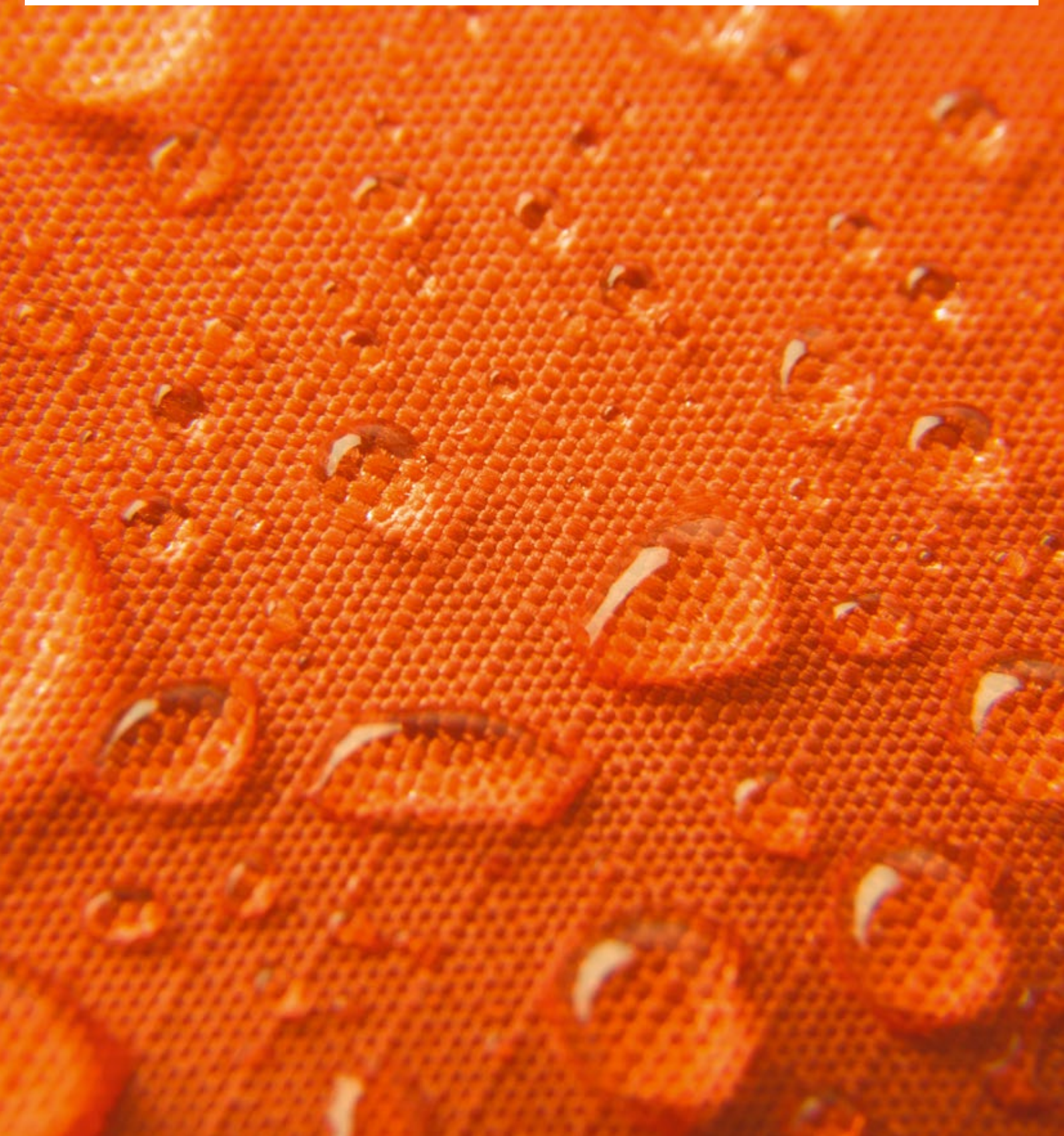
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Nanomaterialien im Alltag

Den Umgang mit Nanomaterialien sicher gestalten



Inhaltsverzeichnis

Vorwort 2

Nanomaterialien im Alltag 3

Warum ist klein so besonders? 4

„Ein Tag mit Nano" – Wie uns Nanotechnologie beeinflusst 5
Technische Nutzung von Nanomaterialien zum Wohl des Menschen 6
Strapazierfähige und geruchsarme Textilien 6
Optimierter UV-Schutz für unsere Haut 6
Ressourceneffiziente Kunststoffe 7
Wasserabweisende und selbstreinigende Oberflächen 7
Nanomedikamente und mehr 8
Die Revolution im IT-Sektor 8

Zur Sicherheit von Nanomaterialien 9

Fortschritt und Risiko – ein untrennbares Paar 9
Neuigkeiten aus der Sicherheitsforschung 9
Nanopartikel am Arbeitsplatz messen 10
Die Lunge als Eintrittspforte 12
Kohlenstoffnanoröhren: Besser als ihr Ruf 14
Nanopartikel im Körper verfolgen 16
Zukunftsträchtige Nanomedizin 18
Risiken bewerten 20
Methoden und Strategien der Risikobewertung 22
Die Regulierung von Nanomaterialien 24

Anhang 1: Forschungsprojekte zu den Auswirkungen auf die Gesundheit 26

Anhang 2: Weblinks 32

Impressum 33

Vorwort

Sie sind so winzig und doch so bedeutend für unseren Alltag: Nanomaterialien verbessern die Wirksamkeit von Sonnenschutzmitteln, die Akkuleistung von Handys, die schmutzabweisenden Eigenschaften von Textilien und den Transport von Medikamenten an ihren Zielort im Körper.

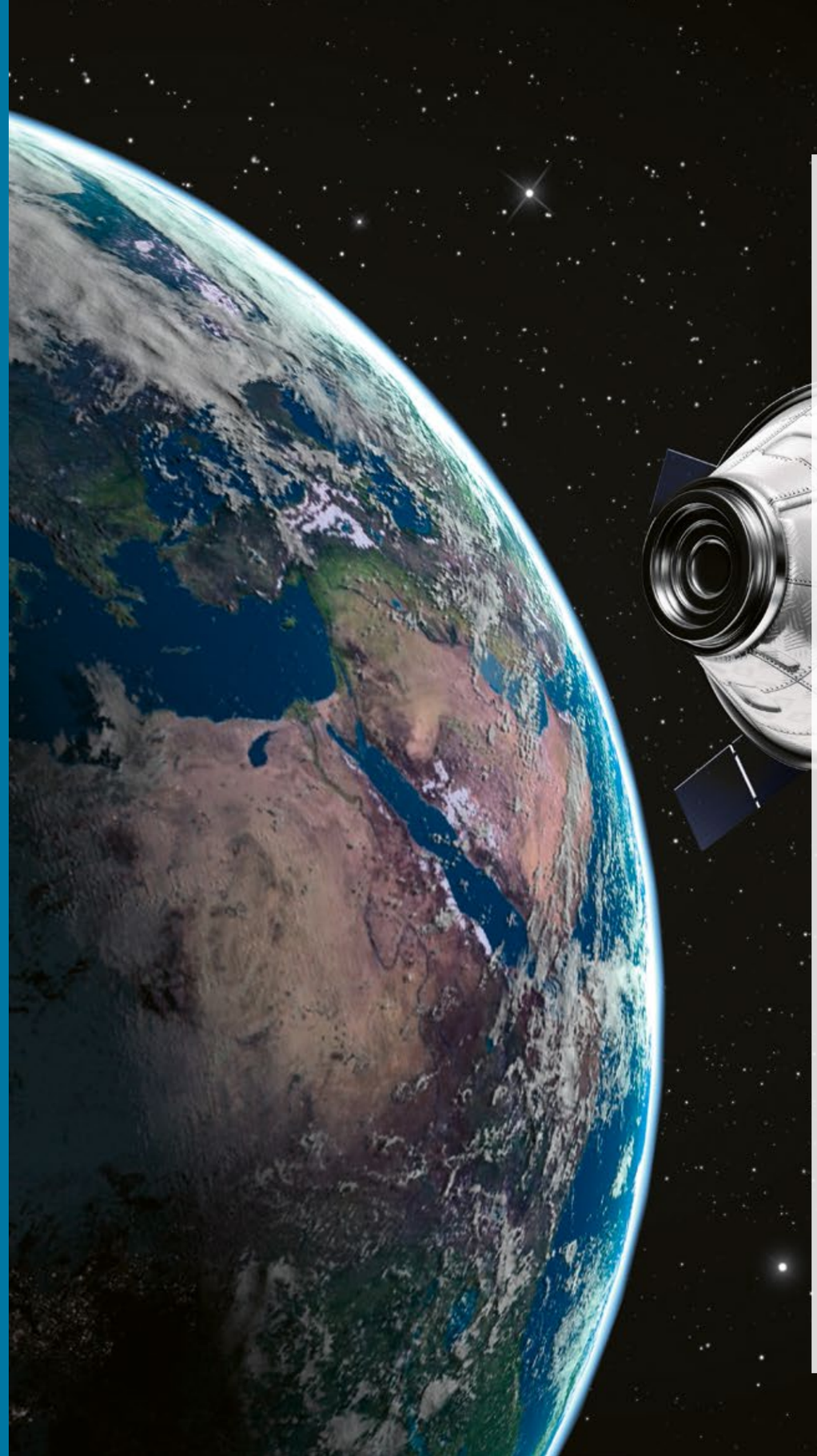
Deshalb ist es wichtig, genau zu verstehen, wie die winzigen Teilchen funktionieren. Was machen Nanomaterialien mit uns? Wie wirken die winzigen Teilchen auf die Umwelt? Wie können wir die neuen Möglichkeiten von Nanomaterialien nutzen ohne dabei mögliche Risiken für Mensch und Umwelt aus den Augen zu verlieren?

Diese und weitere Fragen müssen beantwortet sein, wenn solche neuen Technologien in den Alltag übergehen. Daher schreibt die Bundesregierung den Untersuchungen zu Auswirkungen von Nanomaterialien auf Mensch und Umwelt eine große Bedeutung zu.

Der Aktionsplan Nanotechnologie 2020 der Bundesregierung bildet ein ressortübergreifendes Handlungskonzept für die Förderung der Nanotechnologie in Deutschland. Dabei stellt das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Materialforschung für Risikovorsorge, Begleitmaßnahmen und die Nanosicherheitsforschung bisher rund 70 Millionen Euro zur Verfügung. Zu einer verantwortungsvollen Innovationspolitik gehört aber auch, dass wir Normungs- und Standardisierungsaktivitäten unterstützen, die internationale Vernetzung der Nanosicherheitsforschung vorantreiben und einen transparenten Dialog mit der Öffentlichkeit eingehen.

Die vorliegende Broschüre „Nanomaterialien im Alltag“ informiert über aktuelle Ergebnisse der Nanosicherheitsforschung, um interessierten Leserinnen und Lesern eine solide Wissensbasis für den sicheren Umgang mit Nanomaterialien zu geben.

Ihr Bundesministerium für Bildung und Forschung



Nanomaterialien im Alltag

Ob bei der Behandlung bislang unheilbarer Krankheiten, dem Aufhalten des Klimawandels oder der Entwicklung noch leistungsstärkerer Computer – an der Nanotechnologie führt kein Weg vorbei. In den verschiedensten Bereichen, in unserer Arbeitswelt ebenso wie in der Freizeit, spielen Nanomaterialien schon heute eine entscheidende Rolle.

Seit dem Jahr 2006 fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen seiner Projektförderung wissenschaftliche Arbeiten, die zentrale Aspekte der Sicherheit von Nanomaterialien untersuchen. Im Fokus der Broschüre stehen die Ergebnisse zur Nanosicherheitsforschung aus Forschungsprojekten der nationalen und internationalen BMBF-Initiativen NanoCare und ERA-Net SIINN. In kurzen Interviews erläutern beteiligte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, welche Erkenntnisse sie schon gewonnen haben. Die Broschüre stellt Forschungsarbeiten vor, die zu einer sicheren Verwendung von Nanomaterialien beitragen und so eine Gefährdung der Endanwenderinnen und -anwender sowie der Umwelt ausschließen.

Zwar lassen sich die Risiken, die neue Materialien bergen, mittlerweile schon deutlich besser abschätzen als noch vor ein paar Jahren. Die Sicherheitsforschung muss die Materialentwicklung aber weiterhin kontinuierlich begleiten, um eine umfassende Bewertung möglich zu machen. Diese Broschüre informiert über die Sicherheitsforschung in der Nanotechnologie und hilft, wissenschaftliche Erkenntnisse einzuordnen und zu verstehen.

Mit der neuen Förderinitiative „NanoCare 4.0 – Anwendungssichere Materialinnovationen“ setzt das BMBF die Aktivitäten zur Sicherheitsforschung in der Nanotechnologie fort. Der Schwerpunkt liegt dabei auf neuartigen synthetischen Nanomaterialien und anderen innovativen Werkstoffen, deren Wechselwirkungen mit Mensch und Umwelt es zu erforschen gilt. Das Ziel lautet, substanzbedingte Risiken frühzeitig zu erkennen oder gar vorherzusagen, um die Materialien anwendungssicher und umweltfreundlich zu gestalten. Zudem werden die Forscherinnen und Forscher intelligente Messstrategien entwickeln, die zu einer nachhaltigen Produktion und sicheren Endanwendung beitragen.

Alle relevanten Forschungsergebnisse zu Nanomaterialien aus der BMBF- Nanosicherheitsforschung und von Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen weltweit, die sich mit der Wirkung von synthetischen Nanomaterialien auf Mensch und Umwelt befassen, werden im Projekt DaNa2.0 („Da“ steht für Daten, „Na“ für Nanomaterialien) erfasst, bewertet und für eine breite Leserschaft aufbereitet, etwa in Form der vorliegenden Broschüre oder der Internetpräsenz www.nanopartikel.info. DaNa2.0 ist eine Initiative des BMBF und wird vom BMBF gefördert (FKZ 03X0131). Zusätzlich informiert der InnoTruck, eine mobile Ausstellung des BMBF zu neuen Technologien und Ideen für die Zukunft, die Öffentlichkeit über Nanomaterialien und die daran geknüpfte Sicherheitsforschung (www.innotruck.de).

Warum ist klein so besonders?

Der Zusatz „nano“ stammt aus dem Griechischen und bezeichnet den milliardsten Teil einer Maßeinheit. Ein Nanometer entspricht somit einem Milliardstel Meter oder einem millionstel Millimeter. Das ist ungefähr 50.000-mal kleiner als der Durchmesser eines menschlichen Haares. Nanoobjekte sind aber nicht nur extrem klein, sondern besitzen meist auch außergewöhnliche physikalische und chemische Eigenschaften – und zwar andere Eigenschaften als größere Objekte mit derselben chemischen Zusammensetzung. Das hängt unter anderem damit zusammen, dass ihre Oberfläche im Verhältnis zum Volumen extrem groß ist.

Dazu ein einfaches Beispiel: Schneidet man einen Apfel in zwei Hälften, ändert sich die Zusammensetzung des Apfels nicht. Die Gesamtoberfläche der beiden Teile aber vergrößert sich deutlich – und zwar um die Schnittfläche der Hälften. Mit jedem weiteren Schneideschritt vergrößert sich die Oberfläche weiter. Theoretisch könnte man so Nanoapfelstücke erzeugen. Sie hätten zusammen nicht nur eine viel größere Oberfläche als der ursprüngliche Apfel, sondern auch weitere besondere Eigenschaften: Die vergrößerte Oberfläche beschleunigt zum Beispiel den Oxidationsprozess, das Braunwerden, des Apfels. Man kennt das vom herkömmlichen Reiben eines Apfels: Je feiner der Apfel gerieben wird, desto schneller läuft der Fruchtbrei braun an. Eine vergrößerte Oberfläche sorgt auch in der Nanotechnologie für besondere Eigenschaften: Nanoplatin etwa ist ein viel wirksamerer Katalysator als herkömmliches Platin.

Nanomaterialen werden bereits vielfältig genutzt: In der Medizin sind sie Bestandteil moderner Nachweisverfahren und Therapiemethoden, etwa bei der Diagnostik und Behandlung von Krebs. Auch in Implantaten und Kontrastmitteln kommen Nanomaterialien zum Einsatz. Außerdem verringern sie unseren Energieverbrauch im Alltag. Sie tragen zu mehr Ressourceneffizienz bei, optimieren chemische Prozesse, sie reinigen die Luft von Schadstoffen und helfen bei der Sanierung verschmutzter Gewässer und Böden. Darüber hinaus erhöhen Nanomaterialien die Stabilität und Haltbarkeit von Kunststoffen, Lacken und vielen anderen Produkten. Kurzum: Im Alltag treffen wir schon häufig auf Nanomaterialien, ohne sie bewusst wahrzunehmen.

Was sind Nanomaterialien?

Zu Nanomaterialien zählen gemäß international gültigen Normen wie der DIN ISO/TS 27687 alle Materialien, die
- Nanoobjekte enthalten oder
- eine innere Nanostruktur oder eine nanostrukturierte Oberfläche aufweisen.

Nanoobjekte messen in mindestens einer äußeren Dimension (Länge, Breite oder Höhe) zwischen einem und hundert Nanometer. Sie bestehen meist aus vielen tausenden Atomen oder Molekülen und sind daher deutlich größer als beispielsweise Wassermoleküle. Einige Nanoobjekte sind innen hohl und können mit Wirkstoffen oder anderen Substanzen beladen werden.

Nanoobjekte lassen sich in drei Grundformen einteilen:
- Nanopartikel messen in allen drei Dimensionen zwischen einem und hundert Nanometer.
- Nanoröhrchen und Nanostäbchen, auch Nanofasern genannt, messen in zwei Dimensionen zwischen einem und hundert Nanometer.
- Nanoplättchen und Nanoschichten messen in lediglich einer Dimension zwischen einem und hundert Nanometer.

Nanoobjekte lassen sich zudem nach ihrer Herkunft einteilen in
- natürliche Nanoobjekte wie der feine Staub von Sandstürmen oder Vulkanausbrüchen,
- unbeabsichtigt vom Menschen produzierte Nanoobjekte wie Nanoruß in Autoabgasen, Kerzen- und Zigarettenrauch oder Nanoobjekte, die beim Schleifen, beim Schweißen und bei Sprengungen entstehen und
- gezielt industriell hergestellte synthetische Nanoobjekte.

Zu den in dieser Broschüre betrachteten synthetischen Nanomaterialien zählen alle industriell hergestellten Substanzen, die Nanoobjekte oder Nanostrukturen enthalten und deren Materialeigenschaften dadurch entscheidend beeinflusst werden.

„Ein Tag mit Nano“ – Wie uns Nanotechnologie beeinflusst

Nicholas Alexander Norwick, Spitzname Nano wie die Abkürzung für Nanomaterial, ist in Sachen Nanotechnologie bestens informiert und ein großer Fan von Nanoprodukten. Wir haben ihn einen Tag lang durch sein Leben begleitet.

Es ist 6:30 Uhr, der Wecker klingelt und Nicholas Alexander Norwick (Nano) geht müde ins Bad. Die Dusche sorgt für gute Laune am frühen Morgen: Die Wanne blitzt sauber, denn die Beschichtung mit Nanosiliziumdioxid sorgt für einen Selbstreinigungseffekt – da bleiben Seifenreste und Schmutz nicht mehr hängen.

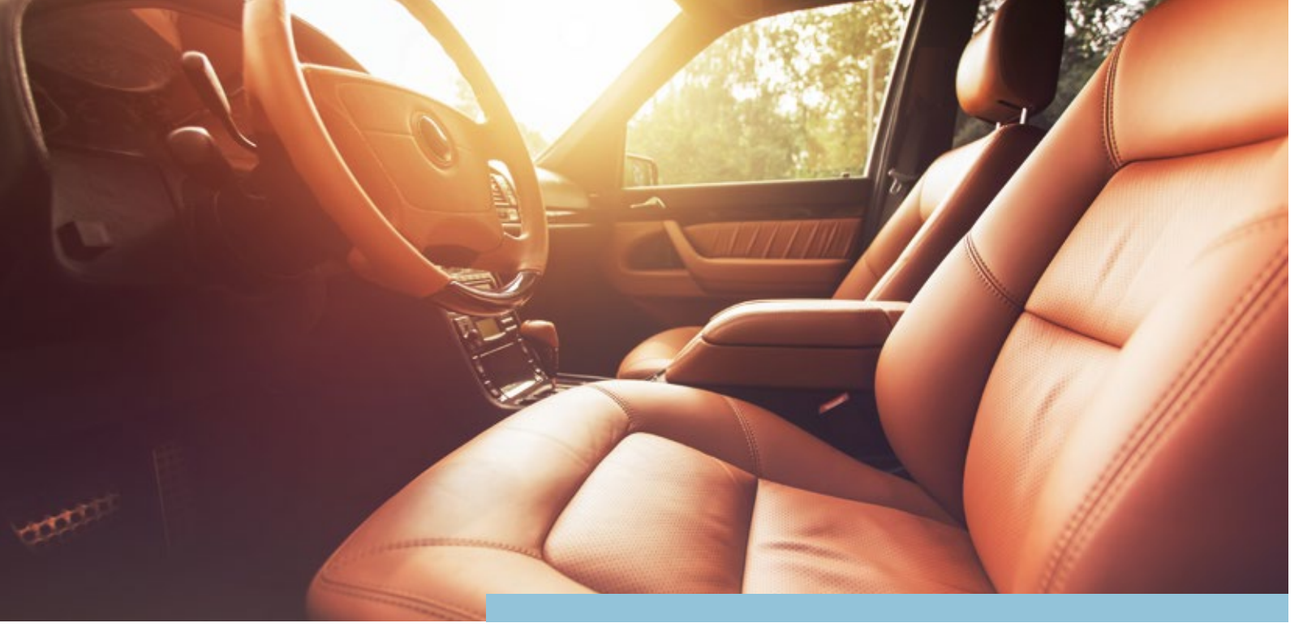
Nano wirft sich in sein Arbeitsoutfit. Zum Glück kann er sich das Bügeln sparen, denn die mit Nanopartikeln behandelten Fasern, aus denen sein Hemd und sein Anzug bestehen, knittern kaum. Überhaupt ist er bestens vorbereitet auf den anstehenden Tag mit wichtigen Telefonaten und langen Meetings, bei denen einem schon mal heiß vor Stress werden kann. Doch das ist für Nano kein Problem: Seine mit Nanosilber ausgerüstete Funktionsunterwäsche schützt ihn vor Schweißgeruch.

Draußen regnet es in Strömen. Da nimmt Nano doch lieber das Auto und nicht wie sonst das Fahrrad. Sein Hybridfahrzeug ist innen und außen mit modernster Nanoelektronik und Nanosensorik ausgerüstet. Auch im Hightech-Gummi der Reifen steckt Nanotechnologie: Nanoruß und Nanosiliziumdioxid verstärken das Material, verringern die Abnutzung und helfen Ressourcen zu sparen. Außerdem liegen die Reifen so gut auf der Straße, dass sie den Spritverbrauch senken. Beste Sicht hat Nano übrigens immer, denn die Scheiben sind nanobeschichtet und wie bei der Duschwanne, perlt der Schmutz mit dem Regen ab. Vor Steinschlag oder Kratzern muss sich Nano auch nicht fürchten: Der Autolack mit Nanoaluminiumoxid bietet besten Schutz.

Um 8 Uhr bei der Arbeit angekommen, zaubert das neue Bürogebäude ein Lächeln auf Nanos Gesicht. Wunderbar, wie viele Innovationen der Nanotechnologie die Architekten und Ingenieure hier eingebaut haben. Der Beton etwa enthält – die Autoreifen lassen grüßen – Nanosiliziumdioxid. Dadurch härtete er schneller aus und ist extrem stabil. Nanodämmstoffe wiederum sorgen für die perfekte Isolierung. Und innen schaffen organische Leuchtdioden aus halbleitenden Nanomaterialien eine angenehme Beleuchtung. Sie verbrauchen deutlich weniger Strom als die herkömmlichen Energiesparlampen.

Nach der Arbeit hat sich Nano mit Freunden zum Tennis verabredet. Schnell fährt er nach Hause, tauscht den Anzug gegen Sportkleidung und steigt auf sein neues Fahrrad. Wie leicht es ist und trotzdem so stabil! Das Material mit integrierten Kohlenstoff-Nanoröhrchen ist wirklich eine tolle Entwicklung. Nanos neue Fitnessuhr darf beim Sport nicht fehlen. Winzige nanobasierte Sensoren an der Unterseite messen seine Aktivitäten und Vitalwerte.

Um 21 Uhr, wieder zuhause angekommen, telefoniert Nano mit seiner Schwester via Videochat auf seinem Tablet, ein Wunderwerk der Nanotechnologie, denn viele der kleinen Elektronikbauteile wären mit herkömmlichen Produktionsweisen gar nicht herstellbar.



Technische Nutzung von Nanomaterialien zum Wohl des Menschen

Strapazierfähige und geruchsarme Textilien
Sie sind atmungsaktiv sowie schmutz- und wasserabweisend, sie schützen vor UV-Licht, knittern nicht und verschleißen kaum: Textilien mit integrierten Nanomaterialien besitzen viele nützliche Eigenschaften. Das gilt für Alltags- und Arbeitskleidung ebenso wie für technische Textilien. Spezielle Gewebe für die Medizin etwa speichern Arzneimittel in Nanofasern und geben sie nach und nach an die Haut ab. Beim Arbeiten mit leicht entflammbaren Chemikalien wiederum empfiehlt sich Schutzkleidung aus antielektrostatischen Nanotextilien.

Nanomaterialien können zudem den Befall von Textilien durch Bakterien oder Pilze reduzieren – das ist für Markisenstoffe ebenso praktisch wie für Verbandsmaterialien oder Sportkleidung. Mit Nanosilber ausgestattete T-Shirts, Socken, Matratzen und Handtücher sind schon länger im Handel. Da die Abgabe von Silberionen das Wachstum von Bakterien hemmt, bleiben die Textilien länger frisch und riechen weniger nach Schweiß.

Eine Beschichtung von Fasern oder Geweben mit nanoskaligem Siliziumdioxid, auch Kieselsäure genannt, macht Kleidung und andere Textilien strapazierfähiger und schützt sie vor Verschleiß. In Kombination mit anderen chemischen Beschichtungen lässt sich sogar wasserabweisendes Baumwollgewebe herstellen. Das konnte bislang nur mit klimaschädlichen fluorhaltigen Kohlenwasserstoffen erreicht werden.

Optimierter UV-Schutz für unsere Haut
Intensive Sonneneinstrahlung über längere Zeit schadet der Haut und damit auch unserer Gesundheit. Sonnencremes schützen uns vor der schädlichen Strahlung, indem sie UV-Licht entweder absorbieren und in Wärme umwandeln oder reflektieren. Sie enthalten chemisch-synthetische oder mineralische UV-Schutzmittel, teilweise auch beides. Mineralische UV-Filter wie Titandioxid oder Zinkoxid sind stabil und können – anders als einige chemische Mittel – keine allergischen Reaktionen auslösen. Der Nachteil: Die Mikrometer großen Mineralien hinterlassen auf der Haut einen weißen Schleier.

Die Nanotechnologie löst das Problem, denn mineralische UV-Schutzfilter in Nanoform sind durchsichtig. Die meisten heute erhältlichen Sonnencremes sind dank Einsatz von Nanotitandioxid nach dem Auftragen transparent und lassen sich zudem leichter auf der Haut verteilen. Es ist erwiesen, dass Nanopartikel weder über gesunde noch sonnenverbrannte Haut in den Körper gelangen. Personen mit verletzter Haut sollten allerdings auf Sonnencreme verzichten und die Sonne meiden.

Sonnencremes mit Nanopartikeln schützen aufgrund ihrer reflektierenden Eigenschaften wesentlich effektiver vor vorzeitiger Hautalterung und bieten einen besseren Schutz vor lebensbedrohlichem Hautkrebs als konventionelle Produkte, da höhere Lichtschutzfaktoren erreicht werden können.

Ressourceneffiziente Kunststoffe
Kunststoffe stecken in Alltagsgegenständen vom Gartenstuhl bis zur Zahnbürste und werden ebenso für viele hochspezialisierte technische oder medizinische Anwendungen benötigt. Kunststoffe sind so vielfältig, weil sich ihre technischen Eigenschaften der jeweiligen Verwendung relativ leicht anpassen lassen. Mit der Kombination aus einem passenden Kunststoff als Basis und Beimischungen an Nanomaterialien und anderen Zusätzen lassen sich maßgeschneiderte Materialien kostengünstig herstellen.

Nanopartikel aus Titannitrid, eine Verbindung der beiden Elemente Titan und Stickstoff, verbessern beispielsweise die thermischen Eigenschaften des Kunststoffs Polyethylenterephthalat, kurz PET, dem Material für Getränkeflaschen. Dank des Nanozusatzes können mehr Flaschen in der gleichen Zeit produziert und Energie sowie Rohstoffe eingespart werden.

Das Nanomaterial Industrieruß, auch Carbon Black genannt, wiederum optimiert seit über 80 Jahren die physikalischen Eigenschaften von Autoreifen und erhöht deren Langlebigkeit. Kunststoffen wird Carbon Black als Füllstoff und UV-Schutz zugesetzt. Außerdem dient die Substanz als schwarzes Pigment für Druckfarben, Lacke und Kosmetika.

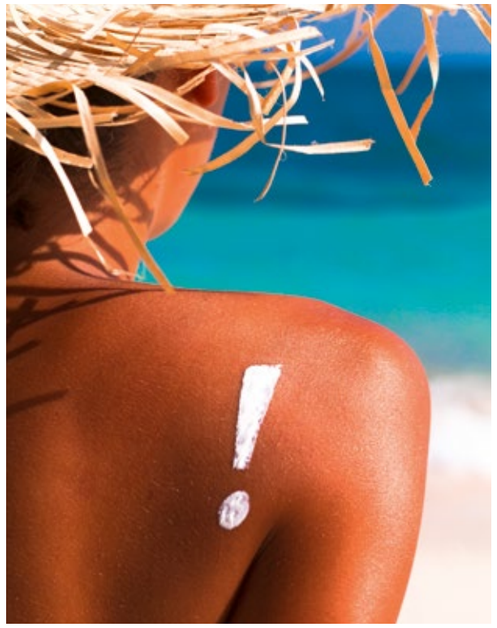
Enthalten Autoreifen neben Industrieruß auch Nanopartikel aus Siliziumdioxid, verringert sich der Rollwiderstand des Reifens und der Treibstoffverbrauch sinkt um bis zu fünf Prozent. Das schont nicht nur Ressourcen, sondern verringert zugleich die Menge an ausgestoßenem Kohlendioxid.

Wasserabweisende und selbstreinigende Oberflächen
Algen- und Pilzbefall an Fassaden, Graffitis auf S-Bahn-Wagen, Dreck auf der Autoscheibe: Gegen diese und ähnliche Ärgernisse hat die Nanotechnologie Mittel parat. Nanobeschichtungen können Oberflächen gezielt so verändern, dass sie das Anhaften von Mikroorganismen, Schmutz und Schmierereien verhindern. Durch Zugabe von Nanomaterialien können sogar Wand- und Fassadenfarben hergestellt werden, die sich selbst reinigen, indem sie Schmutzpartikel oder Mikroorganismen direkt am Ablagerungsort abbauen. Die Rückstände lassen sich leicht abwaschen oder werden vom Regen weggespült.

Moderne Anstriche enthalten zum Beispiel Nanomaterialien aus Titandioxid, Siliziumdioxid oder Silber. Nanosiliziumdioxid erhöht die Abnutzungs-, Kratz- und Witterungsbeständigkeit von Farben und Lacken. Da Siliziumdioxid in Nanoform transparent ist, beeinflusst es das Aussehen der Oberfläche nicht. Nanotitandioxid wiederum verleiht Fassadenfarben eine wasserabweisende und selbstreinigende Wirkung und Nanosilber verhindert den Befall der Oberflächen mit Bakterien, Pilzen und Algen. Nach dem Trocknen des Anstrichs sind die Nanopartikel fest in die Matrix eingebunden. Selbst unter rauen Bedingungen wie starkem Wind oder Regen gelangen sie kaum in die Umwelt.

Kennzeichnungspflicht für Nanoinhaltsstoffe in Kosmetik-Produkten

Seit Dezember 2013 ist es gesetzlich vorgeschrieben: Kosmetika mit Nanopartikeln müssen entsprechend gekennzeichnet werden. Hinter dem betreffenden Inhaltsstoff wird dann der Zusatz „(nano)“ ergänzt. Viele Sonnencremes beispielsweise enthalten Partikel aus Titandioxid, die kleiner als 100 Nanometer sind. Auf der Packung solcher Sonnenschutzmittel steht dann „Titandioxid (nano)“.



Nanomedikamente und mehr
In der Pharmazie sowie in der Diagnostik und Therapie hat die Nanotechnologie bereits für vielfältige Verbesserungen und Neuerungen gesorgt. So ist schon heute gängige Praxis, dass Operationsbesteck und andere medizinische Instrumente mit nanobasierten Beschichtungen ausgestattet sind, die vor Keimen und Korrosion schützen. Ein weiteres Beispiel sind Implantate: Dank nanostrukturierter Oberfläche wachsen sie besser ins umgebende Gewebe ein.

Nanopartikel aus Gold bilden die Grundlage für Schnelltests zum Nachweis von Krankheiten oder Krankheitserregern. Die Partikel werden dafür mit spezifischen Molekülen beladen, die Erkrankungen wie HIV erkennen und deren Fortschreiten im Körper messen. Auch Schwangerschaftstests und die Früherkennung von Tumorleiden wie Prostatakrebs basieren auf dieser Methode.

Nanopartikel, die Wirkstoffe aufnehmen oder an ihre Oberfläche binden, sollen die Arzneien zielgenau an ihren Wirkort im Körper transportieren, zum Beispiel direkt in einen Tumor. Das erhöht nicht nur die Effizienz des Wirkstoffs, sondern schützt zudem gesundes Gewebe vor unerwünschten Nebenwirkungen. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler forschen aktuell intensiv an Techniken zur Wirkstofffreigabe auf Basis von Nanomaterialien wie Gold, Eisenoxid oder milchsäurebasierten Biokunststoffen. Für eine breite Palette von Krankheiten gibt es bereits zugelassene Nanomedikamente. Die meisten davon richten sich gegen Krebs.

Die Revolution im IT-Sektor
Von der Miniaturisierung elektronischer Geräte bis zu Nanoschaltkreisen: Die Elektronikbranche hat eine revolutionäre Entwicklung durchlaufen, die ohne Nanotechnologie undenkbar gewesen wäre. Auch der weitere Fortschritt in diesem Sektor hängt von neuen Nanomaterialien ab. In den Anfängen der Computer- und Informationstechnologie spielte der Halbleiter Silizium die Schlüsselrolle. Jetzt rücken nanoskaliges Indiumzinnoxid, Kohlenstoffnanoröhren, Materialien wie Graphen und die als Quantenpunkte bezeichneten Nanokristalle immer mehr in den Fokus.

Das halbleitende Nanomaterial Indiumzinnoxid ist aus modernen LED-Flachbildschirmen und Touch-Oberflächen, etwa von Smartphones, Tablets und Fahrkartenautomaten, nicht mehr wegzudenken. Da nanoskaliges Indiumzinnoxid elektrischen Strom gut leitet und zugleich transparent ist, wird es vor allem für Leiterbahnen und Kontakte verwendet.

In Fernsehern kommt mit der Quantenpunkttechnologie aktuell eine weitere Entwicklung aus der Nanowelt zum Einsatz. Quantenpunkte – halbleitende Kristalle mit Durchmessern von wenigen Nanometern – leuchten bei Lichteinfall, liefern effizient Strom oder dienen als winzige Informationsspeicher. Sie verbessern die Farbbrillanz und senken zugleich den Energieverbrauch im Vergleich zu handelsüblichen LED-Bildschirmen deutlich.

Auch kohlenstoffbasierte Nanomaterialien – Kohlenstoffnanoröhren und Graphen – besitzen das Potenzial, die Zukunft der Informationstechnologie fundamental zu beeinflussen. Die elektrische Leitfähigkeit von Kohlenstoffnanoröhren kann im Herstellungsprozess für spätere Anwendungen maßgeschneidert werden. Die Nanoröhrchen werden als Zusatz zu verschiedensten Kunststoffen für Elektronikanwendungen, in neuartigen Transistoren und permanenten Datenspeichern verwendet.

Das Wundermaterial Graphen

Graphen – eine einlagige, weniger als einen halben Nanometer dünne Schicht aus Kohlenstoffatomen – gilt seit gut einem Jahrzehnt als neues Wundermaterial. Im Jahr 2004 gelang einem Forschungsteam um Andre Geim von der Universität Manchester die erstmalige Herstellung von Graphen; zusammen mit seinem Kollegen Konstantin Novoselov erhielt Geim sechs Jahre später den Nobelpreis für Physik. Mittlerweile existiert eine ganze Familie von Graphen-basierten Materialien. Der wichtigste Vertreter neben Graphen ist Graphenoxid.

Graphen ist transparent, biegsam und auf molekularer Ebene extrem stabil. Wegen seiner elektrischen Leitfähigkeit wird es als kostengünstiger Ersatz für Indiumzinnoxid diskutiert. Nicht nur die Elektronikbranche verspricht sich viel von dem neuen Material. Auch in den optischen Technologien, in Verbundmaterialien, in der Energiegewinnung und -speicherung sowie in Sensoren für die Messtechnik und Medizin soll Graphen zum Einsatz kommen.

Zur Sicherheit von Nanomaterialien

Fortschritt und Risiko – ein untrennbares Paar

Wir sind Zeugen einer immer schnelleren Entwicklung im technischen und naturwissenschaftlichen Bereich: In den vergangenen Jahrzehnten haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Molekularstruktur unserer Erbsubstanz entdeckt, sind Menschen auf dem Mond gelandet, wurden das Internet und vieles mehr entwickelt. Unsere Lebenserwartung ist gestiegen, wir fliegen rund um den Globus und sind weltweit vernetzt. Ohne neue Technologien wäre all das nicht gelungen und auch eine Besiedlung des Mars in der Zukunft müsste Utopie bleiben. Die Kehrseite des Fortschritts ist ein gigantischer Bedarf an Rohstoffen und Energie. Die Nanotechnologie kann dazu beitragen, Ressourcen zu schonen, alternative Energien zu erschließen und den Weg in eine nachhaltige Wirtschaft zu ebnen.

Neue Technologien eröffnen Chancen, sind aber auch mit gewissen Unsicherheiten verbunden. Die positiven Aspekte von technologischem Fortschritt sind daher immer an die berechtigte Sorge geknüpft, welche Risiken die Neuentwicklungen bergen. Das gilt auch für die Nanotechnologie. Daher muss genau abgewogen werden, wie neue Erkenntnisse aus der Nanotechnologie umgesetzt werden sollen. Dem trägt die Politik seit nunmehr 15 Jahren Rechnung, indem sie die Erforschung möglicher Risiken auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene fördert. Eine hundertprozentige Sicherheit kann niemand garantieren, daher müssen wir das Risiko für Mensch und Umwelt so klein wie möglich halten – und das gelingt nur mit einer kontinuierlichen Sicherheitsforschung.

Die Sicherheitsforschung zur Nanotechnologie sowie zugehörige Begleitmaßnahmen werden in Deutschland bereits seit dem Jahr 2006 gefördert. Sie bleiben auch zukünftig wichtige Eckpfeiler der Technologieentwicklung von neuen Materialien.

Neuigkeiten aus der Sicherheitsforschung

Nanosicherheitsforschung wird in Deutschland seit dem Jahr 2006 intensiv betrieben. Im Rahmen der Programme NanoCare, NanoNature, Inno-CNT und ERA-Net SIINN hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung bislang mehr als 50 Projekte gefördert (siehe Anhang 1). Die beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben begleitend zur Technologieentwicklung die Sicherheit der Nanomaterialien erforscht. Außerdem etablierten sie Methoden zur Erkennung sowie zum Umgang mit Risiken. Die folgenden Seiten fassen die Ergebnisse verschiedener Forschungsverbünde zusammen, die sich jahrelang intensiv mit der Nanosicherheitsforschung beschäftigt haben.

NANOMATERIAL AM ARBEITSPLATZ MESSEN

„Nur personengetragene Messgeräte erlauben zuverlässige Angaben über die Exposition der Arbeiterinnen und Arbeiter mit Nanomaterialien!“

Dr. Christof Asbach
Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V., Duisburg

Der Umgang mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz erfordert eine detaillierte Risikoabschätzung und gegebenenfalls Schutzvorkehrungen. Der Ersatz von staubigen Pulvern durch Suspensionen oder der Einbau von Absauganlagen sind mögliche Maßnahmen für die Sicherheit am Arbeitsplatz, wie auch das Tragen von Filtermasken und Schutzkleidung. Mobile Geräte, die Angestellte am Körper tragen und die direkt im Atembereich messen, sollen eine eventuelle Belastung erfassen. Im Gespräch erläutert Dr. Christof Asbach vom Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. in Duisburg die Erkenntnisse aus den Projekten Nan GEM und NanoIndEx:

Womit haben Sie sich im Rahmen der Projekte der BMBF-Fördermaßnahmen NanoCare und ERA-Net SIINN beschäftigt?
Gestartet sind wir 2006 mit dem Projekt NanoCare, das die Grundlagen für viele weitere Arbeiten legte. Das begann schon damit, eine gemeinsame Sprache für die Messtechniker und die Toxikologen zu entwickeln. Für die weitere Zusammenarbeit war essenziell, dass die Wissenschaftlerinnen und Wissenschafler die anderen Disziplinen aus deren Blickwinkel betrachten konnten – was kann ein Messtechniker überhaupt messen, welche Endpunkte mit welchen Maßeinheiten sind für den Toxikologen relevant? In den Folgeprojekten NanoGEM und NanoIndEx kamen noch Materialwissenschaftler und Gerätehersteller dazu. Gemeinsam wurde dann erstmals eine umfassende Messstrategie entwickelt, um die Exposition am Arbeitsplatz zu messen und mengenmäßig zu erfassen.

Was ist die große Herausforderung bei solchen Messungen?
Das große Problem bei der Exposition gegenüber Nanomaterialien ist, dass es keine nanospezifischen Grenzwerte gibt. Das bedeutet aber nicht, dass es nicht möglicherweise nanospezifische Auswirkungen geben kann. Deshalb ist es wichtig, Aussagen über die Exposition speziell gegenüber Nanomaterialien zu machen. Um wirklich sinnvolle Aussagen treffen zu können, muss die Exposition im Atembereich des Menschen gemessen werden. Dieser lässt sich am besten als eine Halbkugel von 30 Zentimeter Durchmesser rund um Mund und Nase beschreiben. In den letzten Jahren wurden dafür Geräte entwickelt, die an der Person getragen werden. Das Projekt NanoIndEx hat diese Geräte auf Herz und Nieren getestet. Diese Versuche haben gezeigt, dass die Messungen der mobilen Geräte zuverlässig sind. Herkömmliche feststehende Geräte im Raum hingegen ermöglichen nur bedingt Aussagen über die Exposition im Atembereich des Menschen.

Was messen solche Geräte genau?
Das hängt ganz vom Gerät ab. Klassische Grenzwerte für Partikel in der Luft sind massenbezogen, das heißt, dass ein einzelnes zehn Mikrometer großes Partikel genauso bewertet wird wie eintausend Partikel von einem Mikrometer Größe oder eine Milliarde Partikel von zehn Nanometern Größe, weil alle das Gleiche wiegen. Aber die Auswirkungen können höchst unterschiedlich sein. Außerdem erlaubt die gemessene Massenkonzentration keine Aussage über das Risiko. Ein neuerer Ansatz für die Messung von Nanopartikeln besteht darin, die Partikel zu zählen. Es wird also jedes Teilchen gezählt, unabhängig davon, welche Form, Größe oder chemische Zusammensetzung es hat. Eine weitere Messgröße ist die lungendeponierbare Oberflächenkonzentration. Dabei wird gemessen, wie groß die Oberfläche der Partikel ist, die in die Lunge gelangen und dort verbleiben, also nicht wieder ausgeatmet werden. Aber auch dabei werden Zusammensetzung und Form nicht berücksichtigt. Das geht nur, indem man parallel Proben sammelt, zum Beispiel in einem Filter, und diese genauer analysiert.

Welches Vorgehen empfehlen Sie für die Expositionsmessung?
Aus den gerade genannten Gründen empfehlen wir die Kombination aus einem personengetragenen direktanzeigenden Gerät und einem personengetragenen Partikelsammler. So kann man live in hoher Zeitauflösung die Exposition aufzeichnen und im Nachhinein ermitteln, ob eine festgestellte Exposition mit Nanomaterialien besonders kritisch war oder nicht. Es gibt bisher kein Gerät, das online unterscheiden kann, ob es sich bei einem Nanomaterial um ein Partikel oder eine kritische Faser handelt. Außerdem ist die gesamte Messtechnik für Nanopartikelexpositionen bislang noch sehr teuer.

Sind Messungen gesetzlich vorgeschrieben?
Bisher gibt es keine klaren Vorgaben dazu. Gesetzlich vorgeschrieben sind nur die klassischen massenbezogenen Expositionsmessungen. Aktuell ist eine europäische Norm in Arbeit, die beschreiben soll, wie Messungen überhaupt durchzuführen sind. In den Projekten NanoGEM und NanoIndEx wurden Standardarbeitsanweisungen veröffentlicht, die Firmen und Forschungsinstituten hierzu eine Hilfestellung geben. Ein gezieltes Monitoring von Nanopartikeln am Arbeitsplatz geschieht bisher auf freiwilliger Basis.

Wie kann man die Risiken durch Nanopartikel vermeiden?
Die meisten Nanopartikel, die heute synthetisch hergestellt werden, zeigen keine höhere Wirkung als die, die seit Langem in der Umwelt vorkommen, sei es aus Verbrennungsprozessen oder auch aus natürlichen Quellen. Eine Ausnahme können unter bestimmten Bedingungen Kohlenstoffnanoröhren darstellen. Generell gilt für die Exposition immer die sogenannte STOP-Strategie. „S", als erste Stufe, steht für Substitution. Wenn ein Stoff risikobehaftet ist, weicht man, wo immer möglich, auf einen Ersatzstoff aus, oder man verwendet statt eines trockenen, staubenden Pulvers zum Beispiel eine Suspension. Das „T" steht für technische Maßnahmen, etwa Absauganlagen oder eine Einhausung, zum Beispiel beim Umfüllen von Pulvern. „O" steht für organisatorische Maßnahmen, sprich, man begrenzt den Zugang zu bestimmten Bereichen und sorgt dafür, dass möglichst wenige Personen und diese nur über kurze Zeiträume mit dem Material in Berührung kommen. Wenn all das nicht möglich ist, folgt als letzte Maßnahme das „P", die persönliche Schutzausrüstung. Das reicht dann vom Mundschutz bis zum Ganzkörperanzug, ist aber immer nur das letzte Mittel.

DIE LUNGE ALS EINTRITTSPFORTE

„Man kann davon ausgehen, dass die natürlichen Abwehrmechanismen potenziell toxische Eigenschaften von Partikeln bis zu einem gewissen Grad neutralisieren können. In Zellkulturtests kann dieses komplexe Zusammenspiel nicht nachgestellt werden."

Professor Dr. Heinz Fehrenbach
Forschungszentrum Borstel –
Leibniz-Zentrum für Medizin und Biowissenschaften

Über die Atemluft können nachweislich Umweltverunreinigungen, technisch erzeugte sowie natürliche Nanopartikel, etwa aus Vulkanasche, in die Lunge gelangen. Reichen die natürlichen Reinigungsmechanismen unserer Atemorgane nicht aus, können die körperfremden Stoffe wie auch die winzigen Partikel in der Lunge Entzündungsprozesse auslösen. Die gesundheitlichen Folgen hängen von der aufgenommenen Menge und der Form der Nanoteilchen ab. Eine Beladung der Partikel mit gesundheitsschädlichen Chemikalien sowie Vorschädigungen der Lunge durch Erkrankungen wie Allergien oder Asthma spielen ebenfalls eine Rolle. Im Gespräch erläutert Professor Dr. Heinz Fehrenbach vom Forschungszentrum Borstel – Leibniz-Zentrum für Medizin und Biowissenschaften die Erkenntnisse aus den Projekten CarbonBlack und nanoCOLT aus Tier- und Modellversuchen zur Langzeitinhalation von kohlenstoffbasierten Nanomaterialien:

Wieso haben Sie sich auf die Untersuchung von Nanopartikeln aus Kohlenstoff konzentriert?
Solche Nanopartikel entstehen nicht nur bei der gezielten Herstellung von Industrieruß, auf Englisch Carbon Black, für verschiedenste Anwendungen, zum Beispiel als Kunststoffzusatz, als Schwarzpigment oder ähnliches, sondern auch ungewollt bei allen möglichen Verbrennungsprozessen. Dabei können sich andere, unerwünschte Substanzen an die Oberfläche der Partikel anlagern, darunter auch die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK). Man weiß, dass diese Substanzen für sich allein toxisch oder sogar krebserregend wirken.

Im Projekt CarbonBlack wollten wir herausfinden, welchen Einfluss die chemische Zusammensetzung der Oberfläche auf die toxische Wirkung der Kohlenstoffnanopartikel hat. Als Referenzpartikel für die biologischen Untersuchungen haben wir das industriell hergestellte Pigment Printex®90 eingesetzt. Diese Partikel im Nanometerbereich sind wissenschaftlich bereits sehr gut untersucht. Unsere Projektpartner am Karlsruher Institut für Technologie haben dann gezielt Verunreinigungen, unter anderem PAKs, mit bekannter Toxizität auf die Partikel aufgebracht. Zusätzlich haben wir noch eine weitere Rußart, den sogenannten Acetylenruß, getestet, der so hergestellt wurde, dass sich auf dessen Oberfläche ein Gemisch aus vielen unterschiedlichen Polyaromaten finden lässt.

Was ist das Ziel Ihrer Untersuchungen?
Wir wollten wissen, wie sich die unterschiedlichen Partikel auf die verschiedenen Bereiche und Gewebe der Schleimhaut des Atemwegstraktes sowie der Lunge auswirken. Gemeinsam mit den verschiedenen Projektpartnern aus ganz Deutschland konnten wir so die verschiedenen Abschnitte der Lunge von der Luftröhre bis zu den Lungenbläschen abdecken. Wir haben dabei festgestellt, dass die verschiedenen Bereiche der Lunge sehr unterschiedlich auf die Rußpartikel reagieren. Das Projekt nanoCOLT knüpft an diese Experimente an, soll aber insbesondere Auskunft über die Folgen von wiederholten Expositionen geben. Außerdem wird in diesem Projekt untersucht, wie eine kranke oder geschädigte Lunge auf Carbon Black reagiert. Wenn die Lunge zum Beispiel Luftschadstoffen wie Stickoxiden ausgesetzt wird, wird die Schleimhaut der Atemwege geschädigt und ihre zelluläre Zusammensetzung verändert sich. In Deutschland leiden rund zehn Prozent der Kinder an Asthma, und etwa zehn Prozent der erwachsenen Bevölkerung haben chronische Lungenerkrankungen mit ebenfalls veränderter Schleimhaut – all diese Menschen reagieren auf Nanopartikel möglicherweise ganz anders als gesunde Personen.

Bei Kohlenstoffnanoröhren ist die Form ausschlaggebend für die Toxizität. Wie ist das beim Industrieruß Carbon Black?
Die eingesetzten Partikel in den Projekten CarbonBlack und nanoCOLT sind mehr oder weniger kugelförmig. In Flüssigkeiten lagern sich die Partikel häufig zu größeren Ansammlungen zusammen. Diese sind dann zwar nicht mehr ideal kugelförmig, aber immer noch weit von den faserigen Nanoröhren entfernt. In den Kurzzeitversuchen mit den verschiedenen Partikelsorten waren die beobachten Effekte eher gering. Im Tierversuch traten lediglich bei der Exposition mit Acetylenruß milde entzündliche Reaktionen auf. Nach unseren Daten hat die Beladung der Oberfläche mit Aromaten also einen deutlichen Einfluss auf die Wirkung der Partikel – es kommt eher zu Entzündungen, wenn auch glücklicherweise zu geringen.

Andererseits haben die Referenzpartikel im Labor in Zellkulturversuchen teilweise starke Effekte gezeigt, was aber eher auf die große Oberfläche und den dadurch ausgelösten oxidativen Stress zurückzuführen ist. Im Organismus führt der von Zellen der Schleimhaut abgesonderte Schleim in der Luftröhre und den Bronchien dazu, dass die Partikel sehr stark verklumpen und damit unschädlich gemacht werden. Man kann also davon ausgehen, dass die natürlichen Abwehrmechanismen potenziell toxische Eigenschaften von Partikeln bis zu einem gewissen Grad neutralisieren können. In Zellkulturtests kann dieses komplexe Zusammenspiel nicht nachgestellt werden.

Was heißt das für die Übertragbarkeit von Testergebnissen?
Man sollte sicher vorsichtig sein, von Zellkulturversuchen auf die Wirkung im Körper zu schließen. Natürlich lässt sich in solchen Modellsystemen einiges herausfinden über die Interaktion der Nanopartikel zum Beispiel mit der Zellmembran. In der Situation im Organismus durchlaufen die Nanopartikel jedoch noch verschiedene Stationen von Nase über Luftröhre und Bronchien, bevor sie mit den für die Sauerstoffaufnahme verantwortlichen Lungenbläschen mit ihren besonders empfindlichen Zellen in Kontakt kommen. Dies lässt sich nur schwer auf Basis von Zellkulturen vorhersagen. Es gibt aber bereits komplexere Testsysteme, mit denen sich das Zusammenspiel verschiedener Zelltypen oder auch ganzer Organbereiche im Labor nachstellen lässt. In einem solchen Modell konnten wir die Effekte der unterschiedlichen Partikelsorten, die wir im Tierversuch gesehen hatten, bestätigen.

Wie realistisch sind die Mengen, die Sie im Modell untersucht haben?
In den Projekten wollten wir natürlich mit realistischen Mengen arbeiten. Allerdings waren bei diesen niedrigen Konzentrationen häufig kaum oder keine Effekte zu beobachten, sodass wir immer Positivkontrollen zur Überprüfung des Testsystems eingesetzt haben. Zusätzlich mussten wir auch mögliche Wechselwirkungen der Partikel mit den eingesetzten Analysemethoden berücksichtigen. Insbesondere Messmethoden, die mit Licht oder Fluoreszenzlicht arbeiten, liefern bei hohen Partikelkonzentrationen und insbesondere bei den schwarzen Partikeln, wie wir sie eingesetzt haben, keine verlässlichen Ergebnisse. Außerdem verklumpen die Partikel in Flüssigkeiten und wir wollten ja eigentlich die Effekte von luftgetragenen Nanopartikeln untersuchen. Im Tierversuch haben Ratten über sechs Stunden pro Tag schätzungsweise circa 220 Mikrogramm Nanopartikel inhaliert. Aus Messungen in Städten wie London weiß man, dass an vielbefahrenen Straßen durchaus Konzentrationen von 20 bis 50 Mikrogramm Partikel pro Kubikmeter Luft auftreten können. Für den Menschen kommt man dann (auf sechs Stunden hochgerechnet) auf etwa 150 Mikrogramm Partikel. Die Größenordnung ist also ähnlich und entspricht in etwa der Menge, mit der man eben auch in einem städtischen Bereich entlang einer gut befahrenen Straße zu rechnen hätte.

Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (kurz PAK) bilden eine Stoffgruppe aus mehreren hundert organischen Einzelsubstanzen. Sie entstehen bei der unvollständigen Verbrennung von organischem Material wie Kohle, Holz, Öl oder auch zum Beispiel bei Waldbränden.

KOHLENSTOFFNANORÖHREN: BESSER ALS IHR RUF

„Die Abwehrmechanismen der Lunge werden mit Agglomeraten oder Knäueln viel besser fertig als mit langgestreckten Fasern. Die Hersteller haben die Gefahr erkannt und setzen für ihre technischen Produkte bevorzugt lange Kohlenstoffnanoröhren ein, die sehr flexibel sind und verknäueln.“

Dr. Otto Creutzenberg
Fraunhofer ITEM, Hannover

Kohlenstoffnanoröhren (englisch: Carbon Nanotubes, CNTs) finden dank ihrer außergewöhnlichen mechanischen Stabilität und extrem hohen Strom- und Wärmeleitfähigkeit bereits Anwendung als Zusatz in Kunststoffen, etwa für Sportgeräte, für die Elektronikindustrie oder die Automobilbranche. Die faserartige Form von Kohlenstoffnanoröhren weckt jedoch Bedenken, dass sie ähnlich wie andere faserartige Materialien, darunter Asbest, die Gesundheit schädigen. Lange CNTs bilden Knäuel und sind daher nicht so problematisch wie starre, kurze und nadelförmige Partikel. Im Gespräch erläutert Dr. Otto Creutzenberg vom Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin (Fraunhofer ITEM) in Hannover die Erkenntnisse aus den Projekten CarboTox und CaNTser zur Wirkung von Kohlenstoffnanoröhren auf den Menschen:

Was sind CNTs?
CNT steht für Carbon Nanotubes, auf Deutsch Kohlenstoffnanoröhren. Über die Herstellungsbedingungen lassen sich Durchmesser, Länge sowie Dicke der Röhrchen gezielt beeinflussen. Man kann also sehr viele sehr unterschiedliche Röhrchen herstellen, die zwar alle aus reinem Kohlenstoff bestehen, sich aber in ihren Eigenschaften, gerade auch hinsichtlich der Toxizität, stark unterscheiden.

CNTs bestehen eigentlich nur aus Kohlenstoff. Warum werden sie kritischer gesehen als beispielsweise einfacher Ruß?
Bei beiden handelt es sich um Partikel, aber Kohlenstoffnanoröhren sind faserartig. Fasern haben im Vergleich zu kugelförmigen Partikeln eine besondere toxikologische Wirkung – man kennt das beispielsweise von Asbest, einem natürlichen Stoff, der früher sehr viel eingesetzt wurde. Wenn Fasern länger als fünf Mikrometer und dünner als drei Mikrometer sind, sind sie potenziell gefährlich – dabei kommt es nicht darauf an, ob es sich um mineralische oder Kohlenstofffasern handelt. Typische CNTs sind zwischen zehn und 100 Nanometern dünn und können je nach Synthese 40 Mikrometer und länger sein. Wobei sehr lange und flexible CNTs dazu neigen, Knäuel zu bilden – problematisch sind vor allem die starren, nadelförmigen Partikel. Das konnten wir im BMBF-Projekt CarboTox zeigen.

Was genau passiert, wenn man solche Fasern einatmet?
Wenn man normalerweise Partikel aus der Umwelt oder am Arbeitsplatz einatmet, die vier Mikrometer oder kleiner sind, gelangen sie in die Lunge und werden dort von den Fresszellen aufgenommen und aus der Lunge entfernt. Sehr lange Fasern können von Fresszellen aber nicht komplett aufgenommen werden. Sie schränken die Zellen in ihrer Bewegungsfreiheit so stark ein, dass die Fasern nicht mehr aus der Lunge heraus transportiert werden können.

CNTs sind sehr stabil. Anders als Mineralfasern brechen sie kaum, sie sind nicht löslich und auch nicht biologisch abbaubar. So können sie zur Entstehung von Tumoren führen. Die Ergebnisse aus dem Projekt CarboTox weisen darauf hin, dass die Zellen in der Lunge auf unterschiedliche Weise geschädigt werden.

Wie kann man diesem Risiko entgegen wirken?
Wenn man es mit Nanopartikeln zu tun hat, muss man generell genau hinschauen: Wie groß sind die Partikel? Spricht man von einzelnen Nanopartikeln oder von Agglomeraten, liegen gestreckte Fasern vor oder eher kugelförmige Knäuel? Die Wirkungen können jeweils ganz unterschiedlich sein. Entsprechend differenziert sind die Risiken zu bewerten. Die Abwehrmechanismen der Lunge werden mit Agglomeraten oder Knäueln viel besser fertig als mit langgestreckten Fasern. Die Hersteller haben die Gefahr bereits erkannt und setzen für ihre technischen Produkte bevorzugt ein- oder mehrwandige lange CNTs ein, die sehr flexibel sind und verknäueln.

Geht von CNTs ein Risiko für Verbraucher aus?
In den Produkten selbst sind die CNTs fest eingebunden, von daher besteht für Verbraucher kein Risiko. Selbst beim Abwracken eines Flugzeugs werden keine isolierten CNTs freigesetzt, sondern es entsteht dabei höchstens Kunststoffstaub. Im Normalfall genügt eine einfache Staubmaske, um das Einatmen der Stäube zu verhindern und sich so vor solchen Substanzen zu schützen.

Ein besonderes Risiko besteht allerdings für Angestellte in der Produktion, dort, wo die CNTs hergestellt werden. Mit den trockenen CNTs muss man sehr sorgfältig umgehen. Mittlerweile sind die Hersteller dafür aber sehr sensibilisiert. Sowohl Wissenschaftlerinnen und Wissenschafler, die mit CNTs arbeiten, als auch die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter den Firmen treffen alle Vorsichtsmaßnahmen bis hin zum Körpervollschutzanzug mit Luftfiltern. Die Firmen arbeiten in geschlossenen Systemen, um die Freisetzung von CNTs in die Umwelt zu verhindern. Und wo immer möglich, setzt man heute CNTs ein, die Knäuel bilden. Dann hat man es in der Produktion und Verarbeitung nicht mehr mit Fasern, sondern mit eher runden Partikeln zu tun. Mit geeigneten Methoden lässt sich bei der Verarbeitung dafür sorgen, dass sie im Kunststoff dann wieder gestreckt vorliegen. Bei einigen Anwendungen ist man auch wieder zu konventionellen Kohlenstofffasern (Carbonfasern) zurückgekehrt, die für viele Zwecke ebenso geeignet sind wie CNTs.

Woran arbeitet die Forschung aktuell?
Generell laufen zu diesen Materialklassen noch viele Forschungsarbeiten. Wir wollen besser verstehen, welche Mechanismen wirken und wie die Geometrie der Kohlenstoffnanoröhren die Wirkung beeinflusst. In unserer Arbeitsgruppe untersuchen wir unter anderem im BMBF-Projekt CaNTser derzeit, ab welchem Faserdurchmesser Probleme auftreten, indem wir verschiedene Durchmesser-Intervalle der CNTs untersuchen. Die Schwelle liegt nach den bisherigen Erkenntnissen zwischen 20 und 40 Nanometern. Wir möchten sie gerne noch genauer bestimmen.

Die Faserproblematik am Beispiel Asbest

Grundsätzlich bedeuten faserartige Materialien für die Lunge ein Problem, wenn die Fasern länger als fünf Mikrometer, dünner als drei Mikrometer und steif sind. Dann greifen die Reinigungsmechanismen der Lunge nur bedingt oder gar nicht, was Entzündungen des Gewebes und möglicherweise Tumorbildung nach sich ziehen kann.

Das prominenteste Beispiel eines gesundheitsschädlichen Fasermaterials ist Asbest. Asbest ist die Sammelbezeichnung für natürlich vorkommende, faserartige Silikat-Minerale. Charakteristisch für Asbest ist, dass sich das Material längs in feinere Fasern zerteilt, die leicht eingeatmet werden können. Die eingeatmeten Fasern setzen sich in der Lunge fest und reizen das Gewebe.

Asbest wurde wegen seiner Hitzebeständigkeit, guten Dämmeigenschaften und vielen weiteren Vorzügen weltweit in großen Mengen eingesetzt, bis es im Jahr 1993 in Deutschland und zwölf Jahre später EU-weit aufgrund seiner krebserregenden Wirkung verboten wurde.

NANOPARTIKEL IM KÖRPER VERFOLGEN

„Nanopartikel im Körper zu messen, ist unerlässlich, weil die Ergebnisse von in vitro Untersuchungen nur sehr eingeschränkt übertragbar sind. Die Methoden werden ständig weiterentwickelt."

Professor Dr. Martin Wiemann
IBE R&D Institute for Lung Health gGmbH, Münster

Nanomaterialien können ungewollt vor allem über die Lunge oder den Darm sowie beabsichtigt – etwa bei medizinischen Anwendungen – in den menschlichen Körper gelangen. Über den Blutkreislauf verteilen sie sich und lagern sich in den Organen oder im Gewebe ab. Das körpereigene Entsorgungssystem entfernt in den meisten Fällen über 90 Prozent der Partikel schließlich wieder. Für einen gezielten Einsatz von Nanomaterialien im Körper sowie für die Abschätzung eventueller Gesundheitsrisiken ist es wichtig, nicht nur den genauen Weg von Nanoobjekten zu verfolgen, sondern sie auch in kleinsten Mengen im Körper aufzuspüren und zu identifizieren. Hierfür werden neue Methoden und Geräte benötigt, die hochspezifisch und nicht-invasiv ein solches Vorgehen ermöglichen. Im Gespräch erläutert Professor Dr. Martin Wiemann von der IBE R&D Institute for Lung Health gGmbH in Münste die Erkenntnisse aus den Projekten nanoGEM und NanoBioDetect zur Untersuchung von Nanopartikeln im menschlichen Körper:

Sie arbeiten in Ihren Projekten daran, Nanopartikel im Körper zu messen. Was genau ist das Ziel?
Nanopartikel stehen häufig im Verdacht gesundheitsschädlich zu sein, und für einige ist das auch belegt. Wir möchten besser verstehen, welche Gefährdung von Nanopartikeln ausgehen kann und auf welchen Mechanismen sie beruht. Indem wir in unseren Arbeiten untersuchen, wo Nanopartikel im Körper hingelangen und wo nicht, können wir bestimmte Risikoklassen oder Risikobereiche mit hoher Wahrscheinlichkeit ausschließen.

Mit welchen Methoden kann man Nanopartikel im Körper messen?
Wenn man die Wege von Nanopartikeln verfolgen möchte, lässt sich das meist nicht ohne eine spezifische Markierung der Nanopartikel realisieren. Die konventionelle Mikroskopie ermöglicht einen ersten Überblick, in welchen Bereichen eines Gewebes Nanopartikel in größeren Mengen vorliegen. Dann kann man beispielsweise die Dunkelfeld-Mikroskopie einsetzen, bei der die Lichtbrechung an einem Material gemessen wird. Zelluläre Strukturen brechen und streuen das Licht nur schwach, viele Nanopartikel, zum Beispiel Gold, und Agglomerate dagegen sehr stark. Mit diesem Verfahren kann man relativ große Flächen schnell untersuchen.

Im Projekt NanoBioDetect haben wir massenspektrometrische Verfahren genutzt. Die für uns schnellste und beste Methode zur Untersuchung ganzer Organschnitte ist die LA-ICP-MS (englisch: Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry), bei der die Probe Schicht für Schicht mit einem Laserstrahl abgetragen und mit dem Massenspektrometer untersucht wird. Damit erreicht man Auflösungen von zwei bis vier Mikrometern.

Generell gibt es in der Geräteentwicklung ein Kopf-an-Kopf-Rennen, aus dem immer genauere Methoden resultieren. So ist die quantitative Bestimmung von Nanopartikeln derzeit noch sehr aufwendig, aber besonders wichtig für die

toxikologische Beurteilung. Für eine umfassende Aussage braucht man also immer eine Kombination verschiedener Techniken.

Befinden wir uns hier in der Grundlagenforschung oder lassen sich Ihre Methoden für reale Expositionen anwenden?
Die in der Realität auftretenden Konzentrationen bei einer Exposition mit Nanomaterialien sind sehr, sehr gering. Kommt es aber im Körper zu einer Anreicherung der Nanopartikel über einen längeren Zeitraum, dann ist es durchaus möglich, dass auch an sich unkritische Substanzen punktuell soweit angereichert werden, dass sie gefährlich werden könnten – und genau das möchten wir im Projekt NanoBioDetect untersuchen.

Unsere Untersuchungen helfen auch dabei, die Ergebnisse von zellbasierten Testsystemen besser zu beurteilen. Die Frage dabei ist, wie gut die Zellkulturversuche die Realität abbilden beziehungsweise auf den Menschen übertragen werden können. Hinzu kommt außerdem, dass in der realen Situation selten nur eine definierte Art von Nanopartikeln vorliegt – in der Regel geht es um Größenverteilungen, beidenen Nanopartikel verschiedenster Größe bis zu Mikroteilchen vorkommen.

Kann man aus Ihren Ergebnissen allgemein Aussagen über die Toxizität von Nanopartikeln ableiten?
Die pauschale Annahme, Nanopartikel seien klein, könnten überall durchdringen und damit alle Bereiche des Körpers erreichen, ist so nicht richtig. Nicht nur in der Lunge, auch im Darm funktionieren natürliche Schutzmechanismen, sodass ein sehr großer Teil der Nanopartikel über Fresszellen aufgenommen und unschädlich gemacht wird. Darüber hinaus hat man bisher keine Hinweise auf eine spezifische Nanotoxizität gefunden. Ein Material ist nicht deshalb toxisch oder nicht toxisch, weil die Partikel eine bestimmte Größe haben.

Was wir bisher noch gar nicht oder nicht ausreichend untersucht haben, sind Partikel, die teilweise löslich sind. Einerseits können hier chemische Toxizitäten auftreten, andererseits könnten die Materialien aber auch viel schneller aus dem Körper entfernt werden, als es bei Partikeln der Fall wäre.

Kann man aus Ihren Forschungsergebnissen Schlüsse für das Design von Nanopartikeln ziehen?
Im Projekt nanoGEM hatten wir hierfür ein schönes Beispiel. Die Fähigkeit, eine Entzündung auszulösen, ließ sich durch eine spezielle Oberflächenbeschichtung der Nanopartikel mit Phosphorgruppen entscheidend verringern. Man kann Nanopartikel also gezielt „entgiften", wenn sie zum Beispiel aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung eine spezifische Toxizität haben.

Die Reinigungskraft unserer Lunge

Die Atemluft enthält Keime, Staubpartikel und viele andere Verunreinigungen. Mit speziellen Reinigungsmechanismen entledigt sich unser Atemtrakt dieser Stoffe. Kleinstpartikel können bis in die Lungenbläschen gelangen. Hier werden sie von den Fresszellen aufgenommen und über das Bronchialsystem nach oben transportiert. Neben den Fresszellen spielt die sogenannte mukoziliäre Reinigung eine entscheidende Rolle: Sie entfernt Schleim und größere Partikel mit Hilfe von Flimmerhärchen aus den oberen Atemwegen. Über die „mukoziliäre Rolltreppe" werden die Störstoffe direkt in Richtung Rachen geschickt. Per Schlucken, Abhusten oder Ausspucken verlassen die Fremdkörper schließlich die Atemwege.

Nanotoxikologische Studien

Die Nanotoxikologie untersucht mögliche toxische Wirkungen von Nanomaterialien. Als Spezialgebiet der Toxikologie – der Lehre von Giftstoffen, Vergiftungen und deren Behandlung – beschäftigt sie sich mit den Effekten von technisch hergestellten Nanoobjekten und Nanostrukturen auf lebende Organismen.

Für toxikologische Studien sind sowohl Positiv- als auch Negativkontrollen unerlässlich. Ohne sie sind keine validen Aussagen möglich. Positivkontrollen sind Substanzen, die einen bekannten Effekt auslösen und die Funktionalität des Tests sowie des Testsystems bestätigen. Negativkontrollen hingegen lösen keinen Effekt aus. Sie dienen dazu, den Hintergrundwert des Testsystems zu bestimmen, Störfaktoren zu identifizieren oder eine experimentelle Methodik zu verifizieren.

ZUKUNFTSTRÄCHTIGE NANOMEDIZIN

„Insgesamt gibt es eine unglaublich große Vielfalt von Nanopartikeln, die in der Medizin eingesetzt werden können. Die größten Potenziale sehen wir momentan in der Krebstherapie."

Professorin Dr. Dagmar Fischer
Friedrich-Schiller Universität Jena

In der Medizin und Pharmazie gelten Nanomaterialien als Hoffnungsträger. Gerade bei der Diagnostik und Behandlung schwerer Krankheiten wie Krebs verspricht der Einsatz der Nanotechnologie großes Potenzial. Wie herkömmliche Arzneimittel müssen auch Nanomedikamente einen strengen, teuren und langwierigen Prüfprozess durchlaufen. Nach der Zulassung durch die entsprechenden Behörden erfüllen sie die hohen Anforderungen an Sicherheit und Wirksamkeit. Die nanomedizinische Forschung beschäftigt sich zudem intensiv mit möglichen Langzeiteffekten der neuartigen Therapien. Außerdem trägt sie wesentlich zur Entwicklung von Prüfverfahren als Alternative zu Tierversuchen bei. Im Gespräch erläutert Professorin Dr. Dagmar Fischer von der Friedrich-Schiller Universität Jena die Erkenntnisse aus den Projekten NanoMED und NanoBEL zur Nanomedizin:

Nanopartikel können im Körper unerwünschte Wirkungen haben, sie können aber auch nutzbringend eingesetzt werden. Wo nutzt man Nanopartikel in der Medizin?
Im Grunde genommen gibt es in Pharmazie und Medizin drei Anwendungsbereiche für Nanomaterialien: Arzneimittel, Medizinprodukte und Verfahren oder Technologien. Nanopartikel können Arzneiträger sein, wenn beispielsweise ein Wirkstoff darin eingeschlossen ist. Nanoarzneimittel werden vor allem in der Krebstherapie und zur Behandlung von Infektionen eingesetzt, daneben teilweise auch bei degenerativen und inflammatorischen Erkrankungen. Sie können aber auch als Hilfsstoffe dienen, um beispielsweise die Rieselfähigkeit bei der Tablettenherstellung zu verbessern. In Medizinprodukten geht es um die physikalische Wirkung von Nanomaterialien, zum Beispiel bei der Beschichtung von Knochenersatzmaterialien, in Zahnfüllungen oder auch in Wundauflagen. Und dann gibt es Verfahren, die vor allem als Biochips oder Lab-on-a-Chip eine Rolle spielen, um Analysen an Blut oder Urin durchzuführen.

Welche Nanopartikel werden in der Medizin eingesetzt?
Das ist mehr oder weniger die „bunte Welt" der Nanopartikel. Man kann sie aber prinzipiell in zwei Gruppen untergliedern: Einmal gibt es die Nanopartikel, die im Körper rasch wieder in ihre einzelnen Bestandteile zerfallen oder verstoffwechselt werden, sodass sie am Ende wieder verschwunden sind. Dazu zählen Liposomen, viele Polymerpartikel, Mizellen und ähnliche. Und dann gibt es die Nanopartikel, die nur ganz langsam abgebaut werden. Das sind beispielsweise Silikat Partikel, Eisenoxide, die zum Beispiel als Kontrastmittel eingesetzt werden, Silber als Antiseptikum oder Gold bei Impfungen oder in der Diagnostik.

Es geht aber nicht nur um das Material, aus dem die Nanopartikel bestehen. Auch die Oberflächen lassen sich verändern. Sie können rau sein oder porös. Man kann Substanzen auf die Oberfläche bringen, die die Ladung oder auch die Löslichkeit in Wasser oder in

Fett beeinflussen. Man kann Proteine oder Antikörper aufbringen, die für das Erkennen der Zielzellen zuständig sind und die Nanopartikel genau dort hinbringen, wo sie gebraucht werden. Insgesamt gibt es eine unglaublich große Vielfalt von Nanopartikeln, die in der Medizin eingesetzt werden können. Nano ist nicht gleich Nano. Wenn jemand fragt: „Ist Nano gefährlich?", muss ich zurückfragen: „Welches Nano?".

Was können Nanopartikel in der Medizin leisten, was mit anderen Verfahren nicht möglich ist?
Sogenannte Drug-Delivery-Systeme, bei denen der Wirkstoff in einem Nanopartikel eingeschlossen wird, ermöglichen zum Beispiel den Transport von schwerlöslichen Wirkstoffen. Man kann die Wirkstoffmoleküle darüber hinaus so auch vor Zersetzung schützen. Wir können auch dafür sorgen, dass ein toxischer Wirkstoff wie etwa ein Chemotherapeutikum erst dort freigesetzt wird, wo er tatsächlich gebraucht wird. Dadurch lässt sich gesundes Gewebe vor unerwünschten Nebenwirkungen schützen. Die größten Potenziale sehen wir momentan in der Krebstherapie oder auch bei magnetischen Nanopartikeln, die für Hyperthermie-Behandlungen eingesetzt werden.

Wie notwendig und zuverlässig sind Tierversuche?
Im medizinischen Bereich steht am Ende immer die klinische Prüfung am Menschen. Über die Tierversuche können wir im Vorhinein ungeeignete Partikel aussortieren, und wir können Verträglichkeit und Dosierung abschätzen.

Mittlerweile gibt es neben den Tierversuchen auch viele zellbasierte Testsysteme, sogenannte in-vitro-Systeme, für die Untersuchung von Nanopartikeln, die aber nur spezielle Fragestellungen abdecken und deutlich weniger komplex sind als ein Organismus. Wir entwickeln daher im Projekt NanoBEL unter anderem das Hühnerei-Modell als Alternative zum Tierversuch, mit dem sich das Verhalten von Nanomaterialien am Gewebe und in Blutgefäßen simulieren lässt. Die Investition in komplexe Modelle vor dem Tierversuch lohnt sich auf jeden Fall.

Wir können mit Hilfe von in-vitro-Experimenten und im Tierversuch auch viele Effekte von Nanopartikeln optimieren, was wir im NanoMed-Projekt untersucht haben. Wenn ich zum Beispiel die sehr dichte Blut-Hirn-Schranke durchdringen möchte, muss ich die Nanopartikeloberfläche gezielt anpassen, um das zu bewerkstelligen. Andererseits lassen sich bestimmte Strukturmerkmale auch gezielt so ausschalten, um Nanopartikel von solchen Barrieren fernzuhalten.

Was weiß man über Langzeiteffekte?
Eine einmalige Gabe in therapeutischen Dosen von Nanopartikeln ist sicher als unkritisch anzusehen. Wenn man solchen Substanzen wiederholt in hohen Dosen ausgesetzt wird und sich unter Umständen größere Mengen im Körper anreichern, kann das möglicherweise anders aussehen. In Zellkulturen und Tierversuchen hat man bisher vor allem Kurzzeiteffekte untersucht. Über die Langzeitschäden von solchen Systemen weiß man vergleichsweise wenig. Verschiedene Forschungsvorhaben, darunter auch unser Projekt NanoBEL, untersuchen seit einigen Jahren die Folgen von Langzeitexpositionen oder wiederholten Gaben. Zu wiederholten Applikationen oder chronischen Expositionen fehlen uns noch viele Informationen – da geht noch was.

Was waren die wichtigsten Erkenntnisse aus Ihren bisherigen Forschungsprojekten?
Unser erstes Projekt war das NanoMed-Projekt, bei dem es um kurzzeitige Effekte von Nanopartikeln ging. Dabei haben wir unter anderem viel über Methodik gelernt. So musste man zunächst die Datengewinnung vereinheitlichen – heute ein anerkannter Standard, aber damals war das erst im Aufbau. Dann haben wir ein Datenbankkonzept aufgesetzt, um die bei den Projektpartnern gesammelten Ergebnisse zentral abzulegen und zu bündeln. Aus wissenschaftlicher Sicht haben wir festgestellt, dass es nicht reicht, nur über wenige Tage oder gar Stunden die akuten Effekte zu beobachten, sondern dass bei Nanopartikeln, die länger im Organismus sind, Langzeiteffekte auftreten können. Wir müssen uns den gesamten Lebenszyklus vom frisch hergestellten Partikel bis hin zu den Abbauprodukten und den Überbleibseln im Körper anschauen, bis der Partikel vollständig verschwunden ist. Wir haben außerdem gelernt, dass man zwischen gesundem und krankem Organismus differenzieren muss, da hier erhebliche Unterschiede bestehen können. Im aktuellen Projekt NanoBEL schauen wir auf die Langzeiteffekte und beziehen gesunde und kranke Versuchstiere mit ein, um die Effekte zum Beispiel von Tumoren, Wasser im Gewebe oder Defekten an der Blut-Hirn-Schranke zu berücksichtigen.

Risiken bewerten

Der Mensch unterliegt ständig äußeren Einflüssen, die positive oder negative Auswirkungen haben. Umweltbelastungen wirken oft negativ und können zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen. Die Wahrscheinlichkeit, dass tatsächlich Beschwerden auftreten, ist umso größer, je häufiger und stärker wir einem schädlichen Reiz ausgesetzt sind. Hinzu kommt eine weitere Größe: die Höhe des Gefährdungspotenzials, also die Schwere des biologischen Effektes. Beides zusammen, die Exposition (das „Ausgesetzt-Sein“) und die biologische Wirkung, bestimmen das Risiko.

Das folgende Beispiel soll das verdeutlichen: Wer Pilze sammelt, erwischt mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit einen Giftpilz und sollte seine Funde deshalb immer gründlich prüfen. Wer sich bestens im Reich der Pilze auskennt und die giftigen Pilze aussortiert oder aber seine gesammelten Pilze dann lieber doch nicht isst, senkt das Risiko einer Vergiftung. Ebenso verhält es sich mit dem potenziellen Risiko einer chemischen Substanz, also auch eines Nanomaterials: Zunächst muss geprüft werden, ob von dem speziellen Material überhaupt eine Gefährdung ausgeht. Selbst wenn dies zutrifft, besteht nur dann ein Risiko, wenn wir mit dem Material in Kontakt kommen oder ihm ausgesetzt sind. In diesem Fall müssen wir sinnvoll mit dem Risiko umgehen, es also minimieren oder gar eliminieren.

In Sonnencremes dienen Nanomaterialien wie Titandioxid oder Zinkoxid als effektive und langanhaltende UV-Schutzmittel. Sie kommen zwar über die Haut mit unserem Körper in Kontakt, können aber weder gesunde noch sonnenverbrannte Haut durchdringen. Zudem sind diese beiden Nanomaterialien – wie auch Nanozusätze zu Zahnpasten und anderen Kosmetika – biologisch kaum aktiv, sodass hier prinzipiell kein Risiko besteht. Bei Sprühanwendungen von Sonnenschutzmitteln aber könnten die enthaltenen Nanopartikel über das Einatmen in den Körper gelangen. Um dieses Risiko zu vermeiden, ist der Gebrauch von Nanomaterialien in Sprays EU-weit verboten.

Von Nanoprodukten geht nach bisherigem Wissensstand kein oder nur ein sehr geringes Risiko aus. Synthetische Nanoobjekte, die zum Beispiel Kunststoffen besondere Eigenschaften verleihen oder Batterien leistungsfähiger machen, sind so fest in die sie umgebende Matrix eingebunden, dass sie während der Nutzung nicht freigesetzt werden.

Auf dem europäischen Markt sind nur Produkte zugelassen, die den Verbraucher nicht schädigen. Daher ist die EU-Kennzeichnungspflicht für Nanomaterialien in Kosmetika und Lebensmitteln eine Information für den Kunden darüber, ob Nanomaterialien enthalten sind oder nicht.

METHODEN UND STRATEGIEN DER RISIKO-BEWERTUNG

„Sich als Verbraucher eine Meinung zu einem spezifischen Produkt zu bilden, ist extrem schwierig. Eine fundierte Bewertung ist selbst für einen Wissenschaftler komplex. Wir versuchen, übergeordnete Kriterien zu identifizieren, um Gruppierungen zu bilden.“

Professor Dr. Thomas Kuhlbusch
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund

Die Gefahrenpotenziale von Nanomaterialien und die entsprechenden Expositionsszenarien werden derzeit für jeden Einzelfall gesondert betrachtet. Das Problem dabei: Diese Vorgehensweise ist zeitaufwendig und kann nicht mit der rasanten Entwicklung der vielen neuen Nanomaterialien mithalten. Für Hersteller und Anwender bedeutet es eine Herausforderung, die Unbedenklichkeit jeder einzelnen Neuentwicklung gewissenhaft und kosteneffizient zu prüfen. Ein Ziel der Forschung lautet daher, geeignete Systeme zu entwickeln, die Nanomaterialien für eine vereinfachte Risikobewertung zusammenfassen. Bereits vorhandene Erkenntnisse sollten sich dann auf neue Entwicklungen übertragen lassen. Im Gespräch erläutert Professor Dr. Thomas Kuhlbusch von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin die Erkenntnisse aus den Projekten NanoGEM und nanoGRAVUR zu neuen Strategien für die Risikobewertung von Nanomaterialien:

Wo begegnen mir im täglichen Leben Nanopartikel?
Was verstehen Sie unter Nanopartikeln? Wenn Sie sagen „sehr kleine Teilchen“, dann gibt es dafür sehr unterschiedliche Quellen – den Verkehr, natürliche Vorgänge oder bewusst hergestellte Nanopartikel. Insofern kommt man mit Nanopartikeln im Prinzip immer und überall in Berührung. In Produkten, die man als Verbraucher einsetzt, hat man es praktisch nie mit freien Partikeln zu tun. In der Regel sind die hergestellten Nanopartikel dort eingebunden. Dazu gehören Lackschichten und Verbundwerkstoffe. In Cremes und anderen Kosmetika sowie in Lebensmitteln können Nanopartikel enthalten sein, ebenso in Plastikmaterialien und auch in photokatalytischen Oberflächen, die man beispielsweise in Pflastersteinen oder Dachziegeln einsetzt.

Welche Anwendungen haben Sie im Forschungsprojekt NanoGEM untersucht?
In NanoGEM ging es um Gesundheitsexposition und Materialeigenschaften. Exposition beschreibt, womit wir im Alltag in Berührung kommen. Die nächste Frage ist dann, welche gesundheitlichen Effekte auftreten könnten. Wir haben untersucht, wie Nanopartikel in den Körper aufgenommen werden und in welcher Form. Ein Schwerpunkt lag dabei auf unterschiedlichen Oberflächenbeschichtungen der Nanopartikel. Dabei hat sich herausgestellt, dass diese sehr wohl eine Rolle spielen. Es gibt Unterschiede beim Transport in der Umwelt, im Körper und auch bei der Abstufung der Toxizität. Ein Partikel mit einer hydrophilen, also „wasserliebenden“ Beschichtung, kann zum Beispiel leichter mit Regentropfen transportiert werden als ein hydrophobes Teilchen. Der Transport beeinflusst wiederum die Exposition, deshalb sind diese Oberflächenfunktionen sowohl toxikologisch als auch für das Umweltverhalten relevant.

Aktuell arbeiten Sie im Projekt nanoGRAVUR. Worum geht es dabei?
In nanoGRAVUR schauen wir auf die Test- und Genehmigungsverfahren für Nanomaterialien. Muss beispielsweise jede neue Kombination aus Kern- und Oberflächenmaterial eigene aufwetndige Testverfahren

durchlaufen? In nanoGRAVUR versuchen wir, übergeordnete Kriterien zu identifizieren, um Gruppierungen zu bilden. Wir möchten ja auf der einen Seite Risiken minimieren, auf der anderen Seite möchten wir die Innovationsmöglichkeiten zum Beispiel in Sachen Energieeffizienz und ähnliches auch nicht unnötig einschränken. Der Gruppierungsansatz schaut nicht auf das einzelne Produkt, sondern auf bestimmte Eigenschaften. Wir suchen also nach chemischen oder morphologischen Parametern, die Hinweise auf bestimmte unerwünschte Wirkungen geben können. Sind diese nicht gegeben, ist davon auszugehen, dass ein Produkt eher sicher ist. Sind sie vorhanden, muss genauer getestet werden.

Solche Kriterien beinhalten zunächst Fragen zur Exposition: Liegt ein Pulver vor? Ist das Partikel in eine so genannte Matrix eingebettet? Kann diese Matrix altern, oder ist sie löslich? Dann folgen Fragen nach der Transportfähigkeit und dem Verhalten der Partikel in der Umwelt und auch danach, ob die Substanz selbst altert oder sich verändert. Und dann kommen die Fragen nach möglichen Gesundheitseffekten – ist die Substanz reaktiv, erzeugt sie beispielsweise Radikale oder ähnliches? Im Rahmen von nanoGRAVUR entwickeln und evaluieren wir Schemata für diese Bewertung im Hinblick auf Freisetzung, Exposition, Umwelttransport und Transformation sowie auf Human- und Ökotoxizität. Diese Bewertungsschemata können als Grundlage für die Regulierung dienen, aber auch in der Produktentwicklung berücksichtigt werden.

Welche Verbraucheranwendungen sind eher kritisch?
Kritisch ist der Einsatz von Nanomaterialien in Pulverform und vielleicht auch in Sprays. Bei Stoffen, die sich sofort auflösen, muss man sich um die Partikelwirkung kaum Gedanken machen. Bei nicht-löslichen Fasern hingegen sollte man kritisch hinschauen, inwieweit sie überhaupt eingesetzt werden sollten und in welchen Anwendungen.

Ansonsten hängt die Toxizität kaum von der Größe des Materials ab. Titandioxid, das als Pigment in weißen Farben enthalten ist, misst etwa 200 bis 500 Nanometer; das, was als UV-Filter eingesetzt wird, ist farblos und etwa 80 Nanometer groß. Bei generell geringer Toxizität wirkt das kleinere Titandioxid im Test ein wenig stärker als größere Partikel, etwa um den Faktor zwei bis fünf. Die Sicherheitsfaktoren bei den Grenzwertberechnungen liegen allerdings bei etwa 100, sodass sich das relativiert.

Wie gut können sich Verbraucherinnen und Verbraucher informieren?
Am Anfang stand für Nanomaterialien das Risiko im Mittelpunkt. Dadurch, dass die Diskussion früh öffentlich geführt wurde, werden heute beide Seiten, die Vorteile und möglichen Risiken, parallel diskutiert. Insgesamt ist damit der Diskurs recht breit und auch positiv geführt worden. Sich als Verbraucher eine fundierte Meinung zu einem spezifischen Produkt zu bilden, ist extrem schwierig. Sie können viele Informationen bekommen, aber eine fundierte Bewertung ist selbst für einen Wissenschaftler komplex. Der Faktor „nano“ steht nicht zwingend im direkten Zusammenhang mit Risiken, da kommen andere Eigenschaften zum Tragen.

Methoden der Risikobewertung

Die Kategorisierung von Stoffen (englisch: Grouping), das Stoffgruppen- und Analogiekonzept (englisch: Read-across) und das Control-Banding-Verfahren sind gängige Konzepte für die Risikobewertung von Chemikalien. Über diese Ansätze lassen sich Datenlücken schließen beziehungsweise bekannte Ergebnisse auf Neuentwicklungen übertragen. Das beschleunigt die Entwicklung von neuen Stoffen ohne Abstriche an der Risikobewertung. Die bestehenden Konzepte der Chemikalienbewertung werden derzeit auf Nanomaterialien übertragen und hinsichtlich der Anwendbarkeit getestet. Beim Grouping werden Substanzen in Abhängigkeit ihrer wesentlichen Eigenschaften in Stoffklassen eingeordnet und gemeinsam betrachtet. Mit der Technik des Read-across, des Querlesens, lassen sich dann Informationen über verwandte Ausgangsstoffe dazu nutzen, die Eigenschaften einer neuen Substanz vorherzusagen. Es ist dann nicht mehr notwendig, jeden Stoff einzeln zu prüfen. Das Control-Banding-Verfahren wiederum ist ein halb-quantitativer Ansatz für die Bewertung und das Management von Risiken am Arbeitsplatz in kleinen Betrieben. Die Methode bietet ein geradliniges und pragmatisches Vorgehen, um gefährliche Expositionen zu kontrollieren oder zu vermeiden.

DIE REGULIERUNG VON NANOMATERIALIEN

„Nach unserer Auffassung sind Nanomaterialien kein Sonderfall, der eine spezifische Regelung bräuchte. Bei vielen Materialien ist nicht die Nanoeigenschaft der relevante Faktor, sondern eine mögliche Anreicherung im Körper, wenn die Partikel biobeständig sind.“

Dr. Rolf Packroff
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund

Den sicheren Umgang mit Nanomaterialen am Arbeitsplatz zu gewährleisten, ist nicht nur Aufgabe der herstellenden oder verarbeitenden Betriebe, sondern auch der Behörden und Gesetzgeber. Letztere analysieren und bewerten Nanomaterialien zunächst auf Basis wissenschaftlich fundierter Erkenntnisse. Anschließend stufen sie die Materialen in Risikoklassen ein, schreiben Schutzmaßnahmen vor oder geben Empfehlungen für den sicheren Umgang mit den betreffenden Materialien. Die Maßnahmen zur Reduktion und Vorbeugung von Risiken werden schließlich in neuen oder angepassten Gesetzen und Verordnungen verankert. Es gibt bereits eine Reihe von Handlungsempfehlungen, aber noch keine nanospezifischen Grenzwerte. Im Gespräch geht Dr. Rolf Packroff von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin auf die Regulierung von Nanomaterialen ein:

Wie bewerten Sie Nanopartikel aus arbeitsmedizinischer Sicht?
Zum Glück haben wir mit Nanomaterialien noch keine arbeitsmedizinischen Erfahrungen. Die Arbeitsmedizin kommt immer erst dann ins Spiel, wenn nach dem Umgang mit bestimmten Stoffen nachweislich Gesundheitsschäden auftreten – dann ist aber schon etwas falsch gelaufen.

Die Grundfrage in der Sicherheitsforschung war, ob Nanomaterialien Gesundheitsschäden verursachen, die auf der Eigenschaft „nano“ beruhen. Im Laufe der intensiven Forschung hat sich herausgestellt, dass Nanopartikel praktisch nicht über die Haut aufgenommen werden. Die Hauptproblematik ist, dass Nanopartikel bis in die tiefe Lunge gelangen und sich dort anreichern können, wenn sie schwerlöslich sind. Mit solchen Phänomenen gibt es aber schon arbeitsmedizinische Erfahrungen, zum Beispiel von Asbest. Man weiß, dass dadurch langfristig Gesundheitsschäden auftreten können. Es geht also darum, durch die Risikobewertung Erkenntnisse zu gewinnen, wie mögliche Gesundheitsschäden von vornherein vermieden werden können.

Wie gehen Sie dabei vor?
Bei Nanomaterialien muss man, einfach gesagt, zwei Arten der Wirkung unterscheiden: Die Wirkung lässt sich auf die Chemie oder auf die spezielle Form des Materials zurückführen. Nickel beispielsweise löst sich im Körper zum Teil auf und die freien Nickelionen lösen dann chemisch Effekte aus. Asbest hingegen ist als Material chemisch nicht wirksam, aber die Morphologie, das heißt die Form und Struktur der Fasern, kann Entzündungen bis hin zu Tumoren auslösen.

Ein Ergebnis der Forschung ist, dass Nanomaterialien in der Risikobewertung bestimmten Gruppen zugeordnet werden können, die mit einem spezifischen Gefährdungspotenzial verbunden sind. Bei vielen Materialien ist nicht die Nanoeigenschaft der relevante Faktor, sondern eine mögliche Anreicherung der biobeständigen, also nicht-abbaubaren Partikel im Körper. Auf Basis solcher Einordnungen können dann geeignete Maßnahmen empfohlen werden, und zwar differenziert danach, zu welcher Gruppe ein Nanomaterial gehört.

Gibt es Bestrebungen, Nanomaterialien stärker zu regulieren?
Ja. Das betrifft im Wesentlichen zwei Rechtsbereiche: Auf der europäischen Ebene regelt die Chemikalienverordnung REACH, welche Substanzen unter welchen Voraussetzungen in Verkehr gebracht werden dürfen. Dann gibt es das nationale Arbeitsschutzrecht, das die Arbeitgeber zur Gefährdungsbeurteilung und zur Umsetzung notwendiger Schutzmaßnahmen verpflichtet. Nach unserer Auffassung sind Nanomaterialien kein Sonderfall, der eine spezifische Regelung bräuchte. Bei REACH gibt es derzeit aber keine spezifische Prüfstrategie, die gefährliche Fasermaterialien erkennt. Auch im Arbeitsschutz kann man nicht einfach Grenzwerte für eine Stoffklasse aufstellen – manche Kohlenstoffnanoröhren sind relativ ungefährlich, andere wirken asbestartig. Wenn man hier pauschal reguliert, schränkt man die Möglichkeiten ein, ungefährliche Alternativen zu entwickeln.

Wo sehen Sie im Moment noch Forschungsbedarf?
Ein Vorschlag von uns für die Zukunft wäre, dass zunächst die Staubigkeit eines Materials getestet werden muss, das heißt, ob biobeständige Partikel freigesetzt werden. Wenn das der Fall ist, sollten weitere toxikologische Tests folgen. Tests zur Fasertoxizität sind bisher leider nicht Bestandteil des Prüfkatalogs. Die Steifigkeit von Fasern scheint eine hier entscheidende Rolle zu spielen. Auch vermutet man, dass irgendwo zwischen 15 und 40 Nanometern eine kritische Untergrenze liegt, unter der die Fasern verknäueln und deshalb ungefährlicher sind. Diese Hypothesen müssen durch gezielte Experimente bestätigt oder widerlegt werden. Leider ist auch entgegen aller früheren Erwartungen der Tierversuch immer noch die Methode der Wahl. Für die frühzeitige Erkennung vieler Risiken gibt es keine belastbaren anderen Verfahren. Dort besteht noch großer Forschungsbedarf.

Wo sehen Sie jenseits von Forschung und Regulierung noch Handlungsbedarf?
Letztlich ist Kommunikation der Schlüssel, und zwar in drei Richtungen beziehungsweise auf drei Ebenen: Zum einen hat sich in den Köpfen festgesetzt, Nanomaterialien seien klein und gefährlich. Diesem Pauschalverdacht sollte man aber eine klare Absage erteilen und dies auch entsprechend kommunizieren. Die zweite Richtung ist die Politik: Politische Entscheidungsträgerinnen und -träger lesen keine wissenschaftlichen Veröffentlichungen – es besteht also eine große Lücke zwischen Wissenschaft und politischer Entscheidung. Diese Lücke müssen wir schließen, damit die Regulierung dem Stand der Sicherheitsforschung entspricht. Die Lücke beträgt momentan fast zehn Jahre. Regulation muss Schritt halten mit der Innovation. Und drittens brauchen wir Kommunikation in Richtung der industriellen Hersteller und Anwender, um dort den aktuellen Wissensstand zu vermitteln und Aspekte wie „Safe by Design“, also die anwendungssichere Gestaltung von Produkten, zu forcieren. In der Gefahrstoffverordnung gibt es mittlerweile einen ganzen Anhang zum Umgang mit partikelförmigen Stoffen. Wenn die dort genannten Maßnahmen wie Filter, Absaugung etc. eingehalten werden, sollten auch keine Gesundheitsprobleme auftreten. In der Praxis wird das leider nicht immer beachtet, auch weil das Wissen fehlt.

Europäische Chemikalien-Verordnung REACH

REACH ist die englische Abkürzung für Registrawtion, Evaluation, Authorisation of Chemicals, die seit dem 01. Juni 2007 in Kraft getretene neue EG-Verordnung Nr. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung und Zulassung von Chemikalien in Europa.

Anhang 1: Forschungsprojekte zu den Auswirkungen auf die Gesundheit

Die folgenden Tabellen listen alle Forschungsprojekte der Fördermaßnahmen NanoCare und ERA-Net SIINN in den Jahren 2009 bis 2018 auf. Die Ergebnisse der Projekte sind auf den Seiten der Technischen Informationsbibliothek (TIB) Hannover veröffentlicht (https://www.tib.eu).

Fördermaßnahme NanoCare

Projekttitel	Laufzeit	Förder-kennzeichen	Projektbeteiligte (*): Projektkoordination
NanoMed Toxikologische Charakterisierung von Nanomaterialien für die diagnostische Bildgebung in der Medizin	09/2010–08/2013	03X0104	Chemicell GmbH (*) PerkinElmer Chemagen Technologie GmbH HTS Systeme GmbH Friedrich-Schiller-Universität Jena Institut für Photonische Technologien e. V. (IPHT)
Nano Expo Nanobalancedetektor für personenbezogene Messungen von Nanopartikel-Expositionen	05/2010–10/2013	03X0098	Technische Universität Braunschweig (*) Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI)

NanoGEM Nanostrukturierte Materialien – Gesundheit, Exposition und Materialeigen-schaften	08/2010–10/2013	03X0105	Institut für Energie und Umwelttechnik e. V. (*) BASF SE Bayer Technology Services GmbH Covestro Deutschland AG Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeits-medizin (BAuA) Fachhochschule Dortmund IBE R&D gGmbH Institute for Lung Health Berufsgenossenschaft Rohstoffe und Chemische Industrie (BG RCI) – Institut für Gefahrstoff-Forschung (IGF) – Institut an der Ruhr-Universität Bochum CeraNovis GmbH Westfälische Wilhelms-Universität Münster & Univer-sitätsklinikum Münster Universität des Saarlandes Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München – Zentrum für Allergie und Umwelt Mün-chen (TUM-ZAUM) Unterauftragnehmer: PA Partikel-Analytik-Messgeräte GmbH Bayer HealthCare Center for Nanointegration Duisburg-Essen (CENIDE) Friedrich Schiller Universität Jena Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf Tascon GmbH
Carbon Black Prädiktion humantoxikologischer Wirkung synthetischer Carbon Black Nanopartikel	08/2010–12/2013	03X0093	Forschungszentrum Borstel – Leibniz-Zentrum für Medizin und Biowissenschaft (*) Philipps-Universität Marburg Fraunhofer Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin (ITEM) Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Universität zu Lübeck
CarboTox Entwicklung von Screening-Verfahren zur Untersuchung eines möglichen kanzerogenen Potentials von Carbon Nanotubes	09/2010–12/2013	03X0109	Fraunhofer Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin (ITEM) (*) Leibnitz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden Bayer Material Science AG
NanoKON Systematische Bewertung der Gesundheitsaus-wirkungen nanoskaliger Kontrastmittel	10/2010–12/2013	03X0100	sarastro GmbH (*) Nanogate AG INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien gGmbH Universität des Saarlandes Johannes Gutenberg Universität Mainz (JGU)

Nanosilberpartikel Wirkmechanismen und Untersuchung ihrer möglichen Interaktion mit Geweben, Zellen und Molekülen. Definition ihres relevanten Unverträglichkeits-potenzials	10/2010–03/2014	03X0103	aap Biomaterials GmbH (*) EXcorLAB GmbH RAS AG Justus-Liebig-Universität Gießen Universität Duisburg-Essen
DaNa Erfassung, Bewertung und breitenwirksame Darstellung von gesellschaftlich relevanten Daten und Erkenntnissen zu Nanomaterialien	08/2009–07/2013	03X0075	DECHEMA e. V. (*) Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Fraunhofer Institut für keramische Technologien und Systeme (IKTS) Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) Unterauftragnehmer: Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) Unabhängiges Institut für Umweltfragen (UFU)
CaNTser Erforschung des toxischen Potentials von Carbon Nano-Tubes nach Lang-zeitinhalation	07/2015–12/2018	03XP0016	Fraunhofer Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin (ITEM) Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoff-forschung, Institut für Festkörperchemie (IFW) (*)
DaNa2.0 Daten und Wissen zu Nanomaterialien – Aufbereitung gesellschaftlich relevanter natur-wissenschaftlicher Fakten	08/2013–07/2019	03X0131	DECHEMA e. V. (*) Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) Unterauftragnehmer: Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) Goethe-Universität Frankfurt Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) Universität Salzburg Technische Universität Dänemark (DTU) Universität Ljubljana
InhalT-90 90-Tage Inhalations-test mit CeO2 bei der Ratte und anschließender Analyse von Genex-pressions-profilen zur frühen Erkennung toxischer/kanzero-gener Wirkungen	08/2014–12/2017	03X0149	Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin (ITEM) (*) Universität Leipzig

NanoBEL Biologische Elimination komplexer diagnostischer Nanopartikel	05/2015–04/2018	03XP0003	chemicell GmbH (*) micromod Partikeltechnologie GmbH Dyomics GmbH Friedrich-Schiller-Universität Jena Universitätsklinikum Jena Leibniz-Institut für Photonische Technologien e. V. Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS) Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
NanoBioDetect Nanopartikel im Gewebe: Detektion, Quantifizierung und Darstellung biologischer Effektmarker	08/2014–12/2017	03X0146	IBE R&D Institute for Lung Health gGmbH (*) ION-TOF Technologies GmbH Tascon GmbH Universität Leipzig Westfälische Wilhelms-Universität Münster Fachhochschule Dortmund Unterauftragnehmer: OxProtect GmbH Surflay Nanotec GmbH Ruhr-Universität Bochum Proteome Sciences R&D GmbH & Co. KG (ProSci)
nanoCOLT Langzeitwirkung modifizierter Carbon Black Nanopartikel auf gesunde und vorgeschädigte Lungen	10/2014–12/2017	03X0153	Philipps-Universität Marburg (*) Forschungszentrum Borstel – Leibniz-Zentrum für Medizin und Biowissenschaften Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Experimentel-le Medizin (ITEM) Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Universität zu Lübeck
nanoGRAVUR Nanostrukturierte Materialien – Gruppierung hin-sichtlich Arbeits-, Verbraucher- und Umweltschutz und Risikominimierung	05/2015–04/2018	03XP0002	Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA) (*) BASF SE Zoz GmbH Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (*) Berufsgenossenschaft Rohstoffe und Chemische Industrie (BG RCI) – Institut für Gefahrstoff-Forschung (IGF) – Institut an der Ruhr-Universität Bochum Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie (IME) Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) IBE R&D Institute for Lung Health gGmbH Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV) Westfälische Wilhelms-Universität Münster Unterauftragnehmer: Umweltbundesamt (UBA) Technische Universität Dresden General Reinsurance AG – GenRe HDI-Gerling Industrie Versicherung AG

ProCycle Analyse und toxikologische Bewertung von Stäuben aus Recycling- und Verwertungs-prozessen von Nanokompositen und Strategien zur Gefährdungs-minimierung	05/2015–04/2018	03XP0009	Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) (*) LAUS GMBH VITROCELL Systems GmbH Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Palas GmbH Partikel- und Lasermesstechnik Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Pallmann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG

Fördermaßnahme ERA-Net SIINN (European Research Area Network – Safe Implementation of Innovative Nanoscience and Nanotechnology)

Projekttitel	Laufzeit	Förder-kennzeichen	Projektpartner (*): Projektkoordination
NanOxiMet	06/2013–05/2016	03X0128	Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA) (*) Leibniz-Institut für Umweltmedizinische Forschung gGmbH (IUF) Unterauftragnehmer bzw. Europäische Partner: Universität Duisburg-Essen (UDE) Universität Paris Diderot (UDP)
NanoIndEx	06/2013–05/2016	03X0127	Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA) (*) Berufsgenossenschaft Rohstoffe und Chemische Industrie – BG RCI Unterauftragnehmer bzw. Europäische Partner: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) Universität Duisburg-Essen (UDE) Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) Institute of Occupational Medicine (IOM) Laboratory for Innovation in New Energy Technologies and Nanomaterials (CEA-LITEN) Catholic University of the Sacred Heart
NanoToxClass Etablierung von Nanomaterial Gruppierungs-/ Klassifizierungs-strategien auf Basis der Toxizität und zur Unterstützung der Risikobewertung	12/2015–11/2018	03XP0008	Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) (*) Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA) Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf (UKE) Unterauftragnehmer bzw. Europäische Partner: Universität Tel Aviv Universität Namur StratiCELL Screening Technologies SA Universität Porto Universität Bukarest BASF SE Robert Koch Institut (RKI) Evonik Resource Efficiency GmbH

PLATOX In-vitro- und In-vivo-Unter-suchungen zur Generierung validierter Toxizitätsdaten für Graphen-Nano-plättchen im Vergleich zu einem Refrenz-Testruß	12/2015–03/2018	03XP0007	Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin (ITEM) (*) Unterauftragnehmer bzw. Europäische Partner: BIOTOX srl Universität Aveiro (UAVR)
FATENANO Translokation, biologisches Schicksal, Stabilität und effektive Dosis technisch hergestellter Nano-materialien (MNM) für Nanosicherheitsstudien	05/2016–04/2019	03XP0062	Universität Leipzig Unterauftragnehmer bzw. Europäische Partner: Zentrum für kooperative Forschung an Biomaterialien – CIC biomaGUNE (*) Universität Colorado-Boulder
ICONS Integrierte Teststrategie für die mechanistische Abschätzung der Respirationstoxizität funktionalisierter mehrwandiger Kohlen-stoffröhren (MWCNT)	05/2016–12/2018	03XP0063	Fraunhofer Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin (ITEM) Unterauftragnehmer bzw. Europäische Partner: Louvain Centre for Toxicology and Applied Pharmacology (LTAP) (*) Universität Babes-Bolyai North Carolina State University
NANOaers Verbleib von aerosolge-tragenen Nanoparti-keln: der Einfluss von oberflächenaktiven Substanzen auf Lungendeposition und respiratorische Effekte	05/2016–09/2019	03XP0064	Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) (*) Technische Universität Dresden Unterauftragnehmer bzw. Europäische Partner: National Research and Development Institute for Textile and Leather (INCDTP) TU Graz GAIKER-IK4 Foundation Harvard School of Public Health (HSPH) National Institute of Standards and Technology (NIST)

Anhang 2: Weblinks

Aktionsplan Nanotechnologie 2020
www.bmbf.de/pub/Aktionsplan_Nanotechnologie.pdf

BMBF Nanosicherheitsforschung
www.werkstofftechnologien.de

DaNa2.0 – Erfassung, Bewertung und Erklärung von gesellschaftlich relevanten Daten und Erkenntnissen zu Nanomaterialien
www.nanopartikel.info

Catalogue of nanomaterials used in cosmetic products placed on the market (15.06.2017)
ec.europa.eu/DocsRoom/documents/23861

Europäische Beobachtungsstelle der Europäischen Union für Nanomaterialien
euon.echa.europa.eu/de/home

Europäische Agentur für Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz
osha.europa.eu/de/themes/nanomaterials

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/Nanotechnologie/Nanotech

Bundesinstitut für Risikobewertung
www.bfr.bund.de/de/gesundheitliche_bewertung_von_nanomaterialien-30413.html

Umweltbundesamt
www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/nanotechnik

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
www.bmub.bund.de/themen/gesundheit-chemikalien/nanotechnologie

Nanoportal Baden-Württemberg
www.nanoportal-bw.de

Informationsstelle Nano des Bundesamtes für Gesundheit der Schweiz
www.infonano.ch

Österreichisches Portal zu Nanotechnologien
www.nanoinformation.at

Interaktive Reise in den Nano-Kosmos
www.nanoreisen.de

Kompetenzatlas Nanotechnologien
www.werkstofftechnologien.de

Nanoportal der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung
www.nano.dguv.de

Technologielinie Hessen-Nanotech
www.hessen-nanotech.de

NanoTrust
www.nanotrust.ac.at

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
www.nano.bam.de

Max-Rubner-Institut – Bundesforschungsinstitut für Ernährung und Lebensmittel
www.mri.bund.de

Deutsche Plattform NanoBioMedizin
www.dp-nbm.de

EU Public Health
ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/nanomaterials/de/index.htm

EU NanoSafety Cluster
www.nanosafetycluster.eu

Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit
www.efsa.europa.eu

Europäische Chemikalien-Agentur
www.echa.europa.eu

NanoDialog der Bundesregierung
www.bmub.bund.dethemen/gesundheit-chemikalien/nanotechnologie/nanodialog

Swiss Nano-Cube
www.swissnanocube.ch

Stiftung Risiko-Dialog
www.risiko-dialog.ch

Impressum

Herausgeber
Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Werkstoffinnovationen, Batterie; HZG; KIT
53175 Bonn

Bestellungen
schriftlich an
Publikationsversand der Bundesregierung
Postfach 48 10 09
18132 Rostock
E-Mail: publikationen@bundesregierung.de
Internet: www.bmbf.de
oder per
Tel.: 030 18 272 272 1
Fax: 030 18 10 272 272 1

Stand
Juli 2019 (Erstveröffentlichung Juli 2018)

Text
Karlsruher Institut für Technologie (KIT),) Institut für Automation und angewandte Informatik (IAI), Karlsruhe; DECHEMA e. V., Frankfurt am Main, EMPA-Eidgenössische Materialprüfungsanstalt, St. Gallen; NanoCase GmbH, Engelburg; Dr. Uta Neubauer, Bad Soden am Taunus, Projektträger Jülich (PtJ), BMBF

Gestaltung
Projektträger Jülich (PtJ), Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck
BMBF

Bildnachweise
Titel: ©Taiga – stock.adobe.com
S. 2/3: ©jim – stock.adobe.com
S. 5: ©alenazamotaeva – stock.adobe.com
S. 6: ©Ivan Kurmyshov – stock.adobe.com
S. 7: ©benik.at – stock.adobe.com
S. 9: ©tailex – stock.adobe.com
S. 10: ©IUTA e. V.
S. 11: ©gpointstudio – stock.adobe.com
S. 12: ©ARCN/Eric Shambroom
S. 14: ©Fraunhofer ITEM
S. 16: ©Wiemann
S. 18: ©Friedrich-Schiller-Universität Jena
S. 20/21: ©henze – stock.adobe.com
S. 22: ©IUTA e. V.
S. 24: ©BAuA
S. 26: ©123dartist – stock.adobe.com

Diese Publikation wird als Fachinformation des Bundesministeriums für Bildung und Forschung kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

www.bmbf.de