



OAW

ITA

Institut für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften

Sabine Greßler,
Michael Nentwich*

Nano und Umwelt – Teil II: Gefährdungspotenziale und Risiken

Zusammenfassung

Derzeit gibt es keine eindeutigen Hinweise darauf, dass künstlich hergestellte Nanopartikel (ENPs) eine signifikante Gefährdung für die Umwelt darstellen. Allerdings bestehen noch große Wissenslücken:

Umweltanalytik: Geeignete Methoden zur Bestimmung von Nanopartikel-Konzentrationen und -Eigenschaften in komplexen Umweltmedien, wie z. B. Wasser, Boden, Sediment oder Klärschlamm, wie auch in Organismen müssen erst noch entwickelt werden.

Verbleib und Verhalten in den natürlichen Umweltkompartimenten: Die speziellen Eigenschaften von künstlichen Nanomaterialien machen Vorhersagen schwierig. Der derzeitige Mangel an Daten ist ein großes Hindernis für die realistische Gesamteinschätzung des Verbleibs und des Verhaltens von Nanomaterialien in der Umwelt.

Ökotoxikologie: Die Forschung konzentriert sich primär auf kontrollierte Laboruntersuchungen mit Zellkulturen oder Modellorganismen. Einer der Hauptkritikpunkte sind die dabei verwendeten unrealistisch hohen Dosierungen. Bislang gibt es keine ökotoxikologischen Untersuchungen, die im Detail die Mechanismen der Aufnahme, der Verteilung, der Verstoffwechslung und der Ausscheidung von Nanopartikeln erklären könnten.

Umweltexposition: Die wahrscheinlichsten Eintrittspfade von Nanomaterialien in die Umwelt sind Abwasser und Abfall, doch bislang liegen für kein Nanomaterial quantitative Expositionsdaten vor. Studien basieren ausschließlich auf Modellberechnungen und Schätzungen, was eine umfassende Risikoabschätzung erheblich erschwert.

Insgesamt ist festzustellen, dass stichhaltige Aussagen, ob Umweltschäden auftreten können oder nicht, derzeit kaum möglich sind.

* Korrespondenzautor

Einleitung

Manche Produkte und Anwendungen mit Nanomaterialien versprechen Vorteile für den Umwelt- und Klimaschutz – damit beschäftigt sich Dossier 026. Doch auch ein allfälliges Gefährdungspotenzial und die möglichen Risiken künstlich hergestellter Nanopartikel (ENPs), die sich aufgrund ihrer besonderen physikalischen und chemischen Eigenschaften ergeben, bedürfen einer eingehenden Betrachtung. Zwar gibt es derzeit keine Hinweise, dass ENPs eine signifikante Gefährdung für die Umwelt darstellen; hinsichtlich der Ökotoxizität von ENPs bestehen aber noch viele Wissenslücken. Das Fehlen von Indizien sollte also nicht als Beweis gedeutet werden, dass Umweltschäden nicht auftreten können.

Zurzeit konzentriert sich die ökotoxikologische Forschung primär auf kontrollierte Laboruntersuchungen mit Zellkulturen oder Modellorganismen. Einer der Hauptkritikpunkte sind die dabei verwendeten unrealistisch hohen Dosierungen¹. Solche „Überdosierungen“ sind oft notwendig, um eine Wirkung überhaupt feststellen zu können. In Laboruntersuchungen können sie aber zu Messartefakten führen, da manche ENPs große Aggregate bilden, welche die Bioverfügbarkeit und somit die Toxizität eines Materials verändern können. Die verwendeten Konzentrationen liegen oft weit über den realistischen Expositionsszenarien. So etwa zeigen Risikoabschätzungen für Nanosilber, dass die Maximalkonzentration in Gewässern derzeit wahrscheinlich bei etwa 0,1 µg/Liter liegt. Dennoch wird in den meisten ökotoxikologischen Untersuchungen Nanosilber in Konzentrationen von mg/Liter verwendet¹.

Laboruntersuchungen folgen Testprotokollen, die ursprünglich für herkömmliche Chemikalien, etwa Pestizide, entwickelt wurden und die Spezifika von Nanomaterialien nicht berücksichtigen. Natürliche Ökosysteme sind zudem wesentlich komplexer als eine Petrischale, weshalb Laboruntersuchungen nur bedingt aussagekräftig

sind. Bis dato ist zum Glück kein Unfall dokumentiert, bei dem ENPs in größeren Mengen in die Umwelt gelangt wären, allerdings ist es deshalb auch nicht möglich, direkt im Freiland die Auswirkungen unter natürlichen Bedingungen zu untersuchen¹.

Das vorliegende Dossier zeigt die Probleme im Bereich der *Umweltanalytik* auf, stellt den derzeitigen Kenntnisstand zum Verbleib und zum Verhalten von ENPs in verschiedenen Umweltkompartimenten dar und bietet einen Überblick über die vorläufigen Ergebnisse aus der *Ökotoxikologie* und aus Modellberechnungen zur *Expositionsabschätzung*.

Umweltanalytik

Es gibt eine Reihe von Methoden, um Nanopartikel in einfachen Medien festzustellen, zu messen oder zu charakterisieren, z. B. Mikroskopie, Chromatographie, Spektroskopie, Zentrifugation, Filtration und verwandte Techniken². Welche sich für eine bestimmte Untersuchung eignet, hängt von der Art der Probe und des Nanomaterials, der gewünschten Information, dem verfügbaren Zeitrahmen und den Kosten ab. Manche Methoden erbringen nur den Nachweis der Anwesenheit von Nanopartikeln, andere geben Aufschluss über die Menge, die Größenverteilung oder die Größe der Oberfläche³. Oft ist eine Kombination aus mehreren Methoden notwendig, um eine Frage zu bearbeiten.

Geeignete analytische Methoden müssen erst noch entwickelt werden, um Nanopartikel-Konzentrationen und -Eigenschaften in komplexen Umweltmedien, wie z. B. Wasser, Boden, Sediment oder Klärschlamm, wie auch in Organismen zu bestimmen. Die Schwierigkeiten von Umweltanalysen sind vielfältig und liegen schon bei der Probenentnahme und -aufbereitung, bei der Artefakte entstehen können, wie auch bei der Unterscheidung zwischen

natürlichen und künstlichen Nanopartikeln. Auch die Konservierung und Lagerung von Proben ist problematisch, da dabei oft chemische Veränderungen auftreten⁴.

Bislang gibt es noch keine wissenschaftliche Publikation über Methoden zur Quantifizierung von Kohlenstoff-Nanoröhrchen (CNTs) in der Umwelt⁵. „Single-Walled Carbon Nanotubes“ (SWCNTs) können aber nach (unveröffentlichten) Ergebnissen einer Studie an der Duke University (USA) mittels spezieller spektroskopischer Methoden nachgewiesen werden, wenngleich die Isolation des Nanomaterials aus der Probenmatrix problematisch ist⁶. Weiters gibt es keine Veröffentlichungen über quantitative oder qualitative Messungen von synthetischen Nanomaterialien in der Luft, mit Ausnahme von Messungen an Arbeitsplätzen⁷. Bislang ist erst in wenigen Untersuchungen der Nachweis von ENPs gelungen, die aus einer Anwendung in die Umwelt gelangten: Eine Untersuchung zeigte, dass TiO₂-Partikel in Größen von 20 bis 300 nm durch Regen aus Fassadenfarben ausgewaschen wurden und in natürliche Gewässer⁸ gelangten. Eine weitere Studie konnte nachweisen, dass geringe Mengen von TiO₂-Nanopartikeln in Größen von 4 bis 30 nm durch den Ablauf aus Abwasserreinigungsanlagen in die Umwelt freigesetzt werden⁹.

Verbleib und Verhalten von Nanomaterialien in der Umwelt

Die ökologische Forschung über das Verhalten von ENPs kann auf eine Vielzahl von Studien aus den Geowissenschaften zurückgreifen, die sich mit dem Verhalten natürlich vorkommender Nanopartikel in der Umwelt beschäftigen. ENPs unterscheiden sich jedoch in mancher Hinsicht von natürlich vorkommenden. Während natürliche Nanopartikel zufällig gestaltet und diffus in der Umwelt verteilt sind, werden industriell Suspensionen oder Pulver hergestellt, die reine Nanomaterialien in möglichst einheitlicher Größe, Form und Struktur enthalten. Solche Nanomaterialien haben einzigartige Eigenschaften, wie etwa die besondere Zugfestigkeit von CNTs oder die photokatalytische Aktivität von Nano-TiO₂, die sie interessant für neuartige Produkte und Anwendungen machen. Gerade diese speziellen Eigenschaften machen es aber so schwierig, den Verbleib und das Verhalten von ENPs in der Umwelt vorherzusagen¹.

Beschreibung möglicher Umweltprozesse, die das Verhalten und die Eigenschaften von Nanomaterialien beeinflussen können (nach⁷):

Auflösung: Ein festes Nanomaterial löst sich in einem Lösungsmittel, wobei eine chemische Lösung entsteht.

Niederschlag/Sedimentierung: Nanomaterialien werden aus einer Suspension oder Lösung abgetrennt.

Spezierung: Ausbildung chemischer Ausprägungsformen (Spezies) eines Nanomaterials, die miteinander in einem Reaktionsgleichgewicht stehen.

Verbindung mit biotischen oder abiotischen Partikeln: Nanomaterialien interagieren mit anderen belebten oder unbelebten Materialien in der Umwelt, z. B. in Form von Adhäsion (Anhaftung) oder Sorption (Anreicherung).

Transformation: Ein Nanomaterial erfährt eine biologische oder chemische Umwandlung.

Agglomeration/Disagglomeration: Nanomaterialien verbinden sich zu größeren Einheiten oder trennen sich wieder.

Mineralisierung: Umwandlung eines kohlenstoffhaltigen Nanomaterials in einen anorganischen Zustand durch biotischen und abiotischen Abbau.

Diffusion: Transport eines Nanomaterials aus einem Bereich mit höherer Konzentration in einen mit niedrigerer Konzentration durch zufällige (Brownsche) Molekularbewegung.

Deposition: Abscheidung eines Nanomaterials, z. B. aus der Luft in Wasser.

Resuspension: Erneute Verteilung eines unlöslichen Nanomaterials in einer Flüssigkeit oder einem Gas (z. B. von einer Oberfläche in Gas oder von einem Sediment in Wasser), nachdem dieses zuvor durch Fällung abgetrennt worden war.

Nanomaterialien können in der Umwelt einer Reihe von chemischen Prozessen unterworfen sein (siehe Info-Box), die von vielen Faktoren abhängen (z. B. pH-Wert, Salzgehalt, Konzentrationsunterschiede, Anwesenheit von organischem oder anorganischem Material, etc.). Auch die Charakteristika und Eigenschaften des Nanomaterials selbst spielen eine große Rolle. Für eine mögliche Toxizität ist die Bioverfügbarkeit entscheidend. Diese hängt stark davon ab, ob Nanopartikel in einem Umweltmedium stabil bleiben oder etwa durch Agglomeration und Deposition aus dem betreffenden Medium entfernt werden bzw. in eine Form übergehen, in der sie von Organismen nicht aufgenommen werden können.

Der derzeitige Mangel an Daten lässt ein Gesamtbild des Verbleibs und Verhaltens von Nanomaterialien in der Umwelt nicht zu. Zudem sind vorhandene Studien schlecht vergleichbar, da verschiedene Nanomaterialien mit unterschiedlichen Eigenschaften (z. B. Oberflächenfunktionalisierungen – siehe unten) verwendet werden und sich sowohl die Methoden als auch die Dauer der Untersuchungen oftmals stark unterscheiden. Die Untersuchungsergebnisse zu möglichen Auswirkungen von ENPs auf Umwelt und Gesundheit wurden kürzlich im Rahmen eines EU-Projektes⁷ zusammengefasst. Im Folgenden wird der derzeitige Kenntnisstand zum Verbleib und zum Verhalten von ENPs in den Umweltkompartimenten Luft, Wasser, Boden und Sediment aus diesem Bericht kurz dargestellt.

Luft

Gelangen Nanopartikel in die Luft, wandern sie vom Bereich höherer Konzentration zu Bereichen niedrigerer Konzentration (Diffusion). Luftströmungen verteilen die Partikel rasch; diese können von der Ursprungsquelle aus über weite Strecken wandern. Allerdings neigen Nanopartikel dazu, sich zu größeren Strukturen zusammenzuballen (Agglomeration). Das Aufspüren und der Nachweis von Nanopartikeln in der Luft sind sehr schwierig, weil diese Agglomerate durch einfache Messungen der Größenverteilung kaum von natürlichem Schwebstaub zu unterscheiden sind. Wie schnell Partikel aus der Luft am Boden, im Wasser oder auf Pflanzen abgelagert werden (Deposition) hängt vom Partikeldurchmesser ab. Nanopartikel aus der Luft lagern sich aufgrund ihres geringen Durchmessers wesentlich langsamer ab als größere Partikel.

Wasser

Allgemein gilt, dass sich in Wasser verteilte Nanomaterialien ähnlich wie die in der Chemie gut beschriebenen Kolloide verhalten. Kolloide sind fein in einem Medium verteilte Tröpfchen oder Teilchen, die relativ instabil sind, da sie aufgrund von elektrostatischen Anziehungskräften rasch aneinander haften und als Folge der Schwerkraft absinken. Natürliche Gewässer enthalten zumeist gelöste oder verteilte Materialien, einschließlich natürlicher Nanomaterialien. Erwartungsgemäß binden sich synthetische Nanoma-

terialien, die in natürliche Gewässer gelangen, an solche natürlichen Materialien. Der Verbleib und das Verhalten von Nanomaterialien im Wasser werden allerdings von Faktoren wie dem pH-Wert, dem Salzgehalt (Ionenstärke) und der Anwesenheit von organischem Material beeinflusst. Natürlich vorkommendes organisches Material (NOM) führt etwa zum Zerfall von C60-Fullerenen bzw. deren Aggregaten und verändert somit Partikelgröße und Gestalt. Ein NOM wie Huminsäure kann bestimmte Kohlenstoff-Nanoröhrchen (MWCNT) im Wasser stabilisieren und so ein Absinken verhindern. Manche CNTs werden auch gezielt mittels spezieller Oberflächenveränderungen so hergestellt, dass sie nicht aggregieren. Die Art dieser Funktionalisierung beeinflusst entscheidend, ob CNTs durch Sedimentierung aus einem natürlichen Wasserkörper entfernt werden können. Da CNTs sehr vielgestaltig sind, ist es generell unmöglich, allgemeine Aussagen über ihren Verbleib und Verhalten in der Umwelt zu treffen. Ein starker Einfluss des Umgebungsmilieus auf das Verhalten, insbesondere die Anwesenheit von NOM, wurde auch bei anderen Nanomaterialien wie Metallen oder Metalloxiden¹⁰ festgestellt.

Boden und Sediment

Leider fehlen auch für dieses Umweltkompartiment Daten, um generelle Schlussfolgerungen ziehen zu können. Für diesen Bereich liegen noch viel weniger Studien vor als für Wasser oder Luft. Es gibt jedoch eine umfangreiche Literatur zur Mobilität natürlicher Kolloide im Boden und Grundwasser, die Rückschlüsse auf das Verhalten von Nanomaterialien ermöglicht. Es wird demnach angenommen, dass sich Nanomaterialien im Boden und in den Sedimenten an Feststoffe binden. Die im Allgemeinen sehr geringen Konzentrationen an Partikeln im Grundwasser unterstützen diese These. Die Bioverfügbarkeit – und damit die mögliche Toxizität – eines Nanomaterials für Bodenlebewesen dürften stark davon abhängen, ob es sich mit NOM verbindet. Die Bioverfügbarkeit von Nanosilber in komplexen Medien, wie etwa im Boden, ist wesentlich geringer als in Wasser, da sich die reaktiven Silberionen an Bestandteile im Boden (z. B. NOM) binden können¹¹. Der Co-Transport von Schadstoffen im Boden mit ENPs ist nur wenig untersucht, dürfte aber für die meisten Schadstoffe und ENPs aufgrund der extrem niedrigen ENP Konzentrationen im Boden nicht relevant sein¹².

Umwelttoxizität

Nanopartikel kommen seit Anbeginn der Erdgeschichte natürlich in der Umwelt vor, etwa als Ergebnis von Verbrennungsprozessen (Waldbränden), in Vulkanasche, in den meisten natürlichen Gewässern oder als Staub in der Luft aufgrund von Verwitterung und Erosion. Organismen produzieren in ihren Zellen verschiedene Substanzen in Nanoform (z. B. Proteine, DNA) oder sind selbst nur einige Nanometer groß, wie etwa Viren. Alle lebenden Organismen haben sich im Laufe ihrer Entwicklungsgeschichte an eine Umwelt angepasst, die Nanopartikel enthält, von denen manche auch toxisch wirken wie z. B. Vulkanasche. Diese Anpassung ist eine Funktion von Exposition, Dosis und der Geschwindigkeit, in der sich Lebensräume verändern¹³. Zu den natürlichen Nanopartikeln in der Umwelt kommen auch noch solche, die unbeabsichtigt aufgrund menschlicher Aktivitäten freigesetzt werden, etwa durch Hausbrand, Industrie, Brandrodung, Verkehr und, in jüngster Zeit, durch den industriellen Einsatz unterschiedlicher, extrem vielgestaltiger synthetischer Nanopartikel in unbekanntem Mengen. Diese zusätzliche Belastung von Mensch und Umwelt in einer (entwicklungsgeschichtlich betrachtet) sehr kurzen Zeitspanne wirft die Frage auf, inwieweit Organismen mit diesen künstlichen Nanopartikeln zurecht kommen können, ohne Schaden zu nehmen.

Die meisten Daten zur akuten Toxizität wie auch zu sublethalen Effekten liegen für Süßwasser-Organismen vor (z. B. Wasserflöhe, Fische). Mehr Untersuchungen an marinen und terrestrischen Wirbellosen zur Feststellung einer möglichen Toxizität sind ebenso notwendig wie für Amphibien, Reptilien, Vögel oder Pflanzen, Bakterien und andere Mikroorganismen. Bislang gibt es keine ökotoxikologischen Untersuchungen, die im Detail die Mechanismen der Aufnahme, Verteilung, Verstoffwechslung und der Ausscheidung von Nanopartikeln erklären könnten¹³.

In einer 2010 durchgeführten Zusammenchau der einschlägigen wissenschaftlichen Literatur wurden nur 12 Arbeiten identifiziert, die tatsächlich als ökologische Studien betrachtet werden können, da sie der Komplexität natürlicher Ökosysteme mehr oder weniger gerecht werden. Diese wenigen Studien zu Auswirkungen von ENPs auf ökologische Lebensgemeinschaften zeigten allerdings keinen signifikanten Anstieg der Todesrate oder Veränderungen in deren Zusammensetzung¹.

Im Folgenden werden die Ergebnisse ökotoxikologischer Untersuchungen an einigen ausgewählten Nanomaterialien kurz zusammengefasst (für einen umfassenden Review siehe⁷).

Kohlenstoff-Nanoröhrchen (CNTs)

Zur Ökotoxizität von CNTs liegen bislang erst wenige Arbeiten vor, die sich in ihren Ergebnissen zum Teil stark unterscheiden. Während manche Studien keine negativen Effekte auf Testorganismen feststellen, zeigen andere solche durchaus, etwa für Fische oder Amphibienlarven. Grund ist die große Variabilität von CNTs, die sich in Länge, Struktur, Oberflächenladung, Oberflächenchemie, Agglomerationsverhalten und Reinheit stark unterscheiden können (siehe dazu^{14; 15}). Zudem ist die Untersuchung der Toxizität von CNTs für wasserlebende Organismen sehr schwierig, da CNTs sehr schlecht wasserlöslich sind, unterschiedliche Größen und Durchmesser aufweisen und komplexe Aggregate bilden⁵. CNTs werden oft oberflächenfunktionalisiert, sodass sie in Wasser fein verteilt stabil bleiben und sich nicht absetzen. Solche Oberflächenveränderungen verstärken jedoch die Neigung von CNTs, Schwermetalle anzulagern, wodurch deren Transport in Gewässern oder sogar in biologischen Systemen beeinflusst werden kann¹⁶.

Nano-TiO₂

Titandioxid-Nanopartikel gehören zu den am häufigsten ökotoxikologisch untersuchten Nanomaterialien. Es gibt bereits eine Reihe von standardisierten Tests für Fische, Krebstiere und Algen. Nano-TiO₂ wirkt photokatalytisch, d. h. unter UV-Strahlung entstehen reaktive Sauerstoffspezies (ROS), welche die Zellmembran von Mikroorganismen beschädigen können. In Versuchen, bei denen die Verhältnisse in natürlichen Fließgewässern im Labormaßstab nachgestellt wurden (sogenannte aquatische Mikrokosmen) zeigte sich, dass sowohl TiO₂-Nanopartikel als auch geringe Konzentrationen größerer, natürlich entstehender Agglomerate die Zellmembran von Mikroorganismen signifikant schädigen können. Mikroorganismen sind gegenüber Nano-TiO₂ sehr empfindlich – welche Auswirkungen das auf die Funktion von Ökosystemen hat, ist bislang jedoch unbekannt¹⁷. Größere wasserlebende Organismen wie etwa kleine Krebstiere, die als Zooplankton große Bedeutung in der aquatischen Nahrungskette haben, werden nach vorläufigen Erkenntnissen nicht durch die photokatalytische Wirkung von Nano-TiO₂ geschädigt. Allerdings können sich die Na-

nopartikel außen am Chitinpanzer der Tiere festsetzen und bei Jungtieren die zum Wachstum notwendige Häutung behindern, was zum Tod der Tiere führt. Dieser Effekt wurde bei Konzentrationen von 0,24 mg/Liter Wasser festgestellt; Nano-TiO₂ erwies sich als doppelt so toxisch wie die größere Form¹⁸.

Nanosilber

Silberionen aus Silberverbindungen oder solche, die durch Kontakt mit Wasser aus Nanosilberpartikeln entstehen, wirken stark toxisch auf Mikroorganismen wie Bakterien, Pilze und Algen (siehe dazu¹⁹). Bodenmikroorganismen können betroffen sein, wenn etwa mit Nanosilber belasteter Klärschlamm auf Felder ausgebracht wird. Nanosilberpartikel zeigen bereits bei niedrigen Konzentrationen negative Effekte auf Fische und Krebse; für Säugetiere ist dieses Material nur in sehr hohen Konzentrationen giftig. Untersuchungen an Pflanzen liegen erst wenige vor, eine jüngere Arbeit etwa zeigt negative Auswirkungen von Nanosilberpartikeln auf das Wachstum von Gras-Keimlingen aufgrund von Zellschädigungen²⁰. Als Haupteintragspfad für Nanosilber erscheint Abwasser plausibel, da dieses Material aus speziellen Textilien ausgewaschen werden kann (siehe dazu²¹) oder auch in Kosmetika und Reinigungsmitteln Verwendung findet. Nanosilber im Abwasser wurde deshalb von einer internationalen Gruppe aus ForscherInnen verschiedener Fachdisziplinen als eines von 15 Problemfeldern identifiziert, welche die Erhaltung der biologischen Vielfalt gefährden können²².

Exposition

Ob von ENPs ein Risiko für die Umwelt ausgeht, hängt nicht allein von der Toxizität des betreffenden Materials ab, sondern auch von der Exposition, also von der Menge, die in die Umwelt freigesetzt wird. Leider liegen derzeit für kein einziges Nanomaterial quantitative Daten vor, da es keine verpflichtende Registrierung von Nanomaterialien gibt und Unternehmen sehr zurückhaltend bei der Preisgabe von Produktionsmengen sind²³. Nur wenige Studien haben sich bisher mit der Umweltpexposition durch Nanomaterialien beschäftigt. Diese basieren auf groben Schätzungen der Produktionsmengen und der Freisetzung sowie auf Modellberechnungen, was eine umfassende Risikoabschätzung nicht zulässt.

So schätzt eine kürzlich erschienenen Studie²³ das jährliche Produktionsvolumen in den USA für Nano-TiO₂ auf 7.800 bis 38.000 t, gefolgt von CNTs mit 55 bis 1.101 t und Nano-Ceroxid mit 35 bis 700 t. Das Produktionsvolumen von Nanosilber wird auf 2,8 bis 20 t pro Jahr geschätzt. Um ein mögliches Umweltrisiko abschätzen zu können, reicht jedoch die Kenntnis der Produktionsvolumina nicht aus, vielmehr müssen die tatsächlich freigesetzten Mengen bekannt sein.

Bislang wird davon ausgegangen, dass Nanomaterialien, die fest in eine Matrix eingebunden sind, kein oder nur ein geringes Umweltrisiko darstellen. Das gilt etwa für CNTs, die in Kunststoffe eingearbeitet werden oder für Nano-TiO₂ in dauerhaften photokatalytischen Beschichtungen. Allerdings gibt es erst sehr wenige Studien zur Freisetzung von ENPs aus Konsumprodukten. Nanosilber, sowohl in Form von Partikeln als auch von Ionen, kann etwa durch Waschen aus Textilien freigesetzt werden, wobei die Freisetzungsraten stark von der Herstellungsart abhängt²⁴. Aus Fassadenfarben können TiO₂-Partikeln ausgewaschen werden und in die Umwelt gelangen⁸.

Für Europa, die USA und die Schweiz wurde in Form von Modellberechnungen versucht, die in der Umwelt zu erwartenden Konzentrationen („Predicted Environmental Concentrations“, PEC) von fünf Nanomaterialien zu berechnen. Die höchste Konzentration in allen Umweltkompartimenten ergab sich für Nano-TiO₂, gefolgt von Nano-Zinkoxid. Ein Vergleich dieser Werte mit den Konzentrationen der untersuchten Nanomaterialien, bei denen keine negativen Umwelteffekte zu erwarten sind („Predicted No-Effects-Concentration“, PNEC) ergab ein mögliches Risiko für aquatische Organismen durch Nano-TiO₂, Nanosilber und Nano-Zinkoxid im Abwasser von Kläranlagen. Die PEC von CNTs und Fullerenen wurden als so niedrig eingestuft, dass derzeit kein Umweltrisiko zu erwarten sei²⁵.

Die wahrscheinlichsten Eintrittspfade von Nanomaterialien in die Umwelt sind Abwasser und Abfall. Abfälle, die Nanomaterialien enthalten, können schon bei der Produktion der Materialien entstehen, bei der Herstellung von Produkten mit Nanomaterialien sowie am Ende ihrer Lebensdauer. Die derzeitige Gesetzeslage enthält keine spezifischen Regelungen für die Behandlung von Abfällen mit Nanomaterialien²⁶. Eine Freisetzung von ENPs in die Umwelt aus Abfällen ist möglich, allerdings liegen dazu noch kaum Untersuchungen vor. Man nimmt an, dass ENPs bei der Müllverbrennung durch Filter effizient entfernt werden²⁷.

LEDs enthalten nanoskalige Schichten der Halbleitermaterialien Arsen, Gallium, Phosphor und ihrer Verbindungen. Sie gehören daher zum besonders zu behandelnden oder überwachungsbedürftigen Abfall. Insbesondere das Halbleitermaterial Galliumarsenid ist problematisch, da sich unter Anwesenheit von Luftsauerstoff und Wasser an der Oberfläche des Materials eine hauchdünne Schicht bilden kann, die stark toxisch ist und auf einer normalen Mülldeponie Umweltschäden anrichten könnte²⁸.

Nanosilber kann über verschiedene Wege ins Abwasser gelangen, etwa durch das Waschen spezieller Textilien, durch Kosmetika oder Reinigungsmittel. Etwa 90 % des Nanosilbers wird offenbar in Kläranlagen aus dem Abwasser entfernt und findet sich im Klärschlamm wieder²⁹. Wird dieser als Dünger auf Felder ausgebracht, gelangt dieses Nanomaterial in die Umwelt, wobei Schädigungen von Bodenmikroorganismen nicht ausgeschlossen werden können (siehe dazu¹⁹).

Eine weitere offene Frage betrifft die Wiederverwertbarkeit von Produkten, die Nanomaterialien enthalten. Kunststoffflaschen aus Polyethylenterephthalat (PET) können einem Recycling zugeführt werden, sofern sie keine Farb- oder Zusatzstoffe enthalten. Beschichtungen aus Nanokompositmaterialien, welche die Gasdurchlässigkeit vermindern oder Lichtschutz bieten sollen, gelten als problematisch für das Recycling³⁰.

Anmerkungen und Literaturhinweise

- ¹ Bernhardt, Emily, et al., 2010, An Ecological Perspective on Nanomaterial Impacts in the Environment, *Journal of Environmental Quality* 39, 1954-1965 <<http://snre.umich.edu/cardinale/pdfs/Berhardt%20et%20al,%20J%20Env%20Qual%202010.pdf>>.
- ² Tiede, Karen, et al., 2008, Detection and characterization of engineered nanoparticles in food and the environment, *Food Additives and Contaminants* 25(7), 795-821 <<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02652030802007553>>.
- ³ Essex, University of, o.J., *Measurement Techniques for Nanoparticles*, im Auftrag von: Nanocap <<http://www.nanocap.eu/Flex/Site/Downloadf860.pdf>>.
- ⁴ Von der Kammer, Frank, et al., 2011, Analysis of Engineered Nanomaterials in Complex Matrices (Environment and Biota): General Considerations and Conceptual Case Studies, *Environmental Toxicology and Chemistry* 31(12), 1-18.
- ⁵ Hassellöv, Martin, et al., 2008, Nanoparticle analysis and characterization methodologies in environmental risk assessment of engineered nanoparticles, *Ecotoxicology* 17, 344-361.

Fazit

Zum Verbleib und Verhalten von synthetischen Nanomaterialien in der Umwelt ist wenig bekannt, wie auch geeignete Verfahren zum Nachweis in komplexen Umweltmedien erst in Entwicklung sind. Modellberechnungen der Exposition reichen alleine nicht aus, um eine umfassende Risikoabschätzung vornehmen zu können. Die Entwicklung von Methoden zum Monitoring von Nanomaterialien in der Umwelt ist hierfür unerlässlich. Ökotoxikologische Untersuchungen zeigen ein gewisses Gefährdungspotenzial bestimmter Nanomaterialien. Auch wenn noch wissenschaftliche Unsicherheiten bestehen, sollte im Sinne einer präventiven Risikominimierung das Vorsorgeprinzip angewendet und Umwelteinträge weitgehend vermieden werden. Das Hauptaugenmerk der ökotoxikologischen Forschung sollte verstärkt auf der Umwelrelevanz liegen und der Komplexität natürlicher Systeme Rechnungen tragen. Langzeitstudien wären notwendig, um mögliche Spätfolgen einer Umweltexposition mit ENPs oder aber auch Anpassungsmechanismen feststellen zu können. Mehr Untersuchungen zu einer Anreicherung (Bioakkumulation) in der Nahrungskette sind ebenso notwendig wie zur Interaktion von ENPs mit anderen Schadstoffen in der Umwelt, deren Transport und Wirkung sie unter bestimmten Bedingungen verändern könnten.

⁶ <http://www.ceint.duke.edu/event/brown-bag-lunch-ariette-schierz>.

⁷ Aitken, Robert J., et al., 2008, *Engineered Nanoparticles: Review of Health and Environmental Safety (ENRHES). Final Report* <<http://nmi.jrc.ec.europa.eu/documents/pdf/ENRHES%20Review.pdf>>.

⁸ Kaegi, R., et al., 2008, Synthetic TiO₂ nanoparticle emission from exterior facades into the aquatic environment, *Environmental Pollution* 2008(156), 233-239.

⁹ Westerhoff, Paul, et al., 2011, Occurrence and removal of titanium at full scale wastewater treatment plants: implications for TiO₂ nanomaterials, *Journal of Environmental Monitoring* 13(5), 1195-1203.

¹⁰ Ottofuelling, Stephanie, et al., 2011, Commercial Titanium Dioxide Nanoparticles in Both Natural and Synthetic Water: Comprehensive Multidimensional Testing and Prediction of Aggregation Behavior, *Environmental Science & Technology in Druck*.

¹¹ Lapiéd, Emmanuel, et al., 2010, Silver nanoparticles exposure causes apoptotic response in the earthworm *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta), *Nanomedicine* 5(6), 975-984.

¹² Hofmann, Thilo/Von der Kammer, Frank, 2009, Estimating the relevance of engineered carbonaceous nanoparticle facilitated transport of hydrophobic contaminants in porous media, *Environmental Pollution* 157, 1117-1126.

¹³ Handy, Richard D., et al., 2008, The ecotoxicology of nanoparticles and nanomaterials: current status, knowledge gaps, challenges, and future needs, *Ecotoxicology* 17, 315-325.

¹⁴ Greßler, S., et al., 2011, *Kohlenstoff-Nanoröhrchen (Carbon Nanotubes) Teil I: Grundlagen, Herstellung, Anwendung*. Nano-Trust-Dossier 022 hrsg. v. Institut für Technikfolgen-Abschätzung, Wien <<http://epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier022.pdf>>.

¹⁵ Fries, R., et al., Ibid. *Kohlenstoff-Nanoröhrchen (Carbon Nanotubes) Teil II: Risiken und Regulierung*. Nano-Trust-Dossier 024 hrsg. v. Institut für Technikfolgen-Abschätzung <<http://epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier024.pdf>>.

¹⁶ Schierz, A./Zänker, H., 2009, Aqueous suspensions of carbon nanotubes: Surface oxidation, colloidal stability and uranium sorption, *Environmental Pollution* 157, 1088-1094.

¹⁷ Battin, Tom J., et al., 2009, Nanostructured TiO₂: Transport Behavior and Effects on Aquatic Microbial Communities under Environmental Conditions, *Environmental Science & Technology* 43(21), 8098-8104.

¹⁸ Dabrunz, André, et al., 2011, Biological Surface Coating and Molting Inhibition as Mechanisms of TiO₂ Nanoparticle Toxicity in *Daphnia magna*, *PLoS ONE* 6(5), 1-7 <[http://www.plosone.org/article/ fetchObjectAttachment.action;jsessionid=90A1E37ABE178FA13B36B62BBCCB3D91.ambra01?uri=info%3Adoi%2F10.1371%2F journal.pone.0020112&representation=PDF](http://www.plosone.org/article/fetchObjectAttachment.action;jsessionid=90A1E37ABE178FA13B36B62BBCCB3D91.ambra01?uri=info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0020112&representation=PDF)>.

¹⁹ Fries, R., et al., 2009, *Nanosilber*, Nano-Trust-Dossier 010 hrsg. v. Institut für Technikfolgen-Abschätzung, Wien <<http://epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier010.pdf>>.

²⁰ Yin, Liyan, et al., 2011, More than the Ions: The Effects of Silver Nanoparticles on *Lolium multiflorum*, *Environmental Science & Technology* 45, 2360-2367.

²¹ Greßler, Sabine, et al., 2010, *Nano-Textilien*. Nano-Trust-Dossier 015 hrsg. v. Institut für Technikfolgen-Abschätzung, Wien <<http://epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier015.pdf>>.

²² Sutherland, William J., et al., 2009, A horizon scan of global conservation issues for 2010, *Trends in Ecology and Evolution* 25(1), 1-7.

²³ Hendren, Christine O., et al., 2011, Estimating Production Data for Five Engineered Nanomaterials As a Basis for Exposure Assessment, *Environmental Science & Technology* 45, 2562-2569.

²⁴ Benn, Troy M./Westerhoff, Paul, 2008, Nanoparticle Silver Released into Water from Commercially Available Sock Fabrics, *Ibid.* 42(11), 4133-4139.

²⁵ Gottschalk, Fadri, et al., 2009, Modeled Environmental Concentrations of Engineered Nanomaterials (TiO₂, ZnO, Ag, CNT, Fullerenes) for Different Regions, *Ibid.* 43(24), 9216-9222.

²⁶ Verband der Chemischen Industrie e.V., 2009, *Guidance for the Safe Recovery and Disposal of Wastes containing Nanomaterials*, Frankfurt <https://www.vci.de/Downloads/126414-Handling_Nanomaterials_being%20Wastes_7_October_2009.pdf>.

²⁷ Mueller, Nicole C./Nowack, Bernd, 2008, Exposure modeling of engineered nanoparticles in the environment, *Environmental Science & Technology* 42(12), 4447-4453.

²⁸ Steinfeldt, Michael, et al., 2004, *Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte*, im Auftrag von: BMBF <http://www.bmbf.de/pub/nano_Umwelt_ioew_endbericht.pdf>.

²⁹ Nowack, Bernd, 2010, Nanosilver Revisited Downstream, *Science* 330.

³⁰ Van Dongen, Cees/Dvorak, Robert, 2011, *Design Guide for PET Bottle Recyclability*, März 2011: Union of European Beverages Associations (UNESDA); European Federation of Bottled Waters (EFBW) <http://www.efbw.eu/images/file/Design%20Guide%20for%20PET%20Bottle%20Recyclability_31%20March%202011.pdf>.

IMPRESSUM:

Medieninhaber: Österreichische Akademie der Wissenschaften; Juristische Person öffentlichen Rechts (BGBl 569/1921 idF BGBl I 130/2003); Dr. Ignaz Seipel-Platz 2, A-1010 Wien

Herausgeber: Institut für Technikfolgen-Abschätzung (ITA); Strohgasse 45/5, A-1030 Wien; www.oew.ac.at/ita

Erscheinungsweise: Die NanoTrust-Dossiers erscheinen unregelmäßig und dienen der Veröffentlichung der Forschungsergebnisse des Instituts für Technikfolgen-Abschätzung im Rahmen des Projekts NanoTrust. Die Berichte werden ausschließlich über das Internetportal „epub.oew“ der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt: epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/

NanoTrust-Dossier Nr. 027, November 2011: epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier027.pdf

ISSN: 1998-7293



Dieses Dossier steht unter der Creative Commons (Namensnennung-NichtKommerziell-KeineBearbeitung 2.0 Österreich) Lizenz: creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/at/deed.de