

Arbeitspapier **270**

**270**

Jutta Struwe | Eva Schindler

# **Bedeutung von Nanomaterialien beim Recycling von Abfällen**

**Arbeitspapier 270**

Jutta Struwe | Eva Schindler  
unter Mitarbeit von: Oliver Pfirrmann | Elias Kost

**Bedeutung von Nanomaterialien beim Recycling  
von Abfällen**

Jutta Struwe, Dipl.-Agrarbiologin Universität Hohenheim, seit 1994 bei der Prognos AG Berlin und dort Projektleiterin im Marktfeld Abfall und Sekundärrohstoffe. Expertise und Arbeitsschwerpunkte in den Bereichen Abfallwirtschaft, Bioenergie, Klimaschutz, Umweltverträglichkeits- und Nachhaltigkeitsbewertung, Umweltinnovationen (Clean Tech) sowie Evaluierung von Förderprogrammen.

Eva Schindler, Studium der Europastudien an der Universität Passau und der Pontificia Universidad Católica del Ecuador sowie der Verwaltungswissenschaften (Master of Public Administration) an der London School of Economics und dem Institut d'Études Politiques Paris. Seit 2009 bei der Prognos AG Berlin und dort Beraterin im Geschäftsfeld Innovation, Technologie und Bildung. Ihre Arbeitsschwerpunkte sind Innovationspolitik, Evaluierung von Förderprogrammen, Fachkräftemangel und Beschäftigungsfähigkeit.

PD Dr. Oliver Pfirrmann, Studium der Politik- und Wirtschaftswissenschaften in Bonn und Berlin. Seit 2006 bei der Prognos AG Berlin und dort Leiter des Marktfelds Technologie und Zukunftsmärkte. Veröffentlichung einer Vielzahl von Studien zu Innovations- und Technologiethemen sowie zu Förderprogrammen auf nationaler und internationaler Ebene.

Elias Kost, Student der ETH Zürich, hat bei der Prognos AG vom 21. Juni 2011 bis 20. Dezember 2011 im Marktfeld Abfall und Sekundärrohstoffe seine obligatorische Berufspraxis im Masterstudiengang "Umweltnaturwissenschaften mit Vertiefung Mensch-Umwelt-System" absolviert.

## Impressum

Herausgeber: Hans-Böckler-Stiftung  
Mitbestimmungs-, Forschungs- und Studienförderungswerk des DGB  
Hans-Böckler-Straße 39  
40476 Düsseldorf  
Telefon (02 11) 77 78-127  
Fax (02 11) 77 78-4127  
E-Mail: Marc-Schietinger@boeckler.de  
Redaktion: Marc Schietinger, Leiter Referat 1, Forschungsförderung  
Produktion: Setzkasten GmbH, Düsseldorf

Düsseldorf, November 2012

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	5
1 Zusammenfassung.....	6
2 Einführung.....	7
3 Forschungsbedarf und Definition der Grundlagen.....	10
3.1 Forschungsbedarf.....	10
3.2 Definitionen und Untersuchungsgrundlagen.....	13
4 Leitende Fragestellungen und Vorgehen.....	16
5 Ergebnisse.....	18
5.1 Recyclingrelevanz.....	18
5.2 Mengenrelevanz.....	30
5.3 Gesundheitsrelevanz.....	32
5.4 Regelwerke und Regelungsbedarf.....	39
5.5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	51
6 Literaturverzeichnis.....	56
Über die Hans-Böckler-Stiftung.....	60

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

### Abbildungen

Abbildung 1: Beispiele für Nanomaterialien nach SRU 2011 .....	14
Abbildung 2: Arbeitsprogramm .....	16
Abbildung 3: Erweiterter Stoffkreislauf für Produkte mit Nanomaterialien	19
Abbildung 4: Produktgruppen recyclingfähiger Konsumprodukte, die auch Nanomaterialien enthalten können .....	22
Abbildung 5: Potenzielle Risiken durch Nanomaterialien in Recyclingprozessen .....	34
Abbildung 6: Verwertungsoptionen für Altreifen .....	36
Abbildung 7: Verwertungsoptionen für PET-Flaschen .....	37
Abbildung 8: Grenzwerte für Stäube und offene Fragen im Arbeitsschutz ..	44
Abbildung 9: Aktive und passive Vorsorgemaßnahmen im Arbeitsschutz ...	46
Abbildung 10: Instrumente zur Messung von Nanopartikeln .....	49

### Tabellen

Tabelle 1: Anwendung von Nanomaterialien in Konsumprodukten und Hinweise auf bekannte Toxizitätsrisiken beim Menschen .....	20
Tabelle 1 ff: Anwendung von Nanomaterialien in Konsumprodukten und Hinweise auf bekannte Toxizitätsrisiken .....	21
Tabelle 2: Nanomaterialhaltige Konsumprodukte im Recycling .....	25
Tabelle 2 ff: Nanomaterialhaltige Konsumprodukte im Recycling .....	26
Tabelle 2 ff: Nanomaterialhaltige Konsumprodukte im Recycling .....	27
Tabelle 3: Zukünftige Anwendungen von Nanomaterialien .....	29
Tabelle 4: Mengenströme von Nanomaterialien in ausgewählten Recyclingverfahren .....	31

## Kurzfassung

Produkte, die Nanomaterialien enthalten, verbreiten sich zunehmend. In Herstellungs- und Verarbeitungsprozessen von Nanomaterial-basierten Produkten gilt den gesundheitlichen Risiken für die Beschäftigten ein besonderes Augenmerk. Da bisher keine abschließenden Befunde vorliegen, wird im Produktionsbereich umfassend auf Präventionsmaßnahmen zum Gesundheits- und Arbeitsschutz gesetzt. Die Studie der Prognos AG zur Bedeutung von Nanomaterialien beim Recycling von Abfällen zeigt, dass viele dieser nanomaterialhaltigen Produkte nach ihrem Nutzungsende wieder stofflich verwertet, d.h. recycelt, werden. Da im Recyclingprozess eine Wiederfreisetzung nanomaterialhaltiger Stäube nicht ausgeschlossen werden kann, wird die Anwendung spezifischer Präventionsmaßnahmen zum Gesundheitsschutz auch für die Beschäftigten im Bereich Recycling empfohlen. Es besteht darüber hinaus Forschungsbedarf zu Möglichkeiten einer Wiederfreisetzung von Nanomaterialien im Zuge des Recyclings und zu ihrer technischen Minimierung ebenso wie zur weiteren Verbreitung von Nanomaterialien in Recyclingprodukten.

## 1 Zusammenfassung

Ziel der Studie war es, die Betrachtung der Wertschöpfungskette nanomaterialhaltiger Produkte auf den Bereich der stofflichen Wiederverwertung auszuweiten. Angesichts der zunehmenden Bedeutung von Sekundärrohstoffen für die Versorgung der Industriestaaten ging es darum, erstmals Erkenntnisse zur Relevanz nanomaterialhaltiger Produkte im Recycling zu erhalten.

Die Untersuchung zeigt nun, dass in vielen Produkten, die in Recyclingverfahren wieder aufbereitet werden, Nanomaterialien enthalten sind. Darunter befinden sich auch Nanomaterialien, von denen potenziell gesundheitliche Risiken ausgehen.

Im Recycling liegen nanomaterialhaltige und -freie Produkte gemischt mit unbekanntem Anteil vor. Darunter befinden sich Produkte mit einzelnen, leicht identifizierbaren Nanomaterialien ebenso wie Produkte, bei denen mit einer Vielzahl verschiedener und teilweise nicht identifizierbarer Nanomaterialien zu rechnen ist.

Gesicherte Kenntnisse hinsichtlich des Verhaltens von Nanomaterialien in Recyclingprozessen konnten durch diese Studie nicht erarbeitet werden. Es kann gleichwohl nicht ausgeschlossen werden, dass Nanomaterialien in Recyclingverfahren wieder in Form von nanoskaligen Partikeln freigesetzt werden und in Abhängigkeit von ihrer Toxizität und den Rahmenbedingungen des Wiederaufbereitungsprozesses ein potenzielles gesundheitliches Risiko darstellen.

Für den Arbeitsschutz in Herstellungs- und Verarbeitungsprozessen, die Nanomaterialien einsetzen, liegen ausführliche Leitfäden vor, deren Umsetzung vorbehaltlich bestehender Kenntnislücken einen umfassenden Schutz für Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer gewährleisten kann. Aus Präventionsgründen wird empfohlen, diese Arbeitsschutzmaßnahmen auch in Recyclingverfahren anzuwenden, in denen nanomaterialhaltige Produkte verarbeitet werden.

Darüber hinaus zeigt die Studie weiteren Forschungsbedarf auf: erstens zu den Bedingungen bzw. Möglichkeiten einer Wiederfreisetzung von Nanomaterialien im Zuge des Recyclings, zweitens zu technischen Minimierungsmaßnahmen in Recyclingverfahren, drittens zur Verbreitung von Nanomaterialien und ihrer Risikopotenziale durch Recyclingprodukte und viertens zur Klärung von Art und Menge von Nanomaterialien im Recyclingkreislauf einzelner Stoffströme.

## 2 Einführung

Die Nanotechnologie gilt in vielen Industrie- und so genannten Schwellenländern als Zukunftstechnologie und als Innovationsmotor. Ihr wird für eine Vielzahl von Industriesektoren technologische und wirtschaftliche Relevanz beigemessen. Begründet wird das erstens durch das Spektrum des Entwicklungsstandes, das von bereits etablierten Nanotechnologie-basierten Produkten bis hin zu Lösungen kurz vor der Marktumsetzung reicht. Von diesen Entwicklungen wird erwartet, dass sie durch verbesserte Eigenschaften bzw. neue Funktionalitäten bei Produkten zu Effizienzsteigerungen führen, wie zum Beispiel bei der Beschichtung von Oberflächen mit einer längeren Lebensdauer oder zu Ressourceneinsparungen wie beim reduzierten Energieverbrauch durch neue Batterietypen. Der technologische und wirtschaftliche Stand und die Bedeutung der Nanotechnologie als Innovationsmotor ist vor kurzem durch eine Studie der Prognos AG und der VDI Technologiezentrum belegt worden.<sup>1</sup> Das Allianz Center for Technology and Allianz Global Risks hat in Kooperation mit der OECD International Futures Programme einen Überblick zur ökonomischen Bedeutung, den Investitionsmöglichkeiten und potenziellen Risiken der Nanotechnologie aus der Perspektive der Allianz Gruppe erarbeitet<sup>2</sup> und das Öko-Institut hat für das Bundesumweltministerium eine Machbarkeitsstudie für die rechtliche Realisierbarkeit eines Nanoproduktregisters erstellt.<sup>3</sup>

Parallel zu diesen wirtschaftlichen Aspekten bestehen Unsicherheiten über mögliche Risiken der Nanotechnologie. Die Generierung und Emission synthetischer Nanomaterialien kann grundsätzlich auch in der Nachnutzungsphase oder bei der Verwendung recycelter Materialien erfolgen.<sup>4</sup> Die EU-Strategie für Nanotechnologie<sup>5</sup> weist auf die Notwendigkeit hin, „die Einbeziehung der Risikobewertung in den Schutz der menschlichen Gesundheit [...] und der Beschäftigten in alle(n) Etappen des Lebenszyklus` der Technologie zu fördern (vom Entwurf über Forschung und Entwicklung, Fertigung, Vertrieb, Nutzung bis hin zur Entsorgung).“

Sicher ist, dass die vielfältigen Anwendungen und Möglichkeiten des Einsatzes von vielen verschiedenen Nanomaterialien in Produkten zeigen, dass der Mensch am Arbeitsplatz sowohl bei der Herstellung als auch bei der An- bzw. Verwendung der Produkte mit Nanomaterialien in Kontakt kommen kann. Benannt wird dabei u.a. die inhalative Aufnahme von freien synthetischen Nanopartikeln über die Atemwege, die dermale Aufnahme über die Haut oder auch die orale Aufnahme. Maßgeblich für eine potenzielle Toxizität von Nanomaterialien und dadurch möglichen gesundheitliche Risiken sind

1 (Grimm, et al., 2011)

2 (OECD/Alliance)

3 [http://www.bmu.de/gesundheit\\_und\\_umwelt/downloads/doc/46240.php](http://www.bmu.de/gesundheit_und_umwelt/downloads/doc/46240.php)

4 (Ostertag & Hüsing, 2008, S. 4)

5 [ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/nano\\_com\\_de\\_new.pdf](ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/nano_com_de_new.pdf); S. 20



die geringen Partikelgrößen, die erhöhte Reaktivität als Folge der besonderen Oberflächeneigenschaften und die damit verbundene biologische Aktivität.<sup>6</sup>

Eine Reihe von europäischen Ländern haben Projekte zum verantwortungsvollen Umgang mit Nanotechnologie ins Leben gerufen.<sup>7</sup> Aufgrund des erhöhten Risikos eines unmittelbaren Kontakts zu Nanomaterialien steht die Arbeitsplatzsituation in der Herstellung der Nanomaterialien oder nanomaterialhaltiger Produkte vielfach im Fokus der Untersuchungen. Fortlaufend neue nanotechnologisch basierte Entwicklungen bzw. Anwendungen, die auf den Markt kommen, erschweren jedoch abschließende Aussagen. Spezifische Testmethoden müssen entwickelt, standardisiert und Langzeitstudien eingeleitet werden, um belastbare Aussagen über den gesamten Produktlebenszyklus einschließlich der Nachnutzungsphase und der (Wieder-)Verwendung recycelter Materialien zu generieren.

Von Bedeutung für eine Risikobetrachtung von Nanomaterialien sind diejenigen Nanoprodukte, die Nanoobjekte und ihre Aggregate oder Agglomerate als Funktionselemente auch im fertigen Produkt enthalten. Diese nanoskaligen Bestandteile können fest in eine Matrix eingebunden, auf der Oberfläche anhaftend oder fein verteilt (kolloidal) in festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffen vorliegen.<sup>8</sup>

Mittlerweile ist die Frage, inwieweit von Nanomaterialien Gefahren für Mensch und Umwelt ausgehen, Gegenstand zahlreicher Forschungsprojekte. Die Arbeiten konzentrieren sich auf die Herstellung und Verarbeitung sowie teilweise auf den Konsum. Demgegenüber beschäftigen sich nur wenige Untersuchungen mit der Frage der stofflichen oder energetischen Verwertung von nanomaterialhaltigen Konsumgütern sobald diese das Ende ihrer Nutzung erreicht haben.

Kurz gesagt: Da Nanomaterialien durch den Verbrauch von Produkten auch in Abfällen künftig allgegenwärtig sein werden, stellen sie ebenso wie in der Herstellung auch für die Arbeitsplätze in der Entsorgung wie z.B. der Verwertung (Recycling) eine neue – unsichtbare – Herausforderung dar. Erschwerend kommt hinzu, dass nanomaterialhaltige Konsumgüter weder einer Kennzeichnungspflicht unterliegen noch vor der Verwertung (Recycling) bzw. Entsorgung getrennt erfasst werden (können).

Auf Basis eines begründeten Forschungsbedarfs wird in der vorgelegten Studie näher untersucht, inwieweit Nanopartikel-haltige Konsumprodukte im Recycling eine Rolle

6 (ITA/IÖWb), 2012, S. 1)

7 In Frankreich sind das vor allem Bestandsaufnahmen des INRS (Institut national de recherche et de sécurité); in Österreich sind das das umfassende verschiedene Aktivitäten bündelnde TA-Projekt NanoTrust sowie eine Studie des Gesundheitsministeriums zu Nanosilber; in Deutschland sind u.a. die Projekte NanoCare – Gesundheitsrelevante Aspekte synthetischer Nanopartikel: Schaffung einer allgemeinen Informations- und Wissensbasis als Grundlage für eine innovative Materialforschung. INOS – Identifizierung und Bewertung von Gesundheits- und Umweltauswirkungen von technischen nanoskaligen Partikeln. TRACER – Toxikologische Bewertung und Funktionalisierung von Kohlenstoff-Nanomaterialien, jeweils gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung zu nennen.

8 (SRU, 2011, S. 90)

spielen und unter welchen Bedingungen beim Recycling Nanopartikel-haltiger Konsumprodukte gesundheitliche Risiken durch Freisetzung nanopartikelhaltiger Emissionen entstehen können. Im Fokus stehen in diesem Zusammenhang die möglichen Auswirkungen von Emissionen auf die Arbeitsbedingungen für Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer, die im Zuge des Recyclings in direktem Kontakt zu Nanopartikel-haltigen, ehemaligen Konsumprodukten stehen und daraus abgeleitete Konsequenzen für den Gesundheits- und Arbeitsschutz.

## 3 Forschungsbedarf und Definition der Grundlagen

### 3.1 Forschungsbedarf

Inwieweit von Nanomaterialien Gefahren für Mensch und Umwelt ausgehen, ist Gegenstand vieler aktueller Forschungsvorhaben.<sup>9</sup> Aufgrund des gestiegenen Informationsbedürfnisses der deutschen Bevölkerung zum Thema Nanomaterialien wurde u.a. das Informationsportal NanoCare<sup>10</sup> geschaffen, welches „der Erzeugung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse über mögliche gesundheitliche Auswirkungen von Nanopartikeln sowie der Etablierung einer strukturierten und interpretierten Wissensbasis“ zu bekannten Sicherheitsaspekten dienen soll.

In einigen Untersuchungen wird bereits explizit auf die Risiken bzw. Risikovorsorge für Arbeitnehmer am Arbeitsplatz eingegangen. Beispielhaft werden folgende, ausgewählte Forschungsvorhaben bzw. Untersuchungen genannt:

- Eine aktuelle Untersuchung der Hans-Böckler-Stiftung beschäftigt sich z.B. mit dem Gesundheitsrisiko durch die krebserzeugende Wirkung nanomaterialhaltiger Stäube am Arbeitsplatz.<sup>11</sup> Im Vordergrund stehen die Toxikologie von Nanomaterialien und eine Auseinandersetzung mit ggf. bestehenden Risiken durch eine Exposition bei der Emission nanopartikelhaltiger Stäube.
- Die Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie und Energie (IG BCE) hat im Februar 2011 eine Information zum Arbeitsschutz herausgegeben, die die Herausforderungen durch Nanomaterialien für den Arbeits- und Gesundheitsschutz behandelt. Der Fokus liegt hierbei auf den Bereichen Herstellung sowie industrielle und gewerbliche Verarbeitung von synthetischen Nanomaterialien und den Möglichkeiten für Schutzmaßnahmen an den zugehörigen Arbeitsplätzen.
- Verschiedene Industrieunternehmen wie z.B. BASF, Bayer und EVONIK haben Leitfäden mit Hinweisen zum Arbeitsschutz in der Herstellung und bei Tätigkeiten mit Nanopartikeln veröffentlicht. Auch der Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) und der Niederländische Verband der Industrie und Arbeitgeber haben kürzlich Leitfäden mit Empfehlungen für eine umfassende Risikominimierung vorgelegt.<sup>12</sup>

Im Zusammenhang mit der Situation am Arbeitsplatz liegen bisher jedoch nur zwei Untersuchungen vor, die explizit das Risikopotenzial ansprechen, das mit nanomaterialhaltigen Konsumgütern verbunden sein kann, sobald diese nach Ende ihrer Nutzung in Recyclingprozesse gehen.

<sup>9</sup> siehe dazu Fußnote 7 und (BMU, 2011)

<sup>10</sup> [www.nanopartikel.info](http://www.nanopartikel.info)

<sup>11</sup> (Roller, 2010)

<sup>12</sup> (ITA/IÖWb), 2012, S. 4)

- In einer Literaturstudie<sup>13</sup> des UBA zur „Emission von Nanopartikeln aus ausgewählten Produkten in ihrem Lebenszyklus“ wird festgestellt, dass „bis zur Verfassung des (vorgelegten) Berichts keine Studien (vorliegen), die sich mit der Freisetzung von nanohaltigem Carbon Black Partikeln aus Produkten, z.B. Druckfarben, Lacke, Plastik einschließlich Reifen, während der Deponierung oder des Recyclings befassen“. Für Ansätze, den gesamten Produktlebenszyklus insbesondere das Recycling im Hinblick auf die Freisetzung von Nanomaterialien zu betrachten, wurden dort keine Hinweise in der Literatur gefunden. Daher wurden als künftige Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte u.a. „Life-Cycle-Betrachtungen der Freisetzung über den ganzen (Produkt-)Zyklus“ empfohlen.
- Eine Untersuchung des Fraunhofer-ISI zu „Nanomaterialien in der Abfallwirtschaft“<sup>14</sup> gibt „erste Einblicke in Wege, die nanopartikelhaltige Materialien im Recyclingprozess [...] durchlaufen“. Auf dieser Grundlage wurden prioritäre Ansatzpunkte für eine Expositionsbewertung an zwei Fallbeispielen (Altfahrzeugen, Altpapier) identifiziert. Es wurde empfohlen, diese einer künftigen experimentellen Expositionsbewertung zu Grunde zu legen. Daneben wurde festgestellt, dass die Anwendung der Methodik der Expositionsbewertung im Rahmen einer Risikobewertung einen großen Informationsbedarf hinsichtlich der Frage aufdeckt, „ob Partikel im nanoskaligen Bereich emittiert werden, in welcher Größenverteilung dies geschieht und wie groß ihre Reaktivität, Oberfläche und Lebensdauer ist“.

Diese Arbeiten zeigen, dass der *Forschungs- und Untersuchungsbedarf im Bereich Recycling nanomaterialhaltiger Konsumprodukte sehr hoch* ist. Dazu gehört auch, die Situation der in diesem Bereich beschäftigten Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer in die Betrachtungen einzuschließen.

Im Folgenden werden ergänzend weitere Hinweise auf bestehenden Forschungsbedarf angeführt:

- In der Stellungnahme des Bundesinstituts für Risikobewertung und des Umweltbundesamtes vom 15. April 2010<sup>15</sup> wird u.a. darauf hingewiesen, dass „Informationen über die Freisetzung von Nanopartikeln“ aus unterschiedlichen Konsumprodukten „bisher kaum zur Verfügung“ stehen und daher zunächst „Messverfahren zur Bestimmung der Emissionen und Schätzung der Freisetzungsmengen sowie der daraus resultierenden Exposition und Immission für Mensch und Umwelt“ entwickelt werden müssten. Ein wichtiges Expositionsszenario sei u.a. „die Entsorgung und somit der gesamte Lebenszyklus von Nanomaterialien“.
- Im September 2010 wurde von Herrn Eichert, ENCROS GmbH in einem Artikel der Zeitschrift „Sekundärrohstoffe“<sup>16</sup> und in seinem Vortrag auf der IFAT München darauf hingewiesen, dass Forschungs- und Entwicklungsbedarf für Nanomaterialien

13 Abschluss November 2009, veröffentlicht Oktober 2010

14 (Ostertag & Hüsing, 2008)

15 (UBA/BfR, 2010)

16 (Eichert, 2010, S. 14-15)

in Bereich der Recyclingindustrie bestehe, da sie mit Immissionen verbunden sein könnten und ggf. Einfluss auf die Produktqualität der wiedergewonnenen Sekundärrohstoffe und v.a. auch auf die Arbeitsbedingungen im Recycling- oder Entsorgungsprozess nehmen.

- Die Arbeitsgruppe „Entsorgung von Nanoabfällen“ des Schweizer Bundesamtes für Umwelt (BAFU) hat im Herbst 2010 ein Konzeptpapier „Umweltverträgliche und sichere Entsorgung von Abfällen aus industrieller und gewerblicher Verarbeitung von synthetischen Nanomaterialien“ vorgelegt, indem auf erhebliche Wissenslücken über Art und Mengen von Nanoabfällen und über das Verhalten von Nanomaterialien im Entsorgungsprozess hingewiesen wird.
- Aus dem Gutachten des Sachverständigenrats für Umweltfragen „Vorsorgestrategien für Nanomaterialien“<sup>17</sup> 2011 geht hervor, dass – im Gegensatz zur den Bereichen Materialherstellung, Verarbeitung zum Produkt sowie Konsum – zu möglichen Expositionen im Abfallpfad so gut wie keine Erkenntnisse vorliegen.
- Das Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzung TA-SWISS hat im September 2011 eine Studie «Nanomaterialien: Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit»<sup>18</sup> in Auftrag gegeben, die u.a. „spezifische Fragen im Zusammenhang mit Nanomaterialien und Nanostoffe enthaltenden Produkten (analysiert): Abwasserreinigung; Kehrrichtentsorgung, Recycling und langfristige Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit“.
- Ende Januar 2012 hat die EU-Kommission eine „Studie zur Ermittlung der möglichen Auswirkungen von Nanomaterialien und Nanotechnologie am Arbeitsplatz und zur Beurteilung des Umfangs und der Erfordernisse möglicher Änderungen der einschlägigen Rechtsvorschriften der EU über Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz“ ausgeschrieben.<sup>19</sup> In diesem Kontext soll ein Leitfaden über entsprechende Gefahren/Bedenken erstellt werden mit dem Ziel, einen angemessenen Schutz der Gesundheit und Sicherheit von Arbeitnehmern vor Gefahren sicherzustellen, die mit der Einwirkung von Nanomaterialien und/oder der Anwendung von Nanomaterialien verbunden sind.
- In der Fachzeitschrift „RECYCLING-magazin“ 01/2012<sup>20</sup> weisen Mitarbeiter des Umweltbundesamtes (UBA) darauf hin, dass es „hinsichtlich des Prozesses der Freisetzung von Nanomaterialien in die Umwelt während der Entsorgungsphase [...] noch große Wissenslücken“ gibt. „Beispielsweise gilt es zu klären, inwieweit im Abfall enthaltene Nanomaterialien während einzelner Behandlungsschritte, zum Beispiel bei der Zerkleinerung der Abfälle, freigesetzt“ werden können.
- Erste Ansätze, die ganze Wertschöpfungskette nanomaterialhaltiger Produkte umfassend zu analysieren, werden künftig im EU-Projekt „NanoSustain“<sup>21</sup> verfolgt.

17 (SRU, 2011, S. 281 ff.)

18 <http://www.ta-swiss.ch/projekte/nanotechnologie/nano-und-umwelt/>

19 <http://ted.europa.eu/TED: ABL/S S19 Supplement zum Amtsblatt der Europäischen Union, 28.01.2012, 29682- 2012-DE>

20 (Wiechmann, Dubbert, & Weiss, 2012, S. 32-34)

21 <http://www.nanosustain.eu/>

## 3.2 Definitionen und Untersuchungsgrundlagen

### Nanotechnologie

Mit dem Begriff „Nanotechnologien“ werden Verfahren und Prozesse bezeichnet, die sich mit der Untersuchung, Herstellung und Anwendung von Strukturen und Materialien im Nanometerbereich befassen. Ein Nanometer (nm) ist der millionste Teil eines Millimeters (10<sup>-9</sup> m) und etwa 100.000-mal dünner als ein menschliches Haar.<sup>22</sup> Diese Definition entspricht dem gegenwärtigen Stand der internationalen Diskussion z. B. auch bei der OECD.

### Nanomaterial

Gemäß einer von der Europäischen Kommission (EC) am 18. Oktober 2011 angenommenen Empfehlung wird Nanomaterial beschrieben 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 Außenmaße im Bereich von 1 nm bis 100 nm haben.“* Hierbei handelt es sich um eine sektorübergreifende Definition, die für alle Regelungszwecke einsetzbar ist. Die Definition basiert auf einem Ansatz, bei dem die Größe der konstituierenden Partikel und nicht etwaige Gefahren oder Risiken berücksichtigt werden.<sup>23</sup> Auch der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) verwendet den Begriff Nanomaterial für die Gesamtheit der Materialien in nanoskaliger Dimension.

In diesem Größenbereich ändern sich die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Materialien. Dies kann in vielfältiger Weise zur Entwicklung neuartiger Produkte und Anwendungen genutzt werden. Nanomaterialien zeichnen sich dadurch aus, dass sie im Verhältnis zu ihrer Masse eine sehr große Oberfläche besitzen. Damit sind sogenannte Quanteneffekte verbunden, die die Eigenschaften gegenüber Materialien gleicher chemischer Zusammensetzung, aber nicht in nanoskaliger Größe, deutlich verändern<sup>24</sup> und für eine gezielte Funktionsoptimierung technologischer Komponenten eingesetzt werden.<sup>25</sup> Während eine Reihe nanostrukturierter Materialien schon seit Jahrzehnten zu den etablierten Chemikalien gezählt werden, kommen täglich neu entwickelte Nanomaterialien hinzu.<sup>26</sup>

22 (SRU, 2011, S. 16)

23 (Europäische Kommission)

24 Nano-Keramiken sind beispielsweise biegsam wie Folien.

25 (Grimm, et al., 2011, S. 1)

26 (BfR, 2009, S. 21)

## Nanoobjekte und Nanostrukturierte Materialien

Innerhalb der Nanomaterialien werden desweiteren Nanoobjekte und Nanostrukturier-tes Material unterschieden.<sup>27</sup>

- Unter *Nanoobjekten* werden kleinteilige Partikel, Fasern oder Plättchen verstanden.
- *Nanostrukturierte Materialien* sind dagegen Materialien mit einer internen Nanostruktur oder einer Nanostruktur an der Oberfläche. Hierzu zählen u.a. Nanokomposite (Verbundmaterialien), Materialien mit nanostrukturierten Oberflächen (Lotuseffekt) und zusammengesetzte Nanomaterialien wie z.B. Agglomerate und Aggregate.<sup>28</sup>

Anhand der folgenden Übersicht werden Beispiele für Nanomaterialien<sup>29</sup> aufgeführt.

**Abbildung 1: Beispiele für Nanomaterialien nach SRU 2011**

<b>Nanopartikel:</b>	
Nanopartikuläre Mineralien und Metalloxide	z. B. Siliziumdioxid (SiO <sub>2</sub> ), Titandioxid (TiO <sub>2</sub> ), Zinkoxid, Ceroxid, Aluminiumoxid (Tonerde, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), Eisenoxid (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )
Nanopartikuläre Metalle	z. B. Eisen, Silber, Gold
Quantenpunkte (Quantum-Dots)	Nano-Kristallite, meist aus Halbleitermaterial, bei denen die Elektronen in ihrer Beweglichkeit in allen drei Raumrichtungen so weit eingeschränkt sind, dass ihre Energie nicht mehr kontinuierliche, sondern nur noch diskrete Werte annehmen kann
Fullerene	Käfigartige (fußballförmige) Moleküle aus mindestens 20 Kohlenstoffatomen, z. B. C-60 Fulleren
Dendrimere	Dreidimensionale, kugelförmige, symmetrisch verzweigte Makromoleküle, die stufenweise aus einzelnen Molekülen aufgebaut werden
<b>Nanofasern</b> , z. B. Kohlenstoff-Nanoröhren (carbon nanotubes – CNT): Aus Kohlenstoffatomen aufgebaut. Ihr Durchmesser liegt zwischen knapp 1 und etwa 100 nm, die Länge kann derzeit mehrere hundert µm erreichen. Es gibt ein- und mehrwandige Strukturen (singlewalled CNT (SWCNT) und multiwalled CNT (MWCNT)) mit offenen oder geschlossenen Enden	
<b>Nanoplättchen, Schichtstrukturen</b> , z. B. Nanoton (Silikat-Schichten im Nanometerbereich (Montmorillonite))	
<b>Porenstrukturen</b> , z. B. Zeolithe, Membrane, Aerogele (hochporöse Festkörper aus unterschiedlichen Materialien, z. B. Silikat, Kohlenstoff oder Polymere)	
<b>Komplexe Strukturen</b> , z. B. Micellen (aus Tensiden (Moleküle, die sowohl wasser- als auch fettlöslich sind – amphiphil) aufgebaute Strukturen. Können je nach äußeren Bedingungen Formen zwischen Kugeln und zylindrischen Stäben annehmen) oder Liposomen (aus einer Doppellage amphiphiler Moleküle aufgebaute kugelförmige Aggregate)	
SRU/SG 2011-2/Tab. 3-1; Datenquelle: BMBF 2009; SCHULTE-EBBERT et al. 2009; GRÜNE et al. 2005	

27 Als weitere Quellen für eine ausführliche, allgemeinverständliche Erläuterung von Fachbegriffen im Bereich Nanomaterialien wird auf die Studie der IGBCE und das Arbeitspapier 221 der Hans-Böckler-Stiftung hingewiesen.

28 (SRU, 2011)

29 (SRU, 2011, S. 74)

## Recycling

Recycling bedeutet die Gewinnung von Rohstoffen aus Abfällen (Aufbereitung) und ihre Rückführung in den Wirtschaftskreislauf (als Sekundärrohstoffe) für die Verarbeitung zu neuen Produkten. Das wird auch *stoffliche Verwertung* genannt. Es werden folgende Arten des Recyclings unterschieden<sup>30</sup>:

- a. *Wiederverwendung*: Wiederholter Einsatz eines Rückstandes für den ursprünglichen Verwendungszweck (z.B. Mehrwegflaschen).
- b. *Weiterverwendung*: Rückstandseinsatz für andere Zwecke (z.B. Granulat aus Altreifen zur Produktion von Bodenbelägen, Kompost aus organischen Abfällen als Humuslieferant und Dünger).
- c. *Weiterverwertung*: Herstellung von Sekundärstoffen zum Wiedereinsatz in den Produktionsprozess, dem sie entstammen (z.B. Altglas zur Herstellung von Behälterglas, Kupferrückgewinnung aus Kabelresten, Schmieröl aus Altöl).

Demgegenüber fällt die energetische Verwertung (engl.: energy recovery) nicht unter den Begriff des Recyclings, da der Hauptzweck der Verwertung in der Energierückgewinnung und nicht in der stofflichen Nutzung der (roh-)stofflichen Bestandteile der Abfälle liegt.

---

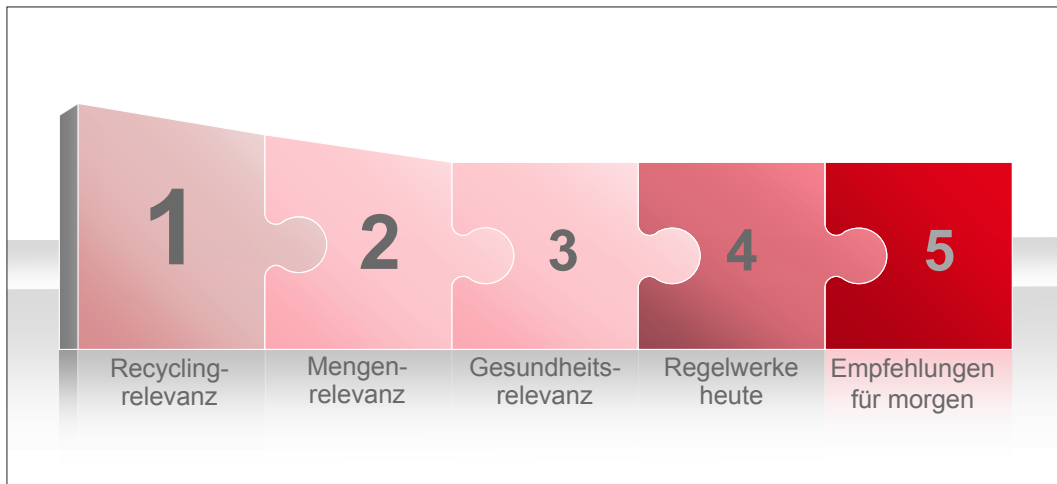
30 [wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/Recycling](http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/Recycling)



## 4 Leitende Fragestellungen und Vorgehen

Vor dem Hintergrund, dass es noch erhebliche Wissenslücken gibt, ob und in welcher Weise sich Nanopartikel aus Konsumprodukten auf das Recycling –auswirken können, wurde folgendes, fünfstufiges Arbeitsprogramm erstellt:

**Abbildung 2: Arbeitsprogramm**



© Prognos AG

### 1. Recyclingrelevanz

Zuerst wird erstmalig eine Übersicht zu Produkten bzw. Produktgruppen erstellt, bei denen Nanomaterialien in der Herstellung eingesetzt wurden und die nach der Nutzung in gängigen Recyclingverfahren einer Wiederverwertung zugeführt werden. Als Grundlage für die Einschätzung potenzieller Risiken wird ergänzend dazu ein Überblick zu der Art und dem Toxizitätsrisiko von Nanomaterialien erstellt, die in Konsumprodukten zum Einsatz kommen. Die Relevanz der Recyclingstoffströme wird beschrieben und einer ersten Bewertung unterzogen.

### 2. Mengenrelevanz

Für eine vertiefende Betrachtung möglicher Umweltauswirkungen der Recyclingprozesse werden nähere Informationen zu den derzeitigen Umsatz- und Recyclingmengen recherchiert und schließlich zwei Produkte/-Produktgruppen als Fallbeispiele ausgewählt, die bereits heute in Deutschland in großen Mengen recycelt werden.

### 3. Gesundheitsrelevanz

Als Grundlage für eine erste Risikoeinschätzung potenziell gesundheitlicher Konsequenzen wird der *Begriff „Risiko“ im Kontext des Recyclings nanomaterialhaltiger Konsumprodukte* aufbereitet und zugehörige, potenzielle Gesundheitsrisiken beschrieben. Für die beiden zugehörigen Recyclingprozesse werden anhand der Verfahrensschritte zur Aufbereitung grundsätzlich in Frage kommende *Möglichkeiten einer Freisetzung von Nanomaterialien im Aufbereitungsprozess identifiziert*.

### 4. Regelwerke heute

Anhand einer Übersicht zu den vorhandenen *Regelwerken zum Schutz der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer* in Herstellungs- und Verarbeitungsprozessen mit Nanomaterialien werden die möglichen Emissionen, die in den beiden ausgewählten Aufbereitungsprozessen entstehen können, gespiegelt und Konsequenzen aus Sicht des Arbeitsschutzes abgeleitet.

### 5. Empfehlungen für morgen

Ziel der Untersuchung ist auf Basis von Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen, mit Fokus auf die Arbeitsplatzsituation für abhängig Beschäftigte *Empfehlungen zum weiteren Vorgehen* z.B. im Arbeitsschutz im Bereich Recycling oder zu weiterem Forschungsbedarf zu geben.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Recyclingrelevanz

#### Vorgehen

Der erste Ansatzpunkt für die Untersuchung der Relevanz von Nanomaterialien beim Recycling liegt darin, Produkte bzw. Produktgruppen zu identifizieren, bei denen Nanomaterialien in der Herstellung eingesetzt wurden und die in Deutschland nach der Nutzung in gängigen Recyclingverfahren einer stofflichen Verwertung zugeführt werden (s. Tabelle 2). Eine Vielzahl von Produkten, die mit Einsatz von Nanomaterialien hergestellt und in Deutschland vertrieben werden, wird davon von vorneherein ausgenommen, weil es sich z.B. um Verbrauchs- und Pflegeprodukte wie z.B. Kosmetika oder Pflegemittel für Autos oder Möbel handelt, die nach der Nutzung nicht recycelt werden können. Ausgehend von den gängigen, heute in Produkten eingesetzten Nanomaterialien wurde die Auswahl zudem auf Produkte begrenzt, die in Europa oder von einem multinationalen Konzern mit internationalem Vertrieb produziert werden.

Parallel wurde für gängige, derzeit zum Einsatz kommende Nanomaterialien der *aktuelle Kenntnisstand zur Toxizität einer Aufnahme von Nanomaterialien* durch die Atemwege (inhalativ), den Mund (oral) und die Haut (dermal) in einer Übersicht zusammengefasst. Auf dieser Basis sollen im weiteren Verlauf die gegebenenfalls auftretenden Expositionen gegenüber nanomaterialhaltigen Stäuben bei der Wiederaufbereitung der Produkten mit Nanomaterialien beurteilt werden (siehe Tabelle 1).

Um eine erste Einschätzung zur Relevanz nanomaterialhaltiger Produkte im Recycling zu erhalten, wurde schließlich auf Basis der bisher erarbeiteten Informationen eine erste Bewertung der Recyclingstoffströme durchgeführt. Es wurden die Konsumprodukte für eine nähere Betrachtung ausgewählt,

- die Nanomaterialien enthalten, mit denen nach vorliegenden Erkenntnissen grundsätzlich ein Toxizitätsrisiko durch inhalative Aufnahme verbunden sein könnte – weil die direkte innere Exposition von Wissenschaftlern als der wichtigste Aufnahmepfad für Menschen identifiziert wurde – und
- die unvermischt in einem produktspezifischen Recyclingverfahren wiederverwertet werden – um einen direkten Zusammenhang zu den möglichen Emissionen herstellen zu können.

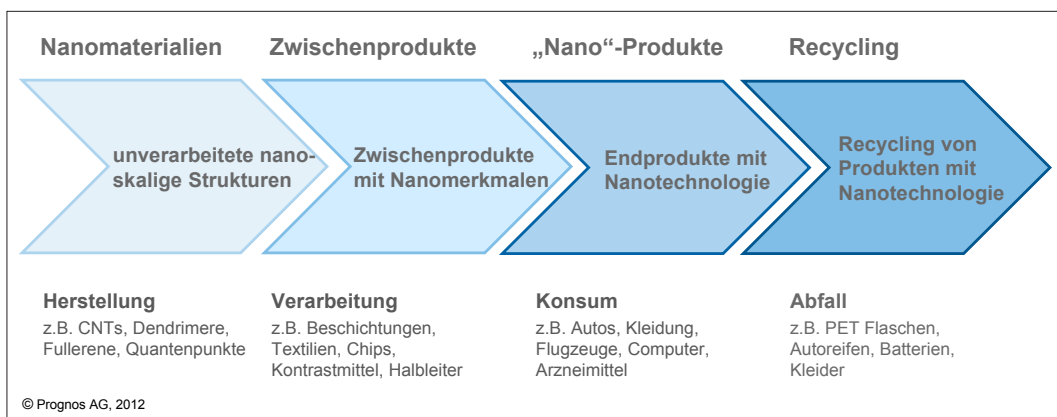
Ergänzend wurde eine Übersicht erstellt, für welche weiteren Produkte zukünftig ein Einsatz von Nanomaterialien geplant ist (s. Tabelle 3).

## Ergebnisse

### ■ Erweiterter Stoffkreislauf von Konsumprodukten mit Nanomaterialien

Nanomaterialien befinden sich in der Regel als untergeordnete Komponente in einem zusammengesetzten Produkt.<sup>31</sup> Wenn diese Produkte nach Ende der Nutzung recycelt werden können, treffen Produkte mit Nanomaterialien in der Regel auch mit vergleichbaren Produkten ohne Nanomaterialien zusammen, da weder Getrennthaltungs- noch Kennzeichnungspflichten bestehen. Während bislang der Schwerpunkt der Untersuchungen zu Risiken von Nanomaterialien in den Bereichen Herstellung, Verarbeitung und Konsum lag, wird in dieser Untersuchung der Fokus auf nanomaterialhaltige Konsumprodukte gerichtet, die am Ende des Produkt-Lebenszyklus in Recyclingverfahren aufbereitet und wiederverwertet werden. Der bisherige Stoffkreislauf für Produkte mit Nanomaterialien wurde dementsprechend um den Bereich Recycling ergänzt.

**Abbildung 3: Erweiterter Stoffkreislauf für Produkte mit Nanomaterialien**



Quelle: Lux Research, 2008; ergänzt durch Prognos AG 2012

### ■ Kenndaten und Eigenschaften von Nanomaterialien

Nachfolgend wird ein Überblick gegeben, welche Nanomaterialien in Konsumprodukten zum Einsatz kommen, welche risikobestimmenden Eigenschaften zu diesem Nanomaterialien bereits bekannt sind und welche Qualität die derzeitige Datenlage besitzt.

31 (SRU, 2011, S. 103)

Tabelle 1: Anwendung von Nanomaterialien in Konsumprodukten und Hinweise auf bekannte Toxizitätsrisiken beim Menschen

Material	Beschreibung	Anwendungen (Beispiele)	Toxizität Inhalation	Toxizität Oral	Toxizität Dermal	Weitere Hinweise auf Toxizität
<b>Fullerene</b>	Fullerene sind sphärische Moleküle aus Kohlenstoffatomen. Bekanntestes Beispiel ist ein fußballförmiges, aus 60 Kohlenstoffatomen aufgebautes Molekül (C60-Fulleren). Es gibt aber auch andere stabile Formen.	Schminke Kosmetika (Anti-Aging Creme) Sportartikel (Tennis-Badminton-, Golfschläger)	akut: sehr gering (1) chronisch: ? (1) Eine Studie an Ratten zeigte eine vorübergehende Entzündungsreaktion in der Lunge (2).	akut: ? (1) chronisch: ? (1) Es liegen bis heute keine Untersuchungen dazu vor (2).	Es gibt Hinweise, dass Fullerene nicht sehr leicht durch die Haut durchdringen können (1).	Da Fullerene nicht biologisch abbaubar sind und die Datenlage zur Toxizität noch sehr gering ist, werden sie wie Ciba (seit 14.2009 Teil der BASF SE) und Novartis derzeit auf ihren Einsatz (2). Die große Vielfalt an Fullerenen ermöglicht keine allgemeingültigen oder vergleichenden Aussagen zu ihrer Toxizität. Sowohl der Herstellungsprozess, insbesondere der Einsatz von Katalysatoren, als auch verschiedene Lösungsmittel beeinflussen die Toxizität oft zusätzlich und machen es schwierig, die Effekte von reinen Fullerenen klar abzugrenzen (2).
<b>CNT</b>	Carbon Nano Tubes (CNT) sind lange, dünne, röhrenförmige Nanoröhren, die in verschiedenen Formen existieren (einwandig, doppelwandig, mehrwandig).	Sportartikel (Fußball, Tennisschläger, Leichtbauteile für Kraftfahrzeuge) Verpackungsfolien	akut: mäßig (1) chronisch: unklar sehr langer CNTs (1) auf kanz. Potential CNTs können in die Lunge gelangen und dort auch über längere Zeit bleiben (2). In einigen Studien wird nahegelegt, dass CNT mindestens ebenso kanzerogen sind wie besonders gefährliche Formen von Asbest (4). Sowohl Lungenkrebs als auch Bauchspeicheldrüsenkrebs wurden in Tierversuchen festgestellt, allerdings scheinen nicht alle CNT's asbestähnliche Wirkungen auszuweisen (12).	akut: ? (1) chronisch: ? (1) Erste Studien an Tieren zeigen keine toxische Wirkung (2).	Ein Durchdringen der Haut von CNTs ist möglich, wenn die Nanoröhren (CN) CNTs von der Haut aufgenommen werden können und ab sie dort Schäden verursachen wurde bis jetzt noch nicht untersucht (2). Toxische Effekte in Zellskulturen konnten nicht eindeutig nachgewiesen, aber auch nicht ausgeschlossen werden (2).	Da umfassende Untersuchungen über das toxische Potenzial von CNT noch fehlen, sind die Ergebnisse der bisherigen Studien, die Aussagen gemacht werden (5, S.36). Die immense Verschiedenartigkeit der Kohlenstoff-Nanoröhren sowie deutliche Unterschiede in der Versuchsdurchführung und Analyse führen dazu, dass (...) jeder Aufnahmeweg (...) für jede Art von Kohlenstoff-Nanoröhren (modifiziert bzw. unverändert) untersucht werden (solle), um für jeden Einzelfall die Gefährdung und Verteilung im Körper ermitteln zu können (2). Die Sicherheits- und Risikoforschung für Kohlenstoff-Nanoröhren (Carbon Nano Tubes - CNT) und -fasern (Carbon Nano Fibres - CNF) steht im Mittelpunkt des aktuellen BMWF-Forschungsprojekts "CarbSafe 2". Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BfArM) konzentriert sich dabei auf mögliche Gesundheitsrisiken für Beschäftigte, die sich bei Herstellung und Verwendung von CNT/CNF sowie im Lebenszyklus von Produkten auf CNT/CNF-Basis ergeben.
<b>Carbon Black (CB)</b>	Industrieruß ist ein unter kontrollierten Bedingungen hergestelltes Verunreinigungsprodukt, das zu 98% aus Kohlenstoff besteht. Es setzt sich aus feinen, raub und leitfähigen Partikeln von nanoskaligen Partikeln zusammen. Diese Aggregate haben eine Größe von 5 bis 500 nm. CB besitzt eine geringe Löslichkeit und ist persistent (1).	Autoreifen Lacke Toner für Kopierer und Laserdrucker Textilien (in Erprobung)	akut: gering (1) chronisch: unklar, mögliches Kanzerogen (1) Justieruß, gilt als Verursacher von Entzündungen und Tumoren in der Lunge (2). Die kreberzeugende Wirkung von Industrieruß-Nanomaterialien in Langzeit-inhalationsversuchen ist eher stärker als diejenige von Dieselruß (4)	akut: ? (1) chronisch: ? (1) Erste Studien an Tieren zeigen keine toxische Wirkung (2). In Zelltests zeigte sich, dass Carbon Black in hohen Dosen einen schädlichen Effekt auf Zellen hat (1, S.233).	Erste Studien geben Hinweise, dass Industrieruß nicht über die Haut aufgenommen werden kann und verbleibt an der Haut. In Zelltests zeigte sich, dass Carbon Black in hohen Dosen einen schädlichen Effekt auf Zellen hat (1, S.233).	Carbon Black ist in Deutschland im Rahmen der Regulierung der maximalen Arbeitsplatzkonzentration (MAK) als kanzerogen der Kategorie 3B eingestuft. Das heißt es bestehen Anzeichen für einen Verdacht auf krebseregende Effekte (9). Carbon Black kann hauptsächlich über die Atemluft aufgenommen werden. Im Gutachten des SRU wird festgehalten, dass eine Exposition von Kohlenstoff-Nano-Rußpartikeln in der Materialherstellung und Verarbeitung nachgewiesen wurde, 1,08 bis 19,95 mg/m³ inhalierbare Anteile (1; S.281 ff.).
<b>Silber</b>	Mit Nanosilber werden nanoskalige Partikel aus Silber bezeichnet, die eingesetzt werden um Gegenstände antibakteriell zu machen. Dafür können diese in ein Gewebe eingeflochten (z.B. bei Textilien), oder als Beschichtung auf eine feste Oberfläche aufgebracht werden.	Küchengeräte Lebensmittelverpackungen Kleider	akut: gering (1) chronisch: ? (1) Silber kann über die Lunge in den Blutkreislauf und somit in den ganzen Körper gelangen. Bisher wurden keine toxischen Effekte festgestellt (2). Unklar ist, auf welche Menge und Art der Belastungssituation diese Aussage basiert.	akut: gering (1) chronisch: ? (1) Silber wird zum Teil Nahrungsmittel beigefügt (z.B. als Farbstoff). In geringen Mengen oral eingenommen gilt es als nicht toxisch (2), unklar ist, auf welche Menge und Art der Belastungssituation diese Aussage basiert.	Silber kann (...) über die Haut aufgenommen werden (2). In mehreren Studien wurden toxische Effekte von Silber an Zellen und Tieren nachgewiesen, der Aufnahmeweg ist unklar (4). In Zellstudien kann Silber einen negativen Effekt auf das Überleben einer Zelle haben (2).	Nanosilber gehört zu einer Reihe von Nanopartikeln, bei denen die Löslichkeit beachtet werden muss, das heißt ein Teil des Silbers löst sich in Anwesenheit von Wasser aus dem Partikel heraus. Es ist daher sehr schwer, das Umwelverhalten der Partikel (Ag) von dem der Silberionen (Ag+) zu trennen. Gerade hinsichtlich der Löslichkeit und dem Verbleib von nicht gelöstem Partikel besteht noch viel Forschungsbedarf (2). Laut EMPA ist Nanosilber eher unbedenklich (keine akute Toxizität, keine DNA-Schädigung, keine Beeinträchtigung der Hautflora, der Verdauung, der Lunge, aber chronische Toxizität) (13)
<b>Titanoxid</b>	Nanoskaliges Titanoxid ist ein sehr guter Absorber von UV-Strahlung und wird wegen seiner Eigenschaften in entsprechenden Sonnenschutzmitteln eingesetzt. Titanoxid (Hydrophil) was ein in der Haut schmutzabweisenden Effekt zu Folge hat. Aufgrund seiner Vielseitigkeit in Größe und Gestalt kommt es sowohl als mikroskaliges Pigment zum Einsatz als auch als Nanoobjekt.	Sonnencreme Holzschutzmittel Pestizide Kosmetika Kleber Klebstoffe "Anti-Fog"-Beschichtungen	akut: sehr gering toxisch (1) chronisch: unklar, evtl. Kanzerogen (1) TiO <sub>2</sub> -Nanopartikel können in der Lunge vorübergehende Entzündungen auslösen (2). Die krebserezeugende Wirkung von Titanoxid ist stärker als die von Dieselruß (4).	akut: unklar (1) chronisch: unklar (1) Sein hohe Dosen verursachen wie hoch diese Dosis und welcher Art die Belastungssituation ist. Titanoxid ist möglicherweise kanzerogen (12).	Titaniumdioxidpartikel können gesunde Haut nicht durchdringen (2). Zu prüfen bleibt die Aufnahme durch die Haut. Sehr hohe Dosen können Zellschäden zu Schäden an den Zellen (2), wobei unklar bleibt, wie hoch diese Dosis und welcher Art die Belastungssituation ist.	Nanoskaliges Titanoxid, das für spezifische Anwendungen hergestellt wird, ist etwa um den Faktor 100 feinteiliger als die Pigmentform und weist andere physikalische Eigenschaften auf (2). Titanoxidpartikel sind in der Luft, die in den Geltungsbereich der allgemeinen Staubgrenzwerte fallen. (Grenzwert an Arbeitsplätzen: Jahresmittelwert für die einatembare Fraktion 4 mg/m³, für die alveolengängige Fraktion 3 mg/m³) (8).

**Tabelle 1 ff: Anwendung von Nanomaterialien in Konsumprodukten und Hinweise auf bekannte Toxizitätsrisiken**

Material	Beschreibung	Anwendungen (Beispiele)	Toxizität Inhalation	Toxizität Oral	Toxizität Dermal	Weitere Hinweise auf Toxizität
<b>Titaniumdioxid</b>	Titaniumdioxid stellt eine Verbindung von Titan und Sauerstoff dar, bei der der Anteil von Sauerstoff variiert (TiO <sub>2</sub> ). Es ist sehr hart und hat einen sehr hohen Schmelzpunkt.	Beschichtung von Werkzeugen PET Flaschen	keine Bewertung durch SRU (1) Es gibt noch wenig Forschung zur Toxizität von nanoskaligem Titaniumdioxid. Bei Versuchen an lebenden Organismen konnten bisher keine Effekte beobachtet werden (2).			Laut deutscher Bedarfsgegenstandsverordnung ist die Zugabe von Titaniumdioxid auf 20 mg TiN pro kg PET beschränkt.
<b>Zinkoxid</b>	Nano-Zinkoxid ist ein weißes Pulver, das für viele Anwendungen interessante Eigenschaften hat. Es absorbiert UV-Strahlung sehr gut, ist wasserunlöslich, kann als Halbleiter eingesetzt werden und ist ein guter Wärmeleiter. Zinkoxid-Nanopartikel besitzen eine geringe Löslichkeit in Wasser, aber in wässrigen Milieus setzen sie Ionen frei (1).	Textilien Klarlacke für Holzmoebel Kunststoffgläser	akut: gering (1) chronisch: ? (1) Tierversuche zeigen eine starke (...) Lungenschädigung als Reaktion auf ZnO, vergleichbar mit Metallrauchreize, dass bei Schwelzgasen durch Einatmen von Zinkdämpfen entstehen kann (2).	akut: ? (1) chronisch: ? (1) Wenn ZnO geschluckt wird, kann es sich in verschiedenen Organen ansammeln (2).	Ein Durchdringen von ZnO-Partikeln durch gesunde Haut scheint nicht oder nur in sehr geringem Maße möglich (2). Zu prüfen bleibt die Aufnahme durch erkrankte oder beschädigte Haut (1). Die meisten Zinkoxide zeigen eine gute Hautverträglichkeit. ZnO-Nanopartikel für Zellen von verschiedenen Geweben als auch von unterschiedlichen Organismen (2).	Technische Zinkoxide sind häufig biokompatibel und müssen dann mit dem entsprechenden Gefahrensymbol (X <sub>n</sub> ) gekennzeichnet werden (2). Falls partikuläres ZnO aufgenommen wird, könnte dessen Auflösung in der Zelle zu lokal sehr hohen Konzentrationen von Zink-Ionen und somit zu Nanopartikel-spezifischen Reaktionen führen (2).
<b>Siliciumdioxid (amorph)</b>	Siliciumdioxid-Nanopartikel werden bereits seit Jahrzehnten und hergestellt und haben eine große wirtschaftliche Bedeutung. Es handelt sich hierbei um amorphes (nicht kristallines) Siliciumdioxid. Oft wird dafür auch der Begriff Kieselensäure verwendet. Es ist hydrophil und im Wasser nur sehr schwer löslich.	Pulvermittel Autoreifen PET Flaschen Lebensmittelzusatz	akut: Schädigung der Lunge Entzündungen (1) amorphes SiO <sub>2</sub> kann Entzündungen auslösen (1, 2); chronisch: Hinweise auf kancerogenes Potenzial (1) Die Ausübung einer Staublunge ist möglich, ein karcinogenes Potenzial nach inhalativer oder oraler Aufnahme konnte bisher nicht nachgewiesen werden (9, S. 10).	akut: sehr gering (1) chronisch: ? (1) amorphes SiO <sub>2</sub> gilt oral aufgenommen als untoxisch (2). In verschiedenen Studien wurden toxische Effekte auf mehrere Organe von Mensch und Tier nachgewiesen, der Aufnahmeweg ist unklar (4).	Keine Informationen zu Aufnahme bzw. Toxizität über Haut verfügbar (2). Amorphes SiO <sub>2</sub> erwies sich in Zelltests als relativ unbedenklich (2).	Siliciumdioxid-Nanopartikel sind in wässrigen Lösungen im Vergleich zu anderen Partikeln ungewöhnlich stabil (2). Aufgrund der hohen Löslichkeit wird amorphes Silikat schnell aus der Lunge eliminiert, unklar bleibt, ob toxische Eigenschaften beim Einwandern in den Interstitiumraum entstehen können (9, S. 11). Siliciumdioxid ist aufgeführt in der Liste von Stoffen, die in den Geltungsbereich der allgemeinen Staubgrenzwerte fallen (Grenzwert an Arbeitsplätzen: Jahresmittelwert für die einatembare Fraktion 4 mg/m <sup>3</sup> , für die alleolengängige Fraktion 3 mg/m <sup>3</sup> ) (8).
<b>Aluminiumoxide</b>	Aluminiumoxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) kommen in verschiedenen Modifikationen mit verschiedenen Eigenschaften vor. Die meisten sind sehr hart, chemisch stabil und nur sehr schwer löslich in Wasser, Säuren oder Laugen.	Schleifmittel Kunststoffe Keramik	akut: gering (1) subchronisch: gering (1) Die Inhalation kann zu Entzündungen der Lunge (Aluminose) führen (2).	akut: ? (1) chronisch: ? (1) In geringen Dosen ist Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> unbedenklich, erst in unrealistisch hohen Dosen können toxische Effekte beobachtet werden (2), wobei unklar bleibt, wie hoch diese Dosen sind und welcher Art die Belastungssituation ist.	nicht toxisch (2) Aluminiumoxid-Partikel aggregieren stark, bilden also größere Partikelstrukturen. Sie sind in dieser Form für Zellen wenig toxisch.	Aluminiumoxid ist aufgeführt in der Liste von Stoffen, die in den Geltungsbereich der allgemeinen Staubgrenzwerte fallen (Grenzwert an Arbeitsplätzen: Jahresmittelwert für die einatembare Fraktion 4 mg/m <sup>3</sup> , für die alleolengängige Fraktion 3 mg/m <sup>3</sup> ) (8). Die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) für Aluminiumoxid liegt bei 1,5 mg/m <sup>3</sup> als Feinstaub (alleolengängige Fraktion) (3). Zum Bohren mit einem weiteren Aluminiumoxid, sind keine ökotoxikologischen Studien vorhanden (2).
<b>Eisenoxide Ferroxide</b>	Eisenoxid-Nanopartikel sind vor allem aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften für verschiedene Anwendungen interessant. Sie weisen jedoch eine geringe chemische Stabilität auf, weshalb es in vielen Fällen notwendig ist, sie zu stabilisieren. Als Stabilisatoren können Fettsäuren, Amine oder Metalle genutzt werden.	Speicherkarten, Respirationsschutzhelme Kontaktschalter erleite Lautsprecher, Herstellung von Pigmenten Umweltanlenierung (nur USA)	akut: gering chronisch: ?	akut: ? chronisch: ? mehrfache Zellkultur-Systeme haben gezeigt, dass Eisenoxid-NP sehr gut von den Zellen internalisiert werden und kaum negative Effekte hervorrufen (2), wobei unklar bleibt, wie hoch diese Dosen sind und welcher Art die Belastungssituation ist.	keine Informationen bekannt (1)	Eisen(II)- und Eisen(III)-Oxide sind aufgeführt in der Liste von Stoffen, die in den Geltungsbereich der allgemeinen Staubgrenzwerte fallen (Grenzwert an Arbeitsplätzen: Jahresmittelwert für die einatembare Fraktion 4 mg/m <sup>3</sup> , für die alleolengängige Fraktion 3 mg/m <sup>3</sup> ).

**Quellen:**  
 1 SRU 2011, S.281-283  
 2 DaNa: nanopartikel.info  
 3 GESTIS Stoffdatenbank, <http://gestis.stoffdatenbank.de/>  
 4 Roller 2010 S.15-39; S. 55  
 5 ZTC-VDI, 2009A  
 6 Oesterreg & Haidinger, 2007  
 7 Som 2010, S. 31ff  
 8 TGRS 900  
 9 UBA/BR 2010  
 10 TGRS 906  
 11 International Agency for Research on Cancer (IARC)  
 12 I/G BCE, 2011 S. 16 ff.  
 13 TVSEMPA, 2011

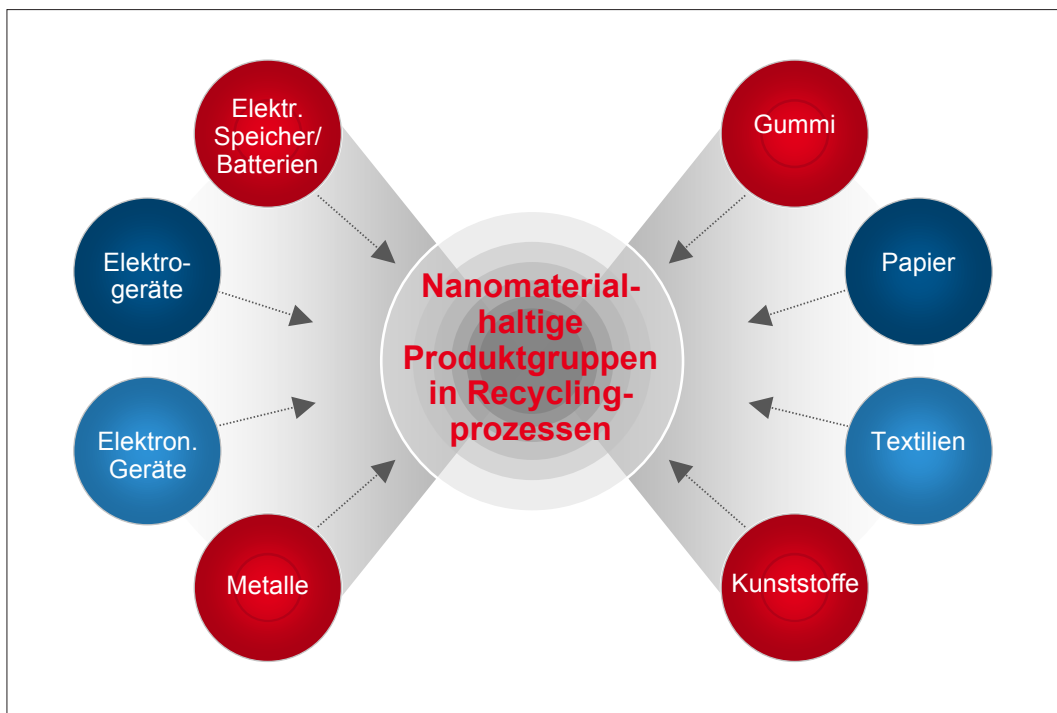
**Legende, Hintergrundfarbe**  
 schlechte, ungenügend abgesicherte Datenlage o. keine Studien vorhanden  
 unsichere Datenlage, nur einzelne Studien vorhanden  
 relativ gute Datenlage, ausreichend für erste Abschätzung

Ergänzend zu den jeweiligen Ausführungen für einzelne Nanomaterialien soll darauf hingewiesen werden, dass z.B. M. Roller<sup>32</sup> sich dafür aus spricht, dass alle Nano-GBS (alveolengängige, granuläre biobeständige Stäube ohne bekannte, signifikante spezifische Toxizität wie z.B. Industrieruß, TiO<sub>2</sub>, Al-Oxid) aufgrund vorliegender Befunde für die inhalative Aufnahme als krebserzeugend gemäß der EU-Kategorie 2 der Richtlinie 67/548/EWG angesehen werden sollten.

■ Recyclingfähige Konsumprodukte mit Nanomaterialien

Auf Grundlage der Übersicht zu Kenndaten und Eigenschaften der Nanomaterialien wurden acht Produktgruppen für potenziell nanomaterialhaltige Konsumprodukte identifiziert, die keine reinen Verbrauchsgüter sind, wie z.B. Schmiermittel oder Kosmetika, und für die in Deutschland gängige Recyclingverfahren zur Aufbereitung und Wiederverwertung zur Anwendung kommen.

**Abbildung 4: Produktgruppen recyclingfähiger Konsumprodukte, die auch Nanomaterialien enthalten können**



Quelle: Prognos AG 2012

Innerhalb der Produktgruppen wurden für 22 einzelne Produktarten die verfügbaren Informationen zu Produktbezeichnungen, Herstellern, Art der eingesetzten Nanomaterialien, Anfallstellen für das Recycling, Nutzungsdauer und Hinweise auf künftige

32 (Roller, 2010, S. 58-59)

Entwicklungen des Einsatzes von Nanomaterialien in dem Produkt /der Produktgruppe in Tabelle 4 zusammengeführt.

Nachfolgend wurden die Produkte in zwei Kategorien eingeteilt:

- *Kategorie 1* (grau hinterlegt) umfasst damit die Produktarten, deren eingesetzte Nanomaterialien nicht primär toxisch sind und/oder die mehrere Nanomaterialien enthalten können und/oder die zusammen mit ähnlichen aber insgesamt sehr unterschiedlichen Ausprägungen als Produktmix in das Recycling gehen (z.B. Altpapier, Elektro-/Elektronikschrott).
- *Kategorie 2* (grün unterlegt) umfasst alle Produktarten, die einige (wenige) Nanomaterialien enthalten, mit denen nach vorliegenden Erkenntnissen grundsätzlich ein Toxizitätsrisiko durch inhalative Aufnahme verbunden sein könnte und die getrennt einem spezifischen Recyclingverfahren zugeführt werden, das allein auf diese Produktart zugeschnitten ist (z.B. Kunststofffolien, Li-Ionen-Akkus).

Die Produkte-/ bzw. Produktgruppen der ersten Kategorie wurden aus der weiteren Untersuchung ausgenommen, da spätere Aussagen zur Gesundheitsrelevanz oder zu Arbeitsschutzmaßnahmen nur dann getroffen werden können, wenn die aktuelle Datenlage eindeutige Hinweise auf ein Risikopotenzial der eingesetzten Nanomaterialien enthält. Gleichmaßen muss für die Einschätzung der Risikopotenziale auch eine Rückführung der Emissionen auf ein bestimmtes (Abfall-)Produkt bzw. Nanomaterial möglich sein, was bei einem Recycling von Produktgemischen nicht gegeben ist.

Es folgt die Bewertung der Produkte aus Kategorie 1 im Einzelnen:

- Speicherkarten, Festplattendichtungen, Lautsprecherboxen > mit hoher Wahrscheinlichkeit keine toxischen Effekte durch inhalative Aufnahme von Ferrofluiden bei Menschen, z.T. langlebige Produkte, kein spezifisches Recyclingverfahren für einzelne Produktarten vorhanden;
- Beleuchtungskörper und verschiedene elektronische Bauelemente und Halbleiter, Gehäuse für elektronische Geräte (Informations- und Kommunikationstechnikgeräte, Unterhaltungselektronik) sowie Elektrogeräte / Haushaltsgroß- und -kleingeräte > sehr großes Produktspektrum mit einer Vielzahl verschiedener Nanomaterialien, kein spezifisches Recycling der einzelnen Produktarten sondern Sammelaufbereitung als Elektronikschrott (Weiße Ware, Braune Ware, Elektro-Kleingeräte);
- Altautos (Metalle und Kunststoffe aus Abdeckhauben/Gehäuse & Innenraumverkleidungen von Autos > sehr großes Produktspektrum mit einer Vielzahl verschiedener Nanomaterialien, Recycling entweder getrennt wie z.B. die Altmetalle (verschiedenste Nanomaterialien z.B. in Metall-Lack, Abgasanlage, Radaufhängung)<sup>33</sup> oder energetische Verwertung einer Mischfraktion von Kunststoffen, Textilien u.a. als sogenannte Shredder-Leichtfraktion.

33 (Ostertag & Hüsing, 2008, S. 9)



- Fahrradreifen > kein spezifisches Recyclingverfahren vorhanden, Mengen im Vergleich zu Autoreifen nicht relevant
- Fahrradrahmen, Tennisschläger, Skistöcke mit CNT-Verstärkung > langlebige Produkte, kein spezifisches Recyclingverfahren vorhanden
- Druck- und Verpackungspapier, Foto-Inkjet-Papier > keine separate Erfassung als Einzelfraktion, kein spezifisches Recyclingverfahren vorhanden, Kenntnisse zu Art- und Menge der eingesetzten Nanomaterialien lückenhaft
- Textilien (Kleider) > mit hoher Wahrscheinlichkeit keine toxischen Effekte durch inhalative Aufnahme von Silber bei Menschen

Tabelle 2: Nanomaterialhaltige Konsumprodukte im Recycling

Produkt-kategorie	Produkt / Produktgruppe	Genaue Produktbezeichnung / Hersteller (ausgewählte Beispiele)	Wo fällt das Produkt fürs Recycling an?	Nutzungsdauer - wann fällt das Produkt fürs Recycling an?	Verwendetes Nanomaterial	Hinweise auf künftige Entwicklungen des Einsatzes von Nanomaterialien in dem Produkt / der Produktgruppe
Elektrische Speicher/ Batterien	Lithium-Ionen Batterien	Lithium Ionen Akkus, verschiedene Produktausführungen (A123 Systems)	Haushalte, Gewerbe	Eingige Wochen bis mehrere Jahre	Carbon Black  Nanophosphate	Als Leitfähigkeitssüße wird Carbon Black in der Elektroindustrie zur Herstellung von Elektroden und Kohlebürsten verwendet. (s. a. UBA 2010)  Nanomaterialien sind für die Elektrospinnertechnologie von großem Interesse. Der Grund besteht darin, dass ein Großteil der Ionen an der Oberfläche bleibt - oder sich in die Lücken von Schichtleiter-Materialien setzt - und nicht wie bei herkömmlichen Lithium-Ionen-Akkus vergleichsweise langsam in das Material diffundiert. Auch um vieles schnellere Ladezyklen werden erwartet. ( <a href="http://www.um-glessen.de/cms/ueber-uns/ressourcen/pm/pm03-10">http://www.um-glessen.de/cms/ueber-uns/ressourcen/pm/pm03-10</a> ). Aus diesen Gründen wird erwartet, dass Nanotechnologie den Markt durchdringen wird und es zukünftig fast ausschließlich Nanobatterien geben wird (VDI 2009). Erste Verfahren zum Recycling für Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge werden aktuell etabliert (z.B. Liho-Rec).
	Speicherkarten, Festplatten-Dichtungen u.ä. (Informations- und Kommunikationstechnikgeräte)	Mini-Notebook und Notebook von Samsung, Prozessor von AMD [RIVM 2011, S. 38 ff.]		fünf- zehn Jahre	Eisenoxid-Nanopartikel [VDI 2009, S.59], Ferrofluide [NanoCare, S. 18]	Ferrofluide werden künftig voraussichtlich abgelöst durch metallische Nanopartikel aus Eisen, Cobalt oder darauf basierenden Legierungen. Es wird in naher Zukunft ein Rückgang erwartet [VDI 2009, S. 57].
Elektronische Geräte	Lautsprecher (Unterhaltungselektronik)	Sony, Heco [RIVM 2011, S. 38 ff.]		> 10 Jahre	Ferrofluide [VDI RM S. 57]  ZnO	Der Markt für Ferrofluidanwendungen in Lautsprechern (zur Kühlung der Lautsprecherboxen) wird nicht mehr als Wachstumsmarkt angesehen. [Roadmap VDI S. 57]  ZnO: keine Hinweise
	Beleuchtungskörper und verschiedene elektronische Bauelemente und Halbleiter u.a. in Mobiltelefon, Computer o. Computermouse	Piezoelektrische Wandler, transparente leitende Oxide, Sensoren, Leuchtdioden oder Optoelektronik- und Spintronik-Bauelemente sowie als Halbleiter bei der Herstellung von blauen Leuchtdioden (LED), Flüssigkristalldschirmen (TFT), Varistoren (VDR) und Dünnschicht-Solarzellen.	E-Schrottsammlung, Wertstofftonne, Sperrmüll, Sortieranlagen	5 - 10 Jahre	CNT für Displays bei Samsung seit 2006 (OECD, S. 81)	CNT: Als ein entscheidendes Anwendungshemmnis der Kohlenstoff-Nanoröhren für kommerzielle Massenprodukte in Deutschland gilt die ungeklärte Frage nach ihrer Toxizität. [ROADMAP VDI, S. 36]. Hinweise aus Allianz / OECD, S. 9): Es bestehen zudem Schwierigkeiten, CNT mit anderen Materialien zu verbinden, ohne dass die Eigenschaften der CNTs dabei geändert werden. Desweiteren können die Produktionskapazitäten von Maschinen zur Herstellung von CNT nicht beliebig hochgefahren werden, bei 600g/Tag ist derzeit die Obergrenze. Für Produktionssteigerungen müssen demnach immer die Anzahl der Produktionsmaschinen erhöht werden.
	Gehäuse für elektronische Geräte (Informations- und Kommunikationstechnikgeräte und Unterhaltungselektronikgeräte)	diverse		5 - 10 Jahre	Industrieruß  CNT	Rußtypen mit hoher spezifischer Oberfläche und wellenartigen Aggregaten sind besonders leitfähig. Diese Leitfähigkeitssüße setzt man z. B. zur entzündlichen Ausrüstung in Kunststoffanwendungen ein. Carbon Black dient ferner zur Einfärbung und zum UV-Schutz von Kunststoffen ( <a href="http://www.nanopartikel.info">www.nanopartikel.info</a> ).  CNT: s. o.
Elektrogeräte / Haushaltsgrößen- und Haushaltskleingeräte	Waschmaschine, Kühlmaschine, Gefriergerät (Weiße Ware)	Samsung [RIVM 2011, S. 38 ff.]	Weiße Ware	10 Jahre	ZnO, SiO <sub>2</sub>	ZnO, SiO <sub>2</sub> ; keine Hinweise; Nanomaterialien in elektronischen Teilen und Kunststoffen sowie Lacken vermutet
	Staubsauger (Weiße Ware)	Samsung [RIVM 2011, S. 38 ff.]	E-Schrottsammlung, Wertstofftonne, Sperrmüll (Sortieranlagen)	10 Jahre	ZnO, SiO <sub>2</sub>	ZnO, SiO <sub>2</sub> ; keine Hinweise; Nanomaterialien in elektronischen Teilen und Kunststoffen sowie Lacken vermutet
Almetalle	Autoteile > Metallackierung	Mercedes Benz Autolacke (z.B. Mercedes Benz GL (Offroad))	Gewerblich als Eisen- o. Stahlschrott	> 10 Jahre	Keramik-Nanopartikel in Lacken (als Beimischungen z.B. TiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , Al-Oxide, Kohlenstoff-, ZnO- oder Silber-Nanopartikel)	Aluminium(hydro)oxide werden in der Farb- und Kunststoffindustrie als Verdickungs- und Füllmittel eingesetzt sowie um die Klebrigkeit herab und die Kratzfestigkeit herauf zu setzen. Auch die F abbrillanz von Lacken kann positiv beeinflusst werden.  Bei Oberflächenbeschichtungen und in Lacken soll amorphes SiO <sub>2</sub> hauptsächlich die Härte und Kratzfestigkeit der Oberflächen erhöhen. Zwar besitzt SiO <sub>2</sub> eine geringere Härte als das alternativ eingesetzte Aluminiumoxid, die Transparenz von Klarlacken mit Nano-SiO <sub>2</sub> ist jedoch deutlich besser ( <a href="http://www.nanopartikel.info">www.nanopartikel.info</a> ).

Tabelle 2 ff: Nanomaterialhaltige Konsumprodukte im Recycling

Produktkategorie	Produkt / Produktgruppe	Genaue Produktbezeichnung / Hersteller (ausgewählte Beispiele)	Wo fällt das Produkt fürs Recycling an?	Nutzungsdauer - wenn fällt das Produkt fürs Recycling an?	Verwendetes Nanomaterial	Hinweise auf künftige Entwicklungen des Einsatzes von Nanomaterialien in dem Produkt / der Produktgruppe
Kunststoffe	Fahrräder (Rahmen)	B4P Sempire (Blanchi)	Haus-/Spermmüll? > Sortieranlagen für Spermmüll, Gewerbeabfälle	> 10 Jahre	CNT	zu CNT s.o.
	Tennisschläger	Nano Titanium Tennisschläger (Head), Nano Ti Pro, Nano Ti Lite, Nano Ti Elite, Nano Ti Tour	Haus-/Spermmüll? > Sortieranlagen für Spermmüll, Gewerbeabfälle	> 10 Jahre	CNT Fullerene?	
	Skistöcke / Skier	Nitech (Exel)	Haushalte, Gastronomiebetriebe > Gelbe Tonne	> 10 Jahre	SiO <sub>2</sub>	Unzureichende Barriere des Werkstoffs PET gegenüber Gasen, fehlende Steifigkeit und Stärke des Materials und mögliche Freisetzung von hormonartig wirkenden Inhaltsstoffen können durch Beschichtung der PET-Flaschen mit SiO <sub>2</sub> oder anderen Nano-Tinmineralen (Polymerkompositen) behoben werden (pressetext austria, SRU 2011, S. 77)
	PET-Flaschen	Plesmax, KHS, Plesmax, DE Glaslin, Terra Pak, SVE BestPET, Kronas, DE Actis Lite, Sidel, Herkunft unbekannt Nanomer, Nanocer, USA Cloisite, Southern Clay Products, USA Honeywell USA, Amcor, AUS, Aegis OX, Bindex	Haushalte, Gewerbe > Hausmüll, Gelbe Tonne	1 Monat bei 60% Recyclinganteil von Neulackierungen (Wiederverwertung) befindet sich das PET einem langjährigen Kreislauf	SiO <sub>2</sub> , Titantrioxid	TIN wird eingesetzt, um das Polymergemisch schneller verarbeiten zu können (Gießen der PET-Flaschen). TIN verbessert die thermischen Eigenschaften des PET und führt zu höheren Produktionszahlen bei der Herstellung der Flaschen. Laut deutscher Bedarfsgegenstandsverordnung ist die Zugabe von Titantrioxid auf 20 mg TIN pro kg PET beschränkt (Bedarfsgegenstandsverordnung, S.98).
	Plastikfolien (Food-Verpackungen)	Aegis OX Bindex	Haushalte, Gewerbe > Hausmüll, Gelbe Tonne	Wochen	CNT, Al-Oxide	Al-Oxide werden in Plastik-Verpackungen eingesetzt, um die Dichtigkeit gegenüber Gasen und Geschmacksstoffen zu verbessern. Aluminium(hydro)oxide werden in der Farb- und Kunststoffindustrie als Verdickungs- und Füllmittel eingesetzt sowie um die Klebrigkeit herab und die Kratzfestigkeit herauf zu setzen. Auch die Farbbrillanz von Lacken kann positiv beeinflusst werden.
	Abdeckhauben/Gehäuse & Innenraumverkleidungen von Autos	diverse	Shreddieranlagen für Alautos > Fraktion Nichtmetalle	5 - 10 Jahre	mit Nano-Silikaten verstärkte Polymerkomposite	Polymer-Werkstoffe sind thermoplastische und duroplastische Kunststoffe sowie Elastomere. Einsatz Nanomaterialien in Polymeren zu einem gewissen Grad eingeführt (gemäß MUA 4/07; S. 9), weitere Entwicklungen sind nicht bekannt. Die Verwertung der Kunststofffraktion aus Alautos findet als Reduktionsmittel im Hochdruckprozess zum Ersatz für Kohle und Schwermetall statt. Chlorhaltige Kunststoffe (v.a. PVC) werden vorher abgetrennt. Sie kann zudem zur Energiegewinnung in dafür geeigneten Anlagen verbrannt werden.
	Autoreifen	Nahezu alle Autoreifen / z. B. S.drive Tire (Yokohama Tire Corporation)	Gewerblich	5 - 10 Jahre	Industrieruß (Carbon Black) als Füllstoff	Bereits heute Stand der Technik. Exzellenter Abriebwiderstand, besserer (reduzierter) Rollwiderstand (Treibstoffersparung), bessere Traktion, dadurch auch besseres Nassrutschverhalten (Abschlussbericht der AG 1 Nanomaterialien – Chancen für Umwelt und Gesundheit NanoDialog 2006 – 2008 / Fraunhofer-Gesellschaft, München, S. 6)
			Gewerblich	5 - 10 Jahre	Nano-SiO <sub>2</sub>	Wird Reifen neben industriell (Carbon Black) auch amorphes SiO <sub>2</sub> als Füllstoff zugesetzt, verringert sich der Rollwiderstand des Reifens und der Spritverbrauch sinkt um bis zu fünf Prozent (wenn auch nur geringfügig). Geringerer Hitzeaufbau im Reifen, dadurch Reduktion der Alterungseffekte in der Polymerstruktur und längere Haltbarkeit des Reifens. (Abschlussbericht der AG 1 Nanomaterialien – Chancen für Umwelt und Gesundheit NanoDialog 2006 – 2008 / Fraunhofer-Gesellschaft, München, S. 6)
		Continental Winterreifen	Gewerblich	5 - 10 Jahre	Nano-Zinkoxyd	Zusatz bei der Vulkanisation von Kautschuk; Verwendung als Katalysator, da sie eine rund zehnmal größere Oberfläche haben als kovalentes Zinkoxyd und je größer die Oberfläche, desto schneller läuft der chemische Prozess ab.
	Gummi	Fahrradreifen	Furious Fred Bicycle Tyres (Schwalbe) Marathon Extreme bicycle Tyres, Nobby Nic bicycle Tyres, Racing Ralph bicycle Tyres, Rocket Ron bicycle Tyres (Schwalbe)	Spermmüll aus Haushalten und gewerblich	5 - 10 Jahre	Carbon Black als Füllstoff Carbon Black als Füllstoff
		GP4000 Tyres, Digga Tyres, Speedking Tyres, Supersonic Tyres, Explorer Supersonic Tyres (Continental)	Gewerblich	5 - 10 Jahre	Rußpartikel im Nanobereich in der Compound Mischung "Black Chili"	s.o.

Tabelle 2 ff: Nanomaterialhaltige Konsumprodukte im Recycling

Produkt-kategorie	Produkt / Produktgruppe	Genaue Produktbezeichnung / Hersteller (ausgewählte Beispiele)	Wo fällt das Produkt fürs Recycling an?	Nutzungsdauer - wann fällt das Produkt fürs Recycling an?	Verwendetes Nanomaterial	Hinweise auf künftige Entwicklungen des Einsatzes von Nanomaterialien in dem Produkt/der Produktgruppe	
Papier	Druckpapier, Verpackungspapier	Keine Informationen zu Hersteller oder Produkten verfügbar.	Altpapiersammlung aus Haushalten und Gewerbe	Tage, Wochen	Siliziumoxide Al-Oxide als Additiv eingebunden in Papierstruktur (in Entwicklung) Polymemanopartikel	Im Bereich Nano und Papier wird aktuell viel geforscht. Vor allem für die Verpackungsindustrie wird eine großskalierte Anwendung vorausgesetzt. Einen großen Teil der Forschung ist auf Spezialanwendungen ausgerichtet, deren Rückführung in das Recycling nicht geklärt ist. Wie groß der Anteil an nanomaterialhaltigen Papieren in Zukunft sein wird, ist daher schwierig vorzusagen. In internationalen Verkaufsportalen (alibaba.com) gibt es TiO <sub>2</sub> sowie Silikonpulver für Anwendungen auf Papier in großen Mengen zu kaufen. In der Studie von Osterlag & Hüsg (2007) wird Papier als ein Beispiel für Anwendungen von Nanomaterialien genannt. Nähere Angaben zu Einsatzmengen und Verbreitung nanoskaliger Zusätze in der Papier- und Altpapierherstellung sind nicht verfügbar. Nach Einschätzung eines Experten der papiertechnischen Stiftung werden Nanomaterialien in Spezialanwendungen eingesetzt (Schulz, 2011), dazu gehören z.B. Hochglanzprospekte.	
	Foto Inkjet Papier	Beschichtung mit Aerosil (Evonik / de Gusa)	Hausmüll, Ausschuss in produzierendem Gewerbe (Gewerbeabfall)	Monate, Jahre (Ausschuss aus gewerblichen Unternehmen fällt laufend an)	SiO <sub>2</sub> ggf. weitere Metalloxide	Primärpartikel in Aerosil (SiO <sub>2</sub> ) liegen im Nanobereich (ca. 10nm) vor, aggregieren auf dem Papier zu Partikeln um 100-150 nm. Fachgespräch mit Herrn Schontfeld, Paperietechnische Stiftung (12.12.2011). Einsatzmengen und Verbreitung nicht bekannt.	
Kleider	Toner für Drucker und Kopierer	Aerosil als Komponente für hohe Rieselfähigkeit; Angaben über Tonierhersteller, von denen eine Einsatz von Nanomaterialien sicher bekannt ist, sind nicht verfügbar.	Toner-Recycling (gewerbliche Abfälle); Altpapier (Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Altpapiersammlung aus Haushalten und Gewerbe)	einige Wochen bis Monate	Carbon Black als schwarzes Farbpigment Eisenoxide SiO <sub>2</sub>	Toner bestehen i.d.R. aus einer Vielzahl von Komponenten (z.B. Kunstharze, magnetisierbare Metalloxide, Farbstoffe und andere Hilfsstoffe). Es wird eine genotoxische Wirkung für hohe Konzentrationen dieser Gemische beschrieben (diese ist jedoch bis heute noch nicht wissenschaftlich bewiesen (Heimholz zentrum, 2008)). Eine Fokussierung auf die Wirkungen von Nanomaterialien ist aufgrund der hohen Anzahl verschiedener und nicht bekannter Komponenten in Tonern nicht möglich. Für die zulässigen Emissionsraten aus Büromaschinen, Laserdruckern und Kopierern gelten definierte Grenzwerte (Siehe BR-Gesundheitliche Bewertung Nr. 014/2008, S. 4, Tabelle 1), um die Auflagen für das Umweltsymbol "Blauer Engel" zu erfüllen. Bei einer Belastung von 60 Mikrogramm lungenlängiger, Tonerslab pro Kubikmeter Raumluft wird das kurzlich vom Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) des Bundesinstituts für Arbeit und Sozialtas beschlossene Akzeptanzrisiko für krebszeugende Stoffe am Arbeitsplatz überschritten (Heimholz, 2008). Die TRGS 900 gibt einen allgemeinen Staubgrenzwert für Arbeitsplätze von 10 mg/cbm für die einatembare Fraktion und 3 mg/cbm für die alveolengängige Fraktion vor.	
	Socken	Medima ANTISEPT Socks		1 - 3 Jahre	Silber	Keine Informationen zu weiteren Entwicklungen, als Umwelwirkung von Nanosilber stehen die Wirkungen auf aquatische Ökosysteme und die Abwasserbehandlung im Vordergrund. s.o.	
	Funktionstextilien	Nano Line von Erima (Sportshosen und -shirts aller Art und für alle Zielgruppen).			1 - 3 Jahre	Silber	s.o.
		Regenjacke, Nano-Pocket Coat, Nano Regenhut, Nanohose, Nanoschurze (Pro-Idee)		Hausmüll, private Sammlungen	1 - 3 Jahre	Silber	s.o.
		Elements Nano-tex Jacken und Hosen für Erwachsene und Kinder, Nano Dry Shirts (Jack Wolfskin)		Hausmüll, private Sammlungen (gewerblich oder charitativ), Ausschuss in produzierendem Gewerbe (Gewerbeabfall)	1-3 Jahre	Nanofasern (unklar welche)	Produkte seit 2010 nicht mehr auf dem deutschen Markt, daher im Recycling ca. ab 2015 zu erwarten, Art der Fasern unbekannt
Unterwäsche	Badelexilien mit Sonnenschutz (z.B. Eddie Bauer Swim Shorts)			1-3 Jahre	TiO <sub>2</sub>	s.o.	
	Sportshirts und -leggings, Unterwäsche, Thermounterwäsche ANTISEPT (Medima)			1 - 3 Jahre	Silber	s.o.	

#### ■ Zukünftige Anwendungen von Nanomaterialien

Für die kommenden Jahre sind viele neue Anwendungen von Nanomaterialien geplant, die in dieser Studie noch nicht berücksichtigt werden können. Vor allem in den Bereichen Energieerzeugung, Energiespeicherung, in der Automobilindustrie sowie im Bereich Elektronik/Optik sind viele Anwendungen mit Recyclingrelevanz in der Entwicklung.<sup>34</sup> In Tabelle 3 wird eine Übersicht der wichtigsten Anwendungen sowie die zugehörigen Nanomaterialien gegeben, die zukünftig eingesetzt werden sollen.

Im Energiebereich häufen sich geplante Anwendungen für Batterien und Photovoltaikzellen. Hierzu werden in naher Zukunft große Fortschritte zu Effizienz, Preis, Materialintensität u.ä. erwartet. Im Bereich Automobilindustrie dient die Nanotechnologie künftig hauptsächlich zwei Zwecken, einerseits zur Reduzierung des Gewichtes im Leichtbau und andererseits zur Beschichtung von Oberflächen. Daneben sind auch bei Reifen sowie in der Autoelektronik weitere Anwendungen geplant.

Im Bereich Elektronik und Optik wird an der Anwendung verschiedener Nanomaterialien geforscht. Hier könnten vor allem die sogenannten Quantenpunkte eine wichtige Rolle einnehmen. Quantenpunkte können aus verschiedenen Materialien gefertigt werden und sind daher aus gesundheitlicher Perspektive schwieriger zu erfassen. Verbrauchsmaterialien z.B. für den Life-Science-Bereich sind i.d.R. nicht relevant für Recyclingverfahren und wurden hier nicht weiter berücksichtigt.

---

34 (ZTC VDI, 2009A)

Tabelle 3: Zukünftige Anwendungen von Nanomaterialien

Anwendung	Nanomaterial	Erste Produkte	Marktdurchdringung
<b>Auto</b>			
Leichtbaumaterialien für Automobil und Flugzeug	Aluminium, Magnesium, Nickel und Legierungen	2009	2012
Leichtbaumaterialien für Automobil und Flugzeug	Graphen	2013	2018
Leichtbaumaterialien für Automobil und Flugzeug	Kohlenstoff Nanoschäume		2016
Leichtbaumaterialien für Automobil und Flugzeug	Eisen / Stahl	2009	
Leichtbaumaterialien für Automobil und Flugzeug	Polymer Nanokomposite		2011
Leichtbaumaterialien für Automobil und Flugzeug	Gummi-Clay-Nanokomposite	2012	2017
Leichtbaumaterialien für Automobil und Flugzeug	Keramikmatrix mit Nanokohlenstoff		2012
Autoelektronik	Halbleitermaterialien		2008
Autoelektronik	Polymer Nanokomposite	2011	2017
Oberflächenbeschichtungen/Lacke	Aluminium, Magnesium, Nickel und Legierungen	2013	2017
Oberflächenbeschichtungen/Lacke	Aluminiumoxid	2009	2012
Oberflächenbeschichtungen/Lacke	Titanoxid		2011
Oberflächenbeschichtungen/Lacke	Eisen / Stahl	2009	2012
Oberflächenbeschichtungen/Lacke	Anorganisch-organische Hybridmaterialien	2013	2017
Oberflächenbeschichtungen/Lacke	Polymer Nanokomposite	2009	
Oberflächenbeschichtungen/Lacke	Kern-Schale-Nanopartikel	2009	2012
Transparente Materialien (Automobil)	Aluminiumdioxid	2009	2012
Reifen	Polymer Nanokomposite	2011	2017
Reifen	Gummi-Clay-Nanokomposite	2012	2017
Energieübertragung Auto	NM aus Eisen/Cobalt Legierungen	2013	2018
<b>Energie</b>			
Batterien	Graphit NM	2009	2012
Batterien	CNT	2013	2017
Batterien	Kohlenstoff Aerogel	2015	2020
Batterien	Aluminium, Magnesium, Nickel und Legierungen	2012	2017
Batterien	Metall Keramik Nanokompositbeschichtungen	2009	2012
Batterien	Nickelpulver	2012	2017
Batterien	Zinnoxid	2013	2016
Batterien	Polymer Nanokomposite	2012	2017
Brennstoffzellen	verschiedene NM	2013	2018
Solarzellen	Fullerene	2013	2018
Solarzellen	Gold NM	2013	2016
Solarzellen	Zinkoxid	2015	>2020
Solarzellen	Titanoxid		2016
Solarzellen	Dentritische Polymere	2018	
Solarzellen	Silizium Quantenpunkte	2011	2013
Solarzellen	Gallium-Indiumphosphid		2009
Solarzellen	Halbleiter Quantenpunkte	2015	2020
Solarzellen	Kern-Schale NP	2012	2017
Solarzellen	CNT	2017	
Solarzellen	Nanopartikeläre Metallpulver		2009
Solarzellen	Aluminiumoxid	2011	2015
Solarzellen	Polymer Nanostrukturen	2011	2012
Solarzellen	Nickel		2009
Windkraftanlagen	Graphen	2018	
Windkraftanlagen	Stahl mit nanokristalliner Oberflächenstruktur	2009	
Straßenbeleuchtung	Aluminiumdioxid	2009	2012
Organische Solarzellen	Polymer Nanokomposite	2011	2013
Polymer Solarzellen	Polymer Nanostrukturen	2011	2012
<b>Elektronik/Optik</b>			
Tinten, Toner	Dentritische Polymere	2012	2018
Flachbildschirme	Halbleiter Quantenpunkte	2010	2016
LED	Zinkoxid	2012	2015
LEDs	Halbleiter Quantenpunkte	2010	2012
Quantencomputer	Halbleiter Quantenpunkte	2018	> 2020
Tinte	Indium-Zinn-Oxid-Nanostrukturen	2013	2017
Tinten für druckbare Elektronik	Silber NM	2008	2013
Datenspeicherung	NM aus Eisen/Cobalt Legierungen	2009	2012
<b>Maschinen</b>			
Maschinenbauteile, Werkzeuge	NP aus Siliziumnitrid, Wolframcarbide, Carbide-Keramik, Bornitrid		2012
Schneidewerkzeug	Aluminiumdioxid		2013
<b>Verpackungen</b>			
Verpackungen für Nahrungsmittel	Polymer Nanokomposite	2011	
Verpackungen für Nahrungsmittel	Cellulose Nanofaser	2009	2012
<b>Anderes</b>			
Gummi	Polymer Nanokomposite	2012	2017

Quelle: ZTC VDI, 2009A

## 5.2 Mengenrelevanz

### Vorgehen

Für die vertiefte Betrachtung möglicher gesundheitlicher Auswirkungen von Nanomaterialien im Recycling wurden zwei Produkte/Produktgruppen aus Kategorie 2 als Fallbeispiele ausgewählt. Für diese wurden nähere Informationen zu den derzeitigen Umsatz- und Recyclingmengen der ausgewählten Recyclingstoffströme recherchiert, um Grundlagen für eine Bewertung der Mengenrelevanz zu erhalten.

### Ergebnis

Für die vertiefende Untersuchung möglicher Emissionen, die beim Recycling nanomaterialhaltiger Produkte u.U. mit Gesundheitsrisiken und zugehörigen Konsequenzen für den Arbeitsschutz einhergehen können, wurden aus den Recyclingstoffströmen der Kategorie 2 Autoreifen und PET-Flaschen ausgewählt.

Beide Produkte zeichnen sich dadurch aus, dass sie relativ kurzlebig sind, Nanopartikel enthalten, die potenzielle Risiken für die Gesundheit darstellen und dass ihr Produktstrom, sobald er zum Abfallstrom wird, in Deutschland in großem Umfang in etablierten, produktspezifischen Recyclingverfahren wieder aufbereitet wird.

Anhand von Desktop-Research, einzelnen Telefoninterviews, Prognos-interner Expertenkenntnisse zu Stoffströmen in Recyclingverfahren und einer Sichtung einschlägiger, aktueller Studien wurden folgende, nähere Informationen zur näheren Charakterisierung der zugehörigen Mengenströme im Recycling recherchiert (siehe Tabelle 4):

- Art und Menge der Nanopartikel pro Gewichtseinheit
- Derzeitige Nutzungsmenge des Produkts in Deutschland pro Jahr (Verbrauch)
- Anteil an Produkten mit Nanopartikeln an der Nutzungsmenge (Schätzung/Näherung)
- Recyclingmenge des Produkts in Deutschland pro Jahr
- Derzeitiger Anteil nanohaltiger Produkte im Recycling und künftige Entwicklung (Schätzung/Näherung)

Diese Aufbereitung der Mengenströme verdeutlicht, dass nanomaterialhaltige Autoreifen und PET-Flaschen im gesamten Recyclingstoffstrom mit relevanten Mengen vertreten sind.

**Tabelle 4: Mengenströme von Nanomaterialien in ausgewählten Recyclingverfahren**

Produkt / Produktgruppe	Verwendetes Nanomaterial	Menge Nanomaterialien (pro Stück)	Wie wurden die Nanomaterialien verarbeitet?	Derzeitige Nutzungsmenge des Produkts in Deutschland pro Jahr (Verbrauch)	Anteil an Produkten mit Nanopartikeln an der Nutzungsmenge (Schätzung/ Näherung)	Recyclingmenge des Produkts in Deutschland pro Jahr	Nanohaltige Produkte im Recycling (Schätzung/ Näherung), künftige Entwicklung
PET-Flaschen	Si-Oxid Titanitrid	Die Zugabe von Titanitrid auf 20 mg TIN pro kg PET beschränkt. (1)	SiO <sub>2</sub> : Eingebunden in PET Schicht (multi layer) oder Beschichtung auf der innen- oder Aussenseite der Flasche TiN <sub>x</sub> : beigemischt in PET	Berechnung aus Rücklaufquote (93,5% = 400.000 t/a) > ca. 430.000 t/a	liegen keine Informationen vor	1,4 Mio t/a in Europa, davon 29% (~ 400.000 t/a bei einer Rücklaufquote von 93,5%) in Deutschland (2)	Informationen fehlen
Autoreifen	Industrieuß (Carbon Black) als Füllstoff	22 - 30% Carbon Black Anteil im Reifen (3)	Füllstoff für Kautschukmischung // in Kautschukmischung/ Polymere eingemengt (4)	Erstaussstattung: 27 Mio. (2003) (5) Ersatzgeschäft Deutschland 45 Mio. (2005) (6)	fast 100% - Stand der Technik	614.000 t in 2010, davon 215.000 t in werkstoffliche Verwertung, 260.000 t in die energetische Verwertung (7)	wahrscheinlich fast 100% da schon lange Stand der Technik
Autoreifen	Nano-SiO <sub>2</sub>	Ca. 30% Füllstoffe	Füllstoff für Kautschukmischung // in Kautschukmischung/ Polymere eingemengt (4)	Ersatzgeschäft Deutschland 45 Mio. (2005) (6)	Stand der Technik	s.o.	Informationen fehlen
Autoreifen (hier Winterreifen)	Nano-Zinkoxid	6% (8)	Chemikalien für die Vulkanisation	Winterreifen (nur Continental): 1,14 Mio. (2011) (9)	k.A.	s.o.	k.A. (Bekannt bislang nur bei Winterreifen von Continental, hier aber nur in Kleinserien)

Quellen:

- (1) Bedarfsgegenstandsverordnung, S. 98.
- (2) Weile, 2010, S. 17
- (3) Kuhlbusch & Nickel, 2009
- (4) [http://www.nmw.nrw.de/index.php?catalog=aktuelles/nachrichten/4\\_nanokonferenz\\_in\\_dortmund\\_ist\\_plattform\\_fuer\\_zukunftsgestaltung&back=2&catalog%3D%2Fmvelement%2Floadlogin%26seite%3D](http://www.nmw.nrw.de/index.php?catalog=aktuelles/nachrichten/4_nanokonferenz_in_dortmund_ist_plattform_fuer_zukunftsgestaltung&back=2&catalog%3D%2Fmvelement%2Floadlogin%26seite%3D)
- (5) Spiegel Online, 2004
- (6) Spiegel Online, 2005
- (7) EUWID Recycling und Entsorgung 29.2011, S. 11
- (8) Continental (2010) Referenzunterlagen Pkw.
- (9) Continental Pressemitteilung, 14.10.2011.



### 5.3 Gesundheitsrelevanz

#### Vorgehen

Einen Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchung ist die Frage, wann Nanomaterialien im Zuge des Recyclings nanomaterialhaltiger Konsumprodukte gesundheitlich relevant werden können und ggf. ein Gesundheitsrisiko darstellen. Hierzu wurde vorab grundsätzlich geklärt, wie der Begriff Risiko, mit dem mögliche schädliche Effekte für die menschliche Gesundheit oder die Umwelt ausgedrückt werden sollen, in diesem Zusammenhang zu verstehen ist. Anschließend wurden Optionen einer Freisetzung von Nanomaterialien in Recyclingverfahren sowie die möglichen gesundheitlichen Wirkungen durch Aufnahme von Nanomaterialien in den menschlichen Organismus beschrieben. Auf dieser Basis wurden exemplarisch für beide ausgesuchten Recyclingverfahren mögliche Ansatzpunkte für Emissionen von Stäuben bei Aufbereitung und Weiterverarbeitung von Autoreifen und PET-Flaschen identifiziert.

#### Ergebnisse

##### ■ Risikopotenzial und Eigenschaften von Nanomaterialien

Nach dem naturwissenschaftlichen Verständnis besteht das Risiko aus den Komponenten eines möglichen Schadens und der dazugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeit. Im einfachsten Fall ist das *Risiko R* definiert durch das Produkt der beiden Faktoren *Schaden S* und der *Wahrscheinlichkeit des Eintretens P*.<sup>35</sup>

$$R = S * P$$

In der Toxikologie gibt es in der Regel nicht ein Ereignis, das entweder eintreten kann oder nicht, sondern die Wahrscheinlichkeit für einen schädigenden Effekt wächst je mehr ein Organismus einem schädigenden Stoff ausgesetzt ist. Weiter ist der Eintritt eines Schadens abhängig von der Toxizität des Stoffes, die in der Regel von dessen Materialeigenschaften abhängt. Das Risiko ergibt sich somit aus dem Zusammentreffen der Exposition und der Toxizität.<sup>36</sup>

Beim Recycling durchlaufen die Abfälle aus Konsumprodukten diverse Prozesse, u.a. werden sie in einzelne Teile zerlegt, z.T. vermahlen, eingeschmolzen und wieder in eine Form gebracht, in der sie als Recyclingprodukt wieder eingesetzt werden können. Eine Freisetzung von Nanomaterialien ist bei mindestens vier verschiedenen Vorgängen innerhalb des Recyclings vorstellbar:

<sup>35</sup> (SRU, 1999, S. 50)

<sup>36</sup> (SRU, 1999, S. 51)

1. *Staubförmiger Abrieb*, der sich als Schwebstaub in der Luft verbreiten kann, kann insbesondere beim Transport, beim Zerkleinern und Vermahlen sowie bei Schüttvorgängen entstehen.
2. Werden die Abfälle der Konsumprodukten vorher gereinigt oder gewisse Komponenten in Bädern auf- bzw. abgelöst, so besteht die Möglichkeit, dass *Nanomaterialien in flüssige Medien übergehen* und sich schließlich im Reinigungs- und Abwasser ansammeln. Gleiches gilt für die Reinigung von Anlagen, Geräten und Böden, bei denen Stäube in Putzlappen und Reinigungswasser aufgefangen werden.
3. Beim Verbrennen von Produkten mit nanomaterialhaltigen Substanzen ist nicht auszuschließen, dass *Nanomaterialien in Rauchgase übergehen*.
4. In leicht löslichen oder stark erhitzten Medien ist theoretisch auch *eine Verdampfung von Nanomaterialien möglich*.

Durch die beschriebenen Vorgänge können Nanomaterialien in die Medien Luft oder Wasser gelangen. Diese Emissionen können sich direkt oder indirekt auf die Belastung am Arbeitsplatz auswirken und unter Zusammentreffen bestimmter Bedingungen ggf. schädigende Effekte auslösen, die ein potenzielles Risiko für die Beschäftigten darstellen. In Abbildung 5 werden die beschriebenen Zusammenhänge dargestellt.

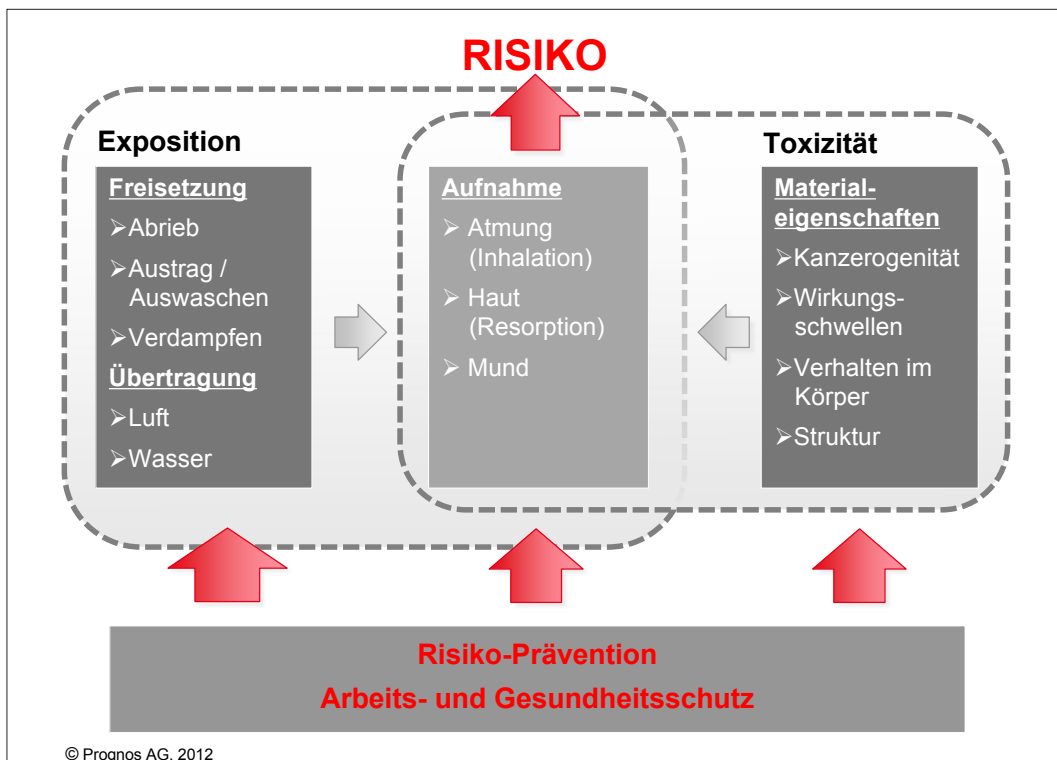
Es gibt drei Wege, über die Nanomaterialien in den Körper gelangen können und die daher auch für den Arbeitsschutz in der Recyclingindustrie von Bedeutung sind.

1. Sie können über den Mund (oral) eingenommen und dann entweder über die Mundschleimhäute oder über den Verdauungstrakt vom Körper aufgenommen werden.
2. Auch die Haut bietet eine Möglichkeit zur Aufnahme (dermal), auch wenn bisherige Studien zeigen, dass gesunde, unbeschädigte Haut eine gute Barriere gegenüber Nanomaterialien bildet.<sup>37</sup>
3. Der wahrscheinlich wichtigste Weg von Nanopartikeln in den Körper ist die Inhalation mit der Atemluft. Die Lunge ist ein sehr empfindliches Organ und insbesondere anfällig für sehr kleine Partikel, die aufgrund ihrer geringen Größe bis in die Lungenbläschen (Alveolen) vordringen können.<sup>38</sup>

<sup>37</sup> (DaNa, 2011) und (SRU, 2011, S. 144, 160)

<sup>38</sup> (SRU, 2011, S. 125)

Abbildung 5: Potenzielle Risiken durch Nanomaterialien in Recyclingprozessen



Quelle: Prognos AG

Wenn Nanomaterialien vom Körper aufgenommen wurden, so ist die Menge, ab der eine Wirkung ausgelöst wird (Wirkungsschwelle für akute oder chronische Wirkungen) und gleichzeitig die Toxizität des Stoffes entscheidend dafür, ob ein gesundheitlicher Schaden aufgrund einer akuten oder einer chronischen Belastung entsteht oder nicht. Das ist an erster Stelle von den Materialeigenschaften selbst abhängig. Wenn eine a) hohe Exposition und / oder b) hohe Toxizität des Materials besteht, wird von einer besonders kritischen Exposition ausgegangen.<sup>39</sup> Als „besonders kritische“ Expositionen sind auch wiederholte Belastungen mit geringen Einzeldosen einer persistenten Nanoform zu betrachten, die zu chronischen, potenziell nicht reversiblen Wirkungen im Organismus führen kann.<sup>40</sup>

Fachleute empfehlen für die Zwecke des Arbeitsschutzes hinsichtlich der gesundheitlichen Wirkungen von Nanomaterialien eine Einteilung in vier Gruppen:<sup>41</sup>

1. *Lösliche Nanomaterialien aus nicht toxischen Stoffen* > auch nach Inhalation ist ein Null-Risiko theoretisch denkbar.<sup>42</sup>

39 (UBA/BfR, 2010, S. 11)

40 (UBA/BfR, 2010, S. 12)

41 (IG BCE, 2011)

42 (Roller, 2010, S. 10)

2. *Biobeständige Nanomaterialien ohne spezifische toxische Eigenschaften oder faserförmige Strukturen:* Industrieruß, Titandioxid, Aluminiumdioxid, Aluminiumsilikat, Zirkonoxid > bei diesen ist grundsätzlich von krebserzeugenden Eigenschaften auszugehen.<sup>43</sup>
3. *Nanomaterialien mit chemischen Substanzen spezifischer Toxizität bzw. Kanzerogenität* z.B. Arsen und Cadmium (in Quantum Dots), Chrom(VI), Nickel und kristallines Siliziumdioxid (Quarz), ggf. auch amorphes Siliziumdioxid (Stäube aus Aerosil®).
4. *Biobeständige faserförmige Nanomaterialien:* z.B. Kohlenstoff-Nanoröhrchen (CNT) > können aufgrund ihrer asbestähnlichen Struktur eine kanzerogene Wirkung haben.<sup>44</sup>

Entscheidend für die Gefährlichkeit eines Stoffes sind zusätzliche Faktoren wie das Verhalten im Körper und seine Beständigkeit. Einige Nanomaterialien besitzen die Eigenschaft zu agglomerieren, d.h. sich in mehr oder weniger großen „Haufen“ anzusammeln. Dabei werden die einzelnen Partikel größer mit der Folge, dass diese nicht mehr überall eindringen können und die Oberfläche relativ zur Masse kleiner wird. Dadurch verlieren die Partikel einige ihrer nano-spezifischen toxischen Eigenschaften. Lösen sich die Partikel, die keine toxischen Substanzen enthalten im Körper auf, so können sie z.B. aus dem Körper ausgetragen werden, ohne dabei einen Schaden zu verursachen.<sup>45</sup> Wie sich die Partikel im Körper bzw. in den Zellen genau verhalten, darüber herrscht noch weitgehend Unklarheit.

Das Institut für Technikfolgenabschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften weist im Dossier vom Januar 2012 darauf hin, dass die besonderen Eigenschaften von Nanopartikeln besondere Herausforderungen für ihren Nachweis mit sich bringen:

„ Es gibt eine Reihe von Partikelzählern, die Nanopartikel in einer ausreichenden Genauigkeit erfassen können. [...] Angesichts der hohen Hintergrundkonzentration von natürlichen und durch menschliche Aktivität erzeugten Nanopartikeln besteht das vorrangliche Problem darin, zwischen natürlichen und synthetischen Nanopartikeln zu unterscheiden. Während die Konzentrationsmessungen vor Ort in wenigen Minuten durchgeführt werden können, ist die Analyse der in der Luft enthaltenen Nanopartikel, die Bestimmung ihrer Form und Zusammensetzung nur mit aufwendigen elektronenmikroskopischen Verfahren im Labor möglich. Dieser Sachverhalt stellt derzeit und auch in naher Zukunft das Hauptproblem einer Bestimmung der Konzentration von synthetischen Nanopartikeln dar.“

43 (Roller, 2010, S. 9)

44 (Roller, 2010, S. 17) und (SRU, 2011, S. 241 ff.)

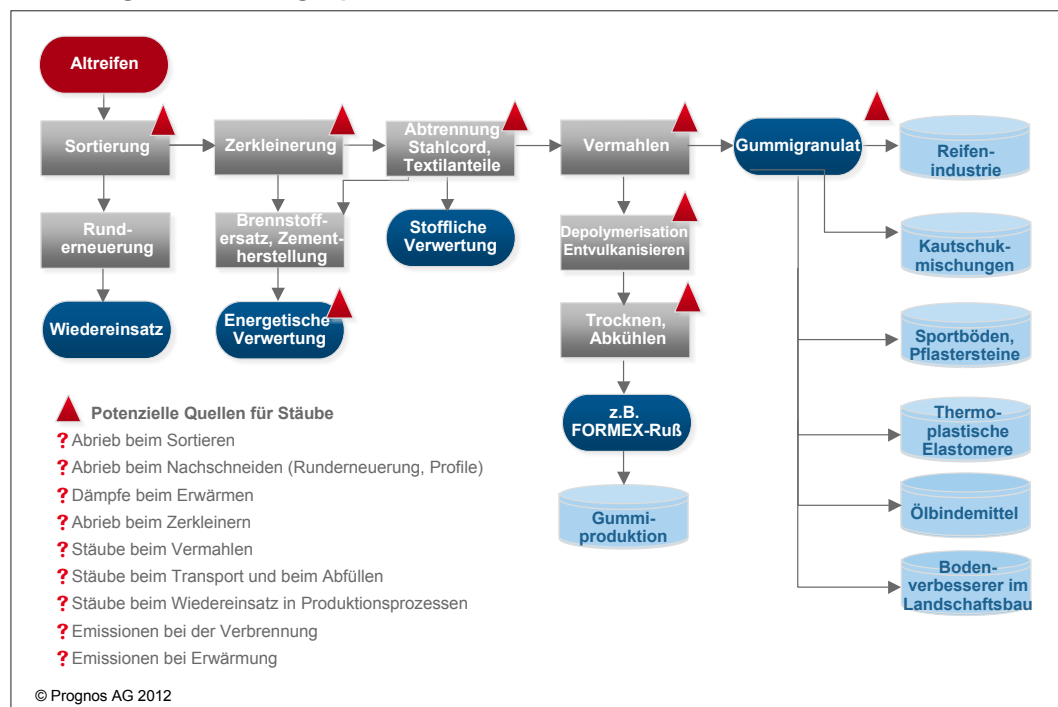
45 (Roller, 2010, S. 16)

■ Staubförmige Emissionen in Recyclingverfahren

Vor diesem Hintergrund wurden für beide ausgesuchten Recyclingverfahren in einer ersten Annäherung mögliche Emissionsquellen für Stäube bei der Aufbereitung und Weiterverwendung identifiziert.

Bei Altreifen handelt es sich um einen überwachungsbedürftigen Abfall, das heißt, dass die gesamte Verwertungskette der Stoffströme u.a. gegenüber den Behörden dokumentiert werden muss. Derzeit wird in Deutschland über die Hälfte der Altreifen als Ersatzbrennstoff verbrannt, ein Teil exportiert oder einem stofflichen Verwertungsverfahren zugeführt. Abbildung 6 gibt einen Überblick zu den gängigen Verwertungsmöglichkeiten für Altreifen und generell mögliche Emissionsquellen für Stäube in Abhängigkeit von der Ausgestaltung des einzelnen Verfahrens.

Abbildung 6: Verwertungsoptionen für Altreifen



Quellen: (Reschner, 2008); (BOS/ABF, 1995); (Kuhlbusch & Nickel, 2009)

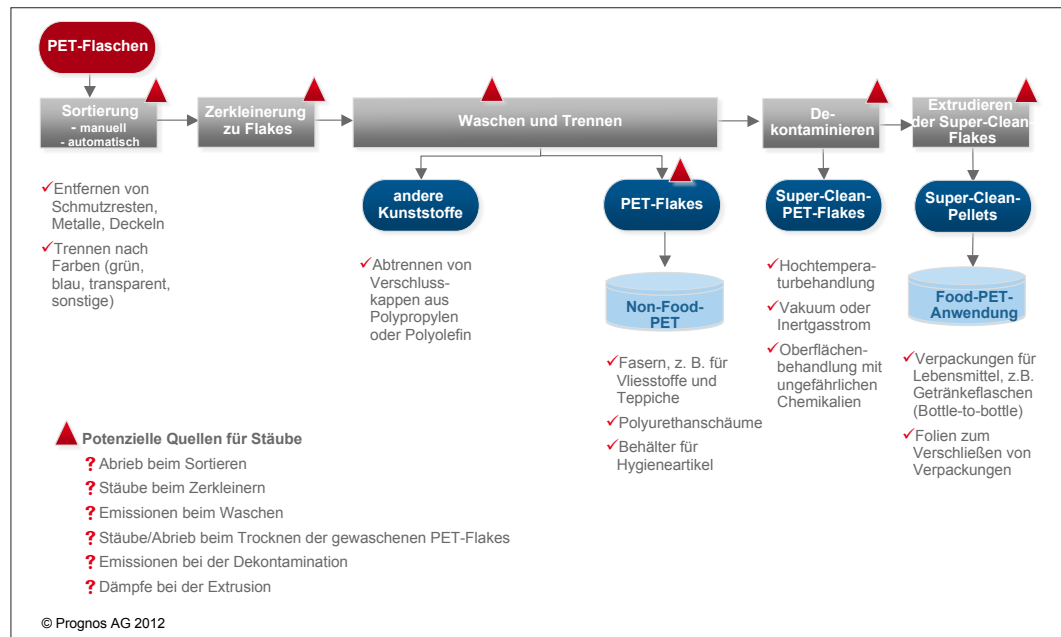
PET-Flaschen werden weltweit als Behältnisse für verschiedenste Konsumprodukte, bspw. Getränke, Hygiene- und Hausreinigungsartikel verwendet. In den meisten Ländern werden die Flaschen anschließend gesammelt und recycelt. In Europa wurden im Jahr 2009 insgesamt 1,36 Mio. Tonnen PET für das Recycling gesammelt. Dies entspricht einer Rücklaufquote von 48,4%.<sup>46</sup> Auf Deutschland entfielen gut 395 000 t der Sammelmenge.<sup>47</sup> Dabei wird mit dem PET-Recycling zum Teil ein geschlossenes Bot-

46 (Welle, 2011, S. 866)

47 (Welle, 2010)

tle-to-bottle-System angestrebt: knapp die Hälfte der PET Recyclate gingen 2009 in Europa bereits zurück in Verpackungsanwendungen.<sup>48</sup> Abbildung 7 gibt einen Überblick zum Recyclingverfahren für PET-Flaschen und generell mögliche Emissionsquellen für Stäube in Abhängigkeit von der Ausgestaltung des einzelnen Verfahrens.

**Abbildung 7: Verwertungsoptionen für PET-Flaschen**



Quellen: (Welle, 2010); (Welle, 2011); (Petcore (<http://www.petcore.org/content/pet-video> und <http://www.petcore.org/content/what-is-pet>))

Eine Emission von Stäuben ist im Recyclingprozess an mehreren Stellen denkbar. So könnten beispielsweise bei der Sortierung der gesammelten PET-Behälter durch Abrieb Stäube entstehen. Sicher ist die Entstehung von Stäuben bei der Verkleinerung der größeren Behälter in kleinere Flakes zur Weiterverarbeitung. Im Waschprozess können möglicherweise zusätzliche Emissionen auftreten. Die PET-Flakes werden dann von anderen Kunststoffen getrennt und wieder getrocknet, so dass auch in diesem Schritt mögliche Quellen für Abrieb und/oder Stäube liegen. Sollen PET-Flakes für die Nahrungsmittelbehältnisse weiter verarbeitet werden, so muss zusätzlich der Super-Clean-Prozess mit einer zusätzlichen Entfernung von Kontaminanten durchgeführt werden. Dank der Existenz verschiedener Technologien kann der Super-Clean-Prozess entweder mit der Extrusion von Pellets beginnen und die Dekontamination als letzten Schritt vornehmen oder die im Waschungsprozess abgetrennten PET-Flakes zunächst der Dekontamination unterziehen und diese Super-Clean-PET-Flakes anschließend zu Pellets formen. In beiden Prozessschritten ist eine Emission denkbar. Unklar ist jedoch, inwiefern der Prozess grundsätzlich in geschlossenen Anlagen stattfindet.

## ■ Zwischenfazit

Diese Untersuchung lehnt sich methodisch an das Vorgehen der systematischen Identifizierung prioritärer Ansatzpunkte für die Expositionsbewertung im Rahmen einer Risikobewertung an.<sup>49</sup> Die Aufarbeitung möglicher Emissionsquellen von Stäuben in Recyclingverfahren basiert ausschließlich auf Erkenntnissen aus Unterlagen und Studien, die zu den Recyclingverfahren oder Expositionssituationen aus Herstellungs- und Anwendungsprozessen vorliegen.

Die bisher gesammelten Informationen zu den ausgewählten Produkten, der Art, Menge und Eigenschaften des eingesetzten Nanomaterials und den möglichen Entstehungsorten und -prozessen von staubförmigen Emissionen innerhalb der Recyclingprozesses werden wie folgt bewertet:<sup>50</sup>

- Den eingesetzten Nanomaterialien wie z.B. Carbon Black und Titanitrid werden potenziell Gesundheitsrisiken beim Einatmen ihrer nanoskaligen Stäube zugeschrieben. Die identifizierten Optionen für mögliche Emissionsquellen in den betrachteten Recyclingverfahren liefert erste Hinweise darauf, dass emittierte Stäube unter Umständen auch Nanomaterialien enthalten könnten, die in den Konsumprodukten eingesetzt worden waren.
- Bisher gibt es keine robusten Monitorsysteme für die Bestimmung von Nano-Aerosolen.<sup>51</sup> Folglich kann bisher nicht bewiesen werden, dass in Aufbereitungsverfahren von nanomaterialhaltigen Konsumprodukten keine Nanomaterialien (hier: Carbon Black, CNT, Zinkoxid, Silicium-Oxid, Titanitrid) freigesetzt werden.
- Für die mögliche Belastungssituation der beschäftigten Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer sind zusätzlich dazu Intensität und Dauer von Emissionssituationen von Bedeutung, die insbesondere von der Verfahrensführung des Recyclingprozesses und seiner technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen (Abluftreinigung usw.) abhängen.

Solange die Wahrscheinlichkeit einer Exposition gegenüber den betreffenden Nanopartikeln nicht sicher ausgeschlossen werden kann, besteht theoretisch ein Risiko, dass ohne wirksame Präventivmaßnahmen in Abhängigkeit von Dosis und Dauer der Emissionsbelastung durch potenziell nanomaterialhaltige Stäube in Recyclingprozessen gesundheitliche Risiken entstehen können. Aufgrund der großen Wissenslücken zu den Eigenschaften der Nanomaterialien, den Bedingungen einer Wiederfreisetzung im Recycling und den auf absehbare Zeit bestehenden Defiziten bei der Staubmessung ist Aufklärung und eine wirksame und umfassende Prävention für den Gesundheitsschutz der Beschäftigten im Recycling sehr zu empfehlen.

49 Fraunhofer ISI in: (Ostertag & Hüsing, 2008, S. 5)

50 Zugehörige technische Details sind nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

51 (ITA/IÖWb), 2012, S. 2)

## 5.4 Regelwerke und Regelungsbedarf

### Vorgehen

Zuerst wurden als Bewertungsgrundlage bestehende Regelwerke und Schutzmaßnahmen für Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer zur Verringerung von Arbeitsplatzbelastungen durch Staubemissionen aufbereitet. Anschließend wurde geklärt, ob bekannte Schutzmaßnahmen aus dem Bereich der Herstellung und Verarbeitung nanomaterialhaltiger Produkte auf die Emissionssituation im Recyclingverfahren übertragen werden können, um das Risiko einer Exposition von Arbeitnehmern durch Anwendung Schutzmaßnahmen zu minimieren.

### Ergebnisse:

Während Produktion und Weiterverarbeitung können Nanomaterialien freigesetzt werden, gleiches ist bei Aufbereitungsprozessen nanomaterialhaltiger Produkte möglich, bei denen Stäube und ggf. Ultrafeinstäube in nicht näher bekannter Menge und Zusammensetzung (Gefährdungspotenzial) entstehen. Nanomaterialien sind eine besondere Form von Chemikalien, die damit u.a. unter die gesetzlichen Regelungen der Arbeitsschutz-, Chemikalien-, Arzneimittel-, Medizinprodukte-, Lebensmittel-, Futtermittel-, Kosmetik-, und Waschmittelverordnung sowie das Bundesimmissionsschutzgesetz fallen.<sup>52</sup> Im bisherigen Umweltrecht finden sich keine speziell auf die Regulierung von Nanomaterialien zugeschnittenen Maßnahmen.<sup>53</sup> Eine Anpassung der Gesetze für die besondere Berücksichtigung von Nanomaterialien ist gemäß des Berichts der Bundesregierung zum Veränderungsbedarf des bestehenden Rechtsrahmens für Anwendungen der Nanotechnologie zunächst auch nicht vorgesehen.<sup>54</sup> Im Folgenden werden die Regelwerke näher betrachtet, die in Bezug auf Recyclingverfahren von nanomaterialhaltigen Konsumprodukten relevant sind.

Auf europäischer Ebene ist das seit dem 01. Juni 2007 geltende *europäische Chemikaliengesetz REACH (Registration, Evaluation, Authorisation of Chemicals)* besonders zu erwähnen. Die ersten kompletten Anmeldungen von großvolumigen Stoffen, die unter REACH eingereicht wurden, betreffen Nanomaterialien.<sup>55</sup> Zu den bereits registrierten Produkten, die nanoskalige Partikel enthalten, gehören u.a. Carbon Black, Mehrwandige Kohlenstoffnanoröhrchen / Graphit (CNT), Siliziumdioxid, Zinkoxid sowie Titandioxid (European Chemical Agency (ECHA)).

Nano-Silber findet sich hingegen nicht unter den bereits im Rahmen von REACH registrierten Chemikalien, da nanoskalige Versionen von makroskaligen Stoffen als „nicht

52 [http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dssid=338&dsmid=12141#dstitle\\_69796](http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dssid=338&dsmid=12141#dstitle_69796)

53 (SRU, 2011, S. 407)

54 (Bundesregierung, 2007, S. 4)

55 (NanoCare, 2009, S. 9)



exklusive“ Nanomaterialien eingeordnet und damit auch nur die Eigenschaften des makroskaligen Stoffs bewertet werden (so genannte Bulk-Betrachtung).

Um das Risiko einer gesundheitlichen Gefährdung zu minimieren gilt es grundsätzlich auf Basis des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG) § 1 (1) „Menschen, [...] vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen.“ Nach § 1 (2) „[...] dient dieses Gesetz auch der integrierten Vermeidung und Verminderung schädlicher Umwelteinwirkungen durch Emissionen in Luft, Wasser und Boden unter Einbeziehung der Abfallwirtschaft, um ein hohes Schutzniveau für die Umwelt insgesamt zu erreichen, sowie dem Schutz und der Vorsorge gegen Gefahren [...] soweit es sich um genehmigungsbedürftige Anlagen handelt.“ Das ist bei Anlagen zur Behandlung von Abfällen – Recyclinganlagen – der Fall. In § 3 (1) – (4) BImSchG werden die wichtigsten Begriffe wie folgt bestimmt:

(1) *Schädliche Umwelteinwirkungen* im Sinne dieses Gesetzes sind Immissionen, die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen.

(2) *Immissionen* im Sinne dieses Gesetzes sind auf Menschen [...] einwirkende Luftverunreinigungen [...].

(3) *Emissionen* im Sinne dieses Gesetzes sind die von einer Anlage ausgehenden Luftverunreinigungen [...].

(4) *Luftverunreinigungen* im Sinne dieses Gesetzes sind Veränderungen der natürlichen Zusammensetzung der Luft, insbesondere durch Rauch, Ruß, Staub, Gase, Aerosole, Dämpfe oder Geruchsstoffe.

Übertragen auf Recyclingverfahren von Konsumprodukten, bei denen in der Herstellung Nanomaterialien eingesetzt worden sind, heißt das aufgrund des bisher nicht auszuschließenden Risikopotenzials bei einer Wiederfreisetzung nanomaterialhaltiger Ultrafeinstäube, dass

- a. die (Wieder-)Freisetzung von Nanomaterialien zu vermeiden und
- b. gleichzeitig die *Gefährdung* der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die durch eine dermale und / oder inhalative Aufnahme unvermeidbarer Emissionen von Nanopartikeln entstehen könnte, zu *verhindern bzw. soweit wie möglich zu minimieren* ist.

Vor dem Hintergrund, dass bisher keine Immissionsschutzwerte für nanoskalige Stäube und keine Emissionsgrenzwerte in der TA-Luft festgelegt sind, validierte und standardisierte Messverfahren zur Ermittlung von Nanomaterialhaltigen Emissionen fehlen und zudem der Stand der Wissenschaft auch keine Grundlage für eine normative Grenzwertfestsetzung bietet<sup>56</sup>, ist derzeit ein vorsorgeorientierter Umgang mit Nanomateri-

<sup>56</sup> (SRU, 2011, S. 412)

alien im Immissionsschutzrecht nicht möglich. Dennoch bestehen Möglichkeiten der Prävention, die aufgrund der benannten und voraussichtlich länger währenden Defizite, zur Anwendung kommen können.

## Vermeidung von Emissionen

Zur Prävention eines Kontakts mit Nanomaterialien steht an erster Stelle, eine Exposition gänzlich zu vermeiden. Dies kann z.B. durch die Produktion (Wiederaufbereitung) in geschlossenen Systemen und Einsatz einer hochwirksamen Abluftreinigung (ggf. unter Unterdruck) oder durch Anpassung des Aufbereitungsverfahrens (Vermeidung der Staubentstehung) erreicht werden.

## Schutzmaßnahmen gegenüber Emissionen

Bei Arbeitsbereichen, in denen eine Emission von Nanopartikeln möglich ist, da z.B. keine geschlossenen Systeme realisiert werden können, sollten zusätzliche technische und organisatorische Maßnahmen wie Filter, Absaugeinrichtungen, wirksame lokale Entlüftungssysteme und persönliche Schutzmaßnahmen eingesetzt und zudem durch Arbeitsplatz- oder Expositionsmessung überwacht werden.

Da bei einem möglichen *dermalen Kontakt* eine Aufnahme gut vorstellbar ist, aber unbeschädigte Haut eine gute Barriere bildet, werden übliche Sicherheitsstandards wie beispielsweise das Tragen von Handschuhen vorgeschrieben.<sup>57</sup> Dabei empfiehlt das IFA, auf ausreichende mechanische Stabilität von Handschuhen und Schäden im Handschuhmaterial sowie die Überlappung der Handschuhe mit weiterer Schutzkleidung zu achten. Es wird darüber hinaus darauf verwiesen, dass gewobene Schutzkleidungsmaterialien einen schlechteren Schutz bieten als Membranmaterialien und zusätzlicher Chemikalienschutz ggf. notwendig wird.<sup>58</sup> Die Hessische Nanoinitiative verweist auf Versuche mit Graphitpartikeln zwischen 20 und 100 nm, bei denen keine Durchdringung von Schutzhandschuhen aus Kunststoff gemessen werden konnte. Versuche mit Schutzanzügen weisen auf den stärkeren Schutz vor Graphitpartikeln zwischen 40 und 80 nm durch Anzüge aus Polyethylen im Vergleich zu Anzügen aus Baumwolle und Polypropylen.<sup>59</sup>

Hinsichtlich einer *möglichen inhalativen Aufnahme (Stäube)* wird von einem erhöhten gesundheitlichen Risiko ausgegangen. Daher sind besonders geeignete, persönliche Schutzmaßnahmen vorzusehen. Für einatembare und alveolengängige Stäube (Gesamtstaub und Feinstaub) gelten zwar grundsätzlich die *Arbeitsplatzgrenzwerte der Technischen Regel für Gefahrstoffe* (TRGS 900). Da Nanopartikel jedoch zu den Ultrafeinstäuben zählen, die aufgrund ihres ubiquitären Vorkommens an staubexponierten

57 (IG BCE, 2011, S. 16)

58 <http://www.dguv.de/ifa/de/fac/nanopartikel/schutzmassnahmen/index.jsp>

59 (HMWVL, 2009, S. 25)

Arbeitsplätzen von diesen Allgemeinen Staubgrenzwerten ausgenommen sind, existieren für Nanopartikel derzeit keine eigenen Grenzwerte.

Die IG BCE weist darauf hin, dass „abgesehen von löslichen Nanomaterialien ohne gesundheitsschädigende Wirkung [...] bei Tätigkeiten mit Nanomaterialien mindestens ein Schutzniveau wie für biobeständige Ultrafeinstäube erforderlich (ist). Für solche Stäube bietet der Allgemeine Staubgrenzwert keinen ausreichenden Schutz. Angesichts ernstzunehmender Hinweise auf krebserzeugenden Wirkung scheint nach gegenwärtigem Wissensstand *mindestens ein Schutzniveau erforderlich, bei dem Belastungen von 100 µg/m<sup>3</sup> nicht überschritten werden.*“<sup>60</sup> Es liegen jedoch noch keine allgemein akzeptierten Werte für zulässige Partikelkonzentrationen verschiedener Nanomaterialien vor, da aufgrund fehlender Daten derzeit keine Parameter für die Berechnung der Dosis für Nanopartikel definiert werden können.<sup>61</sup>

Das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) schlägt für den Umgang mit Nanomaterialien im Arbeitsschutz zur Überwachung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen in den Betrieben eine Reihe von Beurteilungswerten als Erhöhung gegenüber einer Hintergrundbelastung vor:

- Für Metalle, Metalloxide und andere biobeständige granuläre Nanomaterialien mit einer Dichte unter 6 000 kg/m<sup>3</sup> wird empfohlen, eine Teilchenzahlkonzentration von 20 000 Partikel/cm<sup>3</sup> im Messbereich von 1 bis 100 nm nicht zu überschreiten.
- Für biobeständige granuläre Nanomaterialien mit einer Dichte unter 6 000 kg/m<sup>3</sup> soll eine Teilchenzahlkonzentration von 40 000 Partikel/cm<sup>3</sup> im Messbereich von 1 bis 100 nm nicht überschritten werden.
- Für die Beurteilung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen gegen nanoskalige Partikel oder Agglomerate/Aggregate größer als 100 nm sieht das IFA Diskussionsbedarf. Es wird das Beispiel Titandioxid angesprochen. Für 500 nm große Aggregate von Titandioxid entsprechen 360 Partikel/cm<sup>3</sup> einer Massenkonzentration von 0,1 mg/m<sup>3</sup>. Mit heutigen Messgeräten für die Anzahlkonzentration wäre diese Konzentration allenfalls unter Quasi-Reinraumbedingungen messtechnisch zu erfassen. In typischer industrieller Umgebung wäre diese Konzentration angesichts einer ubiquitären Belastung von 20 000 Partikel/cm<sup>3</sup> oder mehr nicht nachweisbar.
- Aufgrund der zunehmenden Hinweise, dass biobeständige CNTs, die der WHO-Faser-Definition entsprechen oder vergleichbare Dimensionen haben, eine dem Asbest ähnliche Wirkung entfalten könnten, empfiehlt das IFA die Verwendung von CNTs mit Herstellerdeklaration. Sofern eine solche nicht vorliegt, wird auf Grundlage der Exposition-Risiko-Beziehung für Asbest eine vorläufige Faserkonzentration von 10 000 Fasern/m<sup>3</sup> zur Beurteilung vorgeschlagen.

60 (IG BCE, 2011, S. 16ff.)

61 (ITA/IÖWa), 2012, S. 3)

- Für ultrafeine Flüssigpartikel (wie z.B. Fette, Kohlenwasserstoffe, Siloxane) empfiehlt das IFA die Einhaltung der gültigen MAK-Werte bzw. AGW.<sup>62</sup>

Darüber hinaus wird empfohlen, gemäß der Schutzmaßnahmen für staubintensive Tätigkeiten in Anhang III Nr. 2 der Gefahrstoffverordnung, *grundsätzlich die Dauer der Exposition so weit wie möglich zu verkürzen*.<sup>63</sup>

Bestehende Arbeitsplatzgrenzwerte beziehen sich immer auf Stäube, nicht aber auf Ultrafeinstäube. Dennoch werden durch einzelne Arbeitsplatz-Grenzwerte Materialien angesprochen, die auch in nanoskaliger Form vorliegen können:

- Für *Druckertoner*, die u.a. auch mit nanomaterialhaltigen Komponenten versehen sein können, existiert bereits ein Grenzwert.<sup>64</sup> In Anwendung der vom Ausschuss für Gefahrstoffe des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales beschlossenen Risikogrenzen (Bekanntmachung 910) für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen ergeben sich für alveolengängigen Toner-GBS folgende Konzentrationswerte: Toleranzrisiko bei 0,6 mg/m<sup>3</sup>, Akzeptanzrisiko derzeit bei 0,06 mg/m<sup>3</sup> und ab 2018 bei 0,006 mg/m<sup>3</sup>.
- *Carbon Black* ist in Deutschland im Rahmen der Regulierung der maximalen Arbeitsplatzkonzentration (MAK) als kanzerogen der Kategorie 3B eingestuft. Das heißt es bestehen Anzeichen für einen Verdacht auf krebserregende Effekte. Für den Arbeitsplatz gilt der Allgemeine Staubgrenzwert, der zwischen alveolengängigen („Feinstaub“) und einatembaren Staubanteil unterscheidet. Wird beim Verarbeiten von Carbon Black eine Konzentration von 3 mg/m<sup>3</sup> alveolengängigem bzw. 10 mg/m<sup>3</sup> einatembarem Staubanteil überschritten, ist eine Objektabsaugung zu verwenden oder eine Staubmaske mit Partikelfilter P1 anzulegen.
- Die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) für Aluminiumoxid liegt bei 1,5 mg/m<sup>3</sup> als Feinstaub (alveolengängige Fraktion).

Verbindliche Arbeitsplatzgrenzwerte für Nanomaterialien existieren bisher weder auf nationaler noch auf internationaler Ebene. Die USA und Großbritannien haben für einzelne Materialien (z.B. Titandioxid, faserförmige Nanomaterialien) Vorschläge für Beurteilungsgrenzwerte als Erhöhung gegenüber einer Hintergrundbelastung gemacht. Auch das IFA macht Vorschläge für Metalle, Metalloxide und andere biobeständige granuläre Nanomaterialien.<sup>65</sup>

Demgegenüber steht eine Vielzahl von Wissenslücken, die einen erheblichen Forschungs- und Untersuchungsbedarf beschreiben. So fehlen neben Informationen zu möglichen Partikelkonzentrationen und Arbeitsplatzgrenzwerten für Ultrafeinstäube

62 <http://www.dguv.de/ifa/de/fac/nanopartikel/beurteilungsmassstaebe/index.jsp>

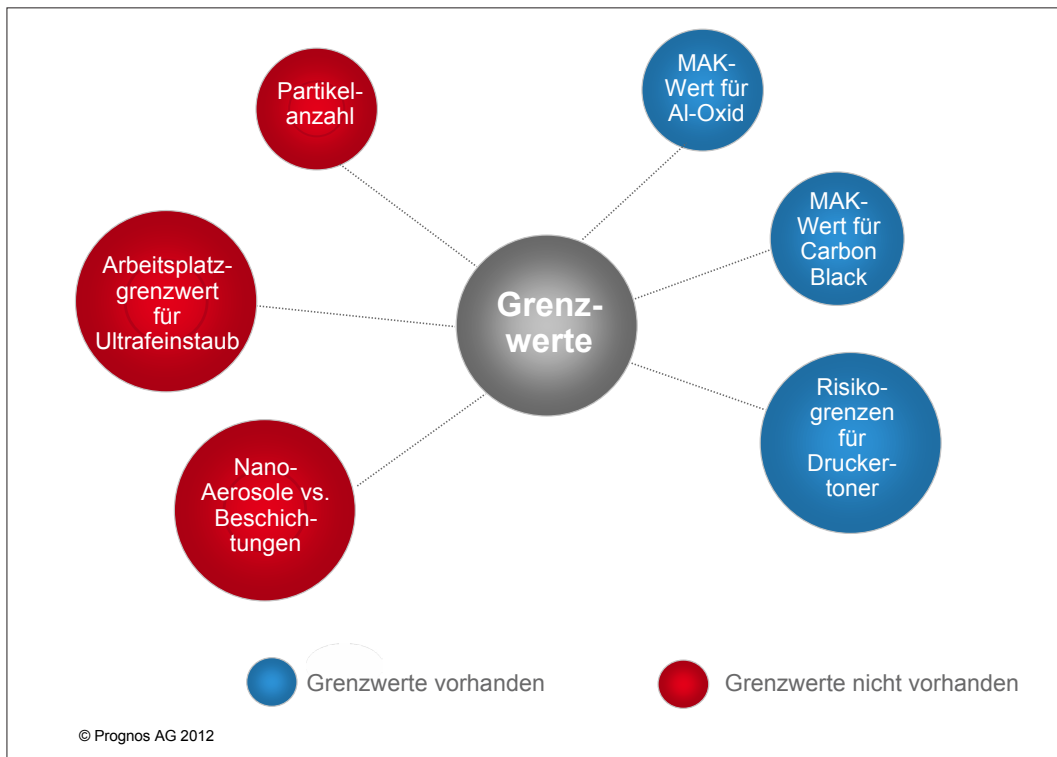
63 <http://www.dguv.de/ifa/de/fac/nanopartikel/schutzmassnahmen/index.jsp>

64 Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) hat für die Exposition gegenüber Toneremissionen aus Kopiergeräten eine Risikoabschätzung durchgeführt. <http://www.dguv.de/ifa/de/fac/nanopartikel/beurteilungsmassstaebe/index.jsp>

65 <http://www.dguv.de/ifa/de/fac/nanopartikel/beurteilungsmassstaebe/index.jsp>

und Nanomaterialien auch differenzierte Informationen zu dem (wahrscheinlich) unterschiedlichen Verhalten von verschiedenen Nanoobjekten und nanostrukturierten Materialien. Es ist beispielsweise davon auszugehen, dass für Nanopartikel in Aerosolen andere Grenzwerte notwendig sind als für Nanomaterialien, die fest in Beschichtungen eingebunden sind.

**Abbildung 8: Grenzwerte für Stäube und offene Fragen im Arbeitsschutz**



Einzelne Leitfäden beschreiben Vorsorgemaßnahmen zur Risikoprävention beim Umgang mit Nanomaterialien:

Der „Leitfaden für Tätigkeiten mit Nanomaterialien“ der Bundesanstalt für Arbeitsmedizin und Arbeitsschutz (BAuA) und des Verbandes der Chemischen Industrie (VCI) legt folgende aufeinander folgende Schritte fest:<sup>66</sup>

- *Substitutionsmöglichkeiten:* Bindung von staubförmigen Nanomaterialien in flüssigen oder festen Medien.
- *Technische Schutzmaßnahmen:* Durchführung von Arbeiten in geschlossenen Apparaturen, Ausstattung von staubemittierenden Anlagen, Maschinen und Geräten mit einer wirksamen Absaugung, Rückführung von abgesaugter Luft erst nach der Abluftreinigung.
- *Organisatorische Schutzmaßnahmen:* Auswahl und Betrieb von Maschinen und Geräten unter Freisetzung von möglichst wenig Staub, mindestens jährliche Prüfung

66 (BAuA/VCI, 2007, S. 5 ff.)

der Funktionsfähigkeit, Wartung und ggf. Instandsetzung der Einrichtungen, Unterweisung über die Notwendigkeit besonderer Maßnahmen und von Langzeitwirkungen von Stäuben, Verkürzung der Dauer der Exposition.

- *Personenbezogene Schutzmaßnahmen*: persönlicher Atemschutz (Filterklasse P3 oder P2, eine Vollmaske mit P3-Atemschutzfilter, ggf. sogar Atemschutzgeräte), geeignete Schutzhandschuhe [...] spezifische Schutzmaßnahmen beim Umgang mit reaktiven oder katalytisch wirksamen Nanomaterialien, regelmäßige Messung der Exposition zur Einhaltung der Arbeitsplatz-Grenzwerte.<sup>67</sup>

Diese Hierarchie von Schutzmaßnahmen wird auch in weiteren Leitfäden wie u.a. von der IG BCE<sup>68</sup>, der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg<sup>69</sup>, der Hessischen Nanoinitiative<sup>70</sup> sowie von der Schweizer Unfallversicherungsanstalt<sup>71</sup> empfohlen. Der BASF „Leitfaden zur sicheren Herstellung und bei Tätigkeiten mit Nanopartikeln an Arbeitsplätzen in der BASF SE“ sieht ebenfalls technische, organisatorische und persönliche Schutzmaßnahmen im Umgang mit Nanomaterialien vor.<sup>72</sup> Im „Bayer Code of Good Practice zum Umgang bei Herstellung und On-Site-Gebrauch von Nanomaterialien“<sup>73</sup> wird ergänzend darauf hingewiesen, dass „Arbeitsplätze nicht mittels Trockenwisch- oder Druckverfahren gereinigt werden (dürfen); vielmehr sind ein geeignetes HEPA (Hoch Effiziente Partikel Abscheidung) -Filtersystem und nasses Wischen erforderlich.“ Besondere Aufmerksamkeit ist auch bei Wartungsarbeiten an den zugehörigen Anlagen angezeigt.

Wriedt bestätigt in seiner Präsentation des Sachstands in der Arbeitsgruppe „Nanomaterialien“ im Ausschuss für Gefahrenstoffe die bereits 2004 von dem IFA (ehemals Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz (BIA)) geprägte Meinung, dass konventionelle technische Maßnahmen, die grundsätzlich gegen Stäube wirksam sind, ebenfalls Schutz gegen nanoskalige Partikelgrößen und ultrafeine Stäube bieten.<sup>74</sup> Das BIA hatte die Durchlässigkeit von filtrierenden Masken zum Schutz gegen Partikel (Glasfaserfilter der Filterklassen P1, P2 und P3) gegenüber Kochsalzaerosol mit Partikelgrößen kleiner als 1000 nm untersucht. Die Partikelgröße im Versuch betrug überwiegend ca. 40 nm. Im Ergebnis zeigte sich, dass der Durchlassgrad gemäß europäischer Normen für Filtermasken (DIN EN 149) sicher eingehalten wird<sup>75</sup>. Diese Ergebnisse bestätigten sich auch in Untersuchungen des NANOSAFE1-Projektes der Europäischen Union.

67 Die Filterklassen P1, P2 und P3 beschreiben aufsteigende Schutzniveaus. Filter der Klasse P1 bieten den geringsten, Filter der Klasse P3 den höchsten Schutz.

68 (IG BCE, 2011, S. 20ff.)

69 (LUBW, 2009, S. 26ff.)

70 (HMWVL, 2009, S. 20 ff.)

71 (SUVA, 2009, S. 6f.)

72 (BASF)

73 (IG BCE, 2011, S. 24)

74 (Wriedt, 2011)

75 (BIA, 2004, S. 44)

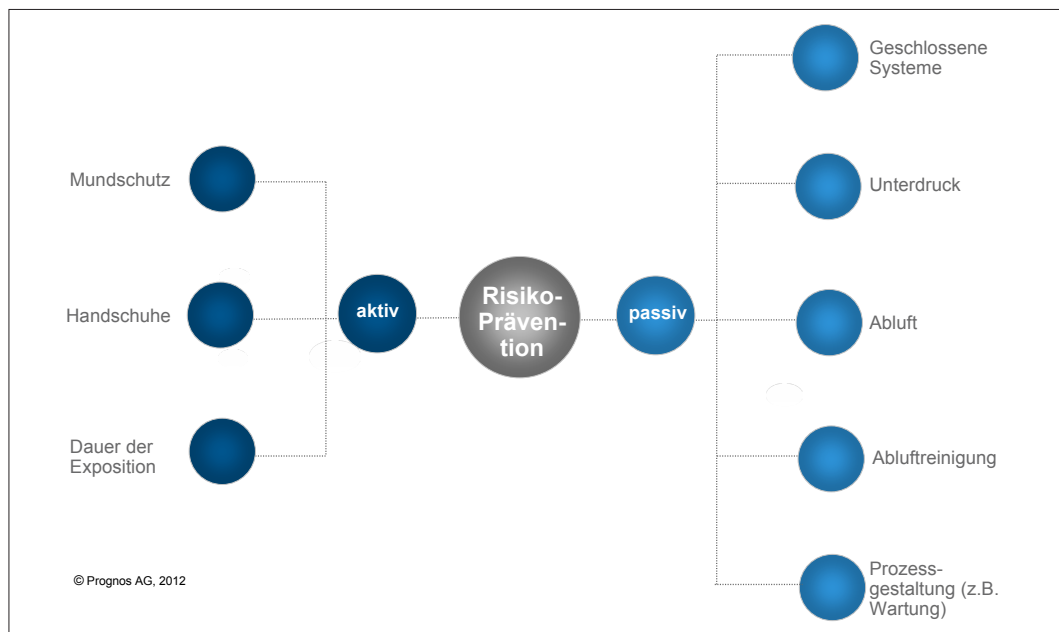
Hierbei wurde der Schutz durch Glasfaserfilter gegenüber Graphitpartikeln mit einem Durchmesser von zehn bis 400 nm untersucht.<sup>76</sup>

Dennoch gibt es Hinweise<sup>77</sup> darauf, dass Nanomaterialien besonderer Vorsicht und ggf. spezieller Maßnahmen sowie eines anderen Managements bedürfen: „Bei Absaugung an der Entstehungsstelle von Emissionen muss darauf geachtet werden, dass Strömungsgeschwindigkeiten nicht zu groß sind, da sonst Wirbelbildungen auftreten und leicht bewegliche Fraktionen an Nanomaterialien im Luftstrom fortgerissen werden. Bei Laborabzügen sollte die Einströmgeschwindigkeiten nicht zu hoch gewählt werden. Mitgerissene Nanoobjekte können sich in Ablufteinrichtungen niederschlagen.“

Der *BAuA/VCI-Leitfaden* wird derzeit überarbeitet, um weitere existierende Leitfäden aufzunehmen und eine Ausweitung auf weitere Branchen sowie andere Tätigkeiten wie Forschung und Entwicklung und die industrielle/gewerbliche Weiterverarbeitung von Nanomaterialien durchzuführen.<sup>78</sup>

In Abbildung 9 werden die verschiedenen aktiven und passiven Vorsorgemaßnahmen, die für den Umgang mit Nanomaterialien empfohlen werden, zusammengefasst.

**Abbildung 9: Aktive und passive Vorsorgemaßnahmen im Arbeitsschutz**



Der Einteilung von Nanomaterialien hinsichtlich der Bekanntheit ihrer gesundheitsschädigenden Wirkung folgend, gibt die IGBCE in ihren „Informationen zum

76 (Nanosafe, Safe production and use of materials. Are conventional protective devices such as fibrous media, respirator cartridges, protective clothing and gloves also efficient for nanoaerosols? Dissemination report, DR-325/326-200801-1, 2008, zitiert in: (EU-OSHA, 2009, S. 47))

77 (DGUV, 2011)

78 (Schäfer, 2011)

Arbeitsschutz“<sup>79</sup> in Bezug auf den Arbeitsschutz folgende zusätzliche Hinweise, die sich in ihrer Klassifizierung an den Ergebnissen von Markus Roller<sup>80</sup> zu krebserzeugenden Wirkungen von Nanomaterialien am Arbeitsplatz orientieren:

- *Nanopartikel, die Substanzen mit bekannter spezifischer Toxizität enthalten:* Arbeitsschutzmaßnahmen sollten sich an den spezifischen Eigenschaften der Stoffe ausrichten. Gleichzeitig sollte die Belastung geringer sein als für die gleichen Stoffe in größerer Form. Zudem sollte die erhöhte Toxizität von Nanomaterialien durch Beschichtung mit anderen Verbindungen berücksichtigt werden.
- *Nanopartikel mit einer bio-beständigen faserförmigen Gestalt:* da bei diesen Materialien asbestähnliche Wirkungen zunächst nicht ausgeschlossen werden können, empfiehlt die IG BCE entsprechende Arbeitsschutzmaßnahmen.
- *Granuläre bio-beständige Nanopartikel:* sofern sich der Stoff in Untersuchungen nicht als gesundheitsschädigend erwiesen hat, sollten sich Arbeitsschutzmaßnahmen an generellen Maßnahmen bei Belastungen mit Ultrafeinstäuben ausrichten. Da es Hinweise auf eine krebserzeugende Wirkung gibt, ist eine Minimierung der Belastung erforderlich.
- *Lösliche Nanopartikel ohne Anzeichen einer signifikanten Toxizität:* als Anhaltspunkt sollten Maßnahmen dienen, die für diese Stoffe getroffen werden, wenn sie in größerer Form vorliegen. Die unterschiedliche Partikelgröße muss bei Luftführungssystemen und Filtermaterialien berücksichtigt werden.

## Messung von Expositionen

Um die Wirksamkeit implementierter Schutzmaßnahmen tatsächlich feststellen zu können, wird weiterhin an der *Messung und Analyse von Nanopartikeln* gearbeitet.<sup>81</sup> Dabei geht es insbesondere darum, die Hintergrundpartikel messen zu können. Dies beinhaltet sowohl solche Partikel, die von außen in Innenräume eindringen als auch solche die durch Hintergrundaktivitäten wie Verbrennungsmotoren, Heizeinheiten oder Reinigungsgeräte entstehen. Gerade diese Messung von Hintergrundpartikeln gestaltet sich jedoch als sehr schwierig.<sup>82</sup> Bereits 1998 haben sich verschiedene Institutionen für Arbeitssicherheit in Abstimmung mit der Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe (so genannte MAK-Kommission) der Deutschen Forschungsgemeinschaft auf eine vorläufige Konvention zur Messung ultrafeiner Stäube an Ar-

79 (IG BCE, 2011, S. 16 ff.)

80 (Roller, 2010, S. 15 ff.)

81 Messgrößen zur Beschreibung ultrafeiner Partikel sind: (1) Numerische Konzentration, (2) Oberflächen- und Volumenkonzentration sowie (3) Biobeständigkeit (Löslichkeit).

82 (EU-OSHA, 2009, S. 25)



beitsplätzen geeinigt und seitdem weiter an der Ausarbeitung dieser Messkonvention gearbeitet.<sup>83</sup>

Die Konvention definiert ein ultrafeines Aerosolteilchen als Teilchen, dessen Mobilitäts-Äquivalentdurchmesser unter 0,1 Mikrometer liegt. Dies ist die Grundlage für die Teilchengrößenanalyse. Dabei wird primär die numerische, nicht die Massenkonzentration gemessen. Nach Möglichkeit soll die gesamte Partikelgrößenverteilung erfasst werden. Gemessen werden sollen Partikel von der Größe zwischen 10 nm und 600 nm mit einer Anzahlkonzentration zwischen wenigen tausend Partikeln pro cm<sup>3</sup> bis zu etwa 108 pro cm<sup>3</sup>.<sup>84</sup> Diese Konvention wurde zwischenzeitlich auch in die internationale Normung aufgenommen.<sup>85</sup>

In einer Literaturstudie der Europäischen Agentur für Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz (EU-OSHA) wurden fünf verschiedene Instrumente zur Messung der Exposition gegenüber Nanopartikeln am Arbeitsplatz identifiziert (siehe Abbildung 10).

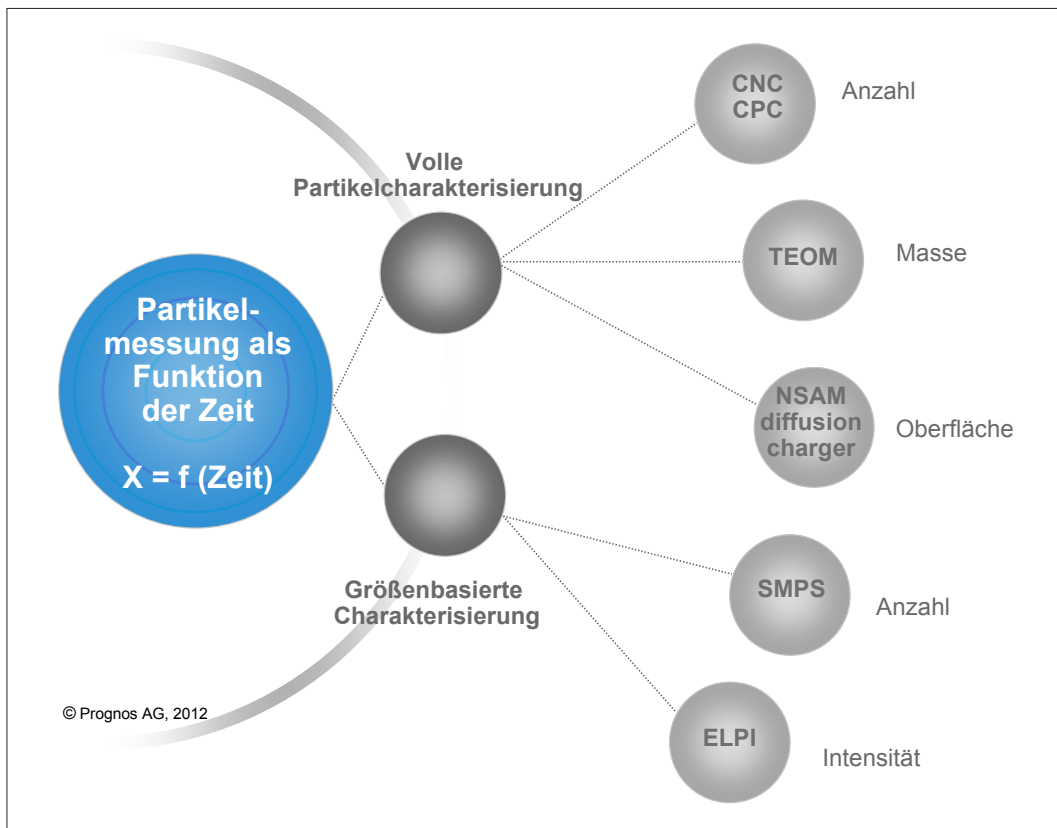
---

83 Folgende Institutionen waren an der Erarbeitung vorläufiger Konventionen zur Messung ultrafeiner Aerosole an Arbeitsplätzen beteiligt: Arbeitslivsinstitutet (AI) National Institute of Occupational Health, Schweden, Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA), Österreich, Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit (BIA), Deutschland, Finish Institute of Occupational Health (FIOH), Finnland, Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Aerosolforschung (ITA), Deutschland, Institut für Inhalationsbiologie des GSF-Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit, Deutschland, Institut für Gefahrstoff-Forschung der Bergbau-Berufsgenossenschaft (IGF), Deutschland, Österreichische Staub-(Silikose-)Bekämpfungsstelle (ÖSBS), Österreich, Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA), Schweiz, Univerza v Ljubljani – Visja tehniška varnosta sola (VTVS), Slowenien (Riediger & Möhlmann, 2001, S. 430) Eine weitere Übersicht über Akteure des Arbeitsschutzes im Bereich Nanopartikel und Nanomaterialien listet die Informationsplattform Nano-Sicherheit.de des Landes Hessen unter folgendem Link <http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dsmid=11646>.

84 <http://www.dguv.de/ifa/de/fac/nanopartikel/messtechnik/index.jsp>

85 Dabei handelt es sich um die ISO/TR 27628:2007 „Workplace atmospheres – Ultrafine, nanoparticle and nanostructured aerosols – Inhalation exposure characterization and assessment“.

Abbildung 10: Instrumente zur Messung von Nanopartikeln



Die Wirksamkeit dieser Messgeräte gegenüber Nanomaterialien und ihre jeweilige Spezifikation unterscheiden sich erheblich:

- *Condensation Particle Counter (CPC) und Condensation Nuclei Counter (CNC)* messen die Partikelanzahlkonzentration in der Außenluft und können so mögliche Nanopartikelemittenten im Arbeitsbereich ermitteln. Zwischen Partikelgrößen wird jedoch nicht unterschieden. Die Instrumente sind folglich vor allem zur Überwachung von Reinräumen geeignet, da für eine akkurate Messung niedrige Hintergrundbelastung benötigt werden.
- *Tapered Element Oscillating Microbalance-Instrumente (TEOM)* messen die Aerosol-Masse in der Luft. Sie sind oftmals als Referenzinstrumente an Messstationen für Luftqualität installiert, messen daher jedoch eher größere Partikel. Zusätzlich handelt es sich hierbei, durch Größe und Gewicht bedingt, um statische Geräte.
- Ein *Nanoparticle Surface Aerosol Monitor (NSAM)* misst die Oberflächenkonzentration von Aerosolen, die sich im tracheobronchialen oder alveolaren Bereich der Luftwege absetzen würden. Die Partikelgrößenverteilung kann dieses Gerät jedoch nicht messen. Darüber hinaus ist sein Gewicht hoch, es kann folglich nur als statisches Messinstrument genutzt werden.

- *Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)* messen die Größenverteilung der Partikel sowie deren Anzahlkonzentration für Partikel zwischen 5 Nanometern und 40 Mikrometern, sind jedoch sehr groß und schwer.
- Der *Electrical Low Pressure Impactor (ELPI)* mißt die Partikelanzahlkonzentration und ermittelt die Größendistribution der Partikelanzahl von Stäuben mit aerodynamischen Durchmessern zwischen 28 Nanometern und 10 Mikrometern. Es handelt sich auch hierbei um schwere, statische Geräte.<sup>86</sup>

Die Messgeräte und -verfahren zeigen eine Reihe weiterer Nachteile, insbesondere wenn es um die Bestimmung von Art und Menge emittierter Nanomaterialien am Arbeitsplatz geht:

- Der Blick auf existierende Geräte zeigt, dass diese *für eine kontinuierliche Messung der Belastungen am Arbeitsplatz eher weniger geeignet* sind. Es handelt sich im Regelfall um statische Geräte, deren Bedienung erhebliche fachliche Kenntnisse und Fähigkeiten in der Analytik erfordert. Die Schwierigkeit besteht insbesondere darin, dass *keine Standardmethode zur Messung von Nanopartikeln am Arbeitsplatz existiert*, sondern stets multiple Ansätze zum Einsatz kommen müssen.<sup>87</sup>
- Erste leichte Geräte, die in den vergangenen Jahren auf den Markt gekommen sind, erlauben *keine Abgrenzung von Nanopartikeln gegenüber ubiquitären Partikeln*.<sup>88</sup>
- Darüber hinaus ermöglichen derzeit verfügbare Messgeräte insgesamt zwar eine Bestimmung größendifferenzierter Teilchenanzahlkonzentrationen, aber *keine gleichzeitige Identifizierung der Teilchenart*. Spezifische Grenzwerte sind daher derzeit noch nicht ableitbar.<sup>89</sup>

Dennoch wurden vom IFA bereits erste Messungen mit einem Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) durchgeführt. Für eine Reihe von Bearbeitungsverfahren liegen Messergebnisse vor, von denen folgende ggf. auch für den Aspekt Freisetzung von Nanomaterialien in Recyclingverfahren grundsätzlich von Interesse sein können:<sup>90</sup>

- Schleifen, z.B. von Metallen, die Nanopartikel enthalten,
- Drehen und Fräsen bei Minimalmengenschmierung,
- Verarbeiten von Thermoplasten und
- Pulverbeschichtung.

Verschiedene Institutionen des Arbeitsschutzes arbeiten derzeit an der Verbesserung existierender Instrumente: Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) führt Untersuchungen zur *Entwicklung und Validierung eines personengetragenen Messsystems, eines so genannten Thermalpräzipitators*, zur Ermittlung von Expositionen gegenüber Nanopartikeln durch. Dabei werden die am Messtag freigesetzten

86 (European Chemical Agency (ECHA)) sowie (Plitzko & Dziurawitz, 2011)

87 (Amoabediny, et al., 2009, S. 4)

88 <http://www.dguv.de/ifa/de/fac/nanopartikel/messtechnik/index.jsp>

89 (Wriedt, 2011)

90 (Riediger & Möhlmann, 2001, S. 43ff.)

Partikel morphologisch charakterisiert und stofflich analysiert. Tests mit mono- und polydispersen Aerosolen zeigten, dass die Methode funktioniert. Derzeit wird an der Verbesserung des Geräts gearbeitet, da im Bereich der Nanotechnologie geringere Partikelanzahlkonzentrationen und kürzere Messzeiten anfallen als ursprünglich für das Gerät vorgesehen.<sup>91</sup>

Das EU-finanzierte Projekt *NanoDevice*<sup>92</sup> hat auch die Entwicklung eines tragbaren, registrierenden Messsystems zum Ziel. Dabei geht es um die Bestimmung der Anzahl- sowie der Oberflächenkonzentration von Nanopartikeln am Arbeitsplatz auf der Grundlage des Prototyps des Thermalpräzipitators, der als Modul an das tragbare System angekoppelt werden soll. Die Fortsetzung des Projekts *CarboSafe* arbeitet an einer Modifizierung des Thermalpräzipitators für die Messung von Kohlenstoffnanoröhrchen am Arbeitsplatz.

## 5.5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

### Zusammenfassung der Ergebnisse

Nanomaterialien sind in vielen Produkten enthalten, die auch in Recyclingverfahren wieder aufbereitet werden. Darunter befinden sich auch Nanomaterialien, von denen potenzielle Risiken ausgehen. Eine Kennzeichnung ist nicht verpflichtend. Im Recycling liegen nanomaterialhaltige und -freie Produkte in unbekanntem Anteil vermischt vor.

Es sind sowohl einzelne, leicht identifizierbare Nanomaterialien in Produkten verarbeitet als auch Produkte im Umlauf, bei denen mit einer Vielzahl verschiedener und teilweise nicht identifizierbarer Nanomaterialien zu rechnen ist.

Gesicherte Kenntnisse hinsichtlich des Verhaltens von Nanomaterialien in Recyclingprozessen existieren bisher nicht. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Nanomaterialien in Recyclingverfahren wieder in Form von nanoskaligen Partikeln freigesetzt werden.

Es liegen umfangreiche Leitfäden für den Umgang mit Nanomaterialien in Herstellungs- und Verarbeitungsprozessen vor, die – vorbehaltlich der benannten Kenntnislücken – einen zuverlässigen Schutz für Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer gewährleisten können.

Aus Präventionsgründen sollten diese Arbeitsschutzmaßnahmen in Recyclingverfahren von Nanomaterialhaltigen Produkten ebenfalls in vollem Umfang zur Anwendung kommen, v.a. die personenbezogenen Schutzmaßnahmen.

<sup>91</sup> <http://www.baua.de/de/Forschung/Forschungsprojekte/f2217.html?nn=948636>

<sup>92</sup> (BAuA, 2011, S. 6)

## Ergebnisse im Einzelnen und abgeleitete Empfehlungen

Die hiermit festgestellte Vielzahl recyclingfähiger, nanomaterialhaltiger Konsumprodukte verdeutlicht, dass durch den weitverbreiteten Einsatz von Nanomaterialien der Bereich Recycling berechtigterweise in die Untersuchungen der Gesundheits- und Umweltwirkungen durch Nanomaterialien einbezogen werden muss.

In diesem Kontext können wir *zwei Kategorien von Stoffströmen* im Recycling unterscheiden:

- a. Die erste Gruppe von (Recycling-)Stoffströmen ist sehr heterogen und dadurch gekennzeichnet, dass unterschiedlichste Produkte als Abfallgruppe gemeinsam erfasst werden. Zudem wurden in den unterschiedlichsten Produktformen viele verschiedene Nanomaterialien, die oftmals nicht alle bekannt sind, verarbeitet. Diese Gruppe umfasst u.a. Elektro- und Elektronikgeräte, Altfahrzeuge, Altpapier und einen Großteil der Kunststoffe.
- b. Die zweite Kategorie von (Recycling-)Stoffströmen ist dadurch gekennzeichnet, dass sich einzelne, i.d.R. bekannte Nanomaterialien in einer relativ homogenen Produktgruppe befinden. Hierzu gehören z.B. PET-Flaschen, Altreifen und Li-Ionen-Batterien.

Sicher ist, dass aufgrund der Vielzahl der verschiedenen Nanomaterialien, die in den verschiedenen, recyclingfähigen Produkten eingebunden sind und der Unklarheit darüber, inwieweit die eingesetzten Nanomaterialien gesundheitlich bedenklich sind, die Abschätzung potenzieller Risiken bei der Aufbereitung eine sehr große Herausforderung für die Zukunft darstellt. Der geplante Einsatz weiterer Nanomaterialien in Produkten zeigt darüber hinaus Folgendes:

Während zum jetzigen Zeitpunkt noch eine relativ überschaubare Menge verschiedener Materialien verwendet wird, wird sich dieses Feld in Zukunft massiv ausweiten. Zudem werden die einzelnen Partikel in Zukunft oft nicht mehr aus nur einem Element mit einer einfachen Struktur (wie z.B. Nanosilber) bestehen, da auch an komplexen Verbindungen von mehreren Elementen geforscht wird. Für den Arbeitsschutz sowohl in der Herstellung und Verarbeitung als auch in der Recyclingindustrie ist damit auch in Zukunft eine weitere Herausforderung verbunden, um ggf. zusätzliche Risiken rechtzeitig zu erkennen.

**Empfehlung:** *Wiederaufbereitungsverfahren für potenziell nanomaterialhaltige Konsumprodukte müssen künftig in den Fokus der Forschung zu Risikopotenzialen durch Einsatz von Nanomaterialien aufgenommen werden. Die einzelnen Stoffströme im Recyclingkreislauf sollten hinsichtlich Art und Menge eingesetzter Nanomaterialien detailliert untersucht werden, um das Ausmaß ggf. bestehender Risiken einschätzen zu können (s.u.).*

Die Untersuchungen zur Mengenrelevanz von Nanomaterialien im Recycling haben ergeben, dass es nahezu unmöglich ist, den Anteil der Nanomaterialien am Produkt und den Anteil der nanomaterialhaltigen Produkte an der gesamten Produktgruppe zu identifizieren. Aufgrund der großen Kenntnislücken besteht hierzu Forschungsbedarf (s.u.). Die Betrachtung des potenziellen Gesundheitsrisikos gegenüber nanomaterialhaltigen Emissionen im Allgemeinen und in Bezug auf Recyclingverfahren im Speziellen (siehe Kapitel 5.3) legt folgende Schlussfolgerungen nahe:

Solange in Recyclingprozessen die Wahrscheinlichkeit einer Exposition nanopartikelhaltiger Stäube nicht sicher ausgeschlossen werden kann, besteht theoretisch ein Risiko, dass ohne wirksame Präventivmaßnahmen in Abhängigkeit von Dosis und Dauer der Emissionsbelastung gesundheitliche Schäden durch potenziell nanomaterialhaltigen Stäube entstehen können.

**Empfehlung:** Aufgrund der großen Wissenslücken zu den Eigenschaften der Nanomaterialien und den auf absehbare Zeit bestehenden Defiziten bei der Staubmessung ist an erster Stelle *Aufklärung der Unternehmen der Recyclingbranche, Information der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer, Identifizierung der Emissionsquellen und ggf. betroffener Arbeitsplätze sowie eine wirksame und umfassende Prävention* für den Gesundheitsschutz der Beschäftigten im Recycling zu empfehlen.

In Recyclingverfahren, in denen nanomaterialhaltige Konsumprodukte aufbereitet werden, sollte die Expositionsbelastung durch nanopartikelhaltige Ultrafeinstäube, auf ein Minimum zu reduziert werden, indem

- > *die Freisetzung von Ultrafeinstäuben durch technische sowie geeignete organisatorische Maßnahmen so weit wie möglich vermieden oder minimiert wird und*
- > *geeignete Partikelfilter als Atemschutz (ggf. sogar Atemschutzgeräte) zur Pflicht erhoben werden.*

Analog zu den Empfehlungen der IG BCE für Tätigkeiten mit Nanomaterialien<sup>93</sup> sollte präventiv mindestens ein Schutzniveau wie für biobeständige Ultrafeinstäube gewährleistet werden. Für solche Stäube bietet der allgemeine Staubgrenzwert keinen ausreichenden Schutz. Erschwerend ist allerdings, dass für Ultrafeinstäube (Staubpartikel mit Größen < 100nm, auch als Feinststaub bezeichnet) noch keine Regelungen (Grenzwerte) bestehen<sup>94</sup>. Desweiteren scheint „angesichts ernstzunehmender Hinweise [...] mindestens ein Schutzniveau erforderlich, bei dem Belastungen von 100 µg/m<sup>3</sup> nicht überschritten werden“. Auch hierzu ist noch nicht das letzte Wort gesprochen und es bestehen Vorbehalte, da zum einen beschichtete oder funktionalisierte Nanomaterialien ggf. völlig andere gesundheitliche Wirkungen haben

93 (IG BCE, 2011, S. 18)

94 (ITA/IÖWb), 2012, S. 2)

und zum zweiten ungewiss ist, ob eine „Konzentrationsangabe für Nanomaterialien überhaupt aussagekräftig ist.“

Stärker als in Herstellung und Verarbeitung, wo v.a. akute und auch hohe Expositionsbelastungen auftreten können, ist bei der Wiederaufbereitung auch eine chronische Langzeitexposition in niedrigen Dosen in Betracht zu ziehen.

Große Wissensdefizite zu Toxizitätspotenzialen und Schwierigkeiten bei Messung und Nachweis von Nanopartikeln sowie demzufolge fehlende gesetzliche Vorgaben führen dazu, dass in den Bereichen Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse bereits heute der Prävention ein sehr hoher Stellenwert eingeräumt wird. Dementsprechend liegt eine Reihe von Leitfäden mit Ausführungsvorschriften für den Umgang mit Nanomaterialien vor. Der Bereich Recycling ist darin bisher nicht berücksichtigt.

**Empfehlung:** *Die vorliegenden Erkenntnisse und Leitfäden zum Gesundheits- und Arbeitsschutz sollten als Grundlage für eine Übertragung in den Bereich Recyclingverfahren dienen. Es wird empfohlen, bestehende Leitfäden entweder zu ergänzen oder einen eigenen Leitfaden zum Arbeitsschutz in Recyclingverfahren zu erstellen.*

## Forschungsbedarf

Auf Basis der Untersuchungsergebnisse zur Bedeutung von Nanomaterialien im Recycling wird ergänzend zu dem bereits in anderen Untersuchungen definierten, allgemeinen Forschungsbedarf zu Nanomaterialien ergänzend folgender Forschungsbedarf gesehen:

Zu den Bedingungen und Möglichkeiten einer Wiederfreisetzung von Nanomaterialien durch Stäube, die im Recyclingprozess entstehen, liegen bisher keine gesicherten Erkenntnisse vor. Insbesondere ist unklar, ob in festen Matrizen gebundene Nanomaterialien durch Zerkleinern oder Zermahlen wieder ihre nanoskalige Ausgangsform erreichen und als Ultrafeinstaub ein potenzielles Risiko für Mensch und Umwelt darstellen. Daher besteht Bedarf, Eigenschaften und Verhalten von potenziell risikobehafteten Nanomaterialien bei der Wiederaufbereitung in Recyclingverfahren zu klären.

Die einzelnen Stoffströme im Recyclingkreislauf sollten hinsichtlich Art und Menge eingesetzter Nanomaterialien detailliert untersucht werden, um genauere Informationen über das Ausmaß ggf. damit verbundener Risiken durch eine Wiederfreisetzung von Nanomaterialien zu erhalten.

Die Betrachtung von möglichen Auswirkungen von Nanomaterial-haltigen Produkten auf Umwelt und Gesundheit sollte zudem über den (ersten) Recyclingprozess hinausgehen, denn die Nanomaterialien werden – mit entsprechenden Konsequenzen für den Arbeitsschutz – auch in nachfolgende Wertschöpfungsstufen weitergegeben und im

(globalen) Kreislauf geführt (z.B. Altpapier, Kunststoffe, Gummi o.a.). Daher sollte geklärt werden, welche Nanomaterialien sich in Recyclingprodukten (z.B. Verwertung von PET zu Fasern für Vliesstoffe) befinden, die eine neue Nutzung erfahren und ggf. an anderer Stelle wieder ein Aufbereitungs- oder schließlich Entsorgungsverfahren durchlaufen. Das ist vor dem Hintergrund besonders relevant, dass auch an diesen Stellen ggf. nanomaterialhaltige Ultrafeinstäube freigesetzt werden könnten, ohne dass dies bisher bekannt ist.



## 6 Literaturverzeichnis

Amoabediny, Naderi, Malakootikhah, Koochi, Mortazavi, Naderi, et al.: Guidelines for safe handling, use and disposal of nanoparticle., IOP Publishing Ltd, 2009.

BASF. Leitfaden zur sicheren Herstellung und bei Tätigkeiten mit Nanopartikeln an Arbeitsplätzen in der BASF SE.

BAuA: Sicherheit und Gesundheit bei Tätigkeiten mit Nanomaterialien in Forschung, Entwicklung, Politikberatung und Transfer, 2011.

BAuA/VCI: Leitfaden für Tätigkeiten mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, /Verband der Chemischen Industrie, 2007.

BedGgstV, (10. April 1992): Bedarfsgegenständeverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. Dezember 1997, die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 7. Februar 2011 geändert worden ist. Stand 7.2.2011 . Bundesministerium der Justiz.

BfR: BfR-Delphi-Studie zur Nanotechnologie, 2009 .

BIA: Anforderungen eingehalten – Atemschutz gegen ultrafeine Partikeln. (B. I. Arbeitsschutz, Hrsg.) Arbeit und Gesundheit – aus der Forschung, 11/2004 .

BMU: Verantwortlicher Umgang mit Nanotechnologien – Bericht und Empfehlungen der NanoKommission der deutschen Bundesregierung 2011, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, 2011.

BOS/ABF: Altreifenrecycling nach dem FORMEX-Verfahren. (Umweltbundesamt, Herausgeber) Abgerufen am 06. 02. 2012 von [www.cleaner-production.de](http://www.cleaner-production.de).

Bundesregierung: Bericht der Bundesregierung zum Veränderungsbedarf des bestehenden Rechtsrahmens für Anwendungen der Nanotechnologie, Deutscher Bundestag, Drucksache 16/6337, 2007.

Continental AG: Ohne Titel, Informationsblatt Reifen, Continental.

Continental AG: Pressemitteilung – Winterreifenentwicklung ist Hightech-Forschung, Continental AG, 2007.

Continental AG: Reifengrundlagen Pkw, Continental AG, 2010.

DaNa: nanopartikel.info. Abgerufen am 1. November 2011 von <http://nanopartikel.info/>, 2011.

DGUV: Nanomaterialien im Labor – Hilfestellungen für den Umgang. DGUV – Fachausschuss Chemie – Arbeitskreis Laboratorien, 2011.

Eichert, C.: Nanomaterialien – Herausforderungen für die Recyclingindustrie, Vortrag, IFAT – Branchendialog NanoCleanTech, 14.09.2010, München, Encros GmbH, 2010.

EU-OSHA: Literature Review – Workplace exposure to nanoparticles, European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA) (Hrsg.), 2009.

Europäische Kommission: Pressemitteilung Definition Nanomaterial. Abgerufen am 18. Oktober 2011 von <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/11/1202&format=HTML&aged=0&language=DE&guiLanguage=en>

European Chemical Agency (ECHA). (kein Datum). Substance Register. Abgerufen am 1. Dezember 2011 von <http://echa.europa.eu/web/guest/information-on-chemicals/registered-substances#search>

Euwid: Altreifenverwertungsquote in Europa auch im Jahr 2010 auf hohem Niveau, EUWID Recycling und Entsorgung, 29/2011 .

Grimm, V., Heinrich, S., Malanowski, N., Pfirrmann, O., Schindler, E., Stahl-Rolf, S., et al.: Nanotechnologie: Innovationsmotor für DE, Hans-Böckler Stiftung, Nomos Verlagsgesellschaft, 2011.

HMWVL: Sichere Verwendung von Nanomaterialien in der Lack- und Farbenbranche – Ein Betriebsleitfaden, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden, 2009.

IG BCE: Nanomaterialien – Herausforderung für den Arbeits- und Gesundheitsschutz; Hannover, IG Bergbau, Chemie, Energie, 2011.

ITA/IÖW: Messung und Charakterisierung von Nanopartikeln in der Luft – Nano Trust-Dossier 025, Institut für Technikfolgenabschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 2011.

ITA/IÖWa): Warum ist die Frage nach der (Nano-)Dosis so wichtig? – Nano Trust-Dossier 028, Institut für Technikfolgenabschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 2012.

ITA/IÖWb): Nanomaterialien und Aspekte des ArbeitnehmerInnenschutzes – Eine Übersicht; NanoTrust-Dossier 029, Institut für Technikfolgenabschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 2012.

Kuhlbusch, T., & Nickel, C.: Emission von Nanopartikeln aus ausgewählten Produkten in ihrem Lebenszyklus, Umweltbundesamt, UBA-Texte 52/2010, Dessau, 2009.

LUBW: Nanomaterialien: Arbeitsschutzaspekte. Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 2009.

NanoCare: Gesundheitsrelevante Aspekte synthetischer Nanomaterialien, Konsortium des Projekts NanoCare, 2009.

OECD/Alliance: Opportunities and Risks of Nanotechnologies, Paris/München.

Ostertag, K., & Hüsing, B.: Nanomaterialien in der Abfallwirtschaft: Identifizierung prioritärer Ansatzpunkte für eine Expositionsbewertung am Beispiel von Altfahrzeugen und Altpapier. Müll und Abfall, 2008.

Plitzko, S., & Dziurawitz, N.: Messung der Exposition gegenüber beabsichtigt hergestellten Nanomaterialien an Arbeitsplätzen, BAuA, 2011.

Reschner, K.: [www.EnTire-Engineering.de](http://www.EnTire-Engineering.de), 2008. Abgerufen am 06. 02. 2012.

Riediger, G., & Möhlmann, C.: Ultrafeine Aerosole an Arbeitsplätzen, Sankt Augustin, Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit – BIA, 2001.

Roller, M.: Krebserzeugende Wirkung von Nanomaterialien am Arbeitsplatz, Düsseldorf, Hans Böckler Stiftung, 2010.

Schäfer, H.-G.: Überarbeitung des Leitfadens für Tätigkeiten mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz, Verband der Chemischen Industrie (VCI), 2011.

Som, C.: Nanomaterialien in Textilien: Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsaspekte, St. Gallen, EMPA, 2010.

Spiegel Online, (31. 10 2004): Reifen-Erstausrüstung: Wer hätte das gedacht? Abgerufen am 07. 12 2011 von <http://www.spiegel.de/auto/werkstatt/0,1518,325452,00.html>

Spiegel Online, (18. 10 2005): Reifenindustrie: Globale Gummibäcker-Gilde. Abgerufen am 07. 12 2011 von <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,379665,00.html>

SRU: Sondergutachten des SRU: Umwelt und Gesundheit – Risiken richtig einschätzen, Sachverständigenrat für Umweltfragen, 1999.

SRU: Vorsorgestrategien für Nanomaterialien. Sachverständigenrat für Umweltfragen – Hausdruck, 2011.

SUVA: Nanopartikel an Arbeitsplätze, 2009, von [www.suva.ch](http://www.suva.ch) abgerufen.

TGRS906: Verzeichnis krebserzeugender Tätigkeiten oder Verfahren nach § 3 Abs. 2 Nr. 3 GefStoffV (TRGS 906). BAuA, 2007.

TRGS900: Technische Regeln für Gefahrstoffe, Arbeitsplatzgrenzwerte, Berlin, Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS), 2006.

TVS/EMPA: Beispiel: Antibakterielle Textilien mit Nanosilber, Textilverband Schweiz, EMPA, 2011.

UBA/BfR: Beurteilung eines möglichen Krebsrisikos von Nanomaterialien und von aus Produkten freigesetzten Nanopartikel, Dessau-Roßlau, UBA, BfR, 2010.

Welle, F.: Recycling von Kunststoffverpackungen – PET Getränkeflaschen und andere Anwendungen, Präsentation auf dem 9. BfR Forum Verbraucherschutz, Berlin, 28. Oktober 2010..

Welle, F.: Twenty years of PET bottle to bottle recycling – An overview, Resources, Conservation and Recycling, S. 865-875, 55/2011,.

Wiechmann, B., Dubbert, W., & Weiss, V.: Winzige Stolpersteine, RECYCLING magazin, 01 2012.

Wriedt, H.: Dialog-Forum Nanomaterialien am Arbeitsplatz – Die Arbeitsgruppe „Nanomaterialien“ im Ausschuss für Gefahrstoffe, Hamburg: Beratungs- und Informationsstelle Arbeit & Gesundheit, 2011.

ZTC VDI.: Meta-Roadmap Nanomaterialien, Düsseldorf, VDI, 2009A.

## **Hans-Böckler-Stiftung**

Die Hans-Böckler-Stiftung ist das Mitbestimmungs-, Forschungs- und Studienförderungswerk des Deutschen Gewerkschaftsbundes. Gegründet wurde sie 1977 aus der Stiftung Mitbestimmung und der Hans-Böckler-Gesellschaft. Die Stiftung wirbt für Mitbestimmung als Gestaltungsprinzip einer demokratischen Gesellschaft und setzt sich dafür ein, die Möglichkeiten der Mitbestimmung zu erweitern.

## **Mitbestimmungsförderung und -beratung**

Die Stiftung informiert und berät Mitglieder von Betriebs- und Personalräten sowie Vertreterinnen und Vertreter von Beschäftigten in Aufsichtsräten. Diese können sich mit Fragen zu Wirtschaft und Recht, Personal- und Sozialwesen, zu Aus- und Weiterbildung an die Stiftung wenden.

## **Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliches Institut (WSI)**

Das Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Institut (WSI) in der Hans-Böckler-Stiftung forscht zu Themen, die für Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer von Bedeutung sind. Globalisierung, Beschäftigung und institutioneller Wandel, Arbeit, Verteilung und soziale Sicherung sowie Arbeitsbeziehungen und Tarifpolitik sind die Schwerpunkte. Das WSI-Tarifarchiv bietet umfangreiche Dokumentationen und fundierte Auswertungen zu allen Aspekten der Tarifpolitik.

## **Institut für Makroökonomie und Konjunkturforschung (IMK)**

Das Ziel des Instituts für Makroökonomie und Konjunkturforschung (IMK) in der Hans-Böckler-Stiftung ist es, gesamtwirtschaftliche Zusammenhänge zu erforschen und für die wirtschaftspolitische Beratung einzusetzen. Daneben stellt das IMK auf der Basis seiner Forschungs- und Beratungsarbeiten regelmäßig Konjunkturprognosen vor.

## **Forschungsförderung**

Die Forschungsförderung finanziert und koordiniert wissenschaftliche Vorhaben zu sechs Themenschwerpunkten: Erwerbsarbeit im Wandel, Strukturwandel – Innovationen und Beschäftigung, Mitbestimmung im Wandel, Zukunft des Sozialstaates/Sozialpolitik, Bildung für und in der Arbeitswelt sowie Geschichte der Gewerkschaften.

## **Studienförderung**

Als zweitgrößtes Studienförderungswerk der Bundesrepublik trägt die Stiftung dazu bei, soziale Ungleichheit im Bildungswesen zu überwinden. Sie fördert gewerkschaftlich und gesellschaftspolitisch engagierte Studierende und Promovierende mit Stipendien, Bildungsangeboten und der Vermittlung von Praktika. Insbesondere unterstützt sie Absolventinnen und Absolventen des zweiten Bildungsweges.

## **Öffentlichkeitsarbeit**

Mit dem 14tägig erscheinenden Infodienst „Böckler Impuls“ begleitet die Stiftung die aktuellen politischen Debatten in den Themenfeldern Arbeit, Wirtschaft und Soziales. Das Magazin „Mitbestimmung“ und die „WSI-Mitteilungen“ informieren monatlich über Themen aus Arbeitswelt und Wissenschaft.

Mit der Homepage [www.boeckler.de](http://www.boeckler.de) bietet die Stiftung einen schnellen Zugang zu ihren Veranstaltungen, Publikationen, Beratungsangeboten und Forschungsergebnissen.

### **Hans-Böckler-Stiftung**

Hans-Böckler-Straße 39  
40476 Düsseldorf

Telefon: 02 11/77 78-0  
Telefax: 02 11/77 78-225