

Giftige Zwerge in der Umwelt?

Über Wirkungen von Nanomaterialien in aquatischen Ökosystemen

von Carolin
Völker

Die Zukunftserwartungen an die Nanotechnologie sind hoch. Sie hat vielfältige Anwendungen, gilt als umweltverträglich, energiesparend und ressourcenschonend. Doch mit der wachsenden Nutzung »nanohaltiger« Produkte wächst die Sorge um einen erhöhten Eintrag in die Umwelt. Da die meisten Produkte erst kurze Zeit im Umlauf sind, herrscht Unklarheit über die Langzeiteffekte. Für die Risikobeurteilung ist es wichtig, bestehende Richtlinien zur Prüfung von Chemikalien zu ergänzen und anzupassen. Hier ist die Untersuchung von wirbellosen Tieren in aquatischen Ökosystemen hilfreich, wie sie die Forschergruppe »Aquatische Ökotoxikologie« von Prof. Jörg Oehlmann am Fachbereich Biowissenschaften der Goethe-Universität vornimmt.

Die Wirkung von Feinstäuben auf die Gesundheit ist bereits durch Vulkanausbrüche und Erfahrungen im Bergbau bekannt. Das Risiko, etwa an Lungenfibrose zu erkranken, nimmt mit dem Anstieg feiner Partikel in der Atemluft deutlich zu. Im Gegensatz dazu ist das Gefährdungspotenzial synthetischer Nanomaterialien für Mensch und Umwelt noch wenig erforscht. Erschwert wird eine Übersicht über Produkte mit nanoskaligen Inhaltsstoffen dadurch, dass derzeit keine umfassende Kennzeichnungspflicht besteht. In bisherigen Studien zur Langzeitwirkung von Nanomaterialien lag das größte Augenmerk bei der Risikobeurteilung auf der Toxikologie und den Gesundheitsfolgen für den Menschen. Die

Auswirkungen synthetischer Nanomaterialien auf den Menschen wurden beispielsweise im bereits abgeschlossenen Verbundprojekt NanoCare des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) untersucht. So ist bekannt, dass Nanopartikel über die Nahrung, die Haut oder die Atemwege in den Körper aufgenommen werden. Aufgrund ihrer Größe gelangen sie über die Lungenbläschen in den Blutstrom, was Entzündungen in Lunge, Leber und Hirn zur Folge haben kann. Teilweise überwinden die Partikel die Blut-Hirn-Schranke und dringen in Zellen ein. Die Untersuchung der Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit stellt einen wichtigen Aspekt dar, wenn es darum geht, die Gefährdung durch Nanomaterialien abzuschätzen. Darüber hinaus müssen aber die möglichen Umweltfolgen eingebrachter Nanopartikel im Ökosystem bewertet werden.

Nanopartikel in aquatischen Ökosystemen

Mit steigenden Produktionsvolumina gelangen nanoskalige Substanzen zunehmend in Oberflächengewässer. Schweizer Studien zeigen, dass nanoskaliges Titandioxid aus Fassadenanstrichen von Hausfassaden gewaschen und auf diesem Weg in das Wasser eingetragen wird (Kaegi et al. 2008). Auch das wegen seiner antibakteriellen Wirkung in Sportbekleidung eingesetzte Nanosilber löst sich beim Waschen aus den Textilien und gelangt in das Abwasser, ebenso Nanomaterialien aus Kosmetika und anderen Körperpflegeprodukten. Im vom BMBF geförderten Verbundprojekt NanoNature werden derzeit Methoden für die Messung der tatsächlichen Umweltkonzentration von Nanomaterialien entwickelt, da zurzeit nur wenige Möglichkeiten bestehen, mit klassischer chemischer Analytik Nanopartikel in aquatischen Kompartimenten und Organismen nachzuweisen. Bislang ist nur wenig über das Verhalten dieser Substanzen in der aquatischen Umwelt bekannt. Je nach Form, Größe und Oberflächenladung können die Partikel komplexe physikalische, chemische und biologische Interaktionen in Gewässern zeigen. Freie Nanopartikel lagern sich meist zu größeren Verbänden zusammen und setzen sich bevorzugt im Sediment eines Gewässers ab. Nanomaterialien, welche mit speziellen Beschichtungen versehen wurden, können jedoch als freie Partikel in der Wasserphase verbleiben und durch Strömungen weit im Gewässer verteilt werden.

Über die Effekte im Ökosystem herrscht bisher ebenfalls Unklarheit. Im Wasser lebende Organismen können Nanopartikel über die Kiemen, die Körperoberfläche und die Nahrung aufnehmen. Silber-Nanopartikel führten beispielsweise in einer Studie zu Fehlbildungen und einer erhöhten Sterblichkeit der Embryonen des Zebrafischlings (Yeo & Kang 2008). Beim japanischen Reiskarpfing reicherten sich fluoreszierende Nanopartikel in verschiedenen Organen an und waren in der Lage, die Blut-Hirn-Schranke zu überwinden (Kashiwada 2006).

Besonders wichtig bei der Einschätzung des Umwelt-risikos von Nanomaterialien ist die Untersuchung von wirbellosen Tieren, die mit mehr als 95 Prozent aller bekannten Tierarten einen wichtigen Teil der Biodiversität mit Schlüsselarten für die Struktur und Funktion

Nanotechnologie

Die Nanotechnologie (gr. *nanos* »Zwerg«) gilt als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts. Darunter versteht man die Entwicklung und Anwendung von Materialien und Strukturen im Bereich zwischen einem und hundert Nanometern (ein Nanometer entspricht einem Milliardstel Meter). Von dem visionären Physiker Richard Feynman schon in den 1950er Jahren angeregt, wurde die Erforschung von Nanomaterialien erst 1981 mit der Entwicklung des Raster-Tunnel-Mikroskops durch die Firma IBM möglich. Die ungewöhnlichen Eigenschaften der Nanopartikel beruhen auf der im Verhältnis zum Rauminhalt vergrößerten Oberfläche, die eine intensivere Wechselwirkung mit der Umgebung ermöglicht. Zum Beispiel werden in diesen Dimensionen undurchsichtige Stoffe wie Kupfer transparent, Gold erscheint rot, und stabile Elemente wie Aluminium entflammen. Auch die Gestalt der Partikel hat einen Einfluss auf deren Eigenschaften: So können Materialien mit gleicher Zusammensetzung aber unterschiedlicher Morphologie völlig verschiedene Eigenschaften aufweisen.

Literatur

- | | | | | |
|--|---|--|--|--|
| Kaegi, R.; Ulrich, A.; Sinnet, B.; Vonbank, R.; Wichser, A.; Zuleeg, S.; Simmler, H.; Brunner, S.; Vonmont, H.; Burkhardt, M. & Boller, M. (2008) <i>Synthetic TiO₂ nanoparticle emission</i> | from exterior facades into the aquatic environment <i>Environmental Pollution</i> 156: 233–239. | Kashiwada, S. (2006) <i>Distribution of nanoparticles in</i> | the see-through me-daka (<i>Oryzias latipes</i>) <i>Environmental Health Perspectives</i> 14: 1697–1702. | sized silver materials on biological toxicity during zebrafish embryogenesis <i>Bulletin of the Korean Chemical Society</i> 29: 1179–1184. |
| | | Yeo, M.-K. & Kang, M. (2008) <i>Effects of nanometer</i> | | |

von aquatischen Ökosystemen darstellen. So konnte in unseren eigenen Untersuchungen gezeigt werden, dass einige nanopartikuläre Substanzen in sehr niedrigen Konzentrationen toxisch auf Wasserflöhe wirken. Die Tiere wurden den Substanzen in verschiedenen Konzentrationen über einen Zeitraum von 48 Stunden ausgesetzt. Bei Exposition der Wasserflöhe gegenüber nanoskaligem Titandioxid konnte eine Anreicherung der Partikel im Darm der Tiere beobachtet werden. Außerdem wurde deutlich, dass der für die Nahrungsaufnahme essenzielle Filterapparat der Versuchstiere durch Titandioxidpartikel verklebte. Die Exposition gegenüber Silbernanopartikeln führte schon nach einem Zeitraum von 24 Stunden zum Tod der Versuchstiere.

Umweltrisiken rechtzeitig erkennen

Bei den meisten nanohaltigen Produkten herrscht Unklarheit über Langzeiteffekte, die durch Anreicherung von Nanomaterialien in der Umwelt und in Organismen über die Nahrungskette entstehen. Auch weiß man wenig über Wechselwirkungen mit anderen Substanzen. Um mögliche Risiken für aquatische Lebensgemeinschaften auszuschließen, die im Freiland eventuell erst mit zeitlicher Verzögerung erkannt werden, sollten vor einer intensiveren Nutzung der Nanotechnologie die Auswirkungen an Modellorganismen im Labor untersucht werden.

Für die Bewertung des Umweltrisikos von Chemikalien existieren (zum Beispiel von der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, OECD) standardisierte Prüfrichtlinien. Zwar gelten sie auch für Nanomaterialien, sind aber nicht zwangsläufig für die Testung nanopartikulärer Substanzen geeignet, da sie deren spezielle Eigenschaften nicht berücksichtigen. Unser Anliegen ist es, diese Richtlinien um weitere Parameter zu ergänzen und sie an die erforderlichen Bedingungen anzupassen. Da die Wirkungen von Nanomaterialien so vielfältig sind wie die Materialien selbst, muss das Gefährdungspotenzial für eine Vielzahl



Die Neuseeländische Zwergdeckelschnecke *Potamopyrgus antipodarum* wurde Mitte des 19. Jahrhunderts durch das Ballastwasser von Schiffen nach Europa eingeschleppt. In Neuseeland kommen männliche und weibliche Tiere vor; in anderen Gebieten findet man fast ausschließlich sich ungeschlechtlich fortpflanzende Weibchen. Aufgrund ihrer hohen Reproduktionsleistung konnte sich die Zwergdeckelschnecke rasch in stehenden und langsam fließenden Gewässern ausbreiten. In der Ökotoxikologie dient die Ermittlung der Fortpflanzungsleistung von *P. antipodarum* als aussagekräftiger Parameter für den Nachweis von Schadstoffwirkungen.

von Substanzen abgewogen und von Einzelfall zu Einzelfall entschieden werden.

Seit 2008 fördert die OECD die Untersuchung 14 repräsentativer Nanomaterialien, für die von einer Exposition von Mensch und Umwelt auszugehen ist. Deutschland engagiert sich bei der Bewertung von nanoskaligem Titandioxid und Silber. Studien zur Gefährdungsabschätzung dieser beiden Materialien werden in unserer Forschergruppe in der Abteilung »Aquatische Ökotoxikologie« durchgeführt. In zwei aktuellen Projekten werden die Auswirkungen von nanoskaligem Titandioxid und Silber auf aquatische Modellorganismen untersucht. Insbesondere werden langfristige Wirkungen dieser Materialien betrachtet, so die Veränderung der Fortpflanzungsleistung von Schnecken und Wasserflöhen und deren Auswirkungen auf die Populationsstruktur. Der Erhalt der Populationen, die einen wichtigen Teil des komplexen Ökosystems ausmachen, ist das erklärte Schutzziel der Ökotoxikologie.

In Versuchen mit der Neuseeländischen Zwergdeckelschnecke (*Potamopyrgus antipodarum*) konnte sowohl nach vierwöchiger Exposition gegenüber na-

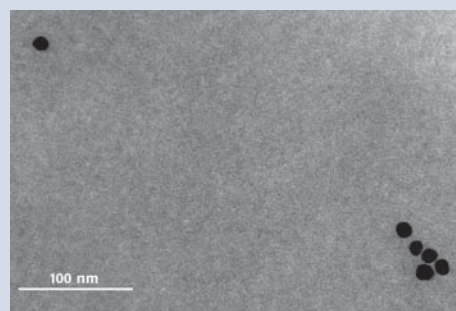
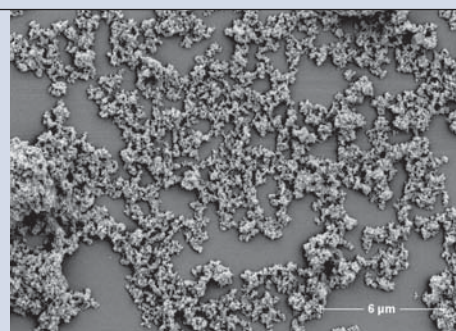
Nanomaterialien und ihre Anwendungen

Die Nanotechnik nutzt die speziellen mechanischen, optischen, magnetischen, elektrischen und chemischen Eigenschaften nanoskaliger Partikel. Verwendete Stoffklassen sind Metalle (zum Beispiel Eisen, Silber und Gold) und Metalloxide (besonders Siliziumdioxid, Cerdioxid, Titandioxid, Aluminiumoxid), Kohlenstoffmoleküle (Fullerene und Nanoröhren) und andere organische Nanomaterialien (zum Beispiel Polymeranopartikel). Die Bandbreite reicht dabei von Aggregaten und Pulvern, die in Lösungen dispergiert vorliegen können, über Kolloide, Röhren und Nanoschichten bis zu komplexen organischen Molekülen. Kohlenstoff-Nanoröhren mit einem Durchmesser von einem bis fünfzig Nanometern dienen als Halbleiter bei der Display- oder Transistorherstellung. Erste nanoskalige Materialien werden zudem in Kosmetika (etwa Titandioxid

in Sonnenschutzmitteln) und Lebensmitteln (zum Beispiel Silber in funktionellen Lebensmittelverpackungen) eingesetzt. Vielversprechende Anwendungen zeichnen sich auch in der Medizintechnik ab. Nanomaterialien können beispielsweise Krebszellen im Körper sichtbar machen und frühzeitige Diagnosen ermöglichen.

► In der Aufnahme mit dem Rasterelektronenmikroskop sind agglomerierte Titandioxidpartikel zu erkennen. Titandioxid ist in zahlreichen alltäglichen Produkten wie Wandfarben oder sogar Lebensmitteln enthalten.

► Die Aufnahme mit dem Transmissionselektronenmikroskop zeigt Silbernanopartikel mit einer Größe von 10 nm. Die Partikel werden aufgrund ihrer antibakteriellen Wirkung vielfältig eingesetzt, beispielsweise in Kosmetika oder Sportbekleidung. Ob von Nanosilber ein Risiko für den Menschen und die Umwelt ausgeht, ist derzeit Gegenstand der Forschung.



Der Große Wasserfloh *Daphnia magna* ist ein wichtiger Teil des Zooplanktons in Kleingewässern Europas und Nordamerikas. Aufgrund ihrer leichten Kultivierbarkeit und ihrer empfindlichen Reaktion gegenüber Chemikalien haben Daphnien als Testorganismen in der Ökotoxikologie große Bedeutung erlangt.



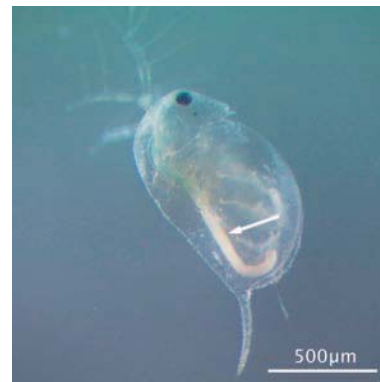
noskaligem Titandioxid als auch nach Exposition gegenüber Nano-Silber gezeigt werden, dass die Schnecken erheblich weniger Nachkommen produzierten als die nicht exponierten Kontrolltiere. Die dreiwöchige Behandlung von Wasserflöhen (*Daphnia magna*) mit nanoskaligem Titandioxid führte zu einem verminderten Wachstum der Tiere. Außerdem produzierten die Wasserflöhe, die sich wie die Zwergdeckelschnecke ungeschlechtlich fortpflanzen (das heißt, es werden Klone gebildet), nach Exposition weniger Jungtiere.

Daphnien, eine Gattung von Krebstieren, die gern als Wasserflöhe bezeichnet werden, stellen ein wichtiges Glied in der Nahrungskette limnischer Ökosysteme dar und dienen beispielsweise als Beute für zahlreiche Fischarten. Um herauszufinden, ob nanopartikuläre Substanzen möglicherweise über die Nahrungskette weitergegeben werden, wurden die Versuchstiere in einem weiteren Experiment mit Algen gefüttert, die zuvor mit Titandioxidpartikeln behandelt worden waren. Durch elektronenmikroskopische Aufnahmen konnten wir zeigen, dass die Partikel an den Algen haften blieben. Nach der Verfütterung der Algen beobachteten wir eine Anreicherung von Titandioxidpartikeln im Darm der Daphnien. Da Daphnien über Nahrungsketten mit zahlreichen anderen Organismen in Beziehung stehen, besteht die Sorge, dass sich die Partikel in diesen Organismen anreichern. Außerdem zeigte der Versuch, dass die Aufnahme des Titandioxidpartikel über die Nahrung bei den Daphnien zu einer höheren Sterblichkeit führte, als wenn die Partikel über das Wasser verabreicht wurden.

In einer Multigenerationsstudie mit Nano-Silber wurden die Wasserflöhe den Partikeln über mehrere Generationen ausgesetzt, das heißt, die im Versuch geschlüpften Jungtiere wurden in einem weiteren Experiment erneut auf ihre Fortpflanzungsleistung hin untersucht. Hier zeigte sich, dass nachkommende Generationen erheblich sensibler auf die Behandlung mit Silbernanopartikeln reagierten, was deutlich macht, dass chronische Folgen nanopartikulärer Substanzen nicht in Kurzzeittests erfasst werden können. Für eine adäquate Risikobewertung von Nanomaterialien müssen daher unbedingt Versuche mit einem verlängerten Expositionszeitraum durchgeführt werden.

Als weiteres Themenfeld wird zukünftig in der Abteilung »Aquatische Ökotoxikologie« untersucht, auf welchen Mechanismen die toxische Wirkung der Partikel in den Organismen beruht. Viele Nanopartikel werden beispielsweise für die Bildung freier Sauerstoffradikale verantwortlich gemacht, die bei verschiedenen Erkrankungen sowie am Alterungsprozess beteiligt sind. Mit der Aufklärung der Prozesse, die sich innerhalb der Zelle abspielen, wird ein wichtiger Beitrag zum Verständnis der vielfältigen Wirkweisen von nanoskaligen Substanzen geleistet.

Die Aufklärung möglicher Risiken der Nanotechnik für Mensch und Umwelt verdient Aufmerksamkeit.



Bei den Versuchstieren, die mit Titandioxid behandelten Algen gefüttert wurden, zeigen sich Ablagerungen im Darm.

Bisher werden mögliche Konsequenzen zumeist unter Fachleuten diskutiert. Die Verbraucher bringen der Nanotechnologie meist ein hohes Vertrauen entgegen. Mit einer frühzeitigen Risikobewertung können die Möglichkeiten dieser Technologie nachhaltig nutzbar gemacht werden, ohne dass mit weitreichenden Konsequenzen für Mensch und Umwelt zu rechnen ist. ♦

Die Autorin

Diplom-Biologin Carolin Völker, 25, studierte Biologie an der Goethe-Universität. In ihrer Diplomarbeit in der Abteilung »Aquatische Ökotoxikologie« am Institut für Ökologie, Evolution und Diversität befasste sie sich mit der ökotoxikologischen Bewertung von Fließgewässersedimenten. In dieser Arbeit beschäftigte sie sich mit der Eignung von Eintagsfliegenlarven als Testorganismus bei der Sediment- und Chemikalienbewertung. Seit 2010 promoviert sie in der Abteilung, betreut von Prof. Dr. Jörg Oehlmann. In ihrer Promotion untersucht sie die Ökotoxikologie und Wirkweise von nanoskaligem Silber unter besonderer Berücksichtigung von Langzeiteffekten.

c.voelker@bio.uni-frankfurt.de
www.bio.uni-frankfurt.de/ee/ecotox

Die Aufnahme mit dem Rasterelektronenmikroskop zeigt gegenüber Titandioxid exponierte Algenzellen. In der Vergrößerung sind deutlich die an den Algenzellen haftenden Partikel zu erkennen.

