

NanoDialog
der Bundesregierung

FachDialog 3 „Nanotechnologien und Abfall“

Zusammenfassung der Diskussion vom FachDialog 3
am 28. und 29. Oktober 2014 in Berlin

Dezember 2014

Autoren: Antonia Reihlen & Dirk Jepsen

Impressum:

ÖKOPOL GmbH
Institut für Ökologie und Politik

Nernstweg 32–34
D – 22765 Hamburg

www.oekopol.de
info@oekopol.de

Tel.: ++ 49-40-39 100 2 0
Fax: ++ 49-40-39 100 2 33

Inhalt

1	Einleitung	4
2	Darstellung und Diskussion des rechtlichen Hintergrundes.....	5
3	Inhalte aus den Vorträgen	8
3.1	<i>Kontext der Debatte zu Nanotechnologien und Abfall.....</i>	8
3.1.1	Abfallpolitische Aspekte in Deutschland	8
3.1.2	Nanomaterialien und Abfall – gibt es ein Problem?	8
3.1.3	Arbeit zu Nanoabfällen und nanomaterialhaltigen Abfällen aus der Schweiz und der OECD	9
3.2	<i>Ressourcenschonung.....</i>	10
3.2.1	Lebenszyklusbetrachtungen mit Fokus auf Abfall	10
3.2.2	Recycling von Nanopartikeln	11
3.3	<i>Bewertung von Entsorgungspfaden.....</i>	12
3.3.1	Thermische Verwertung	12
3.3.2	Klärschlammverwertung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen	12
3.4	<i>Kreislaufführung von Produkten, die Nanomaterialien enthalten.....</i>	13
3.4.1	Relevanz von Nanomaterialien in Recyclingprozessen.....	13
3.4.2	Arbeiten zu Nanomaterialien im Abfall in Österreich.....	14
4	Zentrale Aspekte der Diskussionen	16
4.1	<i>Aktualität des Themas.....</i>	16
4.2	<i>Gefährlichkeit von Nanomaterialien</i>	16
4.3	<i>Erwartungen an REACH.....</i>	17
4.4	<i>Mögliche Risiken durch nanomaterialhaltige Abfälle.....</i>	17
4.5	<i>Arbeitsschutzaspekte</i>	19
4.6	<i>Kennzeichnung von Produkten.....</i>	19
4.7	<i>Anwendung des Vorsorgeprinzips.....</i>	20
4.8	<i>Chancen durch die Verwendung von Nanotechnologien in der Abfallwirtschaft.....</i>	20
5	Zusammenfassung und Fazit	21

1 Einleitung

Nanomaterialien können in Produktions- und Verarbeitungsabfällen sowie in Abfällen aus Altprodukten enthalten sein und während der Entsorgung¹ prinzipiell in die Umwelt emittiert werden. Sind Nanomaterialien in Altprodukten fest eingebunden, so ist nicht ausgeschlossen, dass unter speziellen Bedingungen diese Bindungen an Produktmatrixen durch die Abfallbehandlung zerstört werden und Nanomaterialien freigesetzt werden.

Die Anwendung von Nanotechnologien kann zur Verminderung und Vermeidung von Abfällen beitragen, zum Beispiel durch die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten. Zudem können Nanotechnologien Prozesse der Abfallbehandlung effizienter oder emissionsärmer machen.

Im Oktober 2014 diskutierten etwa 25 Vertreterinnen und Vertreter verschiedener Interessensgruppen Chancen und Risiken in Bezug auf das Thema Nanotechnologien und Abfall beim dritten FachDialog des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

Ziel des FachDialogs „Nanotechnologien und Abfall“ war es unter anderem den Wissensstand zusammen zu tragen, ein Verständnis über rechtliche Anforderungen an Abfälle, die Nanomaterialien enthalten zu bekommen, einen Meinungsaustausch der Akteure zu ermöglichen sowie gegebenenfalls Forschungs- und Handlungsbedarf zu identifizieren.

In dieser Zusammenfassung der Diskussion werden unter dem Begriff „Nanoabfall“ Abfälle verstanden, die aus der Produktion und Verarbeitung von Nanomaterialien in industriellen und gewerblichen Prozessen entstehen und deren Zusammensetzung daher prinzipiell bekannt ist. Abfälle aus Produkten (Erzeugnisse im Sinne des Chemikalienrechts), die Nanomaterialien enthalten, werden im Folgenden als „nanomaterialhaltige Abfälle“ bezeichnet.

¹ Die „Entsorgung“ von Produkten mit dem Abwasser ist hier nicht gemeint; dieses Thema wurde beim FachDialog „Aquatische Umwelt“ diskutiert: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nanotechnologie/nano_fd2_wasser_bf.pdf

2 Darstellung und Diskussion des rechtlichen Hintergrundes²

Abfälle sind als Stoffe oder Gegenstände definiert³, deren sich der Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Im Abfallrecht werden gefährliche und nicht gefährliche Abfälle unterschieden und jeder Abfall ist nach Abfallverzeichnisverordnung⁴ zu bezeichnen und einzustufen.

Beim Umgang und in der Entsorgung sind für gefährliche Abfälle deutlich höhere rechtliche Anforderungen zu erfüllen. Dies bezieht sich unter anderem auf Anforderungen an die Behandlung, den Transport, die Lagerung und die Deponierung der Abfälle sowie die Dokumentation, beziehungsweise die Überwachung des Entsorgungsweges. Zudem gelten strengere Anforderungen an die Genehmigungen der Entsorgungsanlagen, das heißt an die dort zu implementierenden Schutzmaßnahmen für Mensch und Umwelt. Daher ist die Einstufung von Abfall ein zentraler Schritt und die Entscheidung über seine Gefährlichkeit hat weitreichende Konsequenzen.

Das Abfallverzeichnis ist eine Liste verschiedenster Abfallarten, die nach Herkunftsbereichen und Art der Abfälle gruppiert sind. Abfälle, von denen angenommen wird, dass sie ein oder mehrere Gefährlichkeitskriterien - so genannte H-Kriterien - erfüllen, gelten als gefährliche Abfälle und sind in der Liste mit einem Sternchen (*) gekennzeichnet. Um eine Verwechslung mit den H-Sätzen des Chemikalienrechts zu vermeiden, werden die H-Kriterien im Abfallrecht in Zukunft HP-Kriterien genannt.

Für viele Abfälle der gleichen Herkunft und Art gibt es zwei Einträge („Spiegeleinträge“): einen mit und einen ohne Sternchen, da sie sich in der Zusammensetzung und damit gegebenenfalls auch in der Gefährlichkeit unterscheiden können. Der Abfallerzeuger muss dann entscheiden, ob sein Abfall mit oder ohne Sternchen einzustufen ist. Hierfür wendet er die H-Kriterien an.

Die Einstufung von Abfällen beginnt in der Praxis somit zunächst mit der Prüfung ihrer Herkunft und Art, da sich hieraus vielfach bereits der Eintrag nach Abfallverzeichnis ergibt (Abfall mit Sternchen oder Abfall ohne Sternchen). Die

² Inhalte des Vortrags von Herr Dr. Winfried Golla (VCI) einschließlich der Klärungen und Ergänzungen in der sich anschließenden Diskussion

³ § 3 Absatz 1 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG); <http://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>

⁴ Die deutsche Abfallverzeichnisverordnung (<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/avv/gesamt.pdf>) setzt die Entscheidung der EU-Kommission über ein Verzeichnis gefährlicher Abfälle (<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000D0532&from=DE>) um. Die europäische Regelung ist derzeit in der Überarbeitung.

einzelfallbezogene Einstufung über die H-Kriterien bei verfügbaren Spiegeleinträgen ist dann ein zweiter Schritt.

Die H-Kriterien im Abfallrecht orientieren sich an den Inhalten des europäischen Chemikalienrechtes, d.h. zurzeit noch an der EU-Stoff- und der EU-Zubereitungsrichtlinie. Aktuell erfolgt eine Anpassung an die CLP-Verordnung. So sind verschiedene Gefährlichkeitsmerkmale, wie „explosiv“ oder „umweltgefährlich“, in beiden Rechtsbereichen vorhanden.

Die für viele Gefährlichkeitsmerkmale vorhandenen spezifischen Konzentrationsgrenzen⁵, ab denen ein Abfall als gefährlich einzustufen ist, bilden das Stoffrecht teilweise in vereinfachter Form ab. Dies ist der Natur der Abfälle geschuldet. Aufgrund einer gewissen Variabilität in der chemischen Zusammensetzung und weiterer inhärenter Eigenschaften von Abfällen wäre die strikte 1:1-Anwendung des EU-Stoffrechtes im Abfallrecht unverhältnismäßig, da Abfälle, im Gegensatz zu Produkten der Industrie (chemikalienrechtlich gesehen: Stoffe, Gemische oder Erzeugnisse) nicht absichtlich hergestellt werden.

Abfälle, die als Monochargen ausschließlich aus einem stoffrechtlich eingestuften Stoff bestehen, sind in der Entsorgung die absolute Ausnahme. Sie können in Einzelfällen bei Fehlchargen und Produkten im Bereich der Stoffherstellung entstehen, bei denen die Haltbarkeit überschritten ist. Dies könnte theoretisch auch bei Nanomaterialien der Fall sein (Entstehung von Nanoabfällen).

Für Abfallströme, die aus Stoffmischungen und Altprodukten (Erzeugnissen) bestehen, kann eine Klassifizierung basierend auf den H-Kriterien einzelner Inhaltsstoffe schwierig sein. Unabhängig von der Einstufung als gefährlicher Abfall sind für alle Abfälle geeignete Entsorgungswege zu wählen, bei denen sichergestellt ist, dass Gefahren für Mensch und Umwelt vermieden und Ressourcen geschont werden. Für Nanoabfälle und nanomaterialhaltige Abfälle existieren derzeit keine spezifischen Regelungen im Abfallrecht. Wie alle anderen Abfälle werden sie eingestuft und gemäß dem Stand der Technik entsorgt. Wenn ein Abfall aufgrund der Eigenschaften der enthaltenen Stoffe, einschließlich der enthaltenen Nanomaterialien, ein oder mehrere der H-Kriterien erfüllt, gilt er als gefährlicher Abfall. Der Gehalt an Nanomaterialien in Abfällen allein, ohne Betrachtung der gefährlichen Eigenschaften und der enthaltenen Konzentration, löst keine solche Einstufung aus.

⁵ Ein Abfall (Abfallrecht) oder ein Gemisch (Stoffrecht) wird nur dann als gefährlich angesehen, wenn die enthaltenen Stoffe, die gefährliche Eigenschaften haben, einen bestimmten Gehalt überschreiten, soweit entsprechende Grenzwerte vorliegen.

Das Stoffrecht unterstützt die Umsetzung des Abfallrechtes somit in dem Sinne, dass durch die Einstufung und Kennzeichnung Informationen über die Gefährlichkeit von einzelnen Abfallbestandteilen vorliegen.

Die REACH-Verordnung erfordert, dass Stoffe geprüft und Informationen generiert werden, die für die Einstufung und Kennzeichnung genutzt werden können. Die Anhänge der REACH-Verordnung, die unter anderem die Testanforderungen an Stoffe in Abhängigkeit von ihrer Produktionsmenge festlegen, werden derzeit überarbeitet. Hierbei wird besonders Augenmerk darauf gelegt, wie Nanomaterialien zu testen sind, um eine Einstufung und Kennzeichnung zu gewährleisten und sicherzustellen, dass diejenigen spezifischen Eigenschaften bekannt sind, die für eine sichere Handhabung dieser Stoffe notwendig sind.

Die deutschen Bundesoberbehörden haben der EU-Kommission einen Vorschlag für eine entsprechende Überarbeitung der REACH-Anhänge gemacht⁶. Dieser Vorschlag wurde von anderen Mitgliedsstaaten unterstützt. Das Vorschlagsrecht für die Überarbeitung der Anhänge liegt jedoch bei der EU-Kommission und bislang ist unklar, wann ein entsprechender Entwurf vorliegen wird.

⁶ <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/nanomaterialien-reach>

3 Inhalte aus den Vorträgen

In den folgenden Kapiteln werden einige zentrale Inhalte der Vorträge, sowie teilweise auch der sich daran anschließenden inhaltlichen Klärungen kurz wiedergegeben. Die Vortragsfolien sind zum größten Teil im Internet verfügbar⁷.

3.1 Kontext der Debatte zu Nanotechnologien und Abfall

3.1.1 Abfallpolitische Aspekte in Deutschland

Vortrag von Herrn MinR. Dr. Andreas Jaron (BMUB)

Die Ziele der Abfallwirtschaft sind unter anderem der Schutz von Umwelt und Gesundheit, der Schutz der natürlichen Ressourcen sowie das Schließen von Materialkreisläufen (Kreislauffunktion). Zudem ist eine wichtige Aufgabe der Abfallwirtschaft das Ausschleusen von Schadstoffen aus den Materialkreisläufen, um deren Akkumulation in Sekundärrohstoffen zu vermeiden (Senkenfunktion).

In Deutschland können alle Abfallarten sachgemäß entsorgt werden, weil entsprechende Entsorgungskapazitäten vorhanden sind. Dies ist in anderen Ländern auch innerhalb Europas nicht unbedingt der Fall, was bei der Diskussion um nanomaterialhaltige Abfälle berücksichtigt werden sollte. Die Kosten für die Abfallwirtschaft werden in Deutschland vorrangig durch Gebühren, Einnahmen für Sekundärrohstoffe und Beiträge der Produktverantwortlichen getragen.

Bislang ist noch nicht abschließend geklärt, ob die bestehenden Technologien und Verfahren dazu geeignet sind, mögliche Risiken durch Nanomaterialien in Altprodukten und Abfällen angemessen zu beherrschen. Angesichts des hohen Sicherheitsstandards der Entsorgungswirtschaft ist dies allerdings zu vermuten. Entsprechende Wissenslücken sollten gezielt geschlossen werden.

3.1.2 Nanomaterialien und Abfall – gibt es ein Problem?

Vortrag von Frau Dr. Julia Vogel (Umweltbundesamt)

Die Anzahl und die Mengen der Produkte, in denen Nanomaterialien verwendet werden und die am Ende ihrer Nutzungsphase zu Abfall werden, steigen stetig an. Aufgrund fehlender beziehungsweise lückenhafter Daten ist es momentan nicht möglich Aussagen darüber zu treffen, welche Nanomaterialien in welchen Mengen in den Abfallströmen enthalten sind.

⁷ <http://www.oekopol.de/themen/chemikalienpolitik/nanodialog/nanofachdialoge-2013-2015/nanotechnologien-und-abfall/>

Nanoabfälle und nanomaterialhaltige Abfälle können in die folgenden vier Entsorgungspfade gelangen:

- Kläranlage mit Klärschlammverbrennung oder landwirtschaftlicher Verwertung,
- Anlagen zur thermischen oder biologischen Verwertung,
- Deponie,
- Recycling / stoffliche Verwertung.

Emissionen von Nanomaterialien in die Luft sind theoretisch bei allen Pfaden möglich. Feste Rückstände können in Anlagen zur thermischen und biologischen Verwertung, der Klärschlammverbrennung sowie den Verfahren zum Recycling / zur stofflichen Verwertung entstehen. Emissionen von Nanomaterialien ins Wasser sind aus der Kläranlage, mit dem Deponiesickerwasser sowie aus den Prozessen des Recyclings / der stofflichen Verwertung möglich.

Bisher fehlen ausreichende Informationen darüber, wie relevant die jeweils theoretisch möglichen Austragspfade aus den Verfahren und Prozessen für (welche) Nanomaterialien beziehungsweise welche nanomaterialhaltigen Abfälle in der Praxis tatsächlich sind.

3.1.3 Arbeit zu Nanoabfällen und nanomaterialhaltigen Abfällen aus der Schweiz und der OECD

Vortrag von Herrn Dr. Tellenbach – Sommer (Terra consult, Bern)

Im Auftrag des Schweizer Ministeriums für Umwelt ist ein Konzeptpapier⁸ zur sicheren Entsorgung von Nanoabfällen für Unternehmen, die mit Nanomaterialien umgehen, erstellt worden. Das Konzeptpapier soll Bewusstsein für mögliche Quellen von Nanoabfällen und damit gegebenenfalls verbundene Risiken wecken. Es soll zudem Informationen über Schutzmaßnahmen, Entsorgungsmöglichkeiten und – Anforderungen sowie die Klassifizierung der Abfälle geben.

Im Konzeptpapier sind Nanoabfälle definiert als Abfälle mit ungebundenen oder sich freisetzenen Nanopartikeln oder –stäbchen, die aufgrund ihrer Zusammensetzung und chemischen Eigenschaften als toxisch, gefährlich oder umweltgefährdend einzustufen sind oder von denen unerwünschte Wirkungen auf Gesundheit, Umwelt oder die Sicherheit nicht auszuschließen sind. Es wird empfohlen Nanoabfälle als Sonderabfälle zu klassifizieren. Im Konzeptpapier gibt es keine konkreten Entsorgungsempfehlungen.

⁸ Entwurf Konzeptpapier: Umweltverträgliche und sichere Entsorgung von Abfällen aus Herstellung sowie industrieller und gewerblicher Verarbeitung von synthetischen Nanomaterialien; <http://www.bag.admin.ch/nanotechnologie/12171/12177/index.html?lang=de>

Eine Erhebung der OECD über die Forschungsaktivitäten der OECD-Staaten zum Thema Nanomaterialien in Abfall zeigt, dass bislang nur wenige Studien durchgeführt wurden oder werden. Aspekte des Umgangs und der Entsorgung von Nanoabfällen aus Forschung, Herstellung und Verarbeitung von Nanomaterialien sind die häufigsten Forschungsthemen, während zum Beispiel die Prüfung von Entsorgungsverfahren oder Erhebungen über Mengen und Materialflüsse bisher nur selten bearbeitet werden.

In vier „reflection papers“ zu den Themen Deponierung, Verbrennung, Klärschlamm und Recycling von Nanoabfällen und nanomaterialhaltigen Abfällen wurde der Stand des Wissens auf OECD Ebene zusammengetragen⁹. Als zentrale Herausforderungen wurden im Bereich des Recyclings unter anderem identifiziert:

- Schnelle Zunahme der Anwendung von Nanomaterialien und –technologien und damit wachsende Zahl (und Menge) an Produkten mit Nanomaterialien,
- Hohe Diversität von Nanomaterialien in Produkten sowie von Recyclingverfahren,
- Mögliche Risiken durch Exposition gegenüber freien Nanopartikeln in der Abfallbehandlung,
- Schlechtes Risikomanagement durch Verfahren, die nicht dem Stand der Technik entsprechen.

3.2 Ressourcenschonung

3.2.1 Lebenszyklusbetrachtungen mit Fokus auf Abfall

Vortrag von Herrn Dr. Danzebrink (Nanogate)

Am Beispiel einer Beschichtung für Gläser zur Abschirmung von UV-Strahlen, die Nanozinkoxid (ZnO) enthält, wurden verschiedene Fragestellungen zum Umgang mit und zur Behandlung von Nanoabfällen dargestellt.

Mit dem Nano-Nachhaltigkeitsscheck¹⁰ wurde das nanobeschichtete Glas mit einem konventionell beschichteten Glas verglichen. Hierbei zeigte sich eine Verlängerung der Lebensdauer und somit einer Reduzierung der Gesamtabfallmenge. Zudem wurde deutlich, dass Überlegungen zur Entsorgung bereits in der Entwicklungsphase von Nanomaterialien und –Produkten berücksichtigt werden sollten. Allerdings sind

⁹ Diese Dokumente sind noch nicht veröffentlicht.

¹⁰ <http://www.oeko.de/fileadmin/pdfs/oekodoc/1138/2011-020-de.pdf>

oft nicht genug Informationen für eine eingehende Nachhaltigkeitsbewertung vorhanden.

Im Projekt NanoSustain¹¹ wurden für das gleiche nanobeschichtete Glas mögliche Risiken beim Glasrecycling untersucht. Zentrale Ergebnisse sind:

- Der Gehalt an Nano-ZnO in der Beschichtung hat keinen Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung des Staubes beim Bearbeitungsprozess (Schleifen).
- Eine Freibewitterung setzt keine nanopartikulären Stäube frei.
- Beim Schmelzprozess des Glases werden keine freien ZnO-Nanopartikel freigesetzt.

Abfälle des flüssigen Beschichtungsmaterials aus der Verarbeitung können aufgrund der Kenntnis der Abfallzusammensetzung und der spezifischen Eigenschaften der enthaltenen Nanomaterialien sicher gehandhabt und entsorgt werden. Im vorliegenden Fall kann ein saurer oder basischer pH-Wert zu einer Auflösung der Partikel führen.

3.2.2 Recycling von Nanopartikeln

Vortrag von Herrn Prof. Dr. Thöming (Universität Bremen)

Verfahren zur Wiedergewinnung von Nanopartikeln aus Produktions- und Verarbeitungsabfällen sind derzeit erst in der Entwicklung. Grundsätzlich erscheinen aufgrund des verhältnismäßig hohen Aufwandes lediglich Verfahren für teure Nanomaterialien wirtschaftlich lohnenswert.

Zur Wiedergewinnung sind grundsätzlich zwei Schritte notwendig: eine Anreicherung und eine Abtrennung der Nanomaterialien aus den Matrices, in denen sie enthalten sind. Magnetische Nanopartikel können verhältnismäßig gut angereichert und abgetrennt werden.

Für nicht-magnetische, dispergierte Nanopartikel können Membranverfahren zum Einsatz kommen. Allerdings fehlen hier noch Verfahren, um den Bewuchs (fouling) der Membran zu verhindern. Eine (mehrstufige) Extraktion der Partikel aus der Dispersion mit Lösemitteln ist zwar technisch möglich, aber nicht wirtschaftlich. Ein weiteres, sich derzeit in der Erforschung befindliches Verfahren zur Abtrennung dispergierter Nanopartikel arbeitet mit dielektrischen Filtern. In Gasen / Aerosolen enthaltene Nanopartikel könnten über elektrische Felder nach dem Funktionsprinzip zur Analyse der Teilchenmobilität (Differential Mobility Analyzer, DMA) erfolgen. Auch dieses Verfahren ist jedoch derzeit nicht effizient und damit nicht wirtschaftlich.

¹¹ <http://www.nanosustain.eu/>

3.3 Bewertung von Entsorgungspfaden

3.3.1 Thermische Verwertung

Vortrag von Frau Zach (Fraunhofer Umsicht)

Im Vortrag wurden erste Ergebnisse aus Emissionsmessungen von Nanomaterialien aus dem Einsatz nanomaterialhaltiger Abfälle in der thermischen Verwertung vorgestellt¹².

In einer Modellanlage (Technikumsmaßstab) wurde Nanotitandioxid zusammen mit einem Brennstoff in die thermische Verwertung gegeben. Hierbei wurde das Nanotitandioxid auf den Brennstoff aufgetragen (beschichtet), in ihn eingebracht (integriert) als auch in einer Kunststoffmatrix eingebunden (gebunden) zugegeben. In Untersuchungen in einer Müllverbrennungsanlage wurde Nanotitandioxid auf den Inputstrom Hausmüll aufgebracht und verbrannt. Das Nanomaterial wurde als Titandioxid in allen Versuchen zugegeben, die Analytik erfasst den Gehalt an Titan. Daher wird folgend Titan als Referenzgröße herangezogen.

Insgesamt konnte ein hoher Anteil des zugegebenen Nanomaterials in den Messungen wiedergefunden werden (ca. 95%). Die Messungen zeigen, dass sich weder die Titankonzentration im Rauchgas noch der Titananteil an der Staubmasse durch die Titandioxidzugabe erhöht. Der größte Anteil des Titans wird in der Verbrennung abgeschieden und findet sich entsprechend in der Rostschlacke (ca. 92 %) sowie der Flugasche (ca. 5%). Die Untersuchungen zeigen auch, dass die Rauchgasreinigung den Staub- und somit Titangehalt effektiv reduziert.

Diese Ergebnisse stimmen mit denen einer Studie¹³ aus der Schweiz zu Ceroxid, einem weiteren inerten Nanomaterial, in Müllverbrennungsanlagen überein.

3.3.2 Klärschlammverwertung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen

Vortrag von Frau Prof. Dr. Filser (Universität Bremen)

Die Ergebnisse des Projekts „Umsicht“¹⁴ zeigen, dass eine Ausbringung von Klärschlamm, der Nanomaterialien enthält, kritisch zu hinterfragen ist. Dies leitet sich unter anderem aus den folgenden Erkenntnissen des Projektes ab:

¹² Das Projekt „Untersuchung des Emissionsverhaltens nanomaterialhaltiger Abfälle in der thermischen Verwertung“ wird im Auftrag des Umweltbundesamtes vom Fraunhofer Institut Umsicht bearbeitet.

¹³ http://www.ethlife.ethz.ch/archive_articles/120521_nanopartikel_kehricht_su/index

¹⁴ Abschätzung der Umweltgefährdung durch Silber-Nanomaterialien: vom Chemischen Partikel bis zum Technischen Produkt; <http://www.umsicht.uni-bremen.de/>

Nanosilber ist als solches in den meisten getesteten Böden mobil. In einem Gemisch aus Klärschlamm und Boden wird das enthaltene Nanosilber jedoch zurückgehalten und kann sich im Boden anreichern.

Im Langzeitversuch hemmt Nanosilber in Klärschlamm die Nitrifikation durch Bakterien, kann also auch die normalen Prozesse in Böden negativ beeinflussen. Die Toxizität nimmt allerdings bei gefaultem Klärschlamm ab. Eine zeitverzögerte, negative Wirkung auf Collembolen (Springschwänze) konnte ebenfalls nachgewiesen werden.

In Studien mit Eisenoxid-Nanopartikeln wurden ebenfalls hemmende Effekte auf Bodenmikroorganismen nachgewiesen, die bei steigenden Konzentrationen schwächer wurden (Niedrigdosiseffekte). Dieser Befund konnte in Studien mit Eisenoxid-Nanopartikeln in Belebtschlamm bestätigt werden.

Das Einbringen von Nanopartikeln mit Klärschlämmen in Böden sollte zudem kritisch hinterfragt werden, da es Hinweise darauf gibt, dass Nanopartikel zur Resistenzbildung von Mikroorganismen beitragen können. Zudem können sich Nanopartikel auch in der Nahrungskette anreichern. Nicht nur aufgrund der Nanomaterialien, sondern auch, weil Klärschlämme toxische Chemikalien, wie Schwermetalle enthalten können, sollten das Ausbringen von Klärschlämmen auf landwirtschaftliche Flächen generell in Frage gestellt werden.

3.4 Kreislaufführung von Produkten, die Nanomaterialien enthalten

3.4.1 Relevanz von Nanomaterialien in Recyclingprozessen

Vortrag von Frau Stuwe (Prognos)

In einer Studie der Prognos AG¹⁵ wurde untersucht, in welchen Abfallströmen Nanomaterialien in welchen Mengen enthalten sind, welche Umwelt- und Gesundheitswirkungen sie haben und welche Präventionsmaßnahmen am Arbeitsplatz daraus abgeleitet werden können.

Gemäß der Studie können die folgenden Abfallströme relevante Mengen an Nanomaterialien enthalten: Elektronik, Papier, Metalle, Textilien, Elektrogeräte, Batterien, Kunststoffe und Gummi. Allerdings erlaubt die Datenlage keine genauere Abschätzung über die Art und den Gehalt der Nanomaterialien in den verschiedenen Abfallfraktionen.

Aufgrund fehlender Daten kann der Mengenanteil nanomaterialhaltiger Produkte im Recyclingkreislauf nicht beziffert werden. Weitere offene Fragen sind, ob es zu einer

¹⁵ Jutta Struwe, Eva Schindler: Bedeutung von Nanomaterialien beim Recycling von Abfällen, Arbeitspapier 270, November 2012
http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/121100_Prognos_HansBoecklerStiftung_Bedeutung_von_Nanomaterialien.pdf

Freisetzung im Recycling kommt und ob bzw. welche Wirkungen Nanomaterialien in recycelten Produkten haben können. Relevant sind umfangreiche Recyclingstoffströme, bei denen potenziell gefährliche Nanomaterialien in großen Mengen eingearbeitet sind.

Am Beispiel von Autoreifen (Carbon Black und Siliziumdioxid) und PET-Flaschen (Siliziumdioxid und Titanitrid) wurden in den zugehörigen Recyclingprozessen Stäube, Dämpfe und Gase als mögliche Emissionspfade identifiziert. Ob und in welcher Form Nanomaterialien in Stäuben, Dämpfen und Gasen aus den Recyclingprozessen enthalten sind, ist bisher nicht untersucht.

Die derzeit verfügbaren Arbeitsschutzmaßnahmen werden als ausreichend angesehen, um Arbeitnehmer vor eventuellen Risiken durch freigesetzte Ultra-Feinstäube zu schützen; ihre Anwendung wird aus Vorsorgegründen empfohlen.

3.4.2 Arbeiten zu Nanomaterialien im Abfall in Österreich

Vortrag von Herrn Dr. André Gzásó (Institut für Technikfolgeabschätzung der Universität Wien)

Im österreichischen Nanoaktionsplan wird ein Bedarf gesehen, mögliche Freisetzungen von Nanomaterialien aus der Sammlung und Entsorgung von Abfällen zu untersuchen. Diesem Forschungsbedarf sollte unter anderem durch das NanoMia¹⁶ begegnet werden.

Im Rahmen des NanoMia – Projekts wurde die Nanoprodukt Datenbank¹⁷ des Instituts für Technikfolgenabschätzung aktualisiert. Hier wurde deutlich, dass die Gesamtanzahl der in der Datenbank enthaltenen nanomaterialhaltigen Verbraucherprodukte in den letzten Jahren gleich geblieben ist, wobei Verschiebungen bei den Arten der Produkte zu erkennen sind. So hat sich zwischen 2010 und 2014 zum Beispiel die Anzahl nanomaterialhaltiger Kosmetika verdoppelt, während sich die Anzahl nanomaterialhaltiger Textilien halbiert hat.

Die Teilnehmer eines Expertenworkshops zur Diskussion erster Projektergebnisse formulierten verschiedene Forderungen an die Wissenschaft, unter anderem:

- die Entwicklung nanospezifischer Analytik und Verfahren, um Nanomaterialien in Abfallmatrizen (quantitativ) bestimmen zu können sowie

¹⁶ Nanomaterialien in Abfällen: Evaluierung von Regelungen und Verfahren zum Nachweis von Nanomaterialien in Abfallströmen

¹⁷ Die Datenbank erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit sondern bietet lediglich einen aktuellen Marktüberblick. Zudem sind die Produkte gemäß der Produktdokumentation aufgenommen worden, ohne dass überprüft wurde, ob der Gehalt an Nanomaterialien richtig ausgemittelt ist.

- die Evaluierung, ob die Technologien der Abfallwirtschaft für den Umgang mit Nanomaterialien geeignet sind.

Von den Behörden wurde unter anderem gefordert:

- Daten über die Art und Mengen von Nanomaterialien in Produkten zu erheben (zum Beispiel durch ein einheitliches EU Produktregister) sowie
- eine geeignete Entsorgung / Recycling sicherzustellen, zum Beispiel indem Rücknahmeverpflichtungen für die Hersteller nanomaterialhaltiger Produkte eingeführt werden oder andere Maßnahmen ergriffen werden, um ausreichend Informationen über Nanoprodukte verfügbar zu machen.

4 Zentrale Aspekte der Diskussionen

Im Folgenden werden die Diskussionen und Meinungen zu unterschiedlichen thematischen Aspekten dargestellt, die teilweise im Zusammenhang mit verschiedenen Vorträgen diskutiert wurden.

4.1 Aktualität des Themas

Bislang haben viele Akteure kaum Berührungspunkte mit dem Thema „Nanotechnologien und Abfall“ gehabt. Aus Sicht der Verbraucherschutzverbände wurde berichtet, dass es ein Interesse der Konsumentinnen und Konsumenten gibt zu erfahren, wie nanomaterialhaltige Produkte richtig zu entsorgen sind. Aus den Entsorgungsbetrieben wurde berichtet, dass sie konkret noch nicht mit dem Thema beschäftigt sind. Die Verbände der Abfallwirtschaft berichteten einerseits von Sorgen der Entsorgungsunternehmen bezüglich möglicher Umwelt- und Arbeitsschutzrisiken und andererseits von Unternehmen, die der Meinung sind, dass der Stand der Technik ihrer Anlagen dazu geeignet ist, auch Nanomaterialien in Abfällen sicher zu entsorgen.

4.2 Gefährlichkeit von Nanomaterialien

Wie auch in anderen FachDialogen und Themenkomplexen stellten viele Teilnehmende des FachDialogs fest, dass die Informationslage über das Verhalten und die Toxizität von Nanomaterialien nicht zufriedenstellend sei.

Einige Teilnehmende beklagten, dass Toxizitätsdaten fehlen oder widersprüchlich seien. Andere bemerkten, dass die vorhandenen Informationen nicht so aufbereitet sind, dass sie für eine Risikobewertung genutzt werden können.

Die Diskussion, ob (gefährliche) Nanomaterialien nur als freie oder auch als gebundene Partikel Risiken bergen können, konnte nicht abschließend geführt werden. Während einige Teilnehmende der Meinung waren, dass Nanopartikel als Aggregate oder Agglomerate ihre Nanoeigenschaften / Toxizität verlieren, waren andere der Meinung, dass an der Oberfläche dennoch (toxische) Effekte auftreten können.

Die Akteure beim FachDialog waren sich darin einig, dass sich die Forschung zu möglichen Risiken von Nanomaterialien in Abfällen auf diejenigen Materialien fokussieren sollte, von denen bekannt ist oder bei denen es zumindest starke Hinweise gibt, dass sie gefährliche Eigenschaften haben. Zudem sei ein hohes Maß an Transparenz in der Kommunikation über die Gefährlichkeit und Ungefährlichkeit von Nanomaterialien wichtig, sowie die verständliche Darstellung entsprechender Informationen aus der Forschung.

4.3 Erwartungen an REACH

Die Informationslage über die gefährlichen Eigenschaften von Nanomaterialien hat sich in den letzten Jahren zwar verbessert, ist nach Meinung einiger Teilnehmender am FachDialog jedoch noch nicht ausreichend. Durch die Überarbeitung der Anhänge der REACH-Verordnung und die Stoffregistrierung werden neue Informationen erwartet.

Laut einer Studie des „Joint Research Center“ der EU-Kommission, wurden unter REACH bisher nur wenige Nanomaterialien explizit als solche registriert. Es wurde berichtet, dass unter anderem Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT) als „non-phase-in“ Stoffe registriert sind. Eine Reihe dieser CNTs sind, abhängig von ihrer speziellen Beschaffenheit, basierend auf Studien nicht als gefährlich eingestuft. Bei anderen CNTs wiederum liegt ein Gefährdungspotenzial vor.

Einige Teilnehmende merkten kritisch an, dass kleinvolumige Nanomaterialien aufgrund der Tonnenschwelle von REACH¹⁸ nicht registriert und somit auch keine Daten zur Gefährlichkeit verlangt würden.

Die REACH-Verordnung wird nach Aussagen einiger Teilnehmender keine Informationen über reale Verwendungen und Verwendungsmengen von Nanomaterialien liefern, da in der Registrierung lediglich die möglichen Verwendungen benannt werden und der Verwendungsbegriff unter REACH nicht bis auf einzelne Erzeugnisgruppen ausdifferenziert ist. Insofern seien andere Formen der Informationserhebung über Nanomaterialströme in Produkten und daraus entstehenden Abfällen notwendig. Zudem wurde angemerkt, dass die Bewertung der Abfallphase von Nanomaterialien unter REACH im Rahmen der Stoffsicherheitsbewertung bislang nur sehr rudimentär beziehungsweise gar nicht erfolgt sei, unter anderem da validierte Emissionsmodelle für die Prozesse der Abfallwirtschaft fehlen.

Die Teilnehmenden des FachDialogs sahen jedoch eine Lenkungswirkung der REACH-Verordnung: die Registrierung und Kommunikation „vorgesehener Verwendungen“ schränkt den Einsatz von Nanomaterialien auf bestimmte Produktsegmente für bestimmte Anwender, zum Beispiel professionelle Nutzer oder Verbraucherinnen und Verbraucher, ein.

4.4 Mögliche Risiken durch nanomaterialhaltige Abfälle

Grundsätzlich sollte nach Meinung der Diskutierenden beim FachDialog immer beachtet werden, dass Risiken lediglich durch Nanomaterialien entstehen können,

¹⁸ Es müssen nur Stoffe registriert werden, die in größeren Mengen als 1 Tonne pro Jahr von einem Hersteller hergestellt oder einem Importeur importiert werden.

die gefährliche Eigenschaften haben oder im Verlauf ihres Lebenszyklus entwickeln können. Wird in der Diskussion lediglich von „den Nanomaterialien“ gesprochen, könnte sich der Eindruck verfestigen, alle Nanomaterialien seien problematisch.

Altprodukte mit und ohne Nanomaterialien werden gemeinsam unter anderem in den Müllverbrennungsanlagen verwertet. Abfälle aus Altprodukten zur Verbrennung sind überwiegend nicht gefährliche Abfälle, zum Beispiel Kunststoffe, die grundsätzlich aber gefährliche Stoffe / gefährliche Nanomaterialien enthalten können. Da alle Produkte in der Brennkammer zusammen kommen, besteht für die Abfallwirtschaft die grundsätzliche Frage, ob gefährliche Nanomaterialien aus den Anlagen emittiert werden und dadurch Risiken entstehen können. Eine differenzierte Betrachtung des Gehalts an Nanomaterialien in einzelnen Produktströmen erscheint einigen Teilnehmenden vor diesem Hintergrund als nicht notwendig. Es wurde jedoch darauf hingewiesen, dass über die Verwendung der Schlacken aus den Verbrennungsanlagen und eine mögliche Freisetzung von gegebenenfalls darin enthaltenen gefährlichen Nanomaterialien bisher keine Erkenntnisse vorliegen.

Die Ausbringung von Klärschlamm in der Landwirtschaft wird von vielen Teilnehmenden als kritisch angesehen. Allerdings wird angemerkt, dass in Deutschland ein Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Verwendung von Klärschlämmen vorgesehen ist. Praktisch alle Klärschlämme würden dann zukünftig verbrannt werden.

Sollen Altprodukte dem Recycling zugeführt werden, wird ein Bedarf gesehen, Art und Gehalt an gefährlichen Nanomaterialien zu kennen. Dies wird einerseits als erforderlich erachtet, um die Reinheit und Ungefährlichkeit von Produkten aus den Recyclingmaterialien sicher zu stellen. Andererseits sei dies für das einwandfreie Funktionieren der Prozesse wichtig.

Darüber hinaus wurde angeregt, anhand ausgewählter Materialströme, die relevante Mengen an gefährlichen Nanomaterialien enthalten, und ausgewählter Prozesse mit hohen Expositionswahrscheinlichkeiten Emissionsmessungen durchzuführen und so die Wissenslücken zu schließen.

Es wurde verschiedentlich daran erinnert, dass in der Diskussion um Risiken durch Nanomaterialien in Abfällen auch zu berücksichtigen ist, dass die Abfallwirtschaft in Deutschland einen sehr hohen Standard erreicht hat. Dieser wird in vielen anderen Ländern, in die nanomaterialhaltige Produkte auch gelangen, nicht erreicht. Somit ist davon auszugehen, dass dort möglicherweise eine Entsorgung stattfindet, die nicht dem Stand der Technik entspricht und eventuell Risiken erzeugt, die in Deutschland nicht vorkommen.

4.5 Arbeitsschutzaspekte

Neben dem Stoff- und Abfallrecht existiert ein umfangreiches Regelwerk zum Arbeitsschutz, das einen sicheren Umgang mit (nanomaterialhaltigen) Abfällen gewährleisten sollte. Die Bekanntmachung 527 der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin¹⁹ stellt den Stand des Wissens über den Umgang mit hergestellten Nanomaterialien dar. Die Hinweise zur Gefährlichkeit, zur Risikobeurteilung sowie zu Präventionsmaßnahmen gelten für alle Arbeitsplätze, einschließlich denen in der Entsorgungswirtschaft. In der Bekanntmachung ist ein Expositionsgrenzwert für Nanomaterialien am Arbeitsplatz enthalten, der sich von dem für Stäube unterscheidet.

Es wurde zudem angemerkt, dass die Erfahrungen und Erkenntnisse bezüglich der Exposition gegenüber (Ultra-)Feinstaub auch für die Risikobewertungen bei der Behandlung nanomaterialhaltiger Abfälle genutzt werden sollten.

4.6 Kennzeichnung von Produkten

Eine Kennzeichnung des Gehaltes an (gefährlichen) Nanomaterialien in Produkten wurde als eine Möglichkeit diskutiert, Produktströme mit und ohne Nanomaterialien getrennt zu halten und gegebenenfalls auch getrennt zu entsorgen. Zudem könnten so Altprodukte vor Recyclingprozessen sortiert und ein unerwünschter Transfer von Nanomaterialien in Sekundärrohstoffe oder neue Produkte vermieden werden.

Viele Teilnehmende sahen aber die Gefahr, dass einerseits durch eine allgemeine Kennzeichnung der Eindruck entstehen könnte, dass alle Nanomaterialien gefährlich sind. Des Weiteren wurde die Sorge geäußert, dass wegen der breiten EU-Definition von Nanomaterialien sehr viele Produkte zu kennzeichnen seien und damit keine Differenzierung erreicht werden könne. Außerdem müsse eine Regelung rechtssicher und praktisch umsetzbar sein, was in Anbetracht der aktuellen Definition von Nanomaterialien als schwierig angesehen wurde. Der Aufwand für die Kennzeichnung sei für den erreichbaren Nutzen zu hoch. Andere Teilnehmende befürworteten eine Kennzeichnung zumindest in bestimmten Fällen, zum Beispiel bei besonders mengenrelevanten Produkten oder bei Produkten, für die ein Recycling wahrscheinlich ist (also keine Produkte, die über das Abwasser entsorgt werden (Kosmetika et cetera) oder die ausschließlich thermisch verwertet werden).

¹⁹ <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/Bekanntmachung-527.html>

4.7 Anwendung des Vorsorgeprinzips

Aufgrund des (teilweise) fehlenden Wissens sahen einige Teilnehmende die Anwendung des Vorsorgeprinzips als notwendig an. Allerdings sei unklar, welche Maßnahmen sinnvoll sein könnten.

Seitens der Industrie wurde betont, dass die Produktverantwortung sich auch über die Abfallphase erstreckt und die Unternehmen entsprechende Untersuchungen bei neuen Materialien und Produkten durchführen, um diese Verantwortung wahrzunehmen.

4.8 Chancen durch die Verwendung von Nanotechnologien in der Abfallwirtschaft

Viele Teilnehmende sahen Chancen, durch die Verwendung von Nanotechnologien die Prozesse in der Abfallwirtschaft zu verbessern. Unter anderem wurde von speziell beschichteten Wärmetauschern berichtet, die in Müllverbrennungsanlagen eingesetzt werden und die Verbrennungseffizienz erhöhen können.

Ein anderes Beispiel sei der Einsatz von Nanomaterialien als Marker für Kunststoffe. Beim Bau von Schienen würden bereits DNA-Marker verwendet, um ihre Herkunft eindeutig und im Material selbst zu kennzeichnen. Eine analoge Verwendung (ungefährlicher) Nanomaterialien zur Markierung von Kunststoffen könnte die Erkennung und Trennung in Sortieranlagen verbessern.

Der Einsatz von Nanomaterialien in Filtern und Membranen zur Reinigung von Emissionen aus Prozessen der Abfallwirtschaft (Rauchgas, Abwasser et cetera) eröffne ebenfalls eine Chance zur Verbesserung der Sicherheit der Entsorgung.

Weitere Potenziale werden im Bereich der Abfallverminderung und Vermeidung durch die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten gesehen sowie in Möglichkeiten einer Schadstoffentfrachtung von Abfall durch Substitution gefährlicher Stoffe mit (weniger oder nicht gefährlichen) Nanomaterialien.

5 Zusammenfassung und Fazit

Die Informationen aus dem Stoffrecht zur Einstufung und Kennzeichnung von Stoffen, einschließlich der Nanomaterialien, sind die Basis für die Einstufung gefährlicher Abfälle im Abfallrecht. Die Frage, ob die Konzentrationsgrenzen im Abfallrecht für die jeweiligen H-Kriterien auch für Nanomaterialien sachgerecht und angemessen sind, ist hierbei gegebenenfalls durch die zuständigen Gremien zu überprüfen.

In der Diskussion um Nanomaterialien in Abfällen sind Abfälle aus der Produktion und Verarbeitung (Nanoabfälle) von Abfällen aus Altprodukten (nanomaterialhaltige Abfälle) zu unterscheiden. Im Vergleich zu nanomaterialhaltigen Abfällen

- ist die Zusammensetzung von Nanoabfällen, einschließlich ihrem Gehalt an Nanomaterialien prinzipiell bekannt,
- sind Nanoabfälle homogen und haben vielfach keine komplexe Matrixstruktur.

Nanoabfälle können bei Kenntnis der spezifischen Eigenschaften der enthaltenen (gefährlichen) Nanomaterialien grundsätzlich sicher vorbehandelt und entsorgt werden. Allerdings ist nicht davon auszugehen, dass alle weiterverarbeitenden Unternehmen, die die Nanoabfälle erzeugen, in jedem Fall über entsprechende Sachkenntnis verfügen. Insofern wären entsprechende Leitfäden und Informationen zu erstellen.

Ein abschließender Nachweis, dass die verschiedenen Entsorgungspfade für (gefährliche) Abfälle auch für Nanoabfälle und nanomaterialhaltige Abfälle hinsichtlich des Umweltschutzes geeignet sind, existiert bislang nicht. Im Bereich des Arbeitsschutzes gibt es Hinweise, dass bei Einhaltung bestehender Regelungen Risiken für Arbeitnehmer im Umgang mit Nanoabfällen und nanomaterialhaltigen Abfällen angemessen beherrscht werden.

Für die Verbrennung zeigen erste Versuche mit inerten Nanooxiden eine gute Rückhaltung in der Schlacke. Allerdings ist nicht bekannt, ob bei der weiteren Verwertung der Schlacke Nanomaterialien in die Umwelt freigesetzt werden. Untersuchungen mit Klärschlamm zeigen, dass eine landwirtschaftliche Verwertung nanosilberhaltiger Klärschlämme zu einer Anreicherung von Partikeln und negativen Effekten auf die Bodenmikroorganismen führen kann. Die Ergebnisse aus der Verbrennung sowie der Klärschlammverwertung können jedoch nicht auf alle Nanomaterialien übertragen werden.

Da zur Verwertung von Abfällen, auch aus Gründen des Arbeitsschutzes, die Gefährlichkeit von Abfällen bekannt sein sollte, ist eine Kommunikation entsprechender Informationen entlang der Lieferkette bis zum Entsorger erforderlich.

Ob und welche (spezifische) Information allein aufgrund des Gehaltes an Nanomaterialien zu kommunizieren wäre, blieb im FachDialog ungeklärt.

Der Gehalt an Nanomaterialien in Produkten sollte, auch wenn diese keine gefährlichen Eigenschaften haben, unter Umständen auch in der Lieferkette kommuniziert werden, um mögliche Beeinträchtigungen in der Wiederverwendung der Materialströme transparent zu machen. Erschweren oder verhindern Nanomaterialien ein hochwertiges Recycling, sollte geprüft werden, ob diese substituierbar sind.

Einigkeit bestand darin, dass eine allgemeine Kennzeichnung von Produkten bezüglich ihres Gehalts an Nanomaterialien nicht zielführend ist. Es wurde jedoch ein Bedarf gesehen, die Mengen von Nanomaterialien in Produkten zu beobachten, um bei Bekanntwerden möglicher Risiken zielgerichtet handeln zu können.

Wie auch in anderen FachDialogen wurde festgestellt, dass Messmethoden für Nanomaterialien (in komplexen Matrices) fehlen und daher zu entwickeln sind.

In einigen Bereichen werden wichtige Chancen für die Abfallwirtschaft durch den Einsatz von Nanotechnologien gesehen. Beispiele hierfür sind die Installation von speziell beschichteten Wärmetauschern in Verbrennungsanlagen, der Einsatz von Nanofiltern und Nanomembranen zur Abgas- und Abwasserreinigung oder der Einsatz von „Nanomarkern“ zur Kennzeichnung von Materialien, um diese in Sortieranlagen besser erkennen und trennen zu können.

Ein spezifischer Forschungsbedarf wird in Hinblick auf die Ermittlung möglicher Emissionen und Expositionen von gefährlichen Nanomaterialien aus den verschiedenen Standardprozessen der Abfallwirtschaft gesehen, sowie in Hinblick auf die Art und Mengen an Nanomaterialien, die mit verschiedenen Abfallströmen in die Entsorgungswirtschaft und in Recyclingprodukte gelangen.