashidani, K.; Kunugita, N.; Suemura, K.: Measurement of the physical properties of aerosols in a fullerene factory for inhalation exposure assessment. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2008, 5(6), S. 380–389.
- Gagro (2011): Gagro, D.: Effektvolle und farbige Partikel. *Farbe und Lack*, 1/2011.
- Gamer et al. (2006): Gamer, A. O.; Leibold, E.; van Ravenzwaay, B.: The in vitro absorption of microfine zinc oxide and titanium dioxide through porcine skin. *Toxicology In Vitro*, 2006, 20(3), S. 301–307.

- Gao et al. (2009): Gao, J.; Youn, S.; Hovsepian, A.; Llana, V. L.; Wang, Y.; Bitton, G.; Bonzongo, J. C.: Dispersion and toxicity of selected manufactured nanomaterials in natural river water samples: effects of water chemical composition. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(9), S. 3322–3328.
- Gehr (2012): Persönliche Mitteilung Prof. Dr. em. Peter Gehr, Universität Bern, Oktober 2012.
- Geiser et al. (2005): Geiser, M.; Rothen-Rutishauser, B.; Kapp, N.; Schurch, S.; Kreyling, W.; Schulz, H.; Semmler, M.; Hof, V. I.; Heyder, J.; Gehr, P.: Ultrafine particles cross cellular membranes by nonphagocytic mechanisms in lungs and in cultured cells. *Environ. Health Perspect.*, 2005, 113(11), S. 1555–1560.
- Geranio et al. (2009): Geranio, L.; Heuberger, M.; Nowack, B.: The behavior of silver nanotextiles during washing. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(21), S. 8113–8118.
- Gottschalk et al. (2009): Gottschalk, F.; Sonderer, T.; Scholz, R. W.; Nowack, B.: Modeled Environmental Concentrations of Engineered Nanomaterials (TiO<sub>2</sub>, ZnO, Ag, CNT, Fullerenes) for Different Regions. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(24), S. 9216–9222.
- Gottschalk et al. (2010): Gottschalk, F.; Sonderer, T.; Scholz, R. W.; Nowack, B.: Possibilities and limitations of modeling environmental exposure to engineered nanomaterials by probabilistic material flow analysis. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2010, 29, S. 1036–1048.
- Gottschalk und Nowack (2011): Gottschalk, F.; Nowack, B.: The release of engineered nanomaterials to the environment. *Journal of environmental monitoring*, 2011, 13(5), S. 1145–1155, doi:10.1039/c0em00547a.
- Grainger und Castner (2008): Grainger, D. W.; Castner, D. G.: *Nanobiomaterials and Nanoanalysis: Opportunities for Improving the Science to Benefit Biomedical Technologies*. *Advanced Materials*, 2008, 20(5), S. 867–877, abgerufen unter: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.200701760>
- Greßler und Fries (2010): Greßler, S.; Fries R.: *Nanosilber in Kosmetika, Hygieneartikeln und Lebensmittelkontaktmaterialien: Produkte, gesundheitliche und regulatorische Aspekte*. Bundesministerium für Gesundheit, Sektion 2, Wien 2010.
- Grießhammer und Hochfeld (2009): Grießhammer, R.; Hochfeld, C.: *Memorandum Product Carbon Footprint*, Öko-Institut 2009.
- Griffitt et al. (2008): Griffitt, R. J.; Luo, J.; Gao, J.; Bonzongo, J. C.; Barber, D. S.: Effects of particle composition and species on toxicity of metallic nanomaterials in aquatic organisms. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, 27(9), S. 1972–1978.

- Grimm et al. (2011): Grimm, V.; Heinrich, S.; Malanowski, N.; Pfirrmann, O.; Schindler, E.; Stahl-Rolf, S.; Zweck, A.: Nanotechnologie: Innovationsmotor für den Standort Deutschland. Nomos-Verlag, Baden-Baden 2011.
- Grobe et al. (2012): Grobe, A.; Rissanen, M.; Funda, P.; deBeer, J.; Jonas, U.: Nanotechnologie aus der Sicht der Konsumenten – Was Verbraucher wissen und was sie wissen wollen. Stiftung Risiko-Dialog, St. Gallen 2012.
- Gulson et al. (2010): Gulson, B.; McCall, M.; Korsch, M.; Gomez, L.; Casey, P.; Oytam, Y.; Taylor, A.; Kinsley, L.; Greenoak, G.: Small amounts of zinc from zinc oxide particles in sunscreens applied outdoors are absorbed through human skin. *Toxicological Sciences*, 2010, 118(1), S. 140–149.
- Hermann et al. (2007): Hermann, C.; Weiß, W.; Ohler, C.: *Welthandelsrecht*, 2. Auflage, München 2007.
- Hagendorfer et al. (2010): Hagendorfer, H.; Lorenz, C.; Kaegi, R.; Sinnet, B.; Gehrig, R.; von Goetz, N.; Scheringer, M.; Ludwig, C.; Ulrich, A.: Size-fractionated characterization and quantification of nanoparticle release rates from a consumer spray product containing engineered nanoparticles. *J Nanopart Res*, 2010, 12, S. 2481–2494.
- Han et al. (2008): Han, J. H.; Lee, E. J.; Lee, J. H.; So, K. P.; Lee, Y. H.; Bae, G. N.; Lee, S. B.; Ji, J. H.; Cho, M. H.; Yu, I. J.: Monitoring multiwalled carbon nanotube exposure in carbon nanotube research facility. *Inhalation Toxicology*, 2008, 20(8), S. 741–749.
- Han et al. (2012): Han, X.; Corso, N.; Wade-Mercer, P.; Gelein, R.; Jiang, J.; Sahu, M.; Biswas, P.; Finkelstein, J. N.; Elder, A.; Oberdörster, G.: Assessing the relevance of in vitro studies in nanotoxicology by examining correlations between in vitro and in vivo data. *Toxicology*. 2012, 297 (1-3), S. 1–9.
- Hansen et al. (2008): Hansen, S. F.; Michelson, E.; Kamper, A.; Borling, P.; Stuer-Lauridsen, F.; Baun, A.: Categorization framework to aid exposure assessment of nanomaterials in consumer products. *Ecotoxicology*, 2008, 17(5), S. 438–447.
- Harsanyi (1975): Harsanyi, J. C.: Can the Maximin Principle Serve as a Basis for Morality? A Critique of John Rawls's Theory. *The American Political Science Review*, 1975, 69, S. 594 ff.
- Hentze (2010): Hentze, H.-P.: From Nanocellulose Science towards Applications, VTT – Technical Research Center of Finland, online verfügbar unter: [http://www.vtt.fi/files/events/PulPaper10/NFCApplications\\_HPH.pdf](http://www.vtt.fi/files/events/PulPaper10/NFCApplications_HPH.pdf) (abgerufen am 22.5.2012).

- Hermann et al. (2012): Hermann, A.; Groß, R.; Möller, M.; Bunke, D.: Rechtsfragen zur Anwendung des Stoffbegriffs auf Nanomaterialien im Rahmen der REACH-Verordnung, im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA), Veröffentlichung voraussichtlich 2012.
- Hermann und Möller (2010): Hermann, A.; Möller, M.: Rechtliche Machbarkeitsstudie zu einer Nano-Meldeverordnung und einem Nano-Produktregister. Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA), Öko-Institut 2010.
- Hofmann et al. (2009): Hofmann, T.; von der Kammer, F.: Estimating the relevance of engineered carbonaceous nanoparticle facilitated transport of hydrophobic organic contaminants in porous media. *Environmental pollution*, 2009, 157(4), S. 1117–1126, doi:10.1016/j.envpol.2008.10.022.
- Hsu und Chein (2007): Hsu, L.-J.; Chein, H.-M.: Evaluation of nanoparticle emission for TiO<sub>2</sub> nanopowder coating materials. *Journal of Nanoparticle Research*, 2007, 9(1), S. 157–163.
- Hund-Rinke (2012): Hund-Rinke, K.: Persönliche Mitteilung am 25.05.2012.
- Hund-Rinke et al. (2008): Hund-Rinke, K.; Marscheider-Weidemann, F.; Kemper, M.: Beurteilung der Gesamtweltexposition von Silberionen aus Biozid-Produkten. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe, in Kooperation mit Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie (IME), Schmallenberg 2008.
- Hund-Rinke und Simon (2006): Hund-Rinke, K.; Simon, M.: Ecotoxic effect of photocatalytic active nanoparticles TiO<sub>2</sub> on algae and daphnids. *Environ. Sci. Pollution Res.*, 2006, 13(4), S. 225–232.
- Hussain et al. (2005): Hussain, S. M.; Hess, K. L.; Gearhart, J. M.; Geiss, K. T.; Schlager, J. J.: In vitro toxicity of nanoparticles in BRL 3A rat liver cells. *Toxicology in Vitro*, 2005, 19(7), S. 975–983.
- Hyung et al. (2007): Hyung, H.; Fortner, J. D.; Hughes, J. B.; Kim, J. H.: Natural organic matter stabilizes carbon nanotubes in the aqueous phase. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(1), S. 179–184.
- ICBA (2006): International Carbon Black Association (ICBA) (Hrsg.): What is Carbon Black? Online verfügbar unter: [http://www.carbon-black.org/what\\_is.html](http://www.carbon-black.org/what_is.html) (abgerufen am 22.5.2012).
- Inno.CNT (o.J.): Innovationsallianz Carbon Nanotubes (Inno.CNT): CarboAir – Relevanz für Gesellschaft und Wirtschaft, online verfügbar unter: [http://www.inno-cnt.de/de/projekte\\_carboair.php](http://www.inno-cnt.de/de/projekte_carboair.php) (abgerufen am 24.5.2012).
- Innventia (o.J.): Innventia AB (Hrsg.): Microfibrillated Cellulose, online verfügbar unter: [http://innventia.knowitis.se/templates/STFIPage\\_\\_\\_\\_7261.aspx](http://innventia.knowitis.se/templates/STFIPage____7261.aspx) (abgerufen am 30.5.2012).



- IRGC (2008): International Risk Governance Council (IRGC) (Hrsg.): Risk Governance of Nanotechnology Applications in Food and Cosmetics. Genf 2008.
- IRGC (2009): International Risk Governance Council (IRGC) (Hrsg.): Appropriate Risk Governance Strategies for Nanotechnology Applications in Food and Cosmetics, Genf 2009.
- Ji et al. (2007): Ji, J. H.; Jung, J. H.; Kim, S. S.; Yoon, J. U.; Park, J. D.; Choi, B. S.; Chung, Y. H.; Kwon, I. H.; Jeong, J.; Han, B. S.; Shin, J. H.; Sung, J. H.; Song, K. S.; Yu, I. J.: Twenty-eightday inhalation toxicity study of silver nanoparticles in Sprague-Dawley rats. *Inhalation Toxicology*, 2007, 19(10), S. 857–871.
- Johnston et al. (2010a): Johnston, H. J.; Hutchison, G. R.; Christensen, F. M.; Peters, S.; Hankin, S.; Aschberger, K.; Stone, V.: A critical review of the biological mechanisms underlying the in vivo and in vitro toxicity of carbon nanotubes: The contribution of physico-chemical characteristics. *Nanotoxicology*, 2010, 4(2), S. 207–246, doi:10.3109/17435390903569639
- Johnston et al. (2010b): Johnston, H. J.; Hutchison, G. R.; Christensen, F. M.; Aschberger, K.; Stone, V.: The biological mechanisms and physico-chemical characteristics responsible for driving fullerene toxicity. *Toxicological sciences: an official journal of the Society of Toxicology*, 2010, 114(2), S. 162–182, doi:10.1093/toxsci/kfp265.
- Jost (2010): Jost, D. (Word Trade Institut): Recommendations for Precautionary Matrix for Synthetic Nanomaterials, New Chemicals, Domestic Regulation and International Trade, Switzerland's Approach towards Regulatory Action, Bern 2010.
- Kaegi et al. (2008): Kaegi, R.; Ulrich, A.; Sinnet, B.; Vonbank, R.; Wichser, A.; Zuleeg, S.; Simmler, H.; Brunner, S.; Vonmont, H.; Burkhardt, M.; Boller, M.: Synthetic TiO<sub>2</sub> nanoparticle emission from exterior facades into the aquatic environment. *Environmental Pollution*, 2008, 156(2), S. 233–239.
- Kaegi et al. (2011): Kaegi, R.; Voegelin, A.; Sinnet, B.; Zuleeg, S.; Hagendorfer, H.; Burkhardt, M.; Siegrist, H.: Behavior of Metallic Silver Nanoparticles in a Pilot Wastewater Treatment Plant. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(9), S. 3902–3908.
- Kaewamatawong et al. (2005): Kaewamatawong, T.; Kawamura, N.; Okajima, M.; Sawada, M.; Morita, T.; Shimada, A.: Acute pulmonary toxicity caused by exposure to colloidal silica: particle size dependent pathological changes in mice. *Toxicologic Pathology*, 2005, 33(7), S. 743–749.

- Kahan et al. (2007): Kahan, D.; Slovic, P.; Braman, D.; Gastil, J.; Cohen, G.: Nanotechnology Risk Perceptions: The Influence of Affect and Values. 2007, online abrufbar unter: [http://www.nanotechproject.org/file\\_download/files/NanotechRiskPerceptions-DanKahan.pdf](http://www.nanotechproject.org/file_download/files/NanotechRiskPerceptions-DanKahan.pdf) (zuletzt abgerufen am 29.5.2012).
- Kahru und Dubourguier (2010): Kahru, A.; Dubourguier, H.-C.: From ecotoxicology to nanoecotoxicology. *Toxicology*, 2010, 269(2-3), S. 105–119, doi:10.1016/j.tox.2009.08.016.
- Kang et al. (2007): Kang, S.; Pinault, M.; Pfeifferle, L. D.; Elimelech, M.: Single-walled carbon nanotubes exhibit strong antimicrobial activity. *Langmuir*, 2007, 23(17), S. 8670–8673.
- Kapp et al. (2004): Kapp, N.; Kreyling, W. G.; Schulz, H.; Im, H. V.; Gehr, P.; Semmler, M.; Geiser, M.: Electron energy loss spectroscopy for analysis of inhaled ultrafine particles in rat lungs. *Microsc. Res. Tech.*, 2004, 63, S. 298–305.
- Karlsson et al. (2008): Karlsson, H. L.; Cronholm, P.; Gustafsson, J.; Moller, L.: Copper oxide nanoparticles are highly toxic: A comparison between metal oxide nanoparticles and carbon nanotubes. *Chemical Research in Toxicology*, 2008, 21(9), S. 1726–1732.
- Kennedy et al. (2008): Kennedy, A. J.; Hull, M. S.; Steevens, J. A.; Dontsova, K. M.; Chappell, M. A.; Gunter, J. C.; Weiss, C. A.: Factors influencing the partitioning and toxicity of nanotubes in the aquatic environment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, 27(9), S. 1932–1941.
- Kiser et al. (2009): Kiser, M. A.; Westerhoff, P.; Benn, T.; Wang, Y.; Pérez-Rivera, J.; Hristovski, K.: Titanium nanomaterial removal and release from wastewater treatment plants. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(17), S. 6757–6763.
- Klemm et al. (2011): Klemm, D.; Kramer, F.; Moritz, S.: Nanocelluloses: A New Family of Nature-Based Materials. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2011, 50, S. 5438–5466.
- Koelmans et al. (2008): Koelmans, A. A.; Nowack, B.; Wiesner, M. R.: Comparison of manufactured and black carbon nanoparticle concentrations in aquatic sediments. *Environmental Pollution*, 2008, 157(4), S. 1110–1116.
- Kolosnjaj et al. (2007): Kolosnjaj, J.; Szwarc, H.; Moussa, F.: Toxicity Studies of Carbon Nanotubes. In: Chan, W. C. W. (Hrsg.): *Bio-Applications of Nanoparticles*. Springer, New York 2007.
- Krug und Wick (2011): Krug, H. F.; Wick, P.: Nanotoxicology: An Interdisciplinary Challenge. *Nanotoxicology*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2011, 50, S. 1260–1278.

- Kuhlbusch und Fissan (2006): Kuhlbusch T. A. J.; Fissan H.: Particle characteristics in the reactor and pelletizing areas of carbon black production. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2006, 3(10), S. 558–567.
- Kuhlbusch und Nickel (2010): Kuhlbusch, T. A. J.; Nickel, C.: Emission von Nanopartikeln aus ausgewählten Produkten in ihrem Lebenszyklus. Umweltbundesamt Dessau, UBA-Texte 52/2010.
- Kuhlbusch et al. (2011): Kuhlbusch, T. A. J.; Asbach, C.; Fissan, H.; Göhler, D.; Stintz, M.: Nanoparticle exposure at nanotechnology workplaces: A review. *Particle and Fibre Toxicology*, 2011, 8, S. 22, doi:10.1186/1743-8977-8-22.
- Labille et al. (2010): Labille, J.; Feng, J.; Botta, C.; Borschneck, D.; Sammut, M.; Cabie, M.; Auffan, M.; et al.: Aging of TiO<sub>2</sub> nanocomposites used in sunscreen. Dispersion and fate of the degradation products in aqueous environment. *Environmental pollution (Barking, Essex: 1987)*, 2010, 158(12), S. 3482–3489, doi:10.1016/j.envpol.2010.02.012.
- Lam et al. (2004): Lam, C. W.; James, J. T.; McCluskey, R.; Hunter, R. L.: Pulmonary toxicity of singlewall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation. *Toxicological Sciences*, 2004, 77(1), S. 126–134.
- Landsiedel et al. (2012): Landsiedel, R.; Fabian, E.; Ma-Hock, L.; Wohlleben, W.; Wiench, K.; Oesch, F.; van Ravenzwaay, B.: Toxicokinetics of nanomaterials. *Archives of toxicology*, 2012, 86(7), S. 1021–1060, doi:10.1007/s00204-012-0858-7.
- Levard et al. (2012): Levard, C.; Hotze, E. M.; Lowry, G. V.; Brown G. E.: Environmental Transformations of Silver Nanoparticles: Impact on Stability and Toxicity. *Environ Sci Technol.*, 2012, 46(13), S. 6900–6914, doi: 10.1021/es2037405.
- Li et al. (2008): Li, D.; Lyon, D. Y.; Li, Q.; Alvarez, P. J.: Effect of soil sorption and aquatic natural organic matter on the antibacterial activity of a fullerene water suspension. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, 27(9), S. 1888–1894.
- Li et al. (2009): Li, H.; Zhou, Q.; Wu, Y.; Fu, J.; Wang, T.; Jiang, G.: Effects of waterborne nano-iron on medaka (*Oryzias latipes*): Antioxidant enzymatic activity, lipid peroxidation and histopathology. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(3), S. 684–692.
- Limbach et al. (2007): Limbach, L. K.; Wick, P.; Manser, P.; Grass, R. N.; Brunink, A.; Stark, W. J.: Exposure of Engineered Nanoparticles to Human Lung Epithelial Cells: Influence of Chemical Composition and Catalytic Activity on Oxidative Stress. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(11), S. 4158–4163, doi:10.1021/es062629t.

- Lin et al. (2005): Lin, C.-C.; Chen, S.-J.; Huang, K.-L.; Hwang, W.-I.; Chang-Chien, G.-P.; Lin, W.-Y.: Characteristics of Metals in Nano/Ultrafine/Fine/Coarse Particles Collected Beside a Heavily Trafficked Road. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(21), S. 8113–8122, doi:10.1021/es048182a.
- Lindberg et al. (2009): Lindberg, H. K.; Falck, G. C.; Suhonen, S.; Vippola, M.; Vanhala, E.; Catalan, J.; Savolainen, K.; Norppa, H.: Genotoxicity of nanomaterials: DNA damage and micronuclei induced by carbon nanotubes and graphite nanofibres in human bronchial epithelial cells in vitro. *Toxicology Letters*, 2009, 186(3), S. 166–173.
- Lorenz et al. (2011): Lorenz, C.; Hagendorfer, H.; von Goetz, N.; Kaegi, R.; Gehrig, R.; Ulrich, A.; Scheringer, M.; Hungerbühler, K.: Nanosized aerosols from consumer sprays: experimental analysis and exposure modeling for four commercial products. *J Nanopart Res*, 2011, 13, S. 3377–3391.
- Lorenz et al. (2012): Lorenz, C.; Windler, L.; von Goetz, N.; Lehmann, R. P.; Schuppler, M.; Hungerbühler, K.; Heuberger, M.; et al.: Characterization of silver release from commercially available functional (nano)textiles. *Chemosphere*, 2012, 89(7), S. 817–824, doi:10.1016/j.chemosphere.2012.04.063.
- Lovern und Klaper (2006): Lovern, S. B.; Klaper, R.: *Daphnia magna* mortality when exposed to titanium dioxide and fullerene (C60) nanoparticles. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006, 25(4), S. 1132–1137.
- Lowry et al. (2012): Lowry, G. V.; Espinasse, B. P.; Badireddy, A. R.; Richardson, C. J.; Reinsch, B. C.; Bryant, L. D.; Bone, A. J.; et al.: Long-term transformation and fate of manufactured ag nanoparticles in a simulated large scale freshwater emergent wetland. *Environmental science & technology*, 2012, 46(13), S. 7027–7036, doi:10.1021/es204608d.
- LUBW (2010): Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (Hrsg.): *Nanomaterialien: Toxikologie/Ökotoxikologie*, Karlsruhe 2010.
- Luoma (2008): Luoma, S. N.: *Silver Nanotechnologies: old problem or new challenges?*, Woodrow Wilson International Centre for scholars, Project on Emerging Nanotechnologies, 2008.
- Lüth (2011): Lüth, A.: *Nanotechnologie für den Katastrophenschutz und die Entwicklungszusammenarbeit*, Band 17 der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden 2011, online verfügbar unter: [http://www.hessen-nanotech.de/mm/Nanotechnologie\\_Katastrophenschutz\\_Entwicklungszusammenarbeit\\_web.pdf](http://www.hessen-nanotech.de/mm/Nanotechnologie_Katastrophenschutz_Entwicklungszusammenarbeit_web.pdf) (abgerufen am 22.5.2012).

- Luther et al. (2004): Luther, W.; Malanowski, N.; Bachmann, G.; et al.; Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt, Innovations- und Technikanalyse, Düsseldorf 2004, online verfügbar unter: [http://www.bmbf.de/pubRD/nanotech\\_als\\_wachstumsmarkt.pdf](http://www.bmbf.de/pubRD/nanotech_als_wachstumsmarkt.pdf) (abgerufen am 22.5.2012).
- Lux Research (2011): Lux Research: MWNTs Growing Pains In Emerging Composites – A Market Perspective; Jaideep Raje, Lux Research B.V. präsentiert bei der Fachtagung «Nano-Kohlenstoff», Augsburg, September 22, 2011.
- Marris et al. (2001): Marris, C.; Wynna, B.; Simmons, P.; Weldon, S.; et al.: Public Perception of Agricultural Biotechnologies in Europe. Final Report of the PABE Research Project funded by the Commission of European Communities, Contract number: FAIR CT98-3844 (DG12-SSMI), Dec. 2001.
- Martin (2010): Martin, J.: Abfallverbrennungsanlagen im Wandel der Zeit; in: Schenk, K. (Hrsg.): KVA-Rückstände in der Schweiz – Der Rohstoff mit Mehrwert, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern 2010.
- Maynard et al. (2004): Maynard, A. D.; Baron, P. A.; Foley, M.; Shvedova, A. A.; Kisin, E. R.; Castranova, V.: Exposure to carbon nanotube material: Aerosol release during the handling of unrefined single-walled carbon nanotube material. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 2004, A 67(1), S. 87–107.
- Mikkelsen et al. (2011): Mikkelsen, S. H.; Hansen, E.; Christensen, T. B.; Baun, A.; Foss Hansen, S.; Binderup, M.-L.: Survey on basic knowledge about exposure and potential environmental and health risks for selected nanomaterials. Danish Ministry of the Environment – Environmental Protection Agency, Environmental Project No. 1370, 2011.
- Mill (2006): Mill, J. S.: Utilitarismus, Meiner Verlag, Hamburg 2006.
- Möller et al. (2009): Möller, M.; Eberle, U.; Hermann, A.; Moch, K.; Stratmann, B.: Nanotechnologie im Bereich der Lebensmittel. vdf Hochschulverlag, Zürich 2009.
- Möller et al. (2012): Möller, M.; Groß, R.; Hermann, A.; Küppers, P.; Moch, K.; Pistner, C.; Prakash, S.; Spieth-Achnich, A.: Analyse und strategisches Management der Nachhaltigkeitspotenziale von Nanoprodukten – NachhaltigkeitsCheck von Nanoprodukten, UBA-Texte 15/2012, online verfügbar unter: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4276.pdf>. (abgerufen am 22.5.2012).
- Moon et al. (2011): Moon, R. J.; Martini, A.; Nairn, J.; Simonsen, J.; Youngblood, J.: Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites, *Chem. Soc. Rev.*, 2011, 40, S. 3941–3994.

- Mueller et al. (2012): Mueller, N. C.; Braun, J.; Bruns, J.; Černík, M.; Rissing, P.; Rickerby, D.; Nowack, B.: Application of nano zero valent iron (nZVI) for groundwater remediation in Europe. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2012, 19, S. 550–558.
- Mueller und Nowack (2008): Mueller, N. C.; Nowack, B.: Exposure modeling of engineered nanoparticles in the environment. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(12), S. 4447–4453.
- Muller et al. (2006): Muller, J.; Huaux, F.; Lison, D.: Respiratory toxicity of carbon nanotubes: How worried should we be? *Carbon*, 2006, 44(6), S. 1048–1056.
- Murphy et al. (2012): Murphy, F. A.; Poland, C. A.; Duffin, R.; Donaldson, K.: Length-dependent pleural inflammation and parietal pleural responses after deposition of carbon nanotubes in the pulmonary airspaces of mice. *Nanotoxicology*, Aug 21 2012 [epub ahead of print].
- NanoCelluComp (2011): NanoCelluComp Newsletter 1, August 2011, online verfügbar unter: [http://www.nanocellucomp.eu/files/D7\\_2\\_Newsletter1.pdf](http://www.nanocellucomp.eu/files/D7_2_Newsletter1.pdf) (abgerufen am 24.5.2012).
- NanoCelluComp (2012): NanoCelluComp Newsletter 2, February 2012, online verfügbar unter: [http://www.nanocellucomp.eu/files/D7\\_2\\_Newsletter2.pdf](http://www.nanocellucomp.eu/files/D7_2_Newsletter2.pdf) (abgerufen am 24.5.2012).
- Navarro et al. (2008): Navarro, E.; Piccapietra, F.; Wagner, B.; Marconi, F.; Kaegi, R.; Odzak, N.; Sigg, L.; Behra, R.: Toxicity of Silver Nanoparticles to *Chlamydomonas reinhardtii*. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(23), S. 8959–8964.
- Neouze und Schubert (2008): Neouze, M.-A.; Schubert, U.: Surface Modification and Functionalization of Metal and Metal Oxide Nanoparticles by Organic Ligands. *Monatsheft für Chemie*, 2008, 139(3), S. 183–195.
- Nohynek et al. (2007): Nohynek, G. J.; Lademann, J.; Ribaud, C.; Roberts, M. S.: Grey goo on the skin? Nanotechnology, cosmetic and sunscreen safety. *Critical Reviews in Toxicology*, 2007, 37(3), S. 251–277.
- Nowack (2010): Nowack, B.: Nanosilver revisited downstream. *Science*, 2010, 330, S. 1054–1055.
- Nowack et al. (2011): Nowack, B.; Krug, H. F.; Height, M.: 120 Years of Nanosilver History: Implications for Policy Makers. *Environ. Sci. Technol.*, 2011, 45, S. 1177–1183.
- Nowack et al. (2012): Nowack, B.; Ranville, J.; Diamond, S.; Gallego-Urrea, J.; Metcalfe C.; Rose, J.; Horne, N.; Koelmans, A. A.; Klaine, S. J.: Potential scenarios for nanomaterial release and subsequent alteration in the environment. *Environ. Toxicol. Chem.*, 2012, 31, S. 50–59.

- Nowack und Bucheli (2007): Nowack, B.; Bucheli, T. D.: Occurrence, behavior and effects of nanoparticles in the environment. *Environmental Pollution*, 2007, 150(1), S. 5–22.
- O'Donnell (2003): O'Donnell, S.: Impact of Nanomaterials in Airframes on Commercial Aviation, 2003, online verfügbar unter: [http://www.mitre.org/work/tech\\_papers/tech\\_papers\\_03/odonnell\\_nanomaterials/odonnell\\_nanomaterials.pdf](http://www.mitre.org/work/tech_papers/tech_papers_03/odonnell_nanomaterials/odonnell_nanomaterials.pdf) (abgerufen am 24.5.2012)
- Oberdörster et al. (2006): Oberdörster, E.; Zhu, S.; Blickley, T. M.; McClellan-Green, P.; Haasch, M. L.: Ecotoxicology of carbon-based engineered nanoparticles: Effects of fullerene (C60) on aquatic organisms. *Carbon*, 2006, 44(6), S. 1112–1120.
- Oberdörster et al. (2007): Oberdörster, G.; Oberdörster, E.; Oberdörster, J.: Concepts of nanoparticle dose metric and response metric, *Environ. Health Perspect.*, 2007, 115, A290.
- OECD (2009): Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD): Preliminary Review of OECD Test Guidelines for their Applicability to Manufactured Nanomaterials, 2009, ENV/JM/MONO(2009)21.
- OECD (2010): Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD): Preliminary guidance notes on sample preparation and dosimetry for the safety testing of manufactured nanomaterials, 2010, ENV/JM/MONO(2010)25.
- OECD (2011): Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD): Information Gathering Schemes on Nanomaterials: Lessons Learned and Reported Information, 2011, ENV/JM/WRPR/(2011)39.
- Packroff et al. (2011): Packroff, R.; Kuhlbusch, T.; Unfried, K.; Buschmann, R.; Luther, W.; Krüger, P.; Dopp, E. (Expertengruppe Sicherheit): Nanotechnologien – Chancen nutzen – Sicherheit garantieren. Präsentation auf der 4. NRW Nano-Konferenz, 17./18. Oktober 2011.
- Pacurari et al. (2008): Pacurari, M.; Yin, X. J.; Zhao, J.; Ding, M.; Leonard, S. S.; Schwegler-Berry, D.; Ducatman, B. S.; Sbarra, D.; Hoover, M. D.; Castranova, V.; Vallyathan, V.: Raw single-wall carbon nanotubes induce oxidative stress and activate MAPKs, AP-1, NF-kappaB, and Akt in normal and malignant human mesothelial cells. *Environmental Health Perspectives*, 2008, 116(9), S. 1211–1217.
- Park et al. (2008): Park, T.-J.; Martin, J. G.; Linhardt, R. J.: Pharmacological Applications of Biocompatible Carbon Nanotubes and Their Emerging Toxicology Issues. In: Cataldo, F.; Ros, T. (Eds.), *Carbon Materials: Chemistry and Physics*, Vol. 1, Springer, Dordrecht, S. 283–316, doi:10.1007/978-1-4020-6845-4.

- Park et al. (2010): Park, E.-J.; Yi, J.; Kim, Y.; Choi, K.; Park, K.: Silver nanoparticles induce cytotoxicity by a Trojan-horse type mechanism. *Toxicology in vitro*, 2010, 24(3), S. 872–878, doi:10.1016/j.tiv.2009.12.001.
- PAS 2050:2008: PAS 2050:2008 – Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services, online verfügbar unter: <http://www.bsigroup.com/upload/Standards%20&%20Publications/Energy/PAS2050.pdf>
- Piccapietra et al. (2012): Piccapietra, F.; Allue, C. G.; Sigg, L.; Behra, R.: Intracellular Silver Accumulation in *Chlamydomonas reinhardtii* upon Exposure to Carbonate Coated Silver Nanoparticles and Silver Nitrate. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(13), S. 7390–7397.
- Pisanic et al. (2007): Pisanic, T. R.; Blackwell, J. D.; Shubayev, V. I.; Finones, R. R.; Jin, S.: Nanotoxicity of iron oxide nanoparticle internalization in growing neurons. *Biomaterials*, 2007, 28(16), S. 2572–2581.
- Poland et al. (2008): Poland, C. A.; Duffin, R.; Kinloch, I.; Maynard, A.; Wallace, W. A. H.; Seaton, A.; Stone, V.; et al.: Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study. *Nature nanotechnology*, 2008, 3(7), S. 423–428, doi:10.1038/nnano.2008.111.
- Powell et al. (2010): Powell J. J.; Faria, N.; Thomas-McKay, E.; Pele, L. C.: Origin and fate of dietary nanoparticles and microparticles in the gastrointestinal tract. *J Autoimmun.*, 2010, 34(3), S. J226–233.
- Priester et al. (2012): Priester, J.; Werlin, R.; Mielke, R.; Holden, P.: Trophic Transfer, Bioaccumulation and Biomagnification of Engineered Nanomaterials in Basal Levels of Environmental Food Webs. UC Center for Environmental Implications of Nanotechnology, online verfügbar unter: [http://www.cein.ucla.edu/research/4-TER/UC\\_CEIN\\_research\\_TER-2.html](http://www.cein.ucla.edu/research/4-TER/UC_CEIN_research_TER-2.html)
- Pronk et al. (2009): Pronk, M. E. J.; Wijnhoven, S. W. P.; Bleeker, E. A. J.; Heugens, E. H. W.; Peijnenburg, W. J. G. M.; Luttik, R.; Hakkert, B. C.: Nanomaterials under REACH. Nanosilver as a 565 case study. RVIM Report 601780003/2009, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne, Bilthoven 2009.
- Randel (2003): Randel, P.: Nanoporöse Dämmstoffe auf Basis Fumed Silica, VIP Bau Fachtagung, Rostock-Warnemünde, 10./11. Juli 2003, online verfügbar unter: [http://www.vip-bau.de/pdf/1\\_vip\\_bau/c\\_randel.pdf](http://www.vip-bau.de/pdf/1_vip_bau/c_randel.pdf) (abgerufen am 24.5.2012).
- Rath (2008): Rath, B.: Ethik des Risikos – Begriffe, Situationen, Entscheidungstheorien und Aspekte, Bern 2008.
- Rawls (2005): Rawls, J.: Eine Theorie der Gerechtigkeit, Suhrkamp, Frankfurt/M. 2005.



- Reisch und Bitz (2011): Reisch, L.; Beitz, S.: Nanotechnologie: Verbraucherwahrnehmung und verbraucherpolitische Handlungspotenziale, Aktualisierung, Abschlussbericht, Zeppelin Universität, Friedrichshafen 2011.
- Riediker (2009): Riediker, M.: Nano-Debate: CNTs in car tires; in: NanoImpactNet Newsletter vom 8. April 2009, online verfügbar unter: [http://www.nanoimpactnet.eu/uploads/file/Newsletters/NanoImpactNet-Newsletter\\_8-April\\_2009.pdf](http://www.nanoimpactnet.eu/uploads/file/Newsletters/NanoImpactNet-Newsletter_8-April_2009.pdf) (abgerufen am 22.5.2012).
- Riediker (2012): Riediker, M.: Persönliche Mitteilung am 24.05.2012.
- Rippe (2001): Rippe, K.-P.: Vorsorge als umweltethisches Leitprinzip, Studie im Auftrag der Eidgenössischen Ethikkommission für den ausserhumanen Bereich (EKAH), 2001.
- Roberts et al. (2007): Roberts, A. P.; Mount, A. S.; Seda, B.; Souther, J.; Qiao, R.; Lin, S.; Ke, P. C.; Rao, A. M.; Klaine, S. J.: In vivo biomodification of lipid-coated carbon nanotubes by *Daphnia magna*. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(8), S. 3025–3029.
- Robichaud et al. (2005): Robichaud, C. O.; Tanzil, D.; Weilenmann, U.; Wiesner, M. R.: Relative risk analysis of several manufactured nanomaterials: an insurance industry context. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(22), S. 8985–8994.
- Roller (2008): Roller, M.: Untersuchungen zur krebserzeugenden Wirkung von Nanopartikeln und anderen Stäuben. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund, Berlin, Dresden 2008.
- Roller (2009): Roller, M.: Carcinogenicity of inhaled nanoparticles. Informa UK Ltd 2009, London, UK, abrufbar unter: <http://informahealthcare.com/doi/abs/10.1080/08958370902942541>
- Rothen-Rutishauser et al. (2007): Rothen-Rutishauser, B.; Schürch, S.; Gehr, P.: Interaction of particles with membranes. In: *The toxicology of particles*. Donaldson, K.; Borm, P. (Hrsg.). Francis Group, LLC, CRC Press, Boca Raton, S. 139–160, 2007.
- RS/RAE (2004): The Royal Society and The Royal Academy of Engineering (Hrsg.): *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*, 2004.
- sag (2011): Schweizerische Arbeitsgruppe Gentechnologie (sag) (Hrsg.): *Nanotechnologie, Situationsanalyse der SAG*, Zürich 2011.
- Saleh et al. (2008): Saleh, N.; Kim, H. J.; Phenrat, T.; Matyjaszewski, K.; Tilton, R. D.; Lowry, G. V.: Ionic strength and composition affect the mobility of surface-modified Fe<sub>0</sub> nanoparticles in watersaturated sand columns. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(9), S. 3349–3355.

- Sato et al. (2005): Sato, Y.; Yokoyama, A.; Shibata, K.; Akimoto, Y.; Ogino, S.; Nodasaka, Y.; Kohgo, T.; Tamura, K.; Akasaka, T.; Uo, M.; Motomiya, K.; Jeyadevan, B.; Ishiguro, M.; Hatakeyama, R.; Watari, F.; Tohji, K.: Influence of length on cytotoxicity of multi-walled carbon nanotubes against human acute monocytic leukemia cell line THP-1 in vitro and subcutaneous tissue of rats in vivo. *Molecular bioSystems*, 2005, 1(2), S. 176–182.
- Sayes et al. (2007): Sayes, C. M.; Reed, K. L.; Warheit, D. B.: Assessing toxicity of fine and nanoparticles: comparing in vitro measurements to in vivo pulmonary toxicity profiles. *Toxicological Sciences*, 2007, 97(1), S. 163–180.
- SCCP (2007): Scientific Committee on Consumer Products – SCCP der Europäischen Kommission (Hrsg.): Preliminary opinion on safety of nanomaterials in cosmetic products. Brüssel 2007, [http://ec.europa.eu/health/ph\\_risk/committees/04\\_sccp/docs/sccp\\_o\\_099.pdf](http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_sccp/docs/sccp_o_099.pdf) (abgerufen am 13.03.2008).
- SCENIHR (2010): Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) (Hrsg.): Scientific Basis for the Definition of the Term «Nanomaterial», 2010.
- Schins und Knaapen (2008): Schins, R. P. F.; Knaapen, A. M.: Genotoxicity of Poorly Soluble Particles. Informa UK Ltd UK, 2008, abgerufen unter: <http://informahealthcare.com/doi/abs/10.1080/08958370701496202>
- Schirmer et al. (2013): Schirmer, K.; Behra, R.; Sigg, L.; Suter, M. J.-F.: Ecotoxicological aspects of nanomaterials in the aquatic environment. In: Luther, W.; Zweck, A.; *Safety Aspects of Engineered Nanomaterials*, Pan Stanford Publishing, Singapore, 2013.
- Schmid et al. (2010): Schmid, K.; Danuser, B.; Riediker, M.: Nanoparticle usage and protection measures in the manufacturing industry: a representative survey. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2010, 7(4), S. 224–232.
- Schmid und Riediker (2008): Schmid, K.; Riediker, M.: Use of Nanoparticles in Swiss Industry: A Targeted Survey. *Environmental Science & Technology*, 2008, 7, S. 2253–2260.
- Schmidt und Lunk (o.J.): Schmidt, T.; Lunk, P.: Kurzbeitrag Holcim (Schweiz) AG: Nano-T® Technology, online verfügbar unter: [http://www.zement.at/service/literatur/fileupl/koll10\\_schmidt.pdf](http://www.zement.at/service/literatur/fileupl/koll10_schmidt.pdf) (abgerufen am 22.5.2012).
- Schreiner et al. (2009): Schreiner, K. M.; Filley, T. R.; Blanchette, R. A.; Bowen, B. B.; Bolskar, R. D.; Hockaday, W. C.; Masiello, C. A.; Raebiger, J. W.: White-rot basidiomycete-mediated decomposition of C60 fullerol. *Environ Sci Technol.*, 2009, 43(9), S. 3162–3168.

- Schrack et al. (2004): Schrack, B.; Hydutsky, B. W.; Blough, J. L.; Mallouk, T. E.: Delivery Vehicles for Zerovalent Metal Nanoparticles in Soil and Groundwater. *Chemistry of Materials*, 2004, 16(11), S. 2187–2193.
- Schulz (2011): Schulz, R.: Neue Studie zeigt: Standardtests für Umweltbewertung von Nanomaterialien sind ungenügend; Universität Koblenz-Landau, Archiv 2011, <http://www.uni-koblenz-landau.de/landau/aktuelles/archiv-2011/nanomaterialtests> (abgerufen am 31.5.2012).
- Schwab et al. (2011): Schwab, F.; Bucheli, T. D.; Lukhele, L. P.; Magrez, A.; Nowack, B.; Sigg, L.; Knauer, K.: Are carbon nanotube effects on green algae caused by shading and agglomeration? *Environ. Sci. Technol.*, 2011, 45, S. 6136–6144.
- Semmler et al. (2004): Semmler, M.; Seitz, J.; Erbe, F.; Mayer, P.; Heyder, J.; Oberdörster, G.; Kreyling, W. G.: Long-term clearance kinetics of inhaled ultrafine insoluble iridium particles from the rat lung including transient translocation into secondary organs. *Inhal Toxicol.*, 2004, 16(6-7), S. 53–59.
- Shrader-Frechette (1991): Shrader-Frechette, K. S.: Risk and Rationality – Philosophical Foundations of Populist Reforms. University of California Press, Berkeley 1991.
- Shvedova et al. (2005): Shvedova, A. A.; Kisin, E. R.; Mercer, R.; Murray, A. R.; Johnson, V. J.; Potapovich, A. I.; Tyurina, Y. Y.; Gorelik, O.; Arepalli, S.; Schwegler-Berry, D.; Hubbs, A. F.; Antonini, J.; Evans, D. E.; Ku, B.-K.; Ramsey, D.; Maynard, A.; Kagan, V. E.; Castranova, V.; Baron, P.: Unusual inflammatory and fibrogenic pulmonary responses to single-walled carbon nanotubes in mice. *American Journal of Physiology – Lung Cellular and Molecular Physiology*, 2005, 289, S. L698–L708.
- Siqueira et al. (2010): Siqueira, G.; Bras, J.; Dufresne, A.; Cellulosic Bionanocomposites: A Review of Preparation, Properties and Applications. *Polymers* 2010, 2, S. 728–765.
- Siró und Plackett (2010): Siró, I.; Plackett, D.: Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: a review. *Cellulose*, 2010, 17, S. 459–494.
- Smith et al. (2008): Smith, S. E. S.; Hosgood, H. D.; Michelson, E. S.; Stowe, M. H.; Americans' Nanotechnology Risk Perception. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12, S. 459–473, online abrufbar unter: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1530-9290.2008.00032.x/full> (zuletzt abgerufen am 29.5.2012).
- Som (2012): Persönliche Auskunft von Claudia Som (EMPA) vom 22.5.2012.
- Som et al. 2010): Som, C.; Nowack, B.; Wick, P.; Krug, H.: Nanomaterialien in Textilien: Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheits-Aspekte, Fokus: synthetische Nanopartikel. Empa und TVS Textilverband Schweiz, St. Gallen 2010, [http://www.empa.ch/plugin/template/empa/\\*/93326](http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/93326)

- Sorahan und Harrington (2007): Sorahan, T.; Harrington, J. M.: A «lugged» analysis of lung cancer risks in UK carbon black production workers, 1951–2004. *American Journal of Industrial Medicine*, 2007, 50(8), S. 555–564.
- SRU (2011): Sachverständigenrat für Umweltfragen – SRU (Hrsg.): Vorsorgestrategien für Nanomaterialien. Berlin 2011.
- Stone et al. (2009): Stone, V.; Hankin, S.; Aitken, R.; Aschberger, K.; Baun, A.; Christensen, F.; Fernandes, T.; Hansen, S. F.; Hartmann, N. B.; Hutchison, G.; Johnston, H.; Micheletti, C.; Peters, S.; Ross, B.; Sokull-Kluettgen, B.; Stark, D.; Tran, L.: ENRHES – Engineered nanoparticles: review of health and environmental safety, EC contract number 218433, 2009.
- Sunstein (2005): Sunstein, C. R.: *The Laws of Fear – Beyond the Precautionary Principle*. Cambridge University Press, Cambridge 2005.
- Suresh et al. (2012): Suresh, A. K.; Pelletier, D. A.; Wang, W.; Morrell-Falvey, J. L.; Gu, B.; Doktycz, M. J.: Cytotoxicity Induced by Engineered Silver Nanocrystallites is Dependent on Surface Coatings and Cell Types. *Langmuir*, 2012, 28(5), S. 2727–2735.
- SustainComp (o.J.): Webpage des Projektes «SustainComp», Rubrik «Vision & Objectives», online verfügbar unter: <http://www.sustaincomp.eu/> (abgerufen am 24.5.2012).
- SUVA (2012): SUVA Versicherung (Hrsg.): Factsheet zur Gesundheitsgefährdung durch Laserdrucker, Kopiergeräte und Toner. September 2012, <http://www.suva.ch/factsheet-gesundheitsgefaehrdung-durch-laserdrucker-kopiergeraete-toner.pdf>
- Swiss Re (2004): Swiss Re (Hrsg.): *Nanotechnology – Small matter, many unknowns*. Zürich 2004.
- TA Swiss (2006): TA Swiss (Hrsg.): Bericht des Dialogverfahrens publifocus «Nanotechnologien und ihre Bedeutung für Gesundheit und Umwelt – Nanotechnologien in der Schweiz: Herausforderungen erkannt», Bern 2006.
- Tagesanzeiger (2011): 30 Prozent der Lebensmittel landen im Müll, Artikel vom 13.11.2011 im Tagesanzeiger, online verfügbar unter: <http://www.tagesanzeiger.ch/wirtschaft/unternehmen-und-konjunktur/30-Prozent-der-Lebensmittel-landen-im-Muell/story/10250004> (abgerufen am 24.5.2012)
- Takenaka et al. (2001): Takenaka, S.; Karg, E.; Roth, C.; Schulz, H.; Ziesenis, A.; Heinzmann, U.; Schramel, P.; Heyder, J.: Pulmonary and systemic distribution of inhaled ultrafine silver particles in rats. *Environmental Health Perspectives*, 2001, 109 (Suppl. 4), S. 547–551.

- Tellenbach-Sommer (2010): Tellenbach-Sommer, M.: Umweltverträgliche und sichere Entsorgung von Abfällen aus Herstellung sowie industrieller und gewerblicher Verarbeitung von synthetischen Nanomaterialien – Entwurf Konzeptpapier, Terra Consult, Bern, Sept. 2010.
- Thurnherr et al. (2011): Thurnherr, T.; Brandenberger C.; Fischer, K.; Diener, L.; Manser, P.; Maeder-Althaus, X.; Kaiser, J.-P.; Krug, H.; Rothen-Rutishauser, B.; Wick, P.: A comparison of acute and long-term effects of industrial multiwalled carbon nanotubes on human lung and immune cells in vitro. *Toxicol Lett.*, 2011, 200(3), S. 176–186.
- Tiede et al. (2010): Tiede, K.; Boxall, A. B. A.; Wang, X. M.; Gore, D.; Tiede, D.; Baxter, M.; et al.: Application of hydrodynamic chromatography-ICP-MS to investigate the fate of silver nanoparticles in activated sludge. *J Anal At Spectrom* 2010, 25, S. 1149–1154.
- Tingaut et al. (2009): Tingaut, P.; Zimmermann, T.; Lopez-Suevos, F.: Synthesis and Characterization of Bionanocomposites with Tunable Properties from Poly(lactic acid) and Acetylated Microfibrillated Cellulose; *Biomacromolecules*, 2010, 11, S. 454–464.
- UBA (2009): Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.): Nanotechnik für Mensch und Umwelt – Chancen fördern und Risiken mindern. Dessau 2009.
- Umwelt (2010): Nanotechnologie: Risiken für die Umwelt – Noch viele Fragezeichen; *Magazin «umwelt» – Nanotechnologie*, 3/2010; Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern 2010
- Valberg et al. (2009): Valberg, P. A.; Bruch, J.; McCunney, R. J.: Are rat results from intratracheal instillation of 19 granular dusts a reliable basis for predicting cancer risk? *Regulatory toxicology and pharmacology: RTP*, 2009, 54(1), S. 72–83, doi:10.1016/j.yrtph.2009.02.008.
- Vasiliadis (2011): Vasiliadis, H.; Nanotechnology in automotive tyres, *Observatory Nano Briefing Nr. 23*, November 2011, online verfügbar unter: [http://bwcv.es/assets/2012/2/2/Briefing\\_No.23\\_Nanotechnology\\_in\\_Automotive\\_Tyres\\_1\\_.pdf](http://bwcv.es/assets/2012/2/2/Briefing_No.23_Nanotechnology_in_Automotive_Tyres_1_.pdf) (abgerufen am 22.05.2012)
- Völker (2011): Völker, C.: Giftige Zwerge in der Umwelt? Über Wirkungen von Nanomaterialien in aquatischen Ökosystemen. *Forschung Frankfurt* 01/2011, S. 50–52.
- von Gleich et al. (2010): von Gleich, A. et al.: Aspekte einer nachhaltigen Gestaltung von Nanotechnologien, 13 Designprinzipien, Arbeitsgruppe «Green Nano» (30.8.2010), online verfügbar unter: [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nano\\_designprinzipien\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nano_designprinzipien_bf.pdf) (abgerufen am 07.09.2012).

- von Goetz (2012): von Goetz, N.: Consumer exposure to silver (nanoparticles) in consumer products; ETH Zurich, Institute of Chemical and Bioengineering; Presentation at BfR-Conference on Nanosilver, Berlin, 8./9.2.2012, <http://www.bfr.bund.de/cm/349/consumer-exposure-to-silver-nanoparticles-in-consumer-products.pdf>
- Walser et al. (2012): Walser, T.; Limbach, L.; Brogioli, R.; Erisman, E.; Flamigni, L.; Hattendorf, B.; Juchli, M.; Krumeich, F.; Ludwig, C.; Prikopsky, K.; Rossier, M.; Saner, D.; Sigg, A.; Hellweg, S.; Günther, D.; Stark, W.: Persistence of engineered nanoparticles in a municipal solid-waste incineration plant, *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(8), S. 520–524, doi:10.1038/nnano.2012.64.
- Wang et al. (2012): Wang, T.; Bai, J.; Jiang, X.; Nienhaus, G. U.: Cellular Uptake of Nanoparticles by Membrane Penetration: A Study Combining Confocal Microscopy with FTIR Spectroelectrochemistry. *ACS Nano*, 2012, 6(2), S. 1251–1259, doi: 10.1021/nn203892h.
- Warheit et al. (2004): Warheit, D. B.; Laurence, B. R.; Reed, K. L.; Roach, D. H.; Reynolds, G. A.; Webb, T. R.: Comparative pulmonary toxicity assessment of single-wall carbon nanotubes in rats. *Toxicological Sciences*, 2004, 77(1), S. 117–125.
- Watermann et al. (2010): Watermann, B. T.; Daehne, D.; Fürle, C.: Einsatz von Nanomaterialien als Alternative zu biozidhaltigen Antifouling-Anstrichen und deren Umweltauswirkungen. Umweltbundesamt, UBA-Texte 40/10, Dessau 2010.
- Waters et al. (2009): Waters, K. M.; Masiello, L. M.; Zangar, R. C.; Tarasevich, B. J.; Karin, N. J.; Quesenberry, R. D.; Bandyopadhyay, S.; Teeguarden, J. G.; Pounds, J. G.; Thrall, B. D.: Macrophage responses to silica nanoparticles are highly conserved across particle sizes. *Toxicological Sciences*, 2009, 107(2), S. 553–569.
- Weder (2012a): Weder, C.: Zellulose Nanokomposite als neue Konstruktionswerkstoffe, Projektbeschreibung auf der Homepage des Nationalen Forschungsprogramms NFP 64, online verfügbar unter: [http://www.nfp64.ch/D/projekte/andere\\_bereiche/zellulose\\_nanokomposite\\_konstruktionswerkstoffe/Seiten/default.aspx](http://www.nfp64.ch/D/projekte/andere_bereiche/zellulose_nanokomposite_konstruktionswerkstoffe/Seiten/default.aspx) (abgerufen am 11.5.2012).
- Weder (2012b): Weder, C.: Neue Verarbeitungsmethoden für Cellulose-Nanokomposite, Projektbeschreibung auf der Homepage des Nationalen Forschungsprogramms NFP 66, online verfügbar unter: <http://www.nfp66.ch/D/projekte/holz-als-material-fuer-komponenten/neue-verarbeitungsmethoden-fuer-cellulose-nanokomposite/Seiten/default.aspx> (abgerufen am 11.05.2012)

- Weir et al. (2012): Weir, A.; Westerhoff, P.; Fabricius, L.; Hristovski, K.; von Goetz, N.: Titanium Dioxide Nanoparticles in Food and Personal Care Products, *Environ. Sci. and Tech.*, 2012, 46(4), S. 2242–2250.
- Wiesner et al. (2008): Wiesner, M. R.; Hotze, E. M.; Brant, J. A.; Espinasse, B.: Nanomaterials as possible contaminants: the fullerene example. *Water Science and Technology*, 2008, 57(3), S. 305–310.
- Wijnhoven et al. (2009): Wijnhoven, S. W. P.; Peijnenburg, W. J. G. M.; Herberts, C. A.; Hagens, W. I.; Oomen, A. G.; Heugens, E. H. W.; Roszek, B.; Bisschops, J.; Gosens, I.; Meent, D. van de; Dekkers, S.; Jong, W. H. de; Zijverden, M. van; Sips, A. J. A. M.; Geertsma, R. E.: Nano-silver: A review of available data and knowledge gaps in human and environmental risk assessment. *Nanotoxicology*, 2009, 3(2), S. 109–138.
- Wohlfart et al. (2011): Wohlfart, S.; Gelperina, S.; Hreuter, J.: Transport of drugs across the blood-brain barrier by nanoparticles. *Journal of Controlled Release*, 2011, ISSN 0168-3659, 10.1016/j.jconrel.2011.08.017, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168365911005852>
- Xia et al. (2010): Xia, X. R.; Monteiro-Riviere, N. A.; Riviere, J. E.: Skin penetration and kinetics of pristine fullerenes (C60) topically exposed in industrial organic solvents. *Toxicol Appl Pharmacol.*, 2010, 242(1), S. 29–37.
- Xie et al. (2008): Xie, B.; Xu, Z.; Guo, W.; Li, Q.: Impact of natural organic matter on the physicochemical properties of aqueous C60 nanoparticles. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(8), S. 2853–2859.
- Xu et al. (2009): Xu, A.; Chai, Y.; Nohmi, T.; Hei, T. K.: Genotoxic responses to titanium dioxide nanoparticles and fullerene in gpt delta transgenic MEF cells. *Particle and fibre toxicology*, 2009, 6, S. 3, doi:10.1186/1743-8977-6-3.
- Yazdi et al. (2010): Yazdi, A. S.; Guarda, G.; Riteau, N.; Drexler, S. K.; Tardivel, A.; Couillin, I.; Tschopp, J.: Nanoparticles activate the NLR pyrin domain containing 3 (Nlrp3) inflammasome and cause pulmonary inflammation through release of IL-1 $\alpha$  and IL-1 $\beta$ . *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2010, 107, S. 19449–19454, [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1008155107](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1008155107)
- Yeganeh et al. (2008): Yeganeh, B.; Kull, C. M.; Hull, M. S.; Marr, L. C.: Characterization of airborne particles during production of carbonaceous nanomaterials. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(12), S. 4600–4606.
- Yokel und MacPhail (2011): Yokel, R. A.; MacPhail, R. C.: Engineered nanomaterials: exposures, hazards, and risk prevention. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 2011, 6(1), S. 7, doi:10.1186/1745-6673-6-7.

Zhu et al. (2009): Zhu, M. T.; Feng, W. Y.; Wang, Y.; Wang, B.; Wang, M.; Ouyang, H.; Zhao, Y. L.; Chai, Z. F.: Particokinetics and extrapulmonary translocation of intratracheally instilled ferric oxide nanoparticles in rats and the potential health risk assessment. *Toxicological Sciences*, 2009, 107(2), S. 342–351.



## 16 Anhang

### 16.1 Übersicht Schweizer Unternehmen mit Aktivitäten im Bereich Nanomaterialien

Tabelle 23 Übersicht Schweizer Unternehmen mit Aktivitäten im Bereich Nanomaterialien

Firmenname	Ort	Internet	Technologie/ Nanomaterialien	Anwendungen/ Märkte	Wertschöpfungsstufe
adinotec Schweiz GmbH	Lenzburg	www.adinotec.com	Nanopartikel, -kapseln	Nahrungsergänzungsmittel	NP-Handel/-Beratung
AutoBrill GmbH	Grenchen	www.autobrill.ch	Nanobeschichtungsmaterial für die Oberflächenversiegelung, Nanoversiegelung von Fahrzeuglacken	Versiegelungen für Haushalt und Gewerbe, Autolacke	NP-Handel/-Beratung
AWM Mold Tech AG	Muri	www.advaltech.com	Kunststoffspritzguss u. a. mit Oberflächen-technologie im Nanobereich	Automobilindustrie, Medizinaltechnik und Konsumgüter	NP-Verarbeiter
B.f.N. nano pool GmbH	Fürigen	www.bfbag.com	Nanobeschichtungen	Antiti, Betonversiegelung	NP-Verarbeiter

Firmenname	Ort	Internet	Technologie/ Nanomaterialien	Anwendungen/ Märkte	Wertschöpfungsstufe
Beropur AG	Sirmach	<a href="http://www.beropur.ch">www.beropur.ch</a>	Nanobeschichtungen	Versiegelungen, Reinigungsmittel	NP-Handel/ -Beratung
Blaser AG Malters	Malters	<a href="http://www.blasermalters.ch">www.blasermalters.ch</a>	Nanobeschichtungsmaterial für die Oberflächenversiegelung	Galvanotechnik, Antihafbeschichtungen	NP-Verarbeiter
Bühler AG, Nanotechnology	Uzwil	<a href="http://www.buhlergroup.com">www.buhlergroup.com</a>	Herstellung von Nanopartikeln und -formulierungen (Nanoaktivitäten überwiegend in Saarbrücken, D), Geräte zur mechanischen Partikelzerkleinerung	Beschichtungen, Lacke, Tinten, Polymere, Klebstoffe, Verbraucherprodukte etc.	NP-Hersteller
CalciTech Ltd	Genf	<a href="http://www.calcitech.com">www.calcitech.com</a>	Synthetisches Kalziumkarbonat mit Partikelgrösse bis zu 100 nm	Chemische Produkte	NP-Hersteller
CIBA (BASF)	Basel	<a href="http://www.basf.de">www.basf.de</a>	Nanostrukturierte Materialien	Spezialchemikalien	NP-Hersteller
Clariant	Muttenz	<a href="http://www.clariant.com">www.clariant.com</a>	Nanostrukturierte Additive, Emulsionen	Spezialchemikalien	NP-Hersteller

Firmenname	Ort	Internet	Technologie/ Nanomaterialien	Anwendungen/ Märkte	Wertschöpfungsstufe
Composites Busch SA	Porrentruy	<a href="http://www.compositesbusch.ch">www.compositesbusch.ch</a>	Produktion von Faserverbundbauteilen im RTM (Resin Transfer Moulding) und im Infusionsverfahren. Einsatz von Araldite® Nano-Tech Composite (Huntsman ehemals Ciba) für Eishockeyschläger	Sport, Medizinaltechnik, Luftfahrt, Maschinenbau, Uhrenindustrie und Automobilindustrie	NP-Verarbeiter
DACS – Dvorak Advanced Coating Solution	Thun	<a href="http://www.dacs.ch">www.dacs.ch</a>	Nanokomposit-Beschichtungen durch thermische Spritzverfahren von Nano-suspensionen	u. a. Korrosionsschutz	NP-Verarbeiter
Debio Recherche Pharmaceutique S.A.	Martigny	<a href="http://www.debiopharm.com">www.debiopharm.com</a>	Nanopartikel als Drug-Delivery-Systeme	Pharmaka	NP-Hersteller/ -Verarbeiter
EMS-Chemie AG	Domat	<a href="http://www.emsgrilltech.com">www.emsgrilltech.com</a>	Nanostrukturierte Additive	Vernetzer für Pulverlacke, Haftvermittler für die Reifenindustrie, Schmelzklebstoffe	NP-Verarbeiter

Firmenname	Ort	Internet	Technologie/ Nanomaterialien	Anwendungen/ Märkte	Wertschöpfungsstufe
Eposit AG	Pfyn TG	<a href="http://www.eposit.ch">www.eposit.ch</a>	Kunststoffbeschichtungen, u. a. Sol-Gel	easy-to-clean, Antifingerprint, Kratzfestigkeit, Adhäsion in der Uhrenindustrie, Maschinen- und Anlagebau, Labortechnik	NP-Hersteller/ -Verarbeiter
Exto Solutions SA, Techpowder SA	Gland	<i>keine Webseite</i>	Herstellung von Nanopartikeln	Spezialchemikalien, Energietechnik etc.	NP-Hersteller
Falcone AG	Freienbach	<a href="http://www.falcone.ch">www.falcone.ch</a>	Silane, Haftvermittler, Katalysatoren, Vernetzer, Kieselsäure	Bautenschutz, Kleb- und Dichtstoffe	NP-Handel (u. a. für Evonik)
FIRMENICH & CIE	Genf	<a href="http://www.firmenich.com">www.firmenich.com</a>	Duftstoffe und Aromen	Kosmetik, Lebensmittelzusätze	NP-Forschung
Flexcell	Yverdon-les-Bains	<a href="http://www.flexcell.com">www.flexcell.com</a>	Nanobeschichtungstechnik für Solarzellen	Dünnschichtsolarzellen	
FRESO technical-solutions GmbH	Jona	<a href="http://www.technical-solutions.ch">www.technical-solutions.ch</a>	Nanobeschichtungen	Bautenschutz, Versiegelungen	NP-Handel/ -Beratung
Global Surface AG	Zürich	<a href="http://www.globalsurface.com">www.globalsurface.com</a>	Nanobeschichtungen (Solgel, SAM), Nanokomposite	Oberflächenfunktionalisierung in verschiedenen Anwendungsgebieten	NP-Hersteller/ -Verarbeiter
Greatcell Solar SA	Lutry	<a href="http://www.greatcell.com">www.greatcell.com</a>	Nanokomposite für Farbstoffsolarzellen	Fotovoltaik, Textil	NP-Hersteller/ -Verarbeiter

Firmenname	Ort	Internet	Technologie/ Nanomaterialien	Anwendungen/ Märkte	Wertschöpfungsstufe
HeiQ Materials AG	Bad Zurzach	<a href="http://www.heiq.com">www.heiq.com</a>	Nano-/Mikro-Silberkomposite	Antibakterielle Textilaustrüstung	NP-Hersteller/ -Verarbeiter
HOFFMANN LA ROCHE	Basel	<a href="http://www.roche.com">www.roche.com</a>	Nanopartikel zur Formulierung von Wirkstoffen und als Drug-Delivery-Systemen und als Testsysteme für die Diagnostik	Pharmaka, Medizintechnik, Diagnostik	NP-Hersteller/ -Verarbeiter
Holcim (Schweiz) AG	Zürich	<a href="http://www.holcim.ch">www.holcim.ch</a>	Feingemahlener Schiefer als Hydratationskomponente im Zement (Nano-T® Technology)	Zement/Beton	NP-Hersteller/ -Verarbeiter
HTceramix SA	Lausanne	<a href="http://www.htceramix.ch">www.htceramix.ch</a>	Keramische Nanopulver für Brennstoffzellen	Brennstoffzelle	NP-Hersteller/ -Verarbeiter
Huntsman Advanced Materials (Switzerland) GmbH	Basel, Monthey	<a href="http://www.huntsman.com">www.huntsman.com</a>	Araldite® Nano-Tech Composite (organische Nanopartikel zur Härtung von Polymerharzen)	(ehemals CIBA) Polymerharze etc.	NP-Hersteller/ -Verarbeiter

Firmenname	Ort	Internet	Technologie/ Nanomaterialien	Anwendungen/ Märkte	Wertschöpfungsstufe
Iford SA	Marly	<a href="http://www.iford.ch">www.iford.ch</a>	Nanopartikel für Drucktinten und -papiere	Tintenstrahldruck	
IMPAG AG	Zürich	<a href="http://www.impag.ch">www.impag.ch</a>	Nano-Titandioxid in Silicabeads zur optischen Flateminderung in Hautcremes	Kosmetik/Hautcremes	NP-Handel/ -Beratung
Inno-X GmbH	St. Gallen	<a href="http://www.inno-x.ch">www.inno-x.ch</a>	Vertrieb und Beratung zu Nanomaterialien und Nanobeschichtungen (u. a. CNT basiert, Metalloxide etc.)	Massgeschneiderte Lösungen für eine breite Palette industrieller Anwendungen	NP-Handel/ -Beratung
Kälin & Co AG	Wintherthur	<a href="http://www.kaelintaefer.ch">www.kaelintaefer.ch</a>	Nanobeschichtungen	Holzversiegelungen	NP-Handel/ -Beratung
Louis Widmer SA	Schlieren	<a href="http://www.louis-widmer.ch">www.louis-widmer.ch</a>	Liposomale Formulierungen und Nanopartikel als UV-Schutz	Kosmetik, Sonnenschutz- und Pflegecremes	NP-Hersteller/ -Verarbeiter
Medipol	Lausanne	<a href="http://www.medipol.ch">www.medipol.ch</a>	Nanoskalige Drug-Delivery-Systeme	Pharmaka	NP-Hersteller

Firmenname	Ort	Internet	Technologie/ Nanomaterialien	Anwendungen/ Märkte	Wertschöpfungsstufe
Merck Serono AG	Genf	<a href="http://www.merckserono.ch">www.merckserono.ch</a>	Nanobasierte diagnostische Schnelltests	Diagnostika	NP-Hersteller/ -Verarbeiter
Metalor	Neuchâtel	<a href="http://www.metalor.com">www.metalor.com</a>	u. a. Edelmetallpulver, -beschichtungen, z. T. im Nanobereich	u. a. gedruckte Elektronik (RFID), Leitleber	NP-Hersteller/ -Verarbeiter
Mibelle Biochemistry	Buchs	<a href="http://www.mibellebiochemistry.com">www.mibellebiochemistry.com</a>	Nanoemulsionen Nano-Lipobelle für Coenzym Q10	Kosmetika	NP-Hersteller
Nanodiamond.com	Mas-sagno	<a href="http://www.nanodiamond.com">www.nanodiamond.com</a> (im Aufbau)	Nanoskalige Diamanten	Beschichtungsindustrie	NP-Hersteller
Nanograde Lic.	Zürich	<a href="http://nanograde.ch">http://nanograde.ch</a>	Herstellung funktionalisierter Nanopartikel und -suspensionen	Diverse Anwendungsfelder z. B. antimikrobielle Nanopartikel, Nanodispersionen zur Laserkühlung	NP-Hersteller
nanorein - Eicher	Rüti	<a href="http://www.nanorein.ch/default_1.htm">www.nanorein.ch/default_1.htm</a>	Nanobeschichtungen	Versiegelungen für Haushalt und Gewerbe. Holz, Metall, Kunststoff, Glas und Textilien	NP-Handel/ -Beratung

Firmenname	Ort	Internet	Technologie/ Nanomaterialien	Anwendungen/ Märkte	Wertschöpfungsstufe
NanoSys GmbH	Wolfthal- den	<a href="http://www.nanosys.ch">www.nanosys.ch</a>	Formulierung und Anwendung von nanoskaligen chemischen Schichten für verschiedenste Substrate und Funktionen	Korrosionsbeständigkeit, Hydrophobierung	NP-Hersteller
NANO- VERSIEGELUNG	Gerolds- wil	<a href="http://www.nano-versiegelung.ch">www.nano-versiegelung.ch</a>	Nanobeschichtungen	Versiegelungen für Haushalt und Gewerbe. Holz, Metall, Kunststoff, Glas und Textilien	NP-Handel/ -Beratung
Nanovertrieb Schweiz	Wenslin- gen	<a href="http://www.nanovertrieb.ch">www.nanovertrieb.ch</a>	Nanobeschichtungen	Versiegelungen, Reinigungsmittel	NP-Handel/ -Beratung
Nestle S.A.	La Tour- de-Peilz	<a href="http://www.nestle.com">www.nestle.com</a>	Nanoemulsionen	Lebensmittel	NP-Hersteller/ -Verarbeiter
Novartis	Basel	<a href="http://www.novartis.com">www.novartis.com</a>	Bioabbaubare nanoskalige Drug-Delivery-Systeme	Pharmaka	NP-Hersteller/ -Verarbeiter
Omya Develop- ment AG	Oftringen	<a href="http://www.omya.com">www.omya.com</a>	Nanoskalige Pigmente, u. a. aus Kalziumcarbonat	Chemische Produkte	NP-Hersteller
PCT swiss GmbH	Therwil	<a href="http://www.pct-swiss.ch">www.pct-swiss.ch</a>	Nanobeschichtungen	Antigriffiti-Beschichtungsmittel, Antihaf-Beschichtungsmaterialien	NP-Handel/ -Beratung



Firmenname	Ort	Internet	Technologie/ Nanomaterialien	Anwendungen/ Märkte	Wertschöpfungsstufe
Schoeller Textil AG	Sevelen	<a href="http://www.schoeller-textiles.com">www.schoeller-textiles.com</a>	Nanobeschichtungen für Textilfasern	Wasser- und schmutzabweisende Textilien (nanosphere)	NP-Verarbeiter
Sekisui Alveo AG	Luzern	<a href="http://www.sekisuialveo.com">www.sekisuialveo.com</a>	Nanocomposite für Polymerschäume	Bau, Industrie	NP-Verarbeiter
SIKA Technology AG	Baar	<a href="http://che.sika.com">http://che.sika.com</a>	Nanocontainer zur Verkapselung chemischer Füllstoffe (z. B. Korrosionsschutz)	Automobilindustrie, Bau	NP-Hersteller/ -Verarbeiter
Solaronix	Aubonne	<a href="http://www.solaronix.com">www.solaronix.com</a>	Titandioxid-Nanopartikel für Farbstoffsolarzellen	Fotovoltaik	NP-Verarbeiter
SPIRIG PHARMA	Egerkingen	<a href="http://www.spirig.ch">www.spirig.ch</a>	Nanopartikel für Wirkstoffformulierungen	Pharmaka, Kosmetika	NP-Verarbeiter
Spleiss AG	Schaffhausen	<a href="http://www.spleiss.ch">www.spleiss.ch</a>	Nanobeschichtungen	Antigriff-Beschichtungsmittel, Betonversiegelung	NP-Verarbeiter
SWISSDENT Cosmetics AG	Zürich	<a href="http://www.swissdent.com">www.swissdent.com</a>	Nano-Kalziumperoxid als Bleichmittel	Zahncreme	NP-Hersteller/ -Verarbeiter
Temmentec AG	Sumiswald	<a href="http://www.medskina.de">www.medskina.de</a>	Nanoemulsionen NanoCalm	Kosmetik, Hautpflegeprodukte	NP-Verarbeiter

Firmenname	Ort	Internet	Technologie/ Nanomaterialien	Anwendungen/ Märkte	Wertschöpfungsstufe
tiNano Produktion Vertrieb Schweiz	Buchs	<a href="http://www.tinano.ch">www.tinano.ch</a>	Nanobeschichtungen	Textilversegelung	NP-Herstellung und Handel
TOEDI SPORT AG	Glarus	<a href="http://www.colltex.ch">www.colltex.ch</a>	Silikonbasierte Nanokomposite	Steighilfen für Schneesportgeräte, Skihaffelle	NP-Verarbeiter
TURBOBEADS GMBH	Zürich	<a href="http://www.turbobeads.com">www.turbobeads.com</a>	Magnetische Nanopartikel zur Bioseparation	Life Sciences	NP-Hersteller/-Verarbeiter
ultra.air ag	Zürich	<a href="http://www.ultraairgroup.com/index1.html">www.ultraairgroup.com/index1.html</a>	Nanofasern für Filterelemente	Filter für Druckluft, technische Gase	NP-Hersteller/-Verarbeiter
VESIFACT AG	Baar	<a href="http://www.vesifact.ch">www.vesifact.ch</a>	Nanopartikel für Drug-Delivery-Systeme	Pharmaka	NP-Hersteller/-Verarbeiter
Xoliox SA	Pully	<i>keine Webseite</i>	Titannanopartikel für Batterien	Batterietechnik	NP-Hersteller/-Verarbeiter
Xtra surface AG	Frauenfeld	<a href="http://www.xtra-surfaces.ch">www.xtra-surfaces.ch</a>	Oberflächenfunktionalisierung und Versegelung durch Nanobeschichtungen	Oberflächenfunktionalisierung in verschiedenen Anwendungsgebieten	NP-Verarbeiter

## 16.2 Übersicht der Positionen der Stakeholder

### 16.2.1 Unternehmen

Stakeholder	Nanoproduktregister/ Interessensgebiet	Haltung	Informations- instru- mente
Bühler AG	<p>Nanorepel – Oberflächen- schutz Oxylink – Additive für wasserbasierte Be- schichtungssysteme.</p> <p><a href="http://www.buhlergroup.com/global/de/produkte/oxylink.htm">www.buhlergroup.com/ global/de/produkte/ oxylink.htm</a></p> <p><a href="http://www.buhlergroup.com/global/de/produkte/nanorepel.htm">www.buhlergroup.com/ global/de/produkte/ nanorepel.htm</a></p>	<p>«Für die Produktion oder für die Anwendung von Nanopartikeln bestehen gegenwärtig noch keine einheitlichen, weltweit gültigen Regelungen oder Gesetze.</p> <p>Um mögliche Risiken frühzeitig zu erkennen und entsprechende Massnahmen zu ergreifen, hat sich der in der Nanotechnologie tätige Geschäftsbereich Bühler Partec des Technologiekonzerns Bühler AG für die Einführung eines unternehmensinternen Risikomanagement-Systems entschieden.</p> <p>Im Rahmen des Risikomanagement-Systems beobachtet und registriert der Geschäftsbereich Bühler Partec systematisch Aussagen in wissenschaftlichen Publikationen zu den Bereichen Nanotechnologie und Gesundheit, Umwelt und Arbeitssicherheit. Zusätzlich werden die gesellschaftlichen und insbesondere regulatorischen Entwicklungen analysiert und allgemeine Trends in der Technologie und im Markt beobachtet.»</p> <p><a href="http://www.buhlergroup.com/global/de_ueber-buehler-medien_medienmitteilungen_archiv_2007-buehler-partecs-risk-management-system-certified.htm">www.buhlergroup.com/global/de_ueber-buehler-medien_medienmitteilungen_archiv_2007-buehler-partecs-risk-management-system-certified.htm</a></p>	

<p>Credit Suisse</p>	<p>Bewertung von Investitionsmöglichkeiten in NT</p>	<p>«In Nanotechnologie zu investieren, ist eine eigene Wissenschaft. Der aufstrebende Bereich der Nanotechnologie birgt für viele Wirtschaftsbranchen ein grosses Potenzial. Anleger, die sich in dieser Technologie positionieren möchten, müssen Realität und Science-Fiction voneinander unterscheiden können. In Nanotechnologie zu investieren, ist nicht einfach, da das Investitions-umfeld noch nicht besteht. Die Zahl der Unternehmen, die sich mit der Entwicklung von Nanotech-Produkten beschäftigen, nimmt erheblich zu. Viele dieser Unternehmen befinden sich in einem sehr frühen Stadium der Entwicklung, sind in privater Hand und werden durch staatliche Forschungsfonds oder Venture-Kapital finanziert. Es gibt zwar einige wenige an der Börse kotierte Nanotech-Unternehmen, aber jene, die vermutlich den grössten Teil ihrer Erträge und Gewinne mit Nanotech-Produkten erwirtschaften, weisen eine kleine Marktkapitalisierung auf. Aus diesem Grunde ist es schwierig, Nanotech-Portfolios aufzubauen, ohne darin auch grössere etablierte Unternehmen aufzunehmen, die nur beschränkt in Nanotechnologie aktiv sind. Angesichts dieser Tatsache sind Zahl und Grösse der Anlageinstrumente, die eine Risikostreuung erlauben, wie beispielsweise Nanotech-nologiefonds, zurzeit limitiert. Die Credit Suisse sieht folgende drei Möglichkeiten für Investitionen in Nanotechnologie: Grossunter-nahmen mit Exposure zur Nanotechnologie (z. B. BASF, Dow Chemical, General Electric, General Motors, Hewlett-Packard, Intel, IBM etc). Unternehmen, die Equipment und Nanowerkstoffe für die nanotechnologische Forschung liefern (z. B. Veeco, FEI Company). Kleinere Unternehmen mit starkem Exposure zur Nanotechnologie (z. B. Flamel Technologies, Nanogen).»  <a href="https://infocus.credit-suisse.com/article/index.cfm?fuseaction=OpenArticle&amp;aid=94609&amp;lang=DE">https://infocus.credit-suisse.com/article/index.cfm?fuseaction=OpenArticle&amp;aid=94609&amp;lang=DE</a></p>
----------------------	--	---

General Reinsurance (Gen Re)	Interesse insbesondere an den Risiken	<p>«Mit dem Vormarsch der NT kommt vielleicht eines der wichtigsten und möglicherweise das wenigsten beachtete neuartige Risiko auf die Sach- /Haftpflichtversicherer zu. Es gibt heute Dutzende Studien, die einen Zusammenhang zwischen der Exposition verschiedener Nanomaterialien und Gesundheitsschäden aufzeigen. [...] Derzeit gibt es in den USA kaum [...] Rechtsvorschriften über die Verwendung oder Herstellung von Nanomaterialien. Für Versicherer dürfte der wesentliche Aspekt sein, dass die Gefährdung durch die Nanotechnologie keineswegs ein Problem ist, das irgendwann in ferner Zukunft auf uns zukommt.»</p> <p><b><a href="http://www.genre.com/sharedfile/pdf/Phi201201_Nano-de.pdf">www.genre.com/sharedfile/pdf/Phi201201_Nano-de.pdf</a></b></p>
Novartis	Nanomedizin, Nano-Delivery-Systeme, Nano-Trägersysteme	<p>«Novartis baut auf abbaubare Nano-Delivery-Systeme, die von der Dialoggruppe als unbedenklich eingestuft werden, wenn die Einzelbestandteile jeweils den sogenannten GRAS-Nachweis erbringen können. Dies bedeutet, dass es sich bei diesen Substanzen um lebensmitteltaugliche Substanzen handelt, die im Körper zu unschädlichen Abbauprodukten umgewandelt werden können. Darüber hinaus führte eine ökonomische Untersuchung der Nutzenaspekte zu dem Ergebnis, dass die Nutzenvorteile von Nano-Delivery-Systemen vor allem in der verbesserten Wirksamkeit des Produktes und seinen Anwendungseigenschaften für den Nutzer und erst in zweiter Linie in den ökologischen Einsparungspotenzialen und einer verbesserten Ressourceneffizienz liegen.»</p> <p><b><a href="http://www.gen-ethisches-netzwerk.de/gjd/187/nanomaterialien-dialogprojekt-conano">www.gen-ethisches-netzwerk.de/gjd/187/nanomaterialien-dialogprojekt-conano</a></b></p>

SUVA	Arbeitsschutz, Gesundheit	<p>«Die Suva ist in Fragen der Nanotechnologie bereits seit Jahren sehr aktiv und spielt in dieser Thematik gesamteuropäisch eine Vorreiterrolle. Unter anderem hat sie im Rahmen ihres gesetzlich verankerten Präventionsauftrags die Entwicklung eines Messgeräts gefördert, das die Belastung durch Nanopartikel am Arbeitsplatz messen kann. Zudem ist sie in nationalen und internationalen Gremien tätig, die sich mit dem Thema Nanotechnologie befassen.»</p> <p><b><a href="http://www.suva.ch/startseite-suva/die-suva-suva-suva/medien-suva/medienmitteilungen-suva/2010/chancen-und-risiken-der-nanotechnologie/medienmitteilung-detail-suva.htm">www.suva.ch/startseite-suva/die-suva-suva-suva/medien-suva/medienmitteilungen-suva/2010/chancen-und-risiken-der-nanotechnologie/medienmitteilung-detail-suva.htm</a></b></p> <p>«Die Suva ist entsprechend ihrem gesetzlichen Auftrag für die Prävention von Berufskrankheiten in allen Betrieben zuständig. Vor diesem Hintergrund hat sie sich im Rahmen des Erkennens neuer Risiken schon früh mit der Thematik Nanotechnologie auseinandergesetzt. Zudem wird die Suva die Erkenntnisse aus toxikologischen und epidemiologischen Untersuchungen zur Wirkung von Nanopartikeln weiterhin intensiv verfolgen. Sollten dereinst ausreichende wissenschaftliche Kenntnisse für die Festlegung von Arbeitsplatzgrenz- oder Richtwerten bezüglich Nanopartikeln vorliegen, wird dies die Beurteilung von Arbeitsplätzen wesentlich vereinfachen.»</p> <p><b><a href="http://www.suva.ch/nanotechnologie-heute-und-morgen.pdf">www.suva.ch/nanotechnologie-heute-und-morgen.pdf</a></b></p>
------	---------------------------	---

Swiss Re	Interesse insbesondere an den Risiken	<p>«Nanotechnologie findet in der Industrie und im Konsumgüterbereich bereits erste Anwendungen, mit stark steigender Tendenz. Swiss Re hat heute anlässlich eines Mediengesprächs in London die Risiken und Chancen der Nanotechnologie zum Thema gemacht und will damit zu einem offenen Risikodialog beitragen. Erst wenn ein Risiko bekannt ist, lässt sich auch bestimmen, was als Schaden zu gelten hat, und entscheiden, wie dieser optimal zu bewältigen ist. Zu diesem Zweck braucht es einen offenen Risikodialog mit allen beteiligten Partnern – Industrie, Wissenschaft, Behörden und Assecuranz. Annabelle Hett, Risikoexpertin bei Swiss Re: «Die bloße Präsenz der Partikel, auch wenn sie überall auftreten sollten, stellt an sich keine Bedrohung für Mensch und Umwelt dar. Nur wenn sich gewisse Eigenschaften der Partikel als schädlich herausstellen sollten, müsste man von einer Gefahr sprechen. Da aber entsprechende Studien fehlen, lässt sich heute kaum sagen, ob und inwiefern Nanopartikel oder damit hergestellten Produkte eine konkrete Gefahr darstellen.»»</p> <p><a href="http://media.swissre.com/documents/pr_20040510_nano_de.pdf">http://media.swissre.com/documents/pr_20040510_nano_de.pdf</a></p>
----------	---------------------------------------	--

## 16.2.2 Wirtschaftsverbände

Stakeholder	Nanoproduktregister/ Interessensgebiet	Haltung	Informations- instrumente
economiesuisse		<p>«Die neuen Technologien wie Biotechnologie, Nanotechnologie und ICT haben sehr breite Anwendungsspektren. Einen entsprechend hohen Stellenwert räumen ihnen die Schweizer Unternehmen in ihrer Forschungstätigkeit ein. Es wird erwartet, dass die Nanotechnologie vielfältige Auswirkungen auf die Wirtschaft und die Gesellschaft haben wird. Man erhofft sich von ihr Fortschritte bei der Entwicklung neuer Materialien, beim Energiesparen oder in der Spitzenmedizin und bei den Arzneimitteln. Diese vielversprechenden Perspektiven erklären das wachsende Engagement der Unternehmen in der Nanotechnologieforschung.»</p> <p><a href="http://www.economiesuisse.ch/de/PDF%20Download%20Files/Studie-economiesuisse_FuE-Privatwirtschaft_2010.pdf">www.economiesuisse.ch/de/PDF%20Download%20Files/Studie-economiesuisse_FuE-Privatwirtschaft_2010.pdf</a></p>	
Interessengemeinschaft Detailhandel Schweiz (IG DHS)		<p>«Die Interessengemeinschaft Detailhandel Schweiz (IG DHS) befürwortet eine transparente und glaubwürdige Kommunikation zu Produkten mit Nanotechnologie. Die IG DHS hat sich entschieden, eine Führungsrolle im Bereich der Nanotechnologien einzunehmen. Als Instrument dazu dient der Verhaltenskodex (&lt;Code of Conduct&gt; Nanotechnologien, welcher von einer Arbeitsgruppe der IG DHS erarbeitet wurde. [...] Der Einsatz synthetischer Nanopartikel ist bezüglich der Auswirkungen auf Mensch und Umwelt mit gewissen Restrisiken verbunden. Die bestehenden toxikologischen Studien und ökotoxikologischen</p>	<p>Dialogveranstaltungen <a href="http://www.igdhs.ch/archiv/newsletter200901.html">www.igdhs.ch/archiv/newsletter200901.html</a></p>



Stakeholder	Nanoproduktregister/ Interessensgebiet	Haltung	Informations- instrumente
Interpharma	Nanomedizin	<p>Methoden sind noch nicht auf die neuen Dimensionen der Nanopartikel angepasst. [...] Es müssen klare gesetzliche Vorgaben für alle Bereiche nanotechnologischer Anwendungen geschaffen werden. Der Wunsch der Konsumentinnen und Konsumenten für eine Deklaration ist offensichtlich. Deshalb wird eine Kennzeichnung bei Lebensmitteln von den Konsumenten gefordert.»</p> <p><a href="http://www.igdhs.ch/archiv/newsletter200901.html">www.igdhs.ch/archiv/newsletter200901.html</a>  <a href="http://www.igdhs.ch/_nanotechnologie.html">www.igdhs.ch/_nanotechnologie.html</a>  <a href="http://www.igdhs.ch/m/mandanten/175/download/AG6_Q&amp;A_Nanotechnologie_2011_Juli_DE.pdf">www.igdhs.ch/m/mandanten/175/download/AG6_Q&amp;A_Nanotechnologie_2011_Juli_DE.pdf</a></p>	
		<p>«Da die Nanomedizin auf neuartigen Bausteinen aufbaut, mit denen die Forscher zum Teil erst wenig Erfahrung haben, müssen auch die entsprechenden Sicherheitsstandards neu definiert werden. Neue Fragen tauchen auf: Wenn ein bekannter, zugelassener Wirkstoff, Insulin etwa, mit einem Nanoteilchen verbunden wird, wie sicher ist ein solcher Wirkstoff? Was genau geschieht mit den Nanopartikeln im Körper? Lagern sie sich allenfalls in einem Organ ab oder werden sie ausgeschieden? Gibt es Schäden, die erst nach einigen Jahren auftreten? Viele Menschen sind praktisch täglich solchen Partikeln ausgesetzt. Das Abgas von Dieselmotoren enthält viele Nanoteilchen, von denen zudem bekannt ist, dass sie krebserregend sind, aber auch Staub oder der Rauch von Cheminéeofen oder Zigaretten enthalten Nanopartikel. Werden diese Partikel eingeatmet, können sie bis in den Zellkern vordringen, wo</p>	

Stakeholder	Nanoproduktregister/ Interessensgebiet	Haltung	Informations- instrumente
Science- industries / SGCI Chemie Pharma Schweiz		<p>sie mit dem Erbgut interagieren könnten. Ob das tatsächlich auch passiert, ist noch unklar. Daher ist es wichtig, alle Medikamente, die auf Nanotechnologie basieren, genau zu untersuchen – so wie es auch mit allen anderen Wirkstoffen geschieht, bevor sie zugelassen werden.»</p> <p><a href="http://www.interpharma.ch/biotechlerncenter/de/nanomedizin/Nanomedizin-Seite-2.asp">www.interpharma.ch/biotechlerncenter/de/nanomedizin/Nanomedizin-Seite-2.asp</a></p>	
		<p>«SGCI Chemie Pharma Schweiz begrüsst den vom Bundesrat verabschiedeten Aktionsplan «Synthetische Nanomaterialien». Die chemisch-pharmazeutische Industrie ist bereit, ihre Eigenverantwortung bei Entwicklung, Produktion und Verwendung von Nanomaterialien wahrzunehmen. Sie wird bei der Präzisierung der Selbstkontrolle und der Erstellung der zukünftigen Rahmenbedingungen aktiv mit den Behörden zusammenarbeiten. In diesem Bericht legt der Bundesrat erstmals eine Auslegung über Chancen und Risiken dieser Querschnittstechnologie und ein Konzept über das weitere Vorgehen vor. Die Behörden haben Chancen und Nutzen der neuen Technologie erkannt. Die Entwicklung und Produktion von Nanomaterialien sind für den Forschungs- und Werkplatz Schweiz von grosser Bedeutung. Der Aktionsplan stärkt in einer ersten Phase, in der noch wissenschaftliche Lücken bestehen, die Eigenverantwortung der Industrie.»</p> <p><a href="http://www.sgci.ch/plugin/template/sgci/*35108/---/Generalversammlung+2010+-+Selbstbewusst+die+Zukunft+gestalten+%28DE%29+%28Internet+Artikel+%28SGCI+Exporter%29%29">www.sgci.ch/plugin/template/sgci/*35108/---/Generalversammlung+2010+-+Selbstbewusst+die+Zukunft+gestalten+%28DE%29+%28Internet+Artikel+%28SGCI+Exporter%29%29</a></p>	

<b>Stakeholder</b> Textilverband Schweiz (TVS)	<b>Nanoproduktregister/          Interessensgebiet</b> Nanotechnologie in der Textilbranche	<b>Haltung</b> «Der Leitfaden «Nano Textiles» soll Unternehmen der Textil- und Bekleidungsindustrie den sicheren Zu- und Umgang mit Nanotechnik erleichtern. Denn nur wer zuverlässig sichere und innovative Produkte herstellt, hat im Wettbewerb die Nase vorn. Die Empa ist Mitherausge- berin des Leitfadens, der auch für andere Branchen ein Beispiel sein kann. Der TVS Textilverband Schweiz will beim Thema Zukunftstechnik und Risiken nichts verschla- fen: «Wir beschäftigen uns bereits seit 2007 damit, welche Chancen und Risiken die Nanotechnologien für Unter- nehmen unseres Verbands mit sich bringen.»» <a href="http://www.swisstextiles.ch/cms/front_content.php?idcat=99&amp;idart=157&amp;lang=1">www.swisstextiles.ch/cms/front_content.php?idcat=99          &amp;idart=157&amp;lang=1</a>	<b>Informations-          instrumente</b> Leitfaden für Textilfirmen, Dialogveranstal- tungen <a href="http://www.empa.ch/piugin/template/empa/78231">www.empa.ch/piugin/template/empa/78231</a>
---	---	---	---

## 16.2.3 Beratungsorganisationen

Stakeholder	Nanoproduktregister/Intensivbereich	Haltung	Informationsinstrumente
Ethik im Diskurs		<p>«Drohen schwerwiegende oder irreversible Schäden, so darf ein Mangel an vollständiger wissenschaftlicher Gewissheit kein Grund dafür sein, kostenwirksame Massnahmen zur Vermeidung der Schäden aufzuschieben», so umschrieb Professor Rippe das Vorsorgeprinzip, das natürlich auch für die Nanotechnologie gelte.</p> <p><a href="http://www.finanznachrichten.de/nachrichten-2007-10/9261158-herbsttagung-der-angestellten-schweiz-vom-19-oktober-2007-nanotechnologie-chancen-nutzen-risiken-minimieren-006.htm">www.finanznachrichten.de/nachrichten-2007-10/9261158-herbsttagung-der-angestellten-schweiz-vom-19-oktober-2007-nanotechnologie-chancen-nutzen-risiken-minimieren-006.htm</a></p>	
Die Innovationsgesellschaft	Bieten Beratung zum Thema Nanotechnologie an	<p>«Wir halten Sie auf dem Laufenden und machen neues Wissen verfügbar. Wir organisieren verschiedene, einmalige und wiederkehrende Veranstaltungen wie die internationale «NanoRegulation»-Konferenz und bringen die relevanten Akteure auch für individuelle Stakeholder-Dialoge an den runden Tisch.»</p> <p><a href="http://www.innovationsgesellschaft.ch/index.php?page=107">www.innovationsgesellschaft.ch/index.php?page=107</a></p>	<p>NanoRegulation: die wiederkehrende Fachkonferenz für Sicherheits- und Regulierungsfragen in der Nanotechnologie</p> <p>Nano-Behördendialog: Massgeschneiderte Stakeholder- und Dialogveranstaltungen</p> <p>Nanotechnologie-Newsletter und News-Bereich: Bleiben Sie über Trends zu Sicherheit, Risiko und Regulierung in der Nanotechnologie informiert</p>

Stakeholder	Nanoproduktregister/Intensivforschungsgebiet	Haltung	Informationsinstrumente
International Risk Governance Council (IRGC)	Projekte: Nanotechnology Risk Governance Nanotechnology in Food and Cosmetics	«A particular concern of IRGC is that the opportunities flowing from new technologies and innovations – particularly when these technologies have the capacity to alleviate major global concerns – are not forgone due to inadequate or inappropriate risk governance, including poor communication. Nanotechnology is an important and rapidly growing field of scientific and practical innovation that will fundamentally transform our understanding of how materials and devices interact with human and natural environments. Qualitative surveys of consumer opinion provide evidence of a positive to indifferent attitude towards nanotechnologies and their application, with one exception: foods. Concerns about cosmetics are also rising and consumer advocacy groups and independent experts have recommended that more risk assessments should be conducted before cosmetics containing na-	Swiss Nano-Cube, die Schweizerische Wissenschafts- und Bildungsplattform zur Nanotechnologie TEACH NANO, der Weiterbildungskurs für Lehrkräfte auf dem Gebiet der Nanotechnologie <a href="http://www.innovationsgesellschaft.ch/index.php?page=107">http://www.innovationsgesellschaft.ch/index.php?page=107</a>
		Studien	

Stakeholder	Nanoproduktregister/Intensivforschungsgebiet	Haltung	Informationsinstrumente
Stiftung Risiko-Dialog St. Gallen		<p>noscale materials are put on the market. Public authorities in several countries have stressed the need for extended risk assessments and careful oversight.»  <a href="http://www.irgc.org/-Nanotechnologies-.html">www.irgc.org/-Nanotechnologies-.html</a></p> <p>«Die Kommunikationsstrategien verschiedener Branchen, von Behörden und Wissenschaftlern sollten auf den Prüfstand: &lt;Unternehmen, Behörden, NGOs und vor allem die Wissenschaftler haben viel zu wenig kommuniziert. Die Unsicherheit der Konsumentinnen und Konsumenten hat deutlich zugenommen&gt;, so eines der zentralen Ergebnisse der Studie. Bedenklich müsse auch stimmen, dass der Nutzen von Nanotechnologien vor allem mit Zeitersparnis beim lästigen Putzen verbunden wird. &lt;Es ist offensichtlich nicht gelungen, die Breite der Innovationen und den verantwortungsvollen Umgang damit ausreichend zu kommunizieren&gt;, so die Forscher.»  <a href="http://www.risiko-dialog.ch/stiftung/aktuelles/569-neue-studie-nanotechnologien-aus-der-sicht-von-konsumenten-was-verbraucher-wissen-und-was-sie-wissen-wollen">www.risiko-dialog.ch/stiftung/aktuelles/569-neue-studie-nanotechnologien-aus-der-sicht-von-konsumenten-was-verbraucher-wissen-und-was-sie-wissen-wollen</a>  <a href="http://www.risiko-dialog.ch/images/RD-Media/PDF/Themen/Nanotechnologie/Konsumentenstudie_Nano_2011_final.pdf">www.risiko-dialog.ch/images/RD-Media/PDF/Themen/Nanotechnologie/Konsumentenstudie_Nano_2011_final.pdf</a></p> <p>«Die Gestaltung einer gesellschaftlichen Auseinandersetzung über Nano-, Gen- und Biotechnologien hat bei der Stiftung Risiko-Dialog lange Tradition. Seit den 1990er-</p>	<p>Die Stiftung Risiko-Dialog hat im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung die Internet-Plattform «Nano-Sicherheit.de» wissenschaftlich begleitet und redigiert. Die Informationen und Links sind gegliedert in die Themenschwerpunkte Definition, Rechtsrahmen, Risikobewertung, Risikomanagement, öffentliche Wahrnehmung und Kommunikation.  <a href="http://www.nano-sicherheit.de">www.nano-sicherheit.de</a></p> <p>Information und Transparenz entlang des Produkt-Lebensweges von Nanomaterialien (2008–heute) Im BASF Dialogforum Nano 2009/2010 erstellten Vertreterinnen und Vertreter von zivilgesellschaft-</p>

Stakeholder	Nanoproduktregister/Intensivbereich	<p><b>Haltung</b></p> <p>Jahren verbindet die Stiftung ihre Dialog-Kompetenz mit fundierten Kenntnissen über diese Technologien.»  <b>www.risiko-dialog.ch/themen/nano-gen-und-biotechnologien</b></p> <p>«Das von der Stiftung Risiko-Dialog geleitete BASF Dialogforum Nano schloss die Dialogphase mit einem Bericht ab. Darin enthalten sind konkrete Empfehlungen, wie Information und Transparenz entlang des Produkt-Lebensweges von Nanomaterialien gewährleistet werden können.»  <b>www.risiko-dialog.ch/veroeffentlichungen/publikationen/539-kommunikation-von-nanotechnologien</b></p>	<p><b>Informationsinstrumente</b></p> <p>lichen Organisationen gemeinsam mit Mitarbeitenden der BASF SE konkrete Empfehlungen zu verschiedenen Informationsinstrumenten wie z. B. Sicherheitsdatenblatt, Technische Information, Schulungen, Webauftritten, Hotlines.</p> <p>Im Auftrag des Bundesamtes für Gesundheit BAG konzipierte und moderierte die Stiftung Risiko-Dialog die Dialogplattform «Information von Konsumentinnen und Konsumenten über synthetische Nanomaterialien in Produkten». An diesem Stakeholder-Dialog beteiligten sich Vertreterinnen und Vertreter von Konsumentenorganisationen, der Industrie, des Detailhandels sowie der Behörden.  <b>www.risiko-dialog.ch/themen/nano-gen-und-biotechnologien</b></p>
-------------	-------------------------------------	---	---

Stakeholder	Nanoproduktregister/Intensivforschungsgebiet	Haltung	Informationsinstrumente
Temas AG	Beratung	<p>«Die Möglichkeiten scheinen unbegrenzt zu sein, aber Fragen zu möglichen Risiken bleiben in vielen Fällen noch unbeantwortet. TEMAS bietet Lösungsansätze zu diesen Fragestellungen.</p> <p>Unser Ziel ist es, die Akzeptanz Ihrer Produkte, die Sicherheit Ihrer Mitarbeiter und Kunden sowie die Verträglichkeit mit der Umwelt bei der Anwendung von Nanotechnologien zu fördern.»</p> <p><a href="http://www.temas.ch/wwwtemas/temas_homepage.nsf/vwAllByKey/nano_unternehmen%7Cde">www.temas.ch/wwwtemas/temas_homepage.nsf/vwAllByKey/nano_unternehmen%7Cde</a></p> <p>«Die Verantwortung für den sicheren Umgang mit synthetischen Nanomaterialien zum Schutz von Gesundheit und Umwelt liegt bei Industrie und Gewerbe. Spezielle Regelungen für synthetische Nanomaterialien existieren hier bisher weder in der Schweiz noch der europäischen Gesetzgebung. Die wissenschaftlichen und methodischen Grundlagen zur Erarbeitung solcher Regelungen sind gegenwärtig nicht ausreichend. Diese Situation führt zu erheblichen Handlungs- und Investitionsunsicherheiten aufseiten der Wirtschaft und erschwert eine öffentliche Debatte über Chancen und Risiken der Nanotechnologie.»</p> <p><a href="http://www.temas.ch/wwwtemas/temas_homepage.nsf/vwAllByKey/nano_vorsorgeraster%7Cde">www.temas.ch/wwwtemas/temas_homepage.nsf/vwAllByKey/nano_vorsorgeraster%7Cde</a></p>	



## 16.2.4 NGOs

Stakeholder	Nanoproduktregister/ Interessensgebiet	Haltung	Informationsinstrumente
Basler Appell gegen Gentechnologie	<p>Nanomedizin: «Der Basler Appell gegen Gentechnologie beschränkt sich bei der Betrachtung der Nanotechnologie auf Projekte, die Verbindungen zur Gentechnologie haben und vor allem im medizinischen Bereich Anwendung finden, ein Bereich, der in der Öffentlichkeit bisher kaum beachtet wird.»</p> <p><a href="http://www.baslerappell.ch/themen/nanomedizin/">www.baslerappell.ch/themen/nanomedizin/</a></p> <p>Nanofahren, Hypothermieverfahren, Lab-on-a-chip</p> <p><a href="http://www.baslerappell.ch/in dex.php/download_file/view/207/138/brosch_anomedizin.pdf?file=br osch_nanomedizin.pdf">www.baslerappell.ch/index.php/download_file/view/207/138/brosch_anomedizin.pdf?file=br osch_nanomedizin.pdf</a></p>	<p>«Der Basler Appell gegen Gentechnologie fordert Bund und Parteien auf, eine transparente Debatte ins Leben zu rufen. Es reicht nicht aus, bloss einen möglichen Nutzen der Nanotechnologie zu propagieren und so für Akzeptanz in der Gesellschaft zu sorgen. Die Debatte muss jetzt stattfinden, nicht erst, wenn die Technologie breit eingesetzt wird.</p> <p>Es gibt bisher kaum Regelwerke, die die Nanotechnologie explizit umfassen. Die vielen Produkte, die sich bereits auf dem Markt befinden, sind nicht gekennzeichnet. Die VerbraucherInnen können meist nicht erkennen, ob Nanomaterialien enthalten sind. So ist eine Wahrmöglichkeit nicht gegeben. [...]</p> <p>Wir fordern als Sofortmassnahme eine Deklarationspflicht für Nanomaterialien, ein nationales Register für Produkte, die synthetische Nanomaterialien bzw. Nanopartikel enthalten. Ausserdem braucht es dringend die Aufklärung der Bevölkerung über mögliche gesundheitliche Risiken von Nanomaterialien. Eine abschliessende Risikobeurteilung liegt nicht vor, da die wissenschaftlichen und methodischen Grundlagen nicht ausreichend sind. Bis zur Klärung sicherheitsrelevanter Fragen müsste daher ein Moratorium gelten.»</p> <p><a href="http://www.baslerappell.ch/index.php/download_file/view/207/138/brosch_nanomedizin.pdf?file=brosch_nanomedizin.pdf">www.baslerappell.ch/index.php/download_file/view/207/138/brosch_nanomedizin.pdf?file=brosch_nanomedizin.pdf</a></p>	<p>Broschüren / Webseiten zum Thema: z. B.: <a href="http://www.baslerappell.ch/index.php/download_file/view/207/138/brosch_nanomedizin.pdf?file=brosch_nanomedizin.pdf">www.baslerappell.ch/index.php/download_file/view/207/138/brosch_nanomedizin.pdf</a></p>

Stakeholder	Nanoproduktregister/ Interessensgebiet	Haltung	Informationsinstrumente
WWF Schweiz	Nanotechnologie in der Kosmetik und Lebensmittelindustrie	<p>«Empfehlung zu den Verordnungen über die Berufsprüfungen und die dazugehörigen Wegleitungen. Die Berufsleute sollten Wissen über die möglichen Gefahren der Nanotechnologie besitzen. Das Problem dieser neuen Technologie ist, dass man bisher nur wenig über mögliche Gefahren für Mensch und Umwelt weiss. Wegen dieser potenziellen Gefahr hat die Europäische Union 2009 eine neue Kosmetik-Verordnung verabschiedet (Konsumo 2009). Sie stärkt den Konsumentenschutz (neue Kennzeichnungspflichten) und nimmt alle an der Produktions- und Distributionskette beteiligten Unternehmen von Kosmetika mehr in die Verantwortung (Produkt- haftung und -sicherheit) (Dermotopics 2009).»</p> <p><a href="http://assets.wwf.ch/downloads/wwf_berufsfeld_schonheit_bps.pdf">http://assets.wwf.ch/downloads/wwf_berufsfeld_schonheit_bps.pdf</a></p> <p>Forderung einer Kennzeichnungspflicht für Nanotechnologie in der Lebensmittelindustrie</p> <p><a href="http://frc.ch/wp-content/uploads/2010/10/Hintergrundbericht_Labelratgeber_2010_lowend.pdf">http://frc.ch/wp-content/uploads/2010/10/Hintergrundbericht_Labelratgeber_2010_lowend.pdf</a></p>	
Stiftung für Konsumenten- schutz – für starke Konsumenten	Nanotechnologie in Lebensmitteln	<p>Die Nanotechnologie verspricht vieles und kann vielleicht vieles. Es fehlen aber die Grundlagen für eine Risikobeurteilung der Nanomaterialien und es bestehen zurzeit auch grosse Zweifel darüber, ob die gängigen Verfahren geeignet sind, um eine Risikobeurteilung vorzunehmen. Niemand kann heute sagen, ob synthetische Nanopartikel einen negativen Effekt auf den Menschen und die Umwelt haben werden. Erste Forschungsergebnisse zeigen aber zum Teil bedenkliche Resultate. Deshalb</p>	

Stakeholder	Nanoproduktregister/ Interessensgebiet	Haltung	Informationsinstrumente
		<p>fordert die SKS eine strenge Beachtung des Vorsorgeprinzips gemäss Schweizer Umweltrecht und verlangt, dass gerade bei Nahrungsmitteln und Nahrungsmittelverpackungen eine Deklarationspflicht eingeführt wird.</p> <p><b><a href="http://konsumentenschutz.ch/kernthemen/lebensmittel/nanotechnologie/index.html">http://konsumentenschutz.ch/kernthemen/lebensmittel/nanotechnologie/index.html</a></b></p> <p>Die Nanotechnologie gilt als die Technologie der Zukunft, in der Schweizer Gesetzgebung ist sie jedoch kaum existent. Die SKS ist erfreut, dass der Ständerat ein Postulat überweisen hat und die gesetzgeberischen Grundlagen in Bezug auf Nanotechnologie überprüft werden sollen. Bei der Deklaration sowie dem Gesundheits- und Umweltschutz besteht dringender Handlungsbedarf, ist die SKS überzeugt.</p> <p>Für die SKS ist klar, dass die Deklaration der Nanotechnologie auf den Produkten eine grundlegende Information für die Konsumentinnen und Konsumenten darstellt und absolut notwendig ist. Aber auch in Bezug auf den Gesundheits- und Umweltschutz besteht ein zusätzlicher gesetzgeberischer Handlungsbedarf. Die SKS hat in der Revision des Lebensmittelgesetzes im vergangenen Herbst verlangt, dass die Einführung des Vorsorgeprinzips gerade im Hinblick auf die synthetischen Nanomaterialien in Lebensmitteln und Verpackungen absolut notwendig sei und im Gesetz verankert werden muss.</p> <p><b><a href="http://konsumentenschutz.ch/medienmitteilungen/archive/2010/03/12/klare-regeln-fuer-die-nanotechnologie-notwendig.html">http://konsumentenschutz.ch/medienmitteilungen/archive/2010/03/12/klare-regeln-fuer-die-nanotechnologie-notwendig.html</a></b></p>	

Stakeholder	Nanoproduktregister/ Interessensgebiet	Haltung	Informationsinstrumente
		<p>Die Stiftung für Konsumentenschutz (SKS) fordert das rasche Einführen einer Deklarationspflicht für synthetische Nanomaterialien.</p> <p><a href="http://konsumentenschutz.ch/medienmitteilungen/archive/2008/04/22/aktionsplan-nanomaterialien-konsumenten-muessen-rasch-informiert-werden-2.html">http://konsumentenschutz.ch/medienmitteilungen/archive/2008/04/22/aktionsplan-nanomaterialien-konsumenten-muessen-rasch-informiert-werden-2.html</a></p> <p>Die Konsumentenorganisationen ACSI, FRC, KF und SKS stimmen mit den Schlussfolgerungen der TA-SWISS-Studie überein: Auch sie sind überzeugt, dass im Bereich Nanotechnologie zwar grosse Chancen und Entwicklungspotenziale bestehen. Die Risiken sind allerdings noch zu wenig erforscht. Eine Anpassung der Gesetze sowie eine verbindliche Deklaration ist notwendig, damit Nanotechnologie für Konsumentinnen und Umwelt sicher und verantwortungsvoll eingesetzt werden kann.</p> <p><a href="http://konsumentenschutz.ch/medienmitteilungen/archive/2009/01/10/nanotechnologie-empfehlungen-umsetzen.html">http://konsumentenschutz.ch/medienmitteilungen/archive/2009/01/10/nanotechnologie-empfehlungen-umsetzen.html</a></p>	

Stakeholder	Nanoproduktregister/ Interessensgebiet	Haltung	Informationsinstrumente
Pro Natura	Landwirtschaft	<p>Im Standpunkt Landwirtschaftspolitik, der vom Pro Natura Delegiertenrat am 23. August 2008 verabschiedet wurde heisst es:</p> <p>«Der Einsatz von Nanotechnologie in der Landwirtschaft bleibt so lange einem Moratorium unterstellt, bis deren ökologische Auswirkungen bekannt sind.»</p> <p><a href="http://www.pronatura.ch/sg/mitteilungen/de09standpunktlandwirtschaft.pdf">www.pronatura.ch/sg/mitteilungen/de09standpunktlandwirtschaft.pdf</a></p> <p><a href="http://www.gentechnologie.ch/cms/images/stories/bilder/themen/situation_nano_mai_2011.pdf">www.gentechnologie.ch/cms/images/stories/bilder/themen/situation_nano_mai_2011.pdf</a></p>	
Organisation Praktischer Umweltschutz Schweiz PUSCH	Themenschwerpunkt: Umweltauswirkungen	<p>Für die Umwelt birgt sie Chancen und Risiken. Chancen bestehen dort, wo der Einsatz von schädlichen Stoffen oder der Energieverbrauch reduziert werden kann. Risiken treten dann auf, wenn die Nanopartikel gewollt oder ungewollt in Wasser, Boden oder Luft gelangen und direkte oder indirekte Effekte auslösen. Noch ist sehr wenig über diese Effekte bekannt.</p> <p>Aus der Sicht von Pusch ist das Vorsorgeprinzip besonders wichtig: Es sollen nicht zuerst Schäden entstehen, die anschliessend nur mit grossem Aufwand zu korrigieren sind. Es gilt deshalb, jetzt die rechtlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen für diese neue Technologie zu definieren. Die Forschung über die Umweltauswirkungen ist zu intensivieren und die Produzenten sind zu verpflichten, die Umweltverträglichkeit ihrer Produkte vor deren Verbreitung zu prüfen.</p> <p><a href="http://www.umweltschutz.ch/index.php?pid=245&amp;l=de">www.umweltschutz.ch/index.php?pid=245&amp;l=de</a></p>	u. a. Aktionstage

Stakeholder	Nanoproduktregister/ Interessensgebiet	Haltung	Informationsinstrumente
Natur- schutz CH	Nanomaterialien in der Umwelt, Titandioxid, Nanosilber	<p>Keine eigene Position. Aber mehrere kritische Artikel auf der Homepage.</p> <p>Die Zukunftserwartungen an die Nanotechnologie sind hoch. Sie bringt Materialien mit neuartigen Eigenschaften hervor, gilt als energiesparend und ressourcenschonend. Da die meisten Produkte aber erst kurze Zeit im Umlauf sind, herrscht Unklarheit über die Langzeiteffekte auf Mensch und Umwelt. Um Risiken angemessen beurteilen zu können, müssen bestehende Richtlinien zur Prüfung von Chemikalien ergänzt und angepasst werden, so das Plädoyer der Forschergruppe «Aquatische Ökotoxikologie» um Prof. Jörg Oehlmann in der aktuellen Ausgabe von «Forschung Frankfurt». Hilfreich für die Einschätzung des Umweltrisikos von Nanomaterialien ist die Untersuchung wirbelloser Schlüsselorganismen. Ein Beispiel sind Daphnien (Wasserflöhe), die zahlreichen Fischarten als Beute dienen. Die Tiere wurden den nanopartikelären Substanzen über einen Zeitraum von 48 Std. ausgesetzt, die Chemikalien wurden dabei in verschiedenen Konzentrationen dargeboten. Ergebnis: Nanoskaliges Titandioxid reichte sich im Darm an, und auch der für die Nahrungsaufnahme essenzielle Filterapparat der Versuchstiere verklebte. Die Wirkung von Silbernanopartikeln war noch drastischer: Sie führte schon nach 24 Std. zum Tod. In der Studie wurde ebenfalls untersucht, wie es dem Nachwuchs der durch Nanopartikel beeinträchtigten Organismen geht. Es zeigte sich, dass diese noch sensibler auf die Behandlung mit Silbernanopartikeln reagieren.</p>	

Stakeholder	Nanoproduktregister/ Interessensgebiet	Haltung	Informationsinstrumente
Greenpeace Schweiz		<p>Im «Nanotechnology Policy &amp; Position paper» von Greenpeace vom 26. Februar 2007 heisst es: «In the absence of any established regulatory system, Greenpeace is calling for an immediate moratorium on the release of nano-technological materials and products.»</p> <p><a href="http://www.greenpeace.org/raw/content/denmark/press/reporter-og-dokumenter/nanotechnologypolicy-positi.pdf">www.greenpeace.org/raw/content/denmark/press/reporter-og-dokumenter/nanotechnologypolicy-positi.pdf</a></p> <p><a href="http://www.gentechnologie.ch/cms/images/stories/bilder/themen/situation_nano_mai_2011i.pdf">www.gentechnologie.ch/cms/images/stories/bilder/themen/situation_nano_mai_2011i.pdf</a></p> <p>Ansonsten finden man recht wenig: 2008: Immer mehr Produkte werden mithilfe von Nanotechnologie hergestellt. Das birgt grosse Risiken. Doch die Schweizer Umweltverbände haben das Thema bisher verschlafen. [...] Sucht man auf der Internetseite von Greenpeace Schweiz nach dem Begriff Klima, so erhält man 1616 Treffer. Beim Stichwort Nanotechnologie hingegen kommt nur ein einziger Eintrag. Und dabei handelt es sich um eine von Greenpeace Frankreich produzierte Broschüre.</p> <p><a href="http://sc.tagesanzeiger.ch/dyn/news/schweiz/859594.html">http://sc.tagesanzeiger.ch/dyn/news/schweiz/859594.html</a></p> <p>Aktuell hat sich das ein wenig geändert. Man findet 0 Einträge zum Thema</p>	

Stakeholder	Nanoproduktregister/ Interessensgebiet	Haltung	Informations- instrumente
Gen Suisse		<p>Winzig klein, und doch öffnen die Nanoteilchen die Tür zu einer scheinbar riesigen Vielfalt der Möglichkeiten und Chancen. Darin verbergen sich aber auch Risiken. Die winzigen Partikel halten sich nicht an herkömmliche Grenzen im Körper und können bis in den Zellkern vordringen. Diese Risiken müssen unbedingt genauer erforscht werden. Wie wirken nanostrukturierte Materialien auf unseren Körper? Was bedeutet es für die Umwelt, wenn neue Formen von Nanoteilchen freigesetzt werden? Zum Thema Chancen und Risiken von Nanomaterialien wurde ein nationales Forschungsprogramm unter der Leitung von Prof. Peter Gehr, Präsident der Stiftung Gen Suisse, ins Leben gerufen. Weitere Informationen bieten auch die Gen Dialoge «Nanobiotechnologie» und «Nanomedizin» sowie die Webseite Swiss Nano Cube, die gesamtschweizerische Bildungsplattform zur Mikro- und Nanotechnologie.</p> <p><b><a href="http://www.gensuisse.ch/de/themen/nanobiotechnologie">www.gensuisse.ch/de/themen/nanobiotechnologie</a></b></p> <p>Das nationale Forschungsprogramm «Chancen und Risiken von Nanomaterialien» (NFP 64) möchte die Lücken im gegenwärtigen Wissen über Nanomaterialien schliessen. Die mit der Herstellung, dem Einsatz und der Entsorgung von künstlichen Nanomaterialien verbundenen Chancen und Risiken für Mensch und Umwelt sollen besser verstanden werden. Die ersten 18 Forschungsprojekte haben im Dezember 2010 begonnen.</p> <p><b><a href="http://www.nfp64.ch/D/Seiten/home.aspx">www.nfp64.ch/D/Seiten/home.aspx</a></b></p>	<p>Nationales Forschungsprogramm zum Thema Chancen und Risiken: <b><a href="http://www.nfp64.ch/D/Seiten/home.aspx">www.nfp64.ch/D/Seiten/home.aspx</a></b></p> <p>Swiss Nano-Cube ist die gesamtschweizerische Bildungsplattform zur Mikro- und Nanotechnologie: <b><a href="http://www.swissnanocube.ch/ueber-uns/">www.swissnanocube.ch/ueber-uns/</a></b></p> <p>Um Veränderungen in der öffentlichen Wahrnehmung möglichst früh zu erfassen und auf aufkommende kritische Themen adäquat reagieren zu können, hat das NFP 64 ein Issues Management Sys-</p>



Stakeholder	Nanoproduktregister/ Interessensgebiet	Haltung	Informationsinstrumente
		<p>Regulierungsbedarf</p> <p>Die Resultate der Forschungsprojekte bilden einerseits die Basis für Regulierungen durch die öffentliche Hand und für Richtlinien bei der Herstellung von auf Nanomaterialien basierenden Produkten in der Industrie. Wichtig ist dabei, nicht nur die Herstellungsphase, sondern den gesamten Lebenszyklus der Produkte im Auge zu behalten.</p> <p>Solange die staatlichen Regulierungen noch in Ausarbeitung sind, muss sich die Industrie eine gewisse Selbstregulierung auferlegen, indem sie eine Risikeneinschätzung für die eigenen Produktionsbereiche vornimmt. Im steten Austausch mit den verschiedenen Zielgruppen auf behördlicher, politischer und industrieller Ebene wird darauf hingewiesen, dass beim Einsatz innovativer Nanomaterialien Vorsicht geboten ist, solange nicht alle Auswirkungen bekannt sind. Die regulatorischen Anstrengungen wie auch die Verbesserung der Kenntnisse der Bevölkerung über die Chancen und Risiken von Nanomaterialien in verschiedenen Bereichen dienen dazu, den Konsumenten grösstmögliche Gewissheit über die Sicherheit von auf Nanomaterialien basierenden Produkten zu vermitteln.</p> <p><a href="http://www.nfp64.ch/SiteCollectionDocuments/nfp64_programmportraet_d.pdf">www.nfp64.ch/SiteCollectionDocuments/nfp64_programmportraet_d.pdf</a></p>	<p>tem entwickelt, das die wichtigsten Themenbereiche systematisch überwachet.</p> <p><a href="http://www.nfp64.ch/SiteCollectionDocuments/nfp64_programmportraet_d.pdf">www.nfp64.ch/SiteCollectionDocuments/nfp64_programmportraet_d.pdf</a></p>

Stakeholder	Nanoproduktregister/ Interessensgebiet	Haltung	Informations- instrumente
Fédération romande des Consommateurs	Schwerpunkt: Nanotechnologien in der Lebensmittelbranche	<p>Forderung einer Deklarationspflicht für Nanotechnologie in Lebensmitteln  <a href="http://frc.ch/wp-content/uploads/2010/10/Hintergrundbericht_Labelratgeber_2010_lowend.pdf">http://frc.ch/wp-content/uploads/2010/10/Hintergrundbericht_Labelratgeber_2010_lowend.pdf</a>  <i>Les organisations de consommateurs ACSI, FRC, kf et SKS adhèrent aux conclusions de l'étude de TA-SWISS. Elles sont elles aussi convaincues que les nanotechnologies peuvent apporter de nombreuses possibilités dans le domaine de l'alimentation et ouvrent la porte à de grandes opportunités. Toutefois, les risques sont encore peu connus. Par conséquent, une adaptation de la législation ainsi qu'une déclaration obligatoire est nécessaire pour garantir une introduction responsable et sûre des nanotechnologies vis-à-vis des consommateurs et de l'environnement.</i>          -&gt; Nanotechnologie hat in der Lebensmittelindustrie eine grosse Chance. Risiken sind allerdings weitgehend unbekannt. Daher Forderung nach Rechtsvorschriften und Meldepflichten, um die Konsumenten zu schützen.  <a href="http://frc.ch/communiques-de-presse/etude-ta-swiss-sur-les-nanotechnologies-dans-l'alimentation-des-recommandations-concretes-et-pertinentes/">http://frc.ch/communiques-de-presse/etude-ta-swiss-sur-les-nanotechnologies-dans-l'alimentation-des-recommandations-concretes-et-pertinentes/</a></p>	<p>Zusammen mit der Universität Lausanne: Öffentliche Wanderausstellung an öffentlichen Orten zum Thema Nanotechnologie (2011–2012). Themen: Produkte die heute schon Nanotechnologie beinhalten, Risiken, Versprechen von Forschung und Wissenschaft. Ausstellung soll Bürgerdialog fördern  <a href="http://www3.unil.ch/wpmu/nano/">www3.unil.ch/wpmu/nano/</a>          Foto/Artikel über dieAusstellung:  <a href="http://frc.ch/dossiers/dossier_nanotechnologies/">http://frc.ch/dossiers/dossier_nanotechnologies/</a></p>

Stakeholder	Nanoproduktregister/ Interessensgebiet	Haltung	Informations- instrumente
etc Group	<p>«International efforts to address the food, energy and climate crises give technology a central role to play.»</p> <p><a href="http://www.etcgroup.org/en/issues/nanotechnology">www.etcgroup.org/en/issues/nanotechnology</a></p> <p>Focus teilweise sehr auf Geoeengineering, Klima, Klimawandel</p>	<p>«In 2002, ETC called for a moratorium on the commercialisation of new nano-scale materials until laboratory protocols and regulatory regimes are in place that take into account the special characteristics of these materials, and until they are shown to be safe.»</p> <p><a href="http://www.etcgroup.org/upload/publication/1401/nrnanorecallfinal.pdf">www.etcgroup.org/upload/publication/1401/nrnanorecallfinal.pdf</a>;</p> <p><a href="http://www.etcgroup.org/en/node/81">www.etcgroup.org/en/node/81</a></p> <p><a href="http://www.gentechnologie.ch/cms/images/stories/bilder/themen/situation_nano_mai_2011.pdf">www.gentechnologie.ch/cms/images/stories/bilder/themen/situation_nano_mai_2011.pdf</a></p> <p>Zwei Jahre nach der Moratoriumsforderung wurde diese weiter begründet, auch mit Fokus auf die Landwirtschaft.</p> <p><a href="http://www.gentechnologie.ch/cms/images/stories/bilder/themen/situation_nano_mai_2011.pdf">www.gentechnologie.ch/cms/images/stories/bilder/themen/situation_nano_mai_2011.pdf</a></p> <p>2010: «Since our call for a moratorium, science has cast nano's safety even further in doubt, with hundreds of studies now demonstrating harmful effects from exposure to nanoparticles.»</p> <p><a href="http://www.etcgroup.org/upload/publication/pdf_file/nano_big4web.pdf">www.etcgroup.org/upload/publication/pdf_file/nano_big4web.pdf</a></p> <p>«Now, new high-risk technologies, ranging from the very small (synthetic biology, genomics, nanotechnology) to the very large (geoengineering), are rapidly developing.»</p> <p><a href="http://www.etcgroup.org/upload/DurbanBriefing_28Nov2011.pdf">www.etcgroup.org/upload/DurbanBriefing_28Nov2011.pdf</a></p>	<p>Hands Off Mother Earth' campaign (Civil Society)</p> <p>Groups announce new global campaign against geoengineering tests – urge public to join in. (Thema auch Nanotechnology)</p> <p><a href="http://www.etcgroup.org/node/5131">www.etcgroup.org/node/5131</a></p>

Stakeholder	Nanoproduktregister/ Interessensgebiet	Haltung	Informationsinstrumente
Friends of the Earth, BUND	Schwerpunkt: Nanotechnologien in Konsumgüterbereich	<p>Kritik an Definitionen: Auch der BUND spricht sich gegen eine Begrenzung auf 100 Nanometer aus, da Partikel bis zu einer Grösse von einigen Hundert Nanometern nanospezifische Eigenschaften aufweisen können. Partikel bis zu einer ss-Grösse von mindestens 300 Nanometern sollten deshalb als Nanopartikel behandelt werden. Gleiches gilt für Zusammenballungen von Nanopartikeln (Agglomerate und Aggregate), die eine Grösse von 100 Nanometern überschreiten, da auch sie an ihrer Oberfläche häufig reaktive Einzelpartikel aufweisen.</p> <p>«Stopp für den Einsatz synthetischer Nanomaterialien in umweltoffenen und verbrauchernahen Anwendungen. Der Anwendungsstopp muss so lange bestehen, bis:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Daten zur Risikobewertung vorliegen, die die Sicherheit der verwendeten Nanomaterialien für Gesundheit und Umwelt belegen und eine ausreichende Vorsorge ermöglichen,</li> <li>* wirksame nanospezifische Regelungen in Kraft sind, die mögliche Risiken für Verbraucher, Arbeitnehmer und Umwelt bei der Herstellung, Anwendung und Entsorgung hinreichend sicher ausschliessen, sowie</li> <li>* Wahlfreiheit für Verbraucher zwischen Produkten mit und ohne Nanomaterialien gewährleistet ist.</li> </ul> <p>Die bestehenden Gesetze müssen so überarbeitet werden, dass sie die besonderen Eigenschaften von Nanomaterialien berücksichtigen. Dies betrifft vor allem das europäische Chemikaliengesetz REACH, aber auch</p>	<p>Betreiben einer Nanoprodukt-datenbank, Aufklärungsarbeit  <a href="http://www.bund.net/the_nanotechnologie/nanoproduktenbank/">www.bund.net/the_nanotechnologie/nanoproduktenbank/</a></p>

Stakeholder	Nanoproduktregister/ Interessensgebiet	Haltung	Informationsinstrumente
		andere Gesetzgebungen wie das Lebensmittelrecht und die Pestizid- und Biozidrichtlinien.  Mehr Geld für Risikobewertung  Verbraucher müssen wählen können.»  <a href="http://www.bund.net/themen_und_projekte/nanotechnologie/forderungen_des_bund/">www.bund.net/themen_und_projekte/nanotechnologie/forderungen_des_bund/</a>	

## 16.3 Übersicht der Positionen der Parteien

Partei	Haltung
Schweizerische Volkspartei (SVP)	
Sozialdemokratische Partei der Schweiz (SPS)	
FDP. Die Liberalen	«Dans ce marché très prometteur pour notre économie, notamment en microtechnique et nanotechnologies, il n'est pas acceptable que la Confédération continue de réaliser des coupes budgétaires. En 15 ans, les moyens publics alloués à la recherche énergétique sont passés de 220 à 156 millions. Par ailleurs, le nouveau programme de consolidation des finances fédérales prévoit une diminution de 10 millions des fonds CTI visant la recherche appliquée entre les Hautes écoles et les entreprises privées. Cette coupe est clairement et justement contestée par l'organisation faitière Swissmem.»  Es ist nicht akzeptabel, dass der Bund das Budget für den vielversprechenden mikro- und nanotech-

Partei	Haltung
Christlichdemokratische Volkspartei	<p>nologischen Wirtschaftsbereich kürzt. In 15 Jahren reduzierten sich die öffentlichen Mittel für die Energieforschung von 220 auf 156 Mio. Euro. Darüber hinaus fordert die neue Regierung eine Reduzierung von 10 Millionen Euro für C-TI Fonds.</p> <p><a href="http://www.fdp.ch/franzenoisich/203-cleantech-champ-de-recherche-et-developpement-strategique-pour-la-suisse.html">www.fdp.ch/franzenoisich/203-cleantech-champ-de-recherche-et-developpement-strategique-pour-la-suisse.html</a></p> <p>«Wir bauen die Grundlagenforschung aus und fördern den Technologietransfer in den zukunftsorientierten Bereichen (Nanotechnologie, Mikroelektronik, Zukunftstechnologien im Gesundheitsbereich usw.). Wir halten den Spitzenplatz der Schweiz in der Umweltforschung: Mobilitätsforschung, neue Verkehrstechnologien, natürlich abbaubare Stoffe und erneuerbare Energien sind unsere Spezialitäten.»</p> <p><a href="http://www.cvp.ch/fileadmin/Bund_DE/downloads/partei/Parteiprogramm-dt11.pdf">www.cvp.ch/fileadmin/Bund_DE/downloads/partei/Parteiprogramm-dt11.pdf</a></p>
Grüne Partei der Schweiz	<p>«Die Grünen fordern Massnahmen zum Schutz von Gesundheit und Umwelt vor Nanopartikeln und nanotechnologischen Anwendungen. Nanotech-Produkte sind neu. Sie werden mit grossen Versprechungen angepriesen. Doch erste Erfahrungen zeigen, dass die Technologie auch Risiken birgt. Anwendungen der Nanotechnik müssen nachhaltig sein und dürfen weder die Umwelt noch die Gesundheit gefährden. Den Anwendungsbereichen Landwirtschaft, Lebensmittel, Textilien, Haushalt, Kosmetik und Medizin soll besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.»</p> <p><a href="http://www.gruene.ch/web/gruene/de/positionen/wirtschaft/nanotechnologie.html">www.gruene.ch/web/gruene/de/positionen/wirtschaft/nanotechnologie.html</a></p> <p>«Der Bundesrat wird beauftragt:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. gemäss dem Vorsorgeprinzip gesetzliche Regulierungen für die Nanotechnologie einzuleiten;</li> <li>2. eine Deklarationspflicht für Produkte mit Nanopartikeln insbesondere bei Lebensmitteln und Kosmetika einzuführen;</li> <li>3. ein Register der hergestellten, importierten und in Verkehr gebrachten Nanomaterialien und -produkte in der Schweiz aufzubauen.»</li> </ol>

Partei	Haltung
	Motion wurde abgelehnt <a href="http://www.parlament.ch/d/suche/seiten/geschaefte.aspx?gesch_id=20114201">www.parlament.ch/d/suche/seiten/geschaefte.aspx?gesch_id=20114201</a>
Grünliberale Partei	
Bürgerlich-Demokratische Partei	
Evangelische Volkspartei (EVP)	«In der Forschung bringen Gen-, Bio- oder Nanotechnologie neue Chancen, aber auch neue Gefahren, die es sehr sorgsam gegeneinander abzuwägen gilt.» <a href="http://www.evp-rubigen.ch/fileadmin/EVP_Grundlagen/schwerpunkteprogramm2006.pdf">www.evp-rubigen.ch/fileadmin/EVP_Grundlagen/schwerpunkteprogramm2006.pdf</a>





## Verzeichnis der Projektbeteiligten

### Projektleitung

TA-SWISS, Bern:

**Dr. Sergio Bellucci**

Geschäftsführer

**Dr. Emiliano Feresin**

Projektverantwortlicher

**Christine D'Anna-Huber**

Verantwortliche Kommunikation

### Projektgruppe

Öko-Institut e. V., Deutschland:

**Martin Möller**

Projektleiter

**Andreas Hermann**

**Dr. Mark-Oliver Diesner**

**Rita Groß**

**Peter Küppers**

unter Mitarbeit von David Haus

VDI Technologiezentrum GmbH, Deutschland:

**Dr. Wolfgang Luther**

**Dr. Norbert Malanowski**

**Prof. Dr. Dr. Axel Zweck**

## Mitglieder der Begleitgruppe

**Prof. em. Dr. Peter Gehr**

Universität Bern, Institut für Anatomie, Bern (Präsident der Begleitgruppe)

**Prof. em. Dr. Ueli Aebi**

Biozentrum, Universität Basel, TA-SWISS Leitungsausschuss, Basel

**Livia Bergamin**

Staatssekretariat für Wirtschaft SECO, Bern

**Prof. Dr. Thomas Cottier**

World Trade Institute, Universität Bern, Bern

**Dr. Ernst Furrer**

Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern

**PD Dr. Philipp Hübner**

Kantonales Laboratorium Basel-Stadt, Basel

**Prof. em. Dr. Georg Karlaganis**

United Nations Institute for Training and Research UNITAR, Genève

**Huma Khamis**

Fédération Romande des Consommateurs FRC, Lausanne

**Dr. Katja Knauer**

Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern

**Dr. Karl Knop**

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften SATW, Zürich

**Dr. Franziska Meister**

Die Wochenzeitung WOZ, Wissenschaftsredaktorin, Zürich

**PD Dr. Bernd Nowack**

Eidg. Materialprüfungs- & Forschungsanstalt EMPA, St. Gallen

**PD Dr. Michael Riediker**

Institut universitaire romand de Santé au Travail IST, Epalinges-Lausanne & IOM  
Singapore Pte. Ltd., Singapore

**Prof. Dr. Kristin Schirmer**

Eawag: Das Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs, Dübendorf

**Dr. Kaspar Schmid**

Staatssekretariat für Wirtschaft SECO, Bern

**Claudia Som**

Eidg. Materialprüfungs- & Forschungsanstalt EMPA, St. Gallen

**Dr. Christoph Studer**

Bundesamt für Gesundheit BAG, Bern

**Ariane Willemsen, lic. iur., M.A. Philosophy**

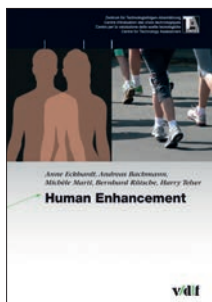
Eidg. Ethikkommission für die Biotechnologie im Ausserhumanbereich EKAH,  
Bern

# Weitere Publikationen von TA-SWISS

---

Anne Eckhardt, Andreas Bachmann,  
Michèle Marti, Bernhard Rütsche,  
Harry Telser

## Human Enhancement



2011, 300 Seiten, zahlreiche  
Abbildungen und Tabellen,  
Format 16 x 23 cm, broschiert  
ISBN 978-3-7281-3396-0  
als eBook (Open Access) erhältlich

Lorenz Hilty, Britta Oertel,  
Michaela Wölk, Kurt Pärli

## Lokalisiert und identifiziert



2012, 294 Seiten, zahlreiche  
Abbildungen und Grafiken,  
Format 16 x 23 cm, broschiert  
ISBN 978-3-7281-3460-8  
auch als eBook (Open Access) erhältlich

Peter de Haan, Rainer Zah

## Chancen und Risiken der Elektromobilität in der Schweiz



2013, 238 Seiten, zahlreiche Abbildungen,  
Format 16 x 23 cm, broschiert  
ISBN 978-3-7281-3487-5  
auch als eBook (Open Access) erhältlich

Heidrun Becker, Mandy Scheermes-  
ser, Michael Früh, Yvonne Treusch,  
Holger Auerbach, Richard Alexander  
Hüppi, Flurina Meier

## Robotik in Betreuung und Gesundheitsversorgung



2013, 252 Seiten, zahlreiche Abbildungen,  
Format 16 x 23 cm, broschiert  
ISBN 978-3-7281-3520-9  
auch als eBook (Open Access) erhältlich

**v/d/f**

vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Voltastrasse 24, VOB D, CH-8092 Zürich  
Tel. +41 (0)44 632 42 42, Fax +41 (0)44 632 12 32, verlag@vdf.ethz.ch, www.vdf.ethz.ch

*Nanomaterialien eröffnen zahlreiche Möglichkeiten für neuartige Produkte und Verfahren in verschiedenen Anwendungsbereichen. Sie haben daher in der Schweiz in vielen Alltagsprodukten Einzug gehalten, beispielsweise als UV-Schutz in Farben, Lacken und Sonnenschutzmitteln, als antimikrobieller Zusatz in Textilien und Lebensmittelverpackungen oder als mechanische Verstärkung in Tennisschlägern und Velorahmen.*

*Für die Konsumentinnen und Konsumenten ist jedoch meist nicht ersichtlich, welche Produkte Nanomaterialien enthalten. Daher löst ihr Einsatz in der Bevölkerung zum Teil diffuse Ängste aus, zumal es bisher kaum umfassende Untersuchungen über die positiven und negativen Auswirkungen in Bezug auf Gesundheit und Umwelt gibt.*

*Vor diesem Hintergrund analysiert die vorliegende interdisziplinäre Studie den gesamten Lebenszyklus ausgewählter Nanomaterialien. Sie berücksichtigt neben der Human- und Ökotoxikologie auch Aspekte wie Treibhauseffekt, Ressourcenschonung und Gebrauchsnutzen.*

*Die Studie richtet konkrete Empfehlungen sowohl an die Politik als auch an die Hersteller, wie ein nachhaltiger Umgang mit Nanomaterialien erreicht und sichergestellt werden kann.*



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU



**TA-SWISS 60/2013**

**ISBN 978-3-7281-3559-9 (Printausgabe)**

**ISBN 978-3-7281-3560-5 (eBook)**

**Doi-Nr. 10.3218/3560-5**



**Öko-Institut e.V.**  
Institut für angewandte Ökologie  
Institute for Applied Ecology



Technologiezentrum