

**C. Raab, M. Simkó*, A. Gzásó,
U. Fiedeler, M. Nentwich**

Was sind synthetische Nanopartikel?

Zusammenfassung

Synthetisch hergestellte Nanopartikel spielen im Rahmen der Nanotechnologie eine bedeutende Rolle. Sie bilden die Basis vieler bereits im großen Maßstab eingesetzter Anwendungen und besitzen ein hohes Potenzial für die Entwicklung neuer Materialien. Die Vielfalt der synthetischen Nanopartikel ist sehr groß. Sie unterscheiden sich in ihren Eigenschaften und auch in ihren Anwendungen stark voneinander. Neben ihrer Größe können synthetische Nanopartikel in chemischer Zusammensetzung, Form, Oberflächenbeschaffenheit und Entstehungsart variieren. Ziel dieses Dossiers ist es einen Überblick über die verschiedenen Charakteristika von Nanopartikeln zu geben.

Einleitung

Nanopartikel sind nicht nur ein Produkt moderner Technologie, sondern entstehen auch auf natürliche Weise wie z. B. bei Vulkanausbrüchen oder bei Waldbränden. Zu den natürlich vorkommenden Nanopartikeln zählen auch ultrafeine Sandkörner aus Mineralpartikeln (z. B. Oxide, Carbonate). Neben den gezielt hergestellten Nanopartikeln werden Nanoobjekte auch unbeabsichtigt produziert, wie zum Beispiel beim Verbrennen von Diesel (Ultrafeinstäube), aber auch beim Grillen.

Synthetische Nanopartikel werden auf vielfältige Weise verwendet. Sie werden in Form von Dispersionen in Gasen (z. B. als Aerosol), als ultrafeine Pulver, für Filme, in Flüssigkeiten verteilt (dispergiert, z. B. Ferrofluide) oder fixiert in einem Festkörper (Nanokomposite) eingesetzt. Im vorliegenden Dossier werden nur Nanopartikel diskutiert, die in festem Zustand vorliegen. Liposome, Mizellen und Vesikel, die als lösliche nanoskalige organische Verbindungen auch in die Kategorie der Nanopartikel fallen, werden hier nicht näher behandelt.

Definition

Der Begriff „Nanopartikel“ setzt sich aus den Wörtern „nanos“ (griechisch: der Zwerg) und „particulum“ (lateinisch: Teilchen) zusammen. Im wissenschaftlichen Kontext bezeichnet „nano“ zunächst nur eine Größenordnung, nämlich 10^{-9} . Diese kann sich auf ein Volumen, eine Gewichtangabe oder auf eine Zeiteinheit beziehen, wonach beispielsweise ein Nanometer ($\text{nm} = 10^{-9}$ Meter) einem millionstel Millimeter entspricht. Zur besseren Vorstellung sei folgender bildlicher Vergleich genannt: Ein Nanometer verhält sich zu einem Meter wie der Durchmesser einer Haselnuss zum Durchmesser der Erde.

Im Rahmen der Nanotechnologie wird der Begriff „nano“ fast ausschließlich in Bezug auf die Länge verwendet. Dies bedeutet, dass als Nanopartikel Objekte bezeichnet werden, die in zwei Dimensionen eine Ausdehnung von einem bis einigen 100 nm besitzen. Damit fallen jedoch auch fadenförmige Objekte wie Nanoröhren unter den Begriff „Nanopartikel“. In diesem Dossier wird daher die Definition der EU-Kommission SCENIHR verwendet¹, nach welcher nur solche Objekte als Partikel gelten, deren Ausdehnung in allen drei Dimensionen zwischen 1 und 100 nm liegen. Objekte, deren Ausdehnung nur in zwei Di-

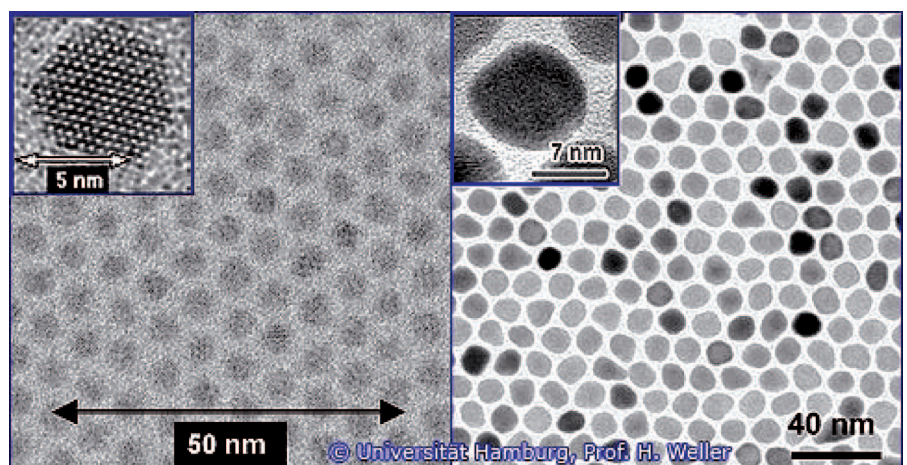


Abbildung 1: Elektronenmikroskopische Aufnahme von verschiedenen Nanopartikeln²

* Korrespondenzautorin

mensionen im nm-Bereich liegen, werden als Nanoröhren und partikuläre Objekte bezeichnet; Objekte mit nur einer Dimension unter 100 nm werden Nanoplättchen (Nanopellets) genannt.

Eigenschaften von Nanopartikeln

Eine entscheidende Eigenschaft, die Partikel technisch interessant machen, ist in ihrem großen Verhältnis von Oberfläche zu Volumen begründet. Dieses Verhältnis nimmt mit abnehmendem Partikeldurchmesser zu. Ein Nanopartikel setzt sich aus wenigen bis mehreren tausend Atomen zusammen. Das bedeutet, dass sich ein bedeutender Anteil der Atome an der Oberfläche der Partikel befindet. Bei einem Partikeldurchmesser von 10 nm sind 20 % der ca. 30.000 Atome³ des gesamten Partikels an dessen Oberfläche; bei einem Partikel mit 5 nm Durchmesser sind es bereits 40 % der ca. 4.000 Atome und bei einem Partikel von 1 nm Durchmesser sind nahezu alle der ca. 30 Atome an der Oberfläche zu finden. Die Atome an der Oberfläche haben gegenüber den Atomen aus dem Inneren des Materials eine geringere Zahl nächster Nachbarn und verfügen daher über so genannte ungesättigte Bindungen. Diese sind wiederum Ursache für die erhöhte Reaktivität der Partikeloberfläche.

Die erhöhte Reaktivität ist Grundlage einer Reihe von Anwendungen. So wird davon ausgegangen, dass mithilfe der exakten Kontrolle der Partikeldurchmesser neue Katalysatoren mit hoher Selektivität entwickelt werden können. Ein Katalysator beschleunigt nur die chemischen Prozesse, die aus den Ausgangsstoffen das Zielprodukt erzeugen. Weiters führt diese hohe Reaktivität auch zu einer Herabsetzung des Schmelzpunktes, so dass die Temperatur des „Brennens“ z. B. von Keramiken durch die Verwendung von nanopartikulären Ausgangsmaterialien verringert wird. Wichtiger noch ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, dass die Verbundmaterialien (aus verschiedenen Materialien zusammengesetzte Festkörper) während des Aushärtens weniger schrumpfen, was z. B. für die Zahnprothetik von besonderem Interesse ist.

Wenngleich die Oberfläche eines einzelnen Partikels natürlich mit der Verringerung seines Durchmessers abnimmt, so nimmt die spezifische Oberfläche des Pulvers mit Abnahme der Größe ihrer Partikel zu – vorausgesetzt, dass immer die gleiche Gewichts-

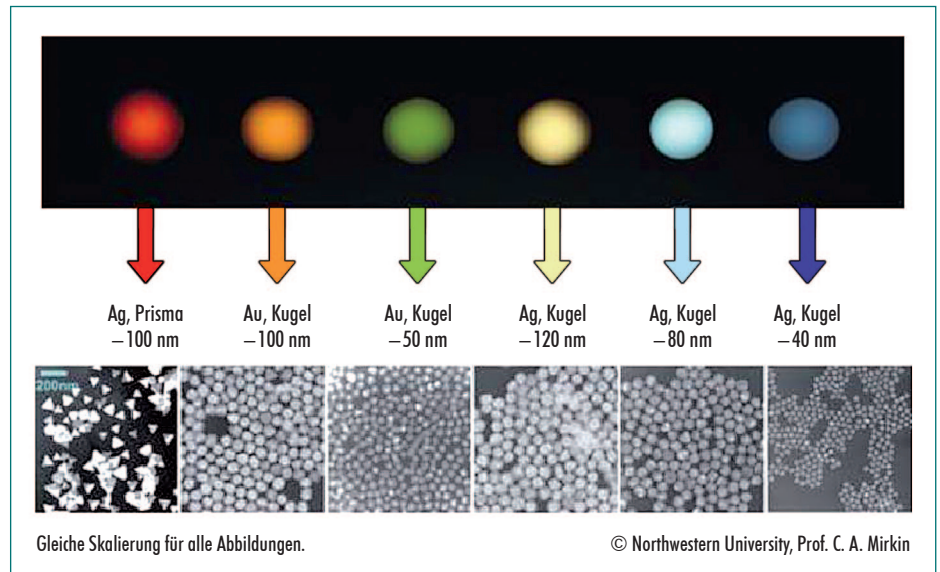


Abbildung 2: Rayleigh Streuungsbilder und elektronenmikroskopische Aufnahmen für Nanokristalle unterschiedlicher Gestalt (kugelförmig, prismaförmig), Größe (40–120 nm) und Zusammensetzung (Gold-Au, Silber-Ag). Die Rayleigh Streuung bezeichnet die Streuung elektromagnetischer Wellen an kugelförmigen Teilchen, die eine im Vergleich zur Wellenlänge der gestreuten Wellen kleinen Durchmesser besitzen.⁴

menge betrachtet wird. Dies ist der Grund, warum nanostrukturierte Materialien interessant für Filtration und Katalyse sind. Nanoporöse Materialien weisen eine große spezifische Oberfläche auf, an der sich die herauszufilternden Substanzen anlagern können. Zudem besitzen sie eine hohe Reaktivität, welche die Adsorption bzw. ihre katalytische Wirkung erhöht.

Neben der Reaktivität können auch optische Eigenschaften der Nanopartikel wie Transparenz, Absorption, Lumineszenz und Streuung durch die Variation der Partikelgröße modifiziert werden. Wenngleich Nanoteilchen mit einigen wenigen Nanometer Durchmesser bedeutend unter dem Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts (380 bis 780 nm) liegen, können sie Licht spezifischer Wellenlänge absorbieren (Abbildung 1). Diese Effekte sind nur quantenmechanisch zu verstehen. Bei Quantum Dots, die aus so genannten Halbleitermaterialien bestehen, lässt sich beispielsweise die Wellenlänge der Fluoreszenz über die Größe der Partikel einstellen. Die optischen Eigenschaften machen Nanopartikel besonders interessant für den Einsatz in der Optoelektronik, der Kosmetik und der medizinischen Diagnostik.

Für das magnetische Verhalten von Nanopartikeln ist von Bedeutung, dass Partikel mit einem Durchmesser im Nanometerbereich in eine Richtung magnetisierte Permanentmagneten sind. Daher bieten Nanopartikel die Möglichkeit die Speicherkapazität magnetischer Datenspeicher zu erhöhen, die durch die Anzahl an magnetisierbaren Teilchen be-

stimmt wird. Zudem sind die magnetischen Eigenschaften von Nanopartikeln relativ unempfindlich gegenüber Temperaturschwankungen.

Erscheinungsformen von Nanopartikeln

Nanopartikel können unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung sein. Sie können aus Metallen, Halbleitermaterialien, Verbindungen wie Metalloxiden (anorganischen Nanopartikeln) oder aus Kohlenstoff bzw. kohlenstoffhaltigen Verbindungen wie Polymeren (organischen Nanopartikeln) bestehen.

In Forschung und Anwendung werden synthetische Nanopartikel entsprechend ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften häufig in folgende Gruppen unterteilt: kohlenstoffhaltig, Metalloxide, Halbleiter oder Metalle (Tabelle 1).

Auf Kohlenstoff basierende Nanopartikel können in Form von sphärischen Nanopartikeln (Fullerene) oder zylindrischen Nanoröhren (Nanotubes) hergestellt werden. Unter Carbon Black versteht man Industrieruß, der unter kontrollierten Bedingungen gezielt synthetisiert (erzeugt) wird und physikalisch und chemisch genau definiert ist. Im Gegensatz dazu stehen Kamin- und Dieselruß, die als nicht genau definierte Nebenprodukte bei der Verbrennung von Kohle bzw. Kohlen-

wasserstoffe anfallen. Der Grad der organischen und anorganischen Verunreinigungen ist daher bei dieser Art von Rußen sehr hoch, wogegen bei Carbon Black der Kohlenstoffgehalt meist mehr als 96 % beträgt.

Nanoskalige Metalloxide, wie Titandioxid (TiO₂) und Zinkoxid (ZnO), kommen in Konsumgütern (z. B. Kosmetika), Farben und Lacken bereits in größerem Maßstab zum Einsatz. Zirkon-(ZrO₂)- und Aluminiumoxid-(Al₂O₃)-Nanopulver werden als Bestandteile von technischer Keramik verwendet, um die Härte sowie die Bruchfestigkeit zu verbessern. Metallische Nanopartikel werden in erste Linie in der Katalyse eingesetzt, während halbleitende Nanokristalle aufgrund ihrer optischen Eigenschaften in der Labor Diagnostik und medizinischer Diagnostik herangezogen werden.

Nanopartikel können als Einzelpartikel, Aggregate oder Agglomerate vorliegen. Aggregate sind lockere, reversible Partikelanlagerungen, die sich durch eine starke anziehende Wechselwirkung der einzelnen Partikel untereinander bilden. Solche Aggregate können in Lösungen zu einzelnen Nanopartikeln aufgelöst werden. Agglomerate hingegen sind irreversible Anhäufungen von Partikelteilchen, sie können nicht in einzelne Teilchen dispergiert (verteilt) werden. Über bestimmte Herstellungsmethoden und Modifikationen der Partikeloberflächen kann die Bildung von Aggregaten eingedämmt werden, was zumeist für die Verarbeitung der Partikel wünschenswert ist. Größere Verbunde von Nanopartikeln haben häufig andere Eigenschaften als einzeln vorliegende Partikel.

Je nach Zusammensetzung und Anwendung werden Nanopartikel unbehandelt oder mit modifizierter Oberfläche eingesetzt. Unbehandelte Nanopartikel lagern sich häufig aneinander und bilden Aggregate oder Agglomerate (z. B. Carbon Black). Deshalb kann ihre Gestalt sehr uneinheitlich sein und verschiedenste Formen annehmen, was erheblichen Einfluss auf ihre Eigenschaften nimmt. Je nach Herstellungsmethode und Herstellungsbedingungen weisen nanopartikuläre Materialien unterschiedliche Formen und Strukturen auf: Sphären, Nadeln bzw. Röhren, Plättchen und Fasern. Getrennt vorliegende, einzelne Nanopartikel können durch gezielte Oberflächenmodifikationen hergestellt werden. Dies kann z. B. durch eine chemische Behandlung als Abstandhalter (Ligand) zwischen den Partikeln erfolgen, die der Zusammenlagerung der Partikel vorbeugt.

Unbehandelte metallische Nanopartikel sind chemisch meist hochreaktiv und oxidieren an der Luft leicht. Für viele Anwendungen sind

Tabelle 1: Typen von künstlich hergestellten Nanopartikeln auf Basis von Kohlenstoff und Metallen und deren Modifikationen

Kohlenstoffhaltig	Metalloxide	Halbleiter	Metalle
Fullerene	Siliziumdioxid (SiO ₂)	Cadmium-Tellurit (CdTe)	Gold (Au)
Nanoröhren	Titandioxid (TiO ₂)	Silizium (Si)	Silber (Ag)
Carbon black	Aluminiumoxid (Al ₂ O ₃) Eisenoxid (Fe ₂ O ₃) bzw. (Fe ₃ O ₄), Zinkoxid (ZnO)	Indiumphosphid (InP bzw. InGaP)	Eisen (Fe) Cobalt (Co)

daher geeignete Schutzstrategien notwendig, um die unbehandelten Nanopartikel während oder nach der Synthese gegen eine Zersetzung zu schützen. Diese Methoden zur Stabilisierung bestehen im Beschichten der Nanopartikel mit zumeist organischen Verbindungen, wie z. B. mit Tensiden, Kohlenstoff und Polymeren. Die Stabilisierung wird aber auch mittels einer anorganischer Schale aus Silicat realisiert. In vielen Fällen stabilisieren diese Schutzschalen die Nanopartikel nicht nur, sondern lassen sich je nach Anwendungsgebiet auch zur weiteren Funktionalisierung, z. B. mit anderen Nanopartikeln oder mit Liganden nutzen. Über die Oberflächenchemie der Nanopartikel kann deren Stabilisierung, Dispergierung (Verteilung) und Funktionalisierung bestimmt werden.

Nanopartikel werden neben der losen Form auch in Nanokompositen eingesetzt. Unter Nanokompositen versteht man Verbundmaterialien, in denen mindestens eine Komponente in Form von Nanopartikeln, Nanoplättchen oder Nanoröhren vorliegt. Die zweite Komponente, die Matrix, besteht häufig aus Polymeren. Gerade in Kompositen lassen sich die einzigartigen Eigenschaften der Nanopartikel mit denjenigen der Verbundmatrix kombinieren.

Vorkommen und Einsatz von Nanopartikeln

Die Anwendungsgebiete für Nanopartikel sind sehr vielfältig. Insbesondere für die Werkstoffentwicklung spielen Nanopartikel eine große Rolle. Die Grundlage der hohen Erwartungen an Materialien, die unter Zuhilfenahme von Nanopartikeln entwickelt werden, ist die Hoffnung, die verschiedenen Materialeigenschaften, wie Leitfähigkeit, Gewicht, Stabilität, Flexibilität, Temperaturbeständigkeit etc. unabhängig voneinander einstellen zu können.

Eine Vielzahl von nanotechnologischen Produkten befindet sich bereits seit einiger Zeit auf dem Markt. Im chemischen Bereich zählt dazu Carbon Black etwa in Druckerschwärze; im Automobilbereich sind es kratzfeste Lacke, Reifenfüllstoffe und Antireflexschichten. Im Life-Science-Bereich werden Nanopartikel für Biochips, aber auch als so genannte Marker eingesetzt. Nanopartikel werden auch in Sonnenschutzmitteln und in Kosmetika eingesetzt. In der medizinischen Diagnostik werden Nanopartikel vermehrt als Kontrastmittel eingesetzt, sie finden aber auch Anwendung in der Krebstherapie.

Seit kurzem sind Nanopartikel-Anwendungen in Lacken, Polymer-Nanoverbundstoffe und Nanopigmente auf dem Markt vertreten.

Konzepte und Prototypen existieren für die regenerative Medizin (z. B. zur Gewebzüchtung), hocheffiziente Wasserstoffspeicher, selbstheilende Werkstoffe und durch Sensorik schaltbare Lacke. Außerdem werden neuartige Produkte zur Behandlung von Krankheiten, wie die gezielte Wirkstoffabgabe von Medikamenten angedacht.

Anmerkungen und Literaturhinweise

- SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks), 2008. The existing and proposed definitions relating to products of nanotechnologies, Brussels: European Commission.
- www.chemie.uni-hamburg.de/pc/weller.
- Nanopartikel-Materialien der Zukunft, Albert Rössler, Georgios Skillas, Sotiris E. Pratsinis; Chemie in unserer Zeit, 2001, 1, 32-41.
- chemgroups.northwestern.edu/mirkingroup.

IMPRESSUM:

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

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

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

NanoTrust-Dossier Nr. 002, Mai 2008: epub.oeaw.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier002.pdf

ISSN: 1998-7293



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

Ergänzung zu Dossier Nr. 002, Stand: Februar 2011

Die Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) der europäischen Commission hat seine abschließende „opinion“ über die „Wissenschaftliche Basis für die Definition des Ausdruckes ' Nanomaterial“ veröffentlicht.

Die Hauptmitteilungen der wissenschaftlichen „Stellungnahme“ sind, dass die Definition eines Nanomaterials auf seiner Größe basieren sollte und nicht auf seine Eigenschaften. Weiters, dass es keine wissenschaftliche Rechtfertigung für die Bevorzugung einer spezifischen Größenbegrenzung von 1 bis 1000 Nanometer gibt.¹

¹ http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_o_032.pdf.

Addendum for Dossier No. 002, Version: February 2011

The European Commission's Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) has published its final opinion on the 'Scientific Basis for the definition of the Term 'nanomaterial'.

The key messages of the Scientific Opinion are that the definition of a nanomaterial should be based on its size and not on its properties. Further on that there is no scientific justification for preferring any specific size limit to any other in the range from 1 to 1000 nanometers.¹

¹ http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_o_032.pdf.