

Sichere Nanomaterialien?!

Neue Erkenntnisse und Methoden in der Physik führten zur Nanotechnologie, einem breiten Forschungsfeld mit möglichen Risiken für Umwelt und Gesundheit.

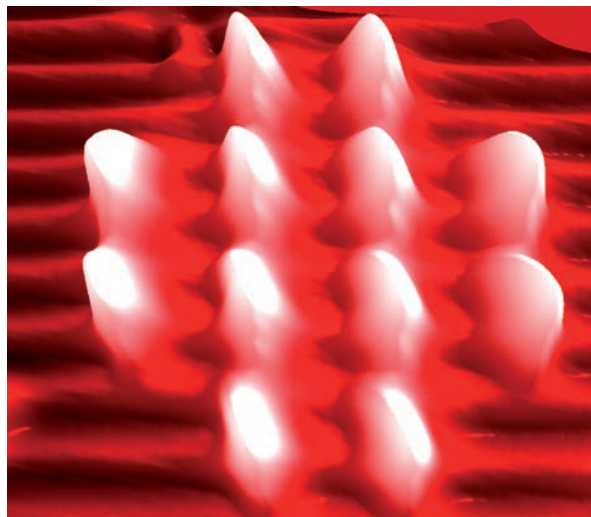
Katja Nau und Harald F. Krug

Obwohl seit Jahrhunderten in Gebrauch, macht die Nanotechnologie erst seit etwas mehr als zwanzig Jahren große Schlagzeilen: Zunächst ermöglichten es die Entdeckung des Rastertunnelmikroskops und die damit einhergehenden Entwicklungen, Materie auf atomarer Ebene gezielt zu manipulieren. Kurz darauf haben Risikoforscher das Feld der Nanomaterialien für sich „entdeckt“. Aber was ist wirklich dran an den „neuen Risiken durch Nanomaterialien“?

Die Nanotechnologien in Gänze werden heute in den Medien gern vereinfacht mit der Entwicklung neuer Nanomaterialien gleichgesetzt – ein großer Fehler und eine starke Vereinfachung. Denn Nanomaterialien machen nur einen relativ kleinen Anteil an der gesamten Technologieentwicklung aus. Dennoch ist die Diskussion um die „Risiken der Nanotechnologie“ meist auf die Produktion und den Umgang mit Nanopartikeln gerichtet [1], sodass sich dieser Beitrag darauf konzentrieren wird. Noch zu Beginn des neuen Jahrtausends standen „bedrohliche“ technische Szenarien im Mittelpunkt der Befürchtungen wie die „selbst-reproduzierenden Nanobots“. Der Nanoforscher Eric Drexler und der Chemie-Nobelpreisträger Richard Smalley lieferten sich einen heftigen Schlagabtausch, ob Nano-Assembler – also Maschinen, die etwas produzieren und sich auch selbst reproduzieren können – mit den Grundlagen der Naturwissenschaft vereinbar seien.

Warum ist aber die Kritik mittlerweile nahezu völlig auf ein einziges Merkmal der Nanomaterialien ausgerichtet, nämlich ihre Kleinheit? Um diese Frage schlüssig zu beantworten, sind einige Vorüberlegungen zu wichtigen Kernpunkten in der Entwicklung von sehr kleinen Materialien notwendig.

Mit den Nanotechnologien geht die Entwicklung neuer Materialien für die unterschiedlichsten Anwendungen von der Energiegewinnung bis zur Energiespeicherung, von der Ressourcenschonung bis zur katalytischen Umweltreinigung, von der Kosmetik bis zur Nanomedizin einher. Das macht Hoffnung auf neue Möglichkeiten, erzeugt aber bei manchen Menschen auch Unbehagen. Neue Materialien können wie neue Chemikalien unter Umständen neue Risiken beinhalten, und die Diskussion um die Asbestähnlichkeit mancher Nanoröhrchen oder Nanofasern ist längst nicht abgeschlossen. Daher ist es wichtig, von



Empa

Das „Schweizer Kreuz“, aufgebaut aus Propen-Molekülen

Beginn an eine sachliche Diskussion zu führen, die auf fundierten Daten und verlässlichen Studien beruht. Es hilft nicht, aufgrund einiger weniger Einzelstudien mit bedenklichen Ergebnissen die gesamte Nanotechnologie an den Pranger zu stellen. Zuerst einmal ist ein Nachweis notwendig, dass bestimmte Materialien tatsächlich kritisch sein könnten. Erst dann sind Maßnahmen zu ergreifen, um ein vorhandenes Risiko zu mindern oder zu vermeiden.

Wenn wir auch den Begriff „Nanotechnologie“ erst seit wenigen Jahrzehnten verwenden, so existieren Nanomaterialien bereits seit vielen hundert Jahren, ohne dass die allgemeine Bevölkerung dies bisher zur Kenntnis genommen hätte. Der Lykurgos-Becher als ein Produkt aus dem vierten Jahrhundert nach Chris-

KOMPAKT

- In der öffentlichen Diskussion wird Nanotechnologie meist auf die Entwicklung und Anwendung von Nanomaterialien reduziert.
- Wissenschaftliche Studien sollen dazu dienen, eine mögliche Gefährdung durch Nanomaterialien einzustufen.
- Viele Veröffentlichungen erfüllen jedoch nicht die hohen Ansprüche der Toxikologie oder der Risikoforschung.
- Das Projekt DaNa verfolgt das Ziel, Informationen zu Nanomaterialien und ihrer Gefahreneinschätzung zu sammeln. Publikationen werden nach einem veröffentlichten Kriterienkatalog bewertet.

Dr. Katja Nau, Institut für Angewandte Informatik, Karlsruher Institut für Technologie, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen und Prof. Dr. Harald Krug, Empa, Lerchenfeldstr. 5, 9014 St. Gallen, Schweiz



Trustees of the British Museum

Abb. 1 Der römische Lykurgos-Becher erscheint bei Auflicht durch die Reflexion an Silber-Nanopartikeln gelbgrün. Bei Durchlicht führt die Absorption an Gold-Nanopartikeln zu einer roten Färbung.

tus macht deutlich, wie die Römer bereits damals für farbige Gläser die Effekte kleinster Partikel aus Gold und Silber genutzt haben (Abb. 1). Der Becher besteht aus Goldrubinglas, welches im Gegenlicht rot und im Auflicht gelbgrün erscheint. Dieser Effekt entsteht, weil in das Glas kleinste Gold- und Silberpartikel mit einem Durchmesser von etwa sieben Nanometern eingearbeitet wurden. Sehr kleine Änderungen im Brechungsindex von sensitiven Schichten in der Nähe einer Metalloberfläche, so genannte Oberflächen-Plasmon-Resonanz-Effekte, erzeugen hier eine gelbgrüne Farbe durch die Reflexion an Silberpartikeln und eine rote Farbe durch die Transmission des Lichtes durch das Glas. Der gleiche Effekt kleinster Gold- und anderer Metallteilchen wird zum Glasfärben seit Jahrhunderten z. B. in Kirchenfenstern verwendet.

Es gibt zahlreiche weitere Anwendungen: Kohlenstoffpartikel (Ruß oder Carbon Black) kommen zum Einfärben oder für die Malerei und zum Verstärken von Kunststoffen oder Gummi zum Einsatz. Mit amorpher Kieselsäure verbessert sich die Viskosität von Flüssigkeiten. Titandioxid und Zinkoxid fungieren als UV-Blocker in Sonnencremes. Silbernanoartikel sind in Produkten zur Wunddesinfektion oder Wassersterilisation – z. B. beim Reinigen von Swimmingpools – enthalten. Teilweise sind diese Nanomaterialien seit hundert Jahren oder länger in Gebrauch. Immer sind es Nanoobjekte, die den gewünschten Effekt erzeugen (Abb. 2). Trotz geringem Materialaufwand ist die Wir-

kung groß, die häufig auf besonderen physikalischen oder auf veränderten chemischen Eigenschaften beruht. Diese Veränderungen hängen mit der überschaubaren Anzahl von Atomen oder Molekülen zusammen, die in einem Nanopartikel stecken. Dadurch nimmt die Zahl der Teilchen, die in direktem Kontakt mit der Umgebung stehen, bei Verkleinerung zu (Abb. 3). Auch die Quantisierung der Energieübergänge wird mit zunehmender Kleinheit immer deutlicher. Der „Größenquantisierungseffekt“ führt dazu, dass abhängig von der Verkleinerung des Radius eines Nanopartikels die Bandlücke zwischen dem energiereichsten besetzten Orbital (HOMO-Zustand) und dem unbesetzten Orbital geringster Energie (LUMO-Zustand) größer wird. Zusätzlich überlappen die Atomorbitale weniger, weil die Anzahl von Atomen sinkt. Daher ist mehr Energie nötig, um eine solche Überlappung zu erreichen. Diese Effekte führen zu den außergewöhnlichen Eigenschaften der Nanopartikel. Dazu gehören eine verbesserte katalytische Wirkung, ein erhöhtes Reaktionsvermögen, neue elektronische, magnetische oder optische Eigenschaften oder auch die veränderte Wechselwirkung mit ihrer Umgebung.

Forschung für die Nanosicherheit

Die veränderte Wechselwirkung ist der entscheidende Punkt, um die Diskussion eines möglichen Risikos für Mensch und Umwelt zu beginnen. Denn diese Veränderung könnte durchaus ein Grund sein, dass sich die Nanopartikel in biologischen Systemen anders verhalten als herkömmliche Materialien. Abgesehen davon wurde den Nanomaterialien um die Jahrtausendwende eine goldene Zukunft vorausgesagt. Ihr Einsatz sollte z. B. unsere Energieprobleme lösen, weil sie eine höhere Effizienz bei der Photovoltaik, leichtere und haltbarere Materialien für die Windkraft oder bessere Energiespeicher versprochen. Sie könnten die Nutzung herkömmlicher Techniken wie Automotoren und Materialien wie Textilien und Oberflächen erheblich verbessern. Im Gesundheitsbereich steht der Begriff Nanomedizin für verbesserte Diagnostik und Therapiemöglichkeiten.

Tatsächlich sind einige dieser Anwendungen inzwischen alltäglich, doch sind die Ergebnisse nicht so spektakulär wie erhofft. Wir nutzen Nanomaterialien in Alltagsprodukten wie Smartphones, in der Unterhaltungselektronik oder Elektromobilität. Diese und andere Beispiele belegen eine schleichende Nutzung. Auf der anderen Seite ist aus einer anfänglich sehr dezenten Diskussion um mögliche gesundheitliche Risiken durch Nanomaterialien [2] schnell eine neue Disziplin entstanden [3], die mittlerweile zu einer umfassenden Diskussion in allen betroffenen Interessengruppen geführt hat [4]. In dieser Diskussion sehen Vertreter verschiedener Gesellschaftsgruppen eine Chance zu profitieren. Dazu gehören Nichtregierungsorganisationen (so genannte Non-Governmental Organizations, NGOs) genauso wie Wissenschaftler.

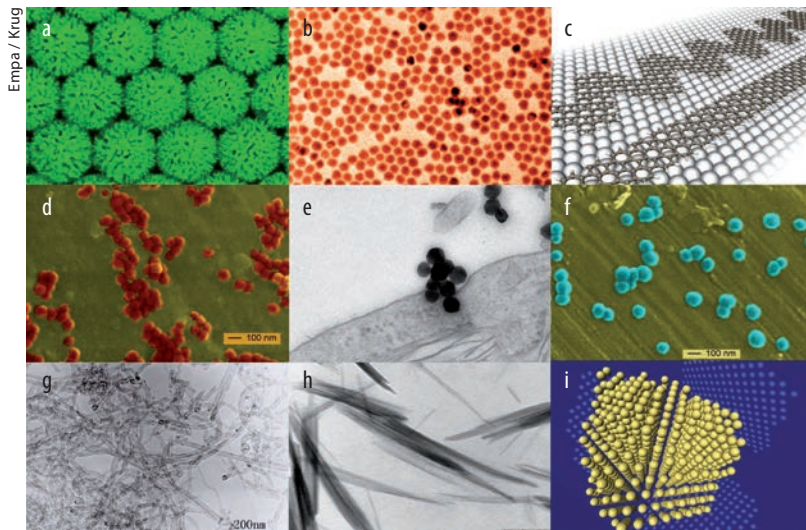


Abb. 2 Nanoobjekte bestehen aus den unterschiedlichsten Materialien: „Nano-Igel“ aus Zinkoxid-Nanodrähten (a), Antimon-Nanokristalle für Batterien (b), Graphen-Nanobänder (c, Computermodell), Hämatit-Nanopartikel (d), Hämatit-Nanopartikel auf der Zellmembran einer Lungenzelle (e), Silicene-Nanopartikel (f), mehrwandige Kohlenstoff-Nanoröhrchen (g), Vanadiumtrioxid-Nanonadel (h), Gold-Nanopartikel mit der berechneten Lage jedes einzelnen Atoms (i, Computermodell). Die Aufnahmen entstanden mit Rasterelektronenmikroskopen (a, d, f) und Transmissionselektronenmikroskopen (b, e, g, h). Alle farbigen Bilder sind Falschfarbendarstellungen.

Solche Interessengruppen haben bereits wenig nachvollziehbare Reaktionen des Marktes erzwungen: Beispielsweise hat die amerikanische Initiative „As You Sow“ die Dunkin’ Donuts®-Gruppe dazu veranlasst, Titandioxid als Lebensmittelzusatzstoff zu verbannen. Titandioxid ist als weiße Lebensmittelfarbe unter der Bezeichnung E 171 zugelassen und ist in dieser Form auch erheblich größer als die Obergrenze von 100 nm für Nanopartikel.

Einige Hersteller gehen mittlerweile dazu über, statt der in der EU seit 2014 geforderten Kennzeichnung von Nano-Bestandteilen in Kosmetika [5] auf das Nichtvorhandensein solcher Materialien hinzuweisen (Abb. 4). Dabei haben praktisch alle Studien zu einer möglichen Aufnahme von Nanopartikeln durch die gesunde Haut ergeben, dass eine solche Penetration nicht stattfindet. Die Verwendung von physikalischen UV-Blockern wie Titandioxid und Zinkoxid ist also sicher [6]. Die Frage, ob wir bezüglich der Nanosicherheitsforschung auf dem richtigen Weg sind, ist tatsächlich von großer Bedeutung, denn aktuell treffen Regulierer oder die International Agency for Research on Cancer (IARC) Entscheidungen, die auf wenig zuverlässigen Daten beruhen. Dafür sind zwei Kriterien entscheidend:

- Fast jede Studie, die einen Effekt eines Nanomaterials in einem biologischen System zeigt, wird publiziert – häufig in hochrangigen Zeitschriften. Dagegen haben Studien, die zeigen, dass keine biologische Wirkung auftritt („No-Effect-Studies“), fast keine Chance auf eine Veröffentlichung: Sie sind für die Herausgeber nicht interessant. Dadurch bekommen wir ein verzerrtes und einseitiges Bild in der Risikodebatte. Hinzu kommt, dass wissenschaftlich publizierte toxische Effekte häufig von Wissenschaftsjournalisten als Schlagzeile aufgemacht werden, frei nach dem Prinzip: „Only bad news are good news“. Um diesem Trend entgegen zu treten, sollten die wissenschaftlichen Zeitschriften auch „No-Effect-Studies“ häufiger publizieren. Einige Herausgeber haben dies schon zugesagt.

- In den vergangenen fünfzehn Jahren wurden große Mengen öffentlicher Fördermittel zur Verfügung ge-

stellt, um die möglichen Risiken von Nanomaterialien zu untersuchen. „Nano“ galt als schick, sodass sich viele Wissenschaftler damit beschäftigten. Daraus entstand eine riesige Flut von Publikationen (Abb. 5), wobei wirkliche Experten auf dem Gebiet der Risikoforschung bzw. der Toxikologie nur einen kleinen Teil der Studien ausführten.

Darum stellt sich die Frage, wie sinnvoll Veröffentlichungen von Einzelergebnissen ohne einen kompletten Datensatz sind. Verschiedene Nanoexperten kritisieren, dass in die Überlegungen von Regulierern überhaupt Arbeiten mit fehlender Charakterisierung der Materialien, fehlenden Kontrollexperimenten oder ohne die Verwendung von Referenzmaterialien, die ebenfalls untersucht wurden, einfließen [7]. Um solche Fehler zu vermeiden, hatten wir selbst bereits im Jahr 2011 Forderungen aufgestellt [8]. Weiterhin gibt es seit 2014 Hinweise zu den wichtigsten Variablen in Toxizitätsstudien sowie mögliche Fehlerquellen [6]. Vom amerikanischen National Institute for Standards and Technology (NIST) kam eine Anleitung, wie man Artefakte in biologischen Untersuchungen vermeiden kann [9]. Gemeinsam mit dem NIST haben wir gezeigt, welche Schritte nötig sind, um einen relativ einfachen Toxizitätstest „hieb- und stichfest“ zu machen [10].

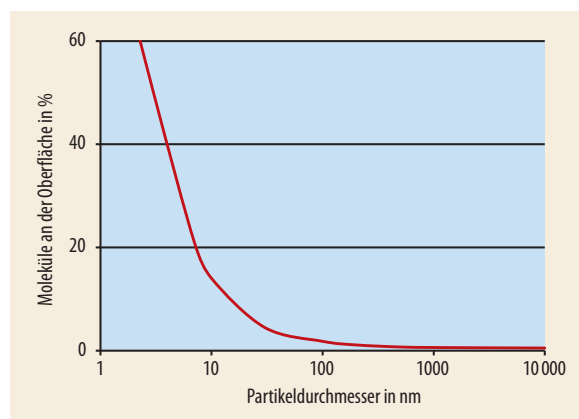


Abb. 3 Der prozentuale Anteil der Atome oder Moleküle, die sich an der Oberfläche befinden, steigt mit sinkender Partikelgröße sehr stark an.



Abb. 4 Statt Inhaltsstoffe in Nanogröße gesetzlich konform zu kennzeichnen (hier: Zinkoxid [nano]), verweisen die Hersteller dieser Kosmetikprodukte auf die „Nicht-Nano-Komponenten“ in den Produkten.

Bei genauerem Hinsehen zeigen sich in vielen Arbeiten Mängel, die häufig auf dem Unverständnis der Experimentatoren für die physikalischen und chemischen Eigenschaften der untersuchten Materialien beruhen. So beachten sie häufig nicht, dass die Nanomaterialien direkt mit den Bestandteilen des Testverfahrens interagieren können [11]. Dies führt z. B. zu falschen Ergebnissen, wenn das Nanomaterial Licht bestimmter Wellenlängen absorbiert und gleichzeitig die Toxizität mit Farbstofftests gemessen wird: Zell-Vitalitätstests, die entscheiden, ob eine Zelle lebendig oder tot ist, beruhen sehr häufig auf solchen Farbstofftests. Darüber hinaus kann die Methode dazu führen, optische und elektronische Wechselwirkungen zu ignorieren. Dann kommt es zu falsch-positiven Ergebnissen, die nicht als solche erkannt werden [12]. Auch toxische Effekte aufgrund von Lösungsmitteln werden als Toxizität des Nanomaterials interpretiert [13]. Die häufigsten Mängel bestehen aber darin, dass entweder die korrespondierenden Kontrollexperimente fehlen

DAS PROJEKT DANA

Die Nanotechnologie gilt als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts. Daher ist es wichtig, den Bedürfnissen möglicherweise Betroffener Rechnung zu tragen, aber auch dem interessierten Bürger, Journalisten oder Politiker eine Möglichkeit an die Hand zu geben, sich ausreichend über die möglichen negativen Folgen informieren zu können. Das **Projekt DaNa** hat zum Ziel, in einem interdisziplinären Ansatz mit Wissenschaftlern aus Humantoxikologie, Ökotoxikologie, Biologie, Physik, Chemie und Pharmazie Forschungsergebnisse zu Nanomaterialien und deren Auswirkungen auf den Menschen und die Umwelt für interessierte Laien verständlich aufzubereiten.^{#)}

Darüber hinaus werden die wissenschaftlichen Ergebnisse der Projekte der BMBF-Fördermaßnahmen NanoNature und NanoCare sowie Literatur zu Human- und Umwelttoxikologie von Nanomaterialien auch anderer wissenschaftlicher Gruppen aufbereitet. Die Bewertung der aktuellen Forschungsergebnisse für die DaNa-Wissensbasis erfolgt auf Grundlage sorgfältiger wissenschaftlicher Vorgehensweisen anhand des DaNa-Kriterienkatalogs.

#) Diese Daten sind auf der Internetplattform www.nanopartikel.info zugänglich.

(siehe Tab. 2 in [6]) oder keine Referenzmaterialien mit untersucht wurden, sodass es keine Bezugspunkte gibt. Das verwendete Material sollte immer auch in seiner „Nicht-Nano-Form“ getestet werden, um tatsächlich auf Nanoeffekte rückschließen zu können.

Nimmt man alle diese möglichen Faktoren für Fehler bzw. Fehlinterpretationen zusammen, so sind sicher weit mehr als 60 Prozent der Veröffentlichungen in diesem Zusammenhang als nicht relevant auszusortieren. Zu einem ähnlichen Ergebnis kam eine italienische Arbeitsgruppe, welche die Literatur nach toxikologischen Daten durchsucht hat und zu Titandioxid 68 Prozent und zu Zinkoxid sogar 87 Prozent der Publikationen als unbrauchbar klassifiziert hatte [14].

Neue Strategien

In jüngster Zeit werden die Stimmen lauter, die den „Mythos“ der Nanoobjekte bezweifeln, wenn es um ihre gesundheitlichen Wirkungen oder umweltrelevante Daten geht [15]. Die Forderung nach klaren Strategien bei der Nanosicherheitsforschung setzt sich immer mehr durch [16], und intelligente Teststrategien werden die Grundlage zukünftiger Forschung bilden [17]. Dabei kann die Nanotoxikologie von der konventionellen Toxikologie lernen [18]. Die dort angewendeten modernen Methoden werden auch die Nanotoxikologie erobern und zu einer Verbesserung der Datenlage führen. Dazu gehören auch die Analyse des vollen Umfangs der Stoffwechselveränderungen auf Basis von Pathways of Toxicology durch den Einfluss industrieller Umweltverschmutzung im Menschen (Toxome) oder die Studie aller Substanzen, die als Zwischenstufen oder als Abbauprodukte von Stoffwechselvorgängen in Zellen, Geweben und Organen entstehen (Metabolomics). Basis sind die Ideen der „Green Toxicology“ – die Anwendung prädiktiver Toxikologie schon während der Entwicklung und der Produktion neuer Materialien und Chemikalien, in Anlehnung an „Green Chemistry“ und „Green Engineering“ [19].

Bis dahin ist es aber noch ein steiniger Weg, denn es fehlt an Experten in diesem Feld, um alle Bereiche der toxikologischen Forschung abzudecken. Für Nanomaterialien gibt es aussichtsreiche Ansätze, die Vielfalt der Materialien zu ordnen und in ein intelligentes Gesamtkonzept zu integrieren. So wurden für Nanomaterialien aus Metalloxiden Vorschläge gemacht, diese nach ihrem Redox-Potential in entsprechende Kategorien einzuteilen und damit zu einem QSAR-Konzept für Nanomaterialien zu kommen, das eine quantitative Beziehung zwischen der Struktur und der Wirkung eines Moleküls herstellt [20]. Dieser Ansatz ist speziell auf die Metalloxide unter den Nanomaterialien ausgerichtet. Umfassender sind Ideen, die Nanomaterialien zu Gruppen zusammenzufassen (Grouping): Die Hauptvertreter dieser Gruppen sind zu testen und die Ergebnisse auf die anderen Gruppenmaterialien zu übertragen (Read-Across). Dies mindert den Aufwand,

der beim Testen ähnlicher Materialien anfallen würde [21]. Insbesondere der Schweizer Ansatz zur Definition von „Sameness“ (Gleichheit) und zur Bildung von „Entitäten“ ist pragmatisch [22].

Für eine verlässliche Risikoabschätzung sind valide Daten erforderlich, die für die Vielzahl von Chemikalien wie auch Nanomaterialien nur selten aufzubringen sind. Daher sind belastbare Studien notwendig, um durch Read-Across und Grouping-Ansätze auf vergleichbare Chemikalien oder Nanomaterialien rückschließen zu können. Valide Daten und belastbare Studien bedeuten aber, dass in den Labors nach guter wissenschaftlicher Praxis gearbeitet werden sollte. Das Anwenden sog. Standard-Arbeitsanweisungen gehört in vielen toxikologischen Labors leider (noch) nicht zum Alltag. Die Regulierungsbehörden verwenden daher häufig Ergebnisse aus mechanistischen, grundlagenorientierten Arbeiten, die keinen direkten Bezug zur Toxizität des Materials herstellen, oder Studien, die auf nicht nachvollziehbaren Protokollen beruhen. Wären die Protokolle standardisiert und einsehbar, ließen sich Ergebnisse besser vergleichen und Bewertungen besser einschätzen.

Alte Produkte neu bewertet

Aus dem oben beschriebenen Vorgehen der vergangenen 15 Jahre resultiert eine Reihe von Missverständnissen zwischen Herstellern, Wissenschaftlern und Behörden, die nur schwer wieder zu beseitigen sind. Wie wäre es anders zu erklären, dass Substanzen bzw. Nanomaterialien, die bereits seit Jahrzehnten auf dem Markt sind und z. B. auch als Nahrungsmittelzusatzstoffe zugelassen sind, aktuell unter dem Aspekt des Nanomaterials erneut zur Diskussion stehen? Kieselsäure (synthetisches amorphes Siliziumdioxid, E551) gehört zu dieser Gruppe von Materialien.

Nur ein Beispiel für irrelevante Arbeiten sei an dieser Stelle genannt: Eine Studie zur Toxikologie amorpher Kieselsäure verwendet für in vitro-Untersuchungen Konzentrationen von 50 bis 800 µg/ml; in vivo wurden den Versuchstieren Dosen von 50 mg/kg intravenös injiziert [23]. Für in vitro-Experimente haben wir aber bereits in einem der größten nationalen Projekte in Deutschland festgestellt (NanoCare, [24]), dass in vitro-Dosen über 50 µg/ml derart exorbitant hohe Konzentrationen darstellen,

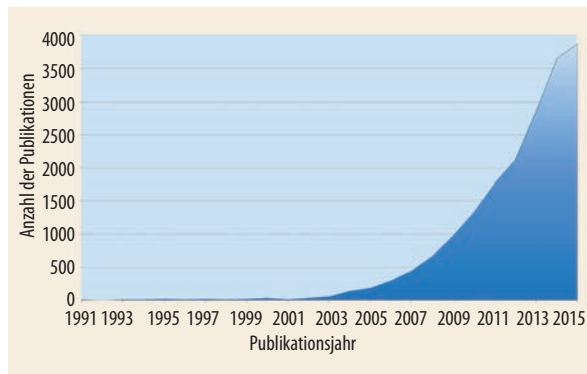


Abb. 5 Die Anzahl der Publikationen, die sich mit Nanotoxikologie beschäftigen, stieg in den Jahren 1991 bis 2015 rapide an.

dass keine belastbare Aussage zur Toxizität des Nanomaterials mehr möglich ist, weil die Zellen mit Material überfrachtet sind. Dies bestätigen Arbeiten von Kollegen des Helmholtz Zentrums München [25], die deutlich machen, dass bereits Konzentrationen von 25 bis 30 µg/ml die Zellen unter einer Schicht des Nanomaterials „begraben“. Die Zellen sterben aufgrund der Masse an Material ab – nicht wegen der Eigenschaften des (Nano-)Materials. Die Testkonzentrationen sollten in vitro daher unter 30 µg/ml liegen und nur darüber hinaus erhöht werden, um Dosis-Wirkungs-Beziehungen wenig toxischer Substanzen zu bestimmen. Auch die in vivo-Dosierung liegt in [23] weit über dem normalen Bereich für Untersuchungen mittels direkter Injektion in den Organismus: Die Tiere ersticken an den Substanzen. Weil es von diesen Beispielen viele gibt, ist es fragwürdig, darauf basierend eine Neubeurteilung eines Materials für den Markt zu begründen.

Ein weiteres Beispiel soll verdeutlichen, wie unterschiedlich Regulierungsbehörden reagieren, wenn es zwar um dasselbe Produkt geht, dieses aber aktuell das Label „Nano“ trägt. Nanosilber, früher eher kolloidales Silber genannt, ist in vielen Alltagsprodukten wie Sportkleidung, Socken, Wundverbänden oder Wandfarbe enthalten und wird seit mehr als hundert Jahren untersucht und genutzt [26]. Während man über die Sinnhaftigkeit mancher dieser Produkte streiten kann, fällt es auf, dass heute Zulassungen für Silber in kolloidaler Form, die bereits vor Jahrzehnten für diese oder ähnliche Produkte erteilt wurden, wieder infrage gestellt werden, als wären sie etwas Neues [27].

An dieser Stelle wollen wir ausdrücklich betonen, dass wir nicht gegen das Testen von Nanomaterialien

Interessengruppen in der Diskussion um Nanotechnologien					
Gruppe	Industrie	Wissenschaft	NGOs	Journalisten	Regulierer
Rolle	Produktion und Anwendung	Eigenschaften der Nanomaterialien, ihre Anwendungen und Risiken erforschen	Information der Verbraucher / gesellschaftliche Instanz zur Kontrolle	Information über positive und negative Entwicklungen	Zulassung von Produkten / Kontrolle der Verwendung
Zukünftige Maßnahmen	Green Chemistry / Green Toxicology / sichere Produkte für den Markt	Toxikologische Standards anwenden / Messunsicherheit berücksichtigen / Eigenkontrolle verbessern	gezielte Fehlinformation als Geschäftsmodell vermeiden / Dialog eingehen und Ergebnisse akzeptieren	verbesserte Recherche / reißerische Headlines auf Basis falscher Daten vermeiden / mit Experten sprechen	voreilige Schlüsse auf Basis einzelner Ergebnisse vermeiden / Expertengremien beurteilen kritische Studien

Tab. 1 Den Interessengruppen kommen im Dialog zu Sicherheit und Risiken der Nanomaterialien unterschiedliche Rollen zu.

für die Zulassung auf dem Markt sind. Allerdings sollten dafür vernünftige Gründe vorliegen, die dies erforderlich machen, sollte das Material bereits seit Jahren auf dem Markt sein. Zu diesen Materialien zählen Titandioxid, Zinkoxid, amorphes Siliziumdioxid, Carbon Black, Silber und einige mehr. Alle sind seit Jahrzehnten in ihrer Nanogröße auf dem Markt und auch schon in ihrer Nanogröße getestet! Bei neuen Materialien, die in Nanogröße vermarktet werden sollen, bisher aber nur in der groben Form verwendet wurden, ist das Testen dringend erforderlich, um ungünstige Effekte auf Umwelt und Mensch auszuschließen. Dennoch konnten die meisten validen Studien bisher eher Entwarnung geben, da keine kritischen Wirkungen in den relevanten Konzentrationsbereichen auftraten.

Das schließt aber nicht aus, dass es auch klare Hinweise auf kritische Materialien gibt. So ist eindeutig nachgewiesen, dass Kohlenstoff-Nanoröhrchen (CNT) unter bestimmten Umständen asbestähnliche Wirkung haben können. Besonders lange und sehr starre CNT haben wegen ihrer biologischen Persistenz durch den fehlenden Abbau nach Einatmen in der Lunge eine entzündliche Wirkung, die auf lange Sicht auch zu Tumoren führen kann [28].

Im Sinne einer „Green Toxicology“ [19] ist begleitende Risikoforschung bei jeder Technologieentwicklung unerlässlich. Seit 2009 gibt es in Deutschland eine vom BMBF geförderte Maßnahme, die sich zum Ziel gesetzt hat, möglichst alle gesellschaftlichen Gruppen wie Journalisten, Politiker, NGOs, Wissenschaftler und den Laien objektiv zu Nanomaterialien, ihrer Nutzung und die damit verbundenen möglichen Risiken zu informieren (Projekt DaNa; **Infokasten**). Das Besondere an diesem Projekt ist die erneute Evaluierung der Publikationen, bevor diese für die Texte und Informationen auf der Webseite genutzt werden. Die Kriterien sind in einem Katalog fixiert, der auf der Webseite zur Verfügung steht, sodass größtmögliche Transparenz entsteht. Viele Arbeiten scheitern an diesem Kriterienkatalog, weil grundlegende Experimente fehlen (z. B. die Materialcharakterisierung) oder toxikologische Prinzipien unbeachtet blieben (z. B. die Dosis-Wirkungs-Beziehung oder realistische Dosierungen). 2015 hatten wir mehr als 100 000 Besucher auf unserer Seite, was ein gutes Ergebnis für eine informative wissenschaftsorientierte Internetseite ist.

Wünschenswert wäre für die nahe Zukunft, dass die verschiedenen Gruppen und Vertreter unserer Gesellschaft ihr eigenes Verhalten bzw. den eigenen Anspruch an die Verhältnisse anpassen würden, die für eine sachliche Diskussion nötig sind und nicht die Entwicklung der Nanotechnologie für ihre eigenen Ziele „missbrauchen“. Auch daraus ist ein Maßnahmenkatalog ableitbar (**Tab. 1**).

Literatur

[1] M. Siegrist et al., Nature Nanotech. 2, 67 (2007)
 [2] P. H. Hoet et al., J. Nanobiotechnology 2, 12 (2004); H. F. Krug, UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox. 17, 223 (2005)
 [3] G. Oberdörster et al., Environ. Health Perspect. 113, 823 (2005)
 [4] P. M. Bos et al., Int. J. Environ. Res. Public Health 12, 15007

(2015); H. Godwin et al., ACS Nano 9, 3409 (2015); K. Juganson et al., Beilstein J. Nanotechnol. 6, 1788 (2015); A. G. Oomen et al., Nanotoxicology 8, 334 (2014); C. Schumacher et al., Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 75, 402 (2015); P. Wiedemann et al., Risk Analysis 31, 1770 (2011)
 [5] K. Aschberger et al., Scientific and Technical Research Report Nr. JRC88931 (2014), doi: 10.2788/3044
 [6] H. F. Krug, Angew. Chem. 126, 12502 (2014)
 [7] D. B. Warheit und E. M. Donner, Sci. Technol. Adv. Mater. 16, 034603 (2015)
 [8] H. F. Krug und P. Wick, Angew. Chem. 123, 1294 (2011)
 [9] E. J. Petersen et al., Environ. Sci. Technol. 48, 4226 (2014)
 [10] M. Rösslein et al., Chem. Res. Toxicol. 28, 21 (2015)
 [11] J. Geys et al., Toxicol. In Vitro 24, 620 (2010); A. Kroll et al., Arch. Toxicol 86, 1123 (2012); G. J. Oostingh et al., Part. Fibre Toxicol. 8, 8 (2011); J. M. Wörle-Knirsch et al., Nano Lett. 6, 1261 (2006); N. A. Monteiro-Riviere und A. O. Inman, Carbon 44, 1070 (2006)
 [12] C. Brandenberger et al., Part. Fibre Toxicol. 7, 15 (2010); K. Rajapakse et al., Nanotoxicology 7, 1043 (2013)
 [13] T. B. Henry et al., Environ. Health Perspect. 115, 1059 (2007); M. Kovochich et al., Environ. Sci. Technol. 43, 6378 (2009); P. Spohn et al., Environ. Pollut. 157, 1134 (2009)
 [14] D. R. Hristozov et al., Nanotoxicology 6, 880 (2012)
 [15] K. Donaldson und C. A. Poland, Curr. Opin. Biotechnol. 24, 724 (2013); A. Caballero-Guzman und B. Nowack, Environ. Pollut. 213, 502 (2016)
 [16] R. L. Marchese Robinson et al., Nanoscale (2016)
 [17] L. Farcal et al., PLoS One 10, e0127174 (2015); V. Stone et al., Part. Fibre Toxicol. 11, 9 (2014)
 [18] T. Hartung, Nature 460, 208 (2009); C. Rovida et al., ALTEX 32, 171 (2015)
 [19] A. Maertens et al., ALTEX 31, 243 (2014)
 [20] H. Zhang et al., ACS Nano 6, 4349 (2012); E. Burello und A. P. Worth, Nanotoxicology 5, 228 (2011); E. Burello und A. P. Worth, Interdiscip. Rev. Nanomed. Nanobiotechnol. 3, 298 (2011)
 [21] J. H. Arts et al., Regul. Toxicol. Pharmacol. 76, 234 (2015); H. M. Braakhuis et al., Toxicol. Appl. Pharmacol. 299, 3 (2016); J. H. Arts et al., Regul. Toxicol. Pharmacol. 71, S1 (2015)
 [22] T. Walser und C. Studer, Regul. Toxicol. Pharmacol. 72, 569 (2015)
 [23] Q. Chen et al., Int. J. Nanomedicine 8, 1129 (2013)
 [24] T. A. J. Kuhlbusch et al., NanoCare Final Report, DECHEMA, (2009), <http://bit.ly/2dPs8SN>
 [25] K. Wittmaack, ACS Nano 5, 3766 (2011)
 [26] T. M. Benn und P. Westerhoff, Environ. Sci. Technol. 42, 4133 (2008); B. Nowack et al., Environ. Sci. Technol. 45, 1177 (2011)
 [27] J. Costanza et al., Environ. Sci. Technol. 45, 7591 (2011); B. Schäfer et al., Environ. Sci. Technol. 45, 7589 (2011)
 [28] S. Rittinghausen et al., Part. Fibre Toxicol. 11, 59 (2014)

DIE AUTOREN

Katja Nau hat Biologie in Kaiserslautern studiert. Nach ihrer Promotion 2002 an der FU Berlin war sie Postdoc an der Universität Tübingen. Seit 2006 ist sie Projektleiterin am KIT und arbeitet auf dem Gebiet der Nanotechnologie, insbesondere der Nanotoxikologie.



Harald F. Krug hat in Kassel Chemie und Biologie studiert und in Göttingen promoviert. Nach einer Postdoczeit am heutigen Helmholtz Zentrum München ging er an das Forschungszentrum Karlsruhe (heute KIT). 1996 habilitierte er sich für Umwelttoxikologie. Seit 2007 lehrt er an der Universität Bern und leitete eine Abteilung der Schweizerischen Empa. Ab 2011 war er im Direktorium der Empa, das er nach der Ausgründung der NanoCASE GmbH 2014 wieder verließ.

