

**OAW****ITA**

Institut für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften

Sabine Greßler,
André Gázsó*

Oberflächenmodifizierte Nanopartikel

Teil I: Arten der Modifikation, Herstellung, Verwendung

Zusammenfassung

Die Oberfläche eines Nanopartikels spielt eine entscheidende Rolle hinsichtlich des Verhaltens und der Eigenschaften eines Nanomaterials. Über die Oberflächenchemie der Nanopartikel können deren Stabilisierung, Dispergierung und Funktionalisierung bestimmt werden. Auch die Toxikologie und Biokompatibilität werden entscheidend von der Oberfläche beeinflusst. Mittels Oberflächenmodifikation lassen sich Nanopartikel je nach Anwendungsbereich und gewünschten Eigenschaften mehr oder weniger „maßschneidern“. Dabei unterscheidet man zwischen einer Oberflächenfunktionalisierung, bei der chemische Substanzen an die Oberfläche binden oder anhaften bzw. einer Modifikation durch Umhüllung eines Nanopartikels mit einer oder mehrerer anorganischer oder organischer Substanzen. Die dabei entstehenden sogenannten „Kern/Schale“-Nanopartikel gewinnen zunehmendes Interesse in den Bereichen Medizin, Diagnostik, Pharmazie, Optik, Katalyse und Elektronik. Hergestellt werden oberflächenmodifizierte Nanopartikel vor allem mittels sogenannter „Bottom-up“-Verfahren, welche die physikalisch-chemischen Grundsätze der molekularen bzw. atomaren Selbstorganisation nutzen. Dazu gehören etwa chemische Verfahren wie Pyrolyse und Hydrolyse, das Sol-Gel-Verfahren sowie die Gasphasensynthese oder die Gasphasenabscheidung.

* Korrespondenzautor

Einleitung

Nanomaterialien¹ können gegenüber den größeren Ausgangsmaterialien **veränderte Eigenschaften** aufweisen, die sie interessant für eine Vielzahl von Anwendungen machen. So können sich etwa die elektrische Leitfähigkeit verändern, die Härte, Bruch- oder Zugfestigkeit, die optischen und magnetischen Eigenschaften, die Farbe, die Löslichkeit oder die Reaktivität.

Der Grund dafür liegt zum einen darin, dass unterhalb von etwa 100 nm quantenphysikalische Effekte auftreten können, zum anderen ist die größere Oberfläche der Partikel im Verhältnis zum Volumen dafür verantwortlich. Je kleiner ein Partikel, desto mehr Atome mit weniger Bindungspartnern befinden sich an dessen Oberfläche – daher die hohe Reaktivität von Nanopartikeln. Diese führt aber auch dazu, dass Nanopartikel zu Verklumpungen neigen und schnell **Aggregate** (Anhäufungen von fest miteinander chemisch verbundenen Partikeln) oder **Agglomerate** (lockere, reversible Anhäufung von Partikeln) bilden. Eine weitere Verarbeitung, etwa ein gleichmäßiges Einbringen der Partikel in einen Kunststoff oder in eine Emulsion, ist dann nicht mehr möglich. Agglomerate können mit geeigneten Dispergiermitteln wieder in ihre Primärpartikel aufgespalten werden.

Um aber eine Aggregation zu vermeiden, müssen die noch getrennt vorliegenden, einzelnen Nanopartikel durch gezielte **Oberflächenmodifikation** stabilisiert werden. Metallische Nanopartikel neigen an der Luft zu Oxidation (z. B. Bildung von Eisenoxiden bzw. Rost) und müssen durch eine Umhüllung vor einer Zersetzung geschützt werden. Doch nicht nur Stabilisierung und Schutz werden durch eine Veränderung der Oberfläche von Nanopartikeln erreicht, auch eine weitere Funktionalisierung je nach Anwendungsgebiet ist möglich. Über die Oberflächenchemie der

Nanopartikel können demnach deren **Stabilisierung, Dispergierung und Funktionalisierung** bestimmt werden. Die folgenden Kapitel bieten einen Überblick über solche Oberflächenmodifikationen, ihre Verwendungszwecke und Herstellungsverfahren.

Warum wird die Oberfläche von Nanopartikeln verändert?

Die Oberfläche wird aus verschiedenen Gründen modifiziert, d. h. verändert, wobei dabei primär die Funktionalisierung im Vordergrund steht – also die Ausstattung eines Nanomaterials mit einer speziellen Funktion:²

- Verhinderung von Agglomeration und Aggregation, d. h. dem Zusammenklumpen von Nanopartikeln;
- Erhöhung der Stabilität von Dispersionen und Verbesserung der Dispergierbarkeit;
- Verbesserung der Kompatibilität von Nanopartikeln mit anderen Phasen oder Matrices, d. h. um diese etwa in eine Flüssigkeit, eine Emulsion oder in einen Kunststoff gleichmäßig einarbeiten zu können;
- Schutz empfindlicher Nanopartikel, etwa vor Auflösung, Oxidation bzw. Korrosion;
- Verringerung des Bedarfs an wertvollen Materialien durch Beschichtung mit einem kostengünstigeren Material;
- Erhöhung der Biokompatibilität;

- Verringerung der Zelltoxizität, z. B. von „Quantum Dots“ in Kontrastmitteln oder von ZnO bei Verwendung in Kosmetika;³
- Ermöglichung eines gezielten Transports von Wirkstoffen an den Wirkort im Körper („Drug Targeting“ und „Drug Delivery“);⁴
- Erhöhung der Verweildauer von Nanopartikeln im Blutkreislauf bei biomedizinischen Anwendungen;⁵
- Verhinderung der photokatalytischen Aktivität von TiO₂-Nanopartikeln bei der Verwendung als UV-Filter.⁶

Mittels Oberflächenmodifikation lassen sich Nanopartikel je nach Anwendungsbereich und gewünschten Eigenschaften also mehr oder weniger „maßschneidern“, dabei unterscheidet man zwischen einer Funktionalisierung der Oberfläche durch Anbindung einer chemischen Substanz und der Umhüllung eines Nanopartikels mit einem anorganischen oder organischen Material. Im Folgenden werden diese Methoden der Oberflächenmodifikation näher dargestellt.

Oberflächenfunktionalisierung

Unter Oberflächenfunktionalisierung versteht man die chemische Anbindung von Molekülen, den sogenannten funktionellen Gruppen, an die Oberfläche eines Nanopartikels. Dabei werden zwei Möglichkeiten unterschieden:⁷

1. Direkte Funktionalisierung

Die Oberfläche wird mittels einer chemischen Substanz modifiziert, die einerseits eine reaktive Gruppe aufweist, die sich mit Atomen an der Oberfläche eines Nanopartikels verbindet und andererseits eine zweite chemische Gruppe aufweist, welche für die gewünschte Funktion (z. B. Hydrophobie) zuständig ist. Chemische Substanzen, die für diese Form üblicherweise, etwa bei Oxiden oder Nanopartikeln aus Edelmetallen, verwendet werden sind Thiole, Phosphinoxid, Phosphonate oder Carboxylatgruppen.

2. Post-Funktionalisierung

Bei dieser – häufiger angewandten – Methode reagiert die Oberfläche eines Nanopartikels zuerst mit einer bifunktionalen chemischen Substanz und in einem zweiten Schritt wird die gewünschte funktionelle Gruppe an die entsprechenden (nach außen gerichteten) freien Bindungsstellen der chemischen Substanz angehängt. Für diese Form der Funktionalisierung werden üblicherweise sogenannte **Silane** eingesetzt. Silane bestehen aus einem Silizium-Basisatom und Wasserstoffatomen und können sowohl mit organischen als auch mit anorganischen Substanzen eine chemische Bindung eingehen.

Die Oberflächenmodifikation mittels Silanen wird auch als „**Silanisierung**“ bezeichnet und ermöglicht einerseits etwa die Herstellung von Nanokompositmaterialien durch die gleichmäßige Einarbeitung und gute Anbindung von Nanopartikeln z. B. in Kunststoffe, und andererseits eröffnet diese Methode viele Möglichkeiten der Umhüllung von anorganischen Nanopartikeln mit anderen Materialien zur Herstellung sogenannter „Kern/Schale“-Nanopartikel (siehe weiter unten) aufgrund der Funktion von Silanen als sogenannte „Haftvermittler“ zwischen unterschiedlichen Materialien.

Ein Beispiel für die Oberflächenmodifikation mittels Silanen ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Nicht-oberflächenmodifizierte Nanopartikel aus Metalloxiden, wie etwa TiO₂ oder ZnO, weisen an der Oberfläche freie Hydroxyl-Gruppen (OH-Gruppen) auf, die mit den Silizium-Atomen einer

Silanverbindung reagieren können. Dadurch wird die gesamte Oberfläche des Nanopartikels mit Silanmolekülen umgeben und die Oberflächeneigenschaften des Partikels ändern sich.

Hybrid-Nanomaterialien – „Kern/Schale“-Nanopartikel

Unter Hybrid-Nanomaterialien versteht man **Kompositmaterialien** aus zwei oder mehr unterschiedlichen Materialien, die aus einem Kern (das innere Material) und einer (oder mehrerer) Schale(n) (das äußere Material) bestehen (Abbildung 2).⁹ Die Schale wird auf Englisch auch als „**Coating**“ bezeichnet, was vielfach mit dem deutschen Begriff „Beschichtung“ übersetzt wird. Diese Übersetzung ist jedoch irreführend, da der Vorgang nicht mit Beschichtungen aus der makroskopischen Welt – also etwa mit Beschichtungen durch Farben und Lacke – gleichzusetzen ist. Eine treffendere Übersetzung im Zusammenhang mit Nanopartikeln wäre „**Umhüllung**“ oder „**Ummantelung**“.

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Kombinationsmöglichkeiten der Materialien, die vor allem vom angestrebten Verwendungszweck der Nanopartikel abhängen. Zumeist sind „Kern/Schale“-Nanopartikel sphärisch (kugelförmig), aber es gibt auch andere Formen, wie etwa hexagonale Partikel.

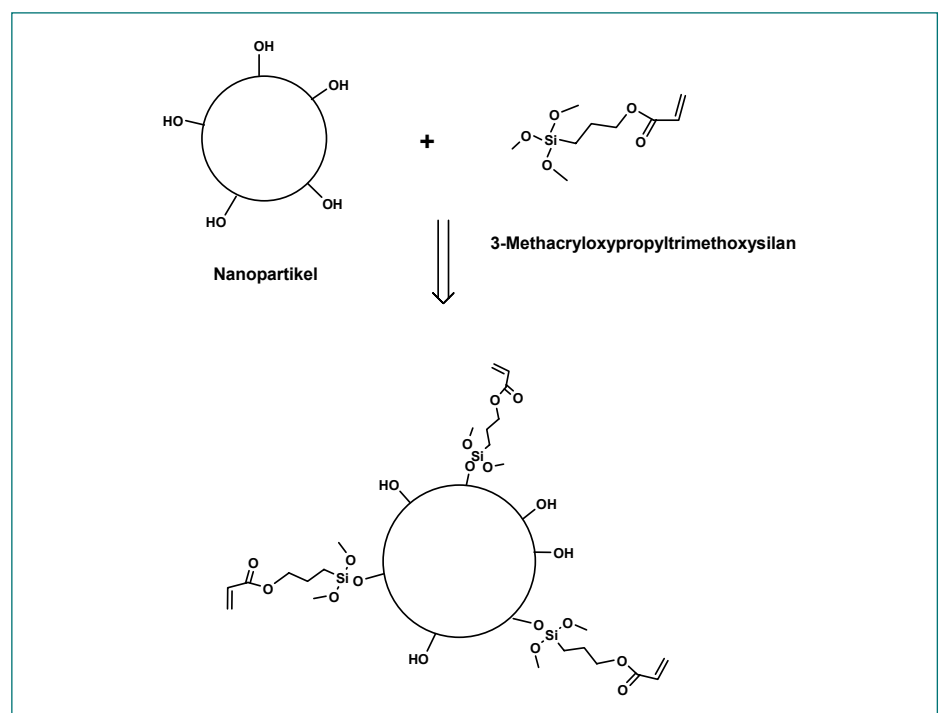


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Modifikation eines Nanopartikels mit 3-Methacryloxypropyltrimethoxysilan.⁸

Hybrid-Nanomaterialien gewinnen aufgrund ihrer vielfältigen Eigenschaften zunehmend an Interesse v. a. in den Bereichen Medizin, Diagnostik, Pharmazie, Optik, Katalyse und Elektronik.

Durch das Hüllmaterial (die Schale) können sich die Eigenschaften des Nanopartikels stark verändern, so kann etwa die Reaktivität abnehmen oder die Hitzebeständigkeit zunehmen. Generell verbessern die Beschichtungsmaterialien die Stabilität und Dispergierbarkeit der Kernmaterialien.

In Abhängigkeit von den verwendeten Materialien werden prinzipiell vier verschiedene Gruppen unterschieden:

1. Anorganische/anorganische „Kern-Schale“-Nanopartikel

Diese Gruppe repräsentiert die wichtigsten „Kern/Schale“-Nanopartikel, die bereits häufig in der Elektronik, in bildgebenden Verfahren der Diagnostik oder in der Umwelttechnik Verwendung finden. Bei dieser Form bestehen sowohl der Kern als auch die Schale aus einem anorganischen Material, wie etwa Metall, Metalloxid oder SiO_2 (Silica).

Häufig werden Kerne aus Metallen mit einer Schale aus Silica umgeben, um die Stabilität einer Suspension zu verbessern und die Kerne vor Oxidation zu schützen. Neben Silica können viele Metalle und Metalloxide als Hüllmaterialien verwendet werden. Gold schützt z. B. ein empfindliches Kernmaterial vor Oxidation und Korrosion, verbessert die physikalischen Eigenschaften, wie etwa die Stabilität, und erhöht die Biokompatibilität des Kernmaterials. Ähnlich der größenabhängigen Farbe von reinen Goldpartikeln, ändert sich auch die Farbe von goldbeschichteten Nanopartikeln in Abhängigkeit von der Größe des Kerns und der Schichtdicke. Diese veränderten optischen Eigenschaften machen goldumhüllte Nanopartikel interessant für bildgebende Verfahren für lebende Objekte und Systeme („Bioimaging“). **Magnetische Nanopartikel** neigen stark zur Aggregation und unterliegen rasch Abbauprozessen, wenn sie in biologische Systeme eingebracht werden. Zudem kann sich die Partikelstruktur ändern, wenn diese Nanopartikel externen magnetischen Feldern ausgesetzt werden. Um diese Nachteile zu überwinden, werden magnetische Nanopartikel mit verschiedenen inerten Materialien ummantelt und in dieser Form etwa als Kontrastmittel bei bildgebenden Diagnoseverfahren (Magnetresonanztomographie, MRT) eingesetzt. Auch im Bereich der Umwelttechnik sind „Kern/Schale“-Nanopartikel aus anorganischen Mate-

rialien interessant. So werden etwa Kerne aus Magnesiumoxid (MgO) oder Calciumoxid (CaO) mit Eisen(III)-Oxid (Fe_2O_3) umhüllt, um die Adsorptionskapazität für toxische Materialien, wie etwa Schwefeldioxid oder Schwefelwasserstoff gegenüber Partikeln aus reinem MgO und CaO zu erhöhen.

Nanopartikel aus Halbleitermaterialien mit interessanten optischen (Fluoreszenz), magnetischen und elektronischen Eigenschaften werden als „Quantum Dots“ bezeichnet. Bei „Kern/Schale“-Nanopartikeln aus Halbleitermaterialien bestehen Kern und/oder die Schale aus einem Halbleitermaterial. Eingesetzt werden sie etwa in der Medizin, dem „Bioimaging“, in Beleuchtungsmitteln (LED), zur Verbesserung von Solarzellen oder der Speicherkapazität von elektronischen Geräten.

2. Anorganische/organische „Kern/Schale“-Nanopartikel

Bei dieser Gruppe besteht der Kern aus einem Metall, einer metallischen Verbindung, einem Metalloxid oder aus Silica und ist umgeben von einem organischen Coating, wie z. B. einem Polymer oder einer anderen organischen Verbindung. Der Vorteil der organischen Schale liegt einerseits in der Erhöhung der Stabilität des metallischen Kerns gegenüber Oxidation und andererseits in einer Verbesserung der Biokompatibilität bei biomedizinischen Anwendungen. Polymerbeschichtete anorganische Materialien finden Anwendung etwa als Katalysatoren, als Pigmente, in Farben, Kosmetika und in Tinten.

Um die Agglomeration von Metalloxiden in einer Dispersion zu verhindern, werden diese häufig mit einem Polymer umhüllt. Die am häufigsten verwendeten Polymere zur Umhüllung von SiO_2 -Nanopartikeln sind Polymethylmethacrylat (PMMA), Polystyren (PS; auch als Polystyrol bezeichnet) oder Polyvinylchlorid (PVC). Polymerumhüllte SiO_2 -Nanopartikel zeigen eine verbesserte kolloidale Stabilität und werden bereits vielfach in optischen und elektronischen Geräten oder Sensoren eingesetzt bzw. als Katalysatoren oder als Materialzusätze verwendet. Natürliche Polymere, wie etwa Zellulose, werden als Coating von TiO_2 -Nanopartikeln eingesetzt um deren Eigenschaften als Pigment zu verbessern. Polymerumhüllte anorganische Nanopartikel, wie z. B. solche aus Calciumphosphat, finden in der Zahnmedizin Anwendung. „Quantum Dots“ finden zunehmend Interesse für Anwendungen in der Biomedizin und Diagnostik, wie oben bereits erwähnt. Diese Nanopartikel sind in wässrigen Lösungen jedoch toxisch,

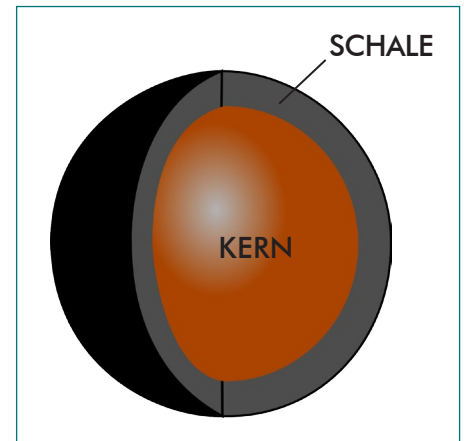


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines „Kern/Schale“-Nanopartikels.¹⁰

schwer löslich und instabil, was eine Anwendung in biologischen Medien erschwert oder unmöglich macht. Ein Coating mit einem Polymer, wie etwa Polyethylenglykol (PEG) verbessert die Löslichkeit und die Stabilität und erhöht die Biokompatibilität.¹¹

3. Organische/anorganische „Kern/Schale“-Nanopartikel

Diese Form weist einen Kern aus einem Polymer, wie z. B. Polystyren, Polyurethan, Polyvinylchlorid, etc. und eine Schale aus einem anorganischen Material, etwa aus einem Metall, einem Metalloxid oder Silica auf. Die anorganische Schale, insbesondere aus Metalloxiden, erhöht die Widerstandsfähigkeit des „Kern/Schale“-Nanopartikels und verbessert die kolloidale Stabilität. Zudem zeigen diese Nanopartikel die Eigenschaften des Polymers, wie etwa sehr gute optische Eigenschaften, Flexibilität und Belastbarkeit. Diese Form von „Hybrid-Nanomaterialien“ finden großes Interesse in der Forschung aufgrund ihrer potenziellen Anwendungen in den Materialwissenschaften, der Mikroelektronik oder Biotechnologie.

4. Organische/organische „Kern/Schale“-Nanopartikel

Bei dieser Kategorie sind sowohl der Kern als auch die Schale aus einem Polymer oder einem anderen organischen Material, wobei die Modifikation der physikalischen Eigenschaften des Gesamtpartikels im Vordergrund steht. Polymer/Polymer „Kern/Schale“-Nanopartikel werden etwa für die kontrollierte Arzneimittelabgabe („Drug Delivery“) in medizinischen Anwendungen eingesetzt, da sie biologisch abbaubar sind und gute Eigenschaften zur Einkapselung von Arzneimitteln aufweisen.

Organische Träger- und Verkapselungssysteme

Diese Systeme sind keine Nanomaterialien im Sinne der Definitionsempfehlung der Europäischen Kommission¹ und fallen auch aufgrund ihrer Löslichkeit nicht unter die Definition von Nanomaterialien der EU-Kosmetikverordnung¹². In Kosmetika, aber auch in Lebensmitteln und in Arzneimitteln werden diese Materialien eingesetzt¹³ und gelegentlich in der Literatur als „Nanopartikel“ bzw. „Kern/Schale“-Nanopartikel bezeichnet, wengleich es sich dabei um keine Partikel aus Feststoffen handelt und diese eine völlig andere Struktur aufweisen. Zur Unterscheidung zu den o. a. „Kern/Schale“-Nanopartikeln werden diese hier kurz angeführt.

Es handelt sich dabei um kugelförmige Strukturen, sogenannte Aggregate, die durch Selbstorganisation entstehen, wenn amphiphile, grenzflächenaktive Substanzen, d. h. solche, die einen wasserliebenden (hydrophilen/lipophoben) und einen wasserabweisenden (hydrophoben/lipophilen) Anteil aufweisen, in Wasser eingebracht werden. Die hydrophilen (lipophoben) Anteile richten sich dabei zur Wasserphase hin aus und die hydrophoben (lipophilen) zu einander. Dadurch entstehen sphärische Strukturen, in deren Innerem je nach Typ wasser- und/oder fettlösliche Substanzen eingeschlossen werden können.

Man unterscheidet je nach Struktur zwischen Mizellen, Liposomen, Lipid-Nanopartikel oder Nanoemulsionen. Wirkstoffe und Substanzen können in diese nanostrukturierte Materialien eingeschlossen (Verkapselung) und in diesen transportiert werden. Damit sollen

- die Löslichkeit verbessert werden,
- eine kontrollierte Abgabe ermöglicht werden,
- die Bioverfügbarkeit erhöht werden,
- Mikronährstoffe und bioaktive Komponenten während der Herstellung, Lagerung und im Handel geschützt werden.

Herstellungsverfahren

Nanomaterialien können mittels einer Reihe von physikalischen und chemischen Methoden hergestellt werden. Man unterscheidet dabei zwischen sogenannten „Top-down“ und „Bottom-up“ Verfahren.¹⁴

Beim „Top-down“-Ansatz („von oben nach unten“) handelt es sich um **physikalische Methoden**, mittels derer größere Ausgangsmaterialien zerkleinert werden. Dazu gehören Herstellungsprozesse wie z. B. Lithographie-Verfahren (etwa für die Herstellung von Computer-Chips), Plasma-basierte Verfahren oder Hochenergiemahlprozesse. Die Herstellung von Nanopartikeln durch Mahlverfahren ist jedoch mit einigen Nachteilen verbunden – man erhält Pulver mit einer relativ breiten Partikelgrößenverteilung und eine gezielte Kontrolle der Partikelform ist praktisch nicht möglich. Zudem sind diese Verfahren sehr energieaufwendig.¹⁵

Häufiger und großtechnisch eingesetzt werden deshalb sogenannte „Bottom-up“-Verfahren, welche die physikalisch-chemischen Grundsätze der **molekularen bzw. atomaren Selbstorganisation nutzen**. Dazu ge-

hören etwa chemische Verfahren wie Pyrolyse und Hydrolyse, das Sol-Gel-Verfahren (siehe Kasten) sowie die Gasphasensynthese oder die Gasphasenabscheidung. Die meisten kommerziell erhältlichen Nanopulver aus Oxiden werden großtechnisch mittels Gasphasen-Methoden (z. B. Gasphasensynthese) hergestellt.⁷ Allerdings haben diese Methoden den Nachteil, dass die hergestellten Partikel zumeist stark agglomeriert sind und weitere Behandlungsschritte notwendig sind, um diese Agglomerate wieder zu trennen. Im Gegensatz dazu ist es möglich, Nanopartikel in flüssigen Phasen (z. B. Sol-Gel-Methode oder Hydrolyse) kolloidal stabil herzustellen. Das wird durch den Zusatz von organischen Additiven erreicht, die an die Oberflächen der Nanopartikel adsorbieren oder binden und mit Hilfe derer einerseits das Wachstum der Nanopartikel kontrolliert werden und andererseits eine Agglomeration verhindert werden kann.

Nicht nur Nanopartikel aus einem Material werden mittels „Bottom-up“-Methoden hergestellt, sondern auch **Komposit- oder Hybrid-Nanomaterialien**. „Kern/Schale“-Nanopartikel können auch durch eine

Sol-Gel-Verfahren

Mittels Sol-Gel-Verfahren, das zu den nasschemischen Prozessen gehört und primär auf anorganischen Reaktionsprinzipien basiert, können oxidische Nanopartikel (z. B. Siliziumdioxid) und hochporöse Nanomaterialien (z. B. Aerogel) hergestellt, Oberflächen von Materialien z. B. kratzfest beschichtet und auch oberflächenmodifizierte Nanopartikel hergestellt werden.

Die Ausgangsmaterialien (auch als Präkursoren bezeichnet) sind Metallverbindungen eines Alkohols z. B. mit Silizium, Titan oder Aluminium, die sogenannten Alkoxide. Im ersten Schritt des Verfahrens werden diese Verbindungen mit Hilfe von Katalysatoren (Säuren oder Basen) durch Wasser gespalten (**Hydrolyse**). Das Ergebnis ist das sogenannte **Sol** – eine kolloidale Dispersion, in der Partikel in einer Flüssigkeit fein verteilt sind. Gleichzeitig verbinden sich die hydrolysierten Präkursormoleküle durch **Kondensationsreaktion**. Wenn das Lösungsmittel verdunstet, beginnt der nächste Schritt der Sol-Gel-Synthese. Die einzelnen Teilchen des Sols bilden durch Selbstorganisation ein zunächst noch loses dreidimensionales Netzwerk – das sogenannte **Gel**. In einem letzten Schritt wird das Gel durch vollständiges Verdampfen des Lösungsmittels getrocknet und es entsteht ein stabiles Netzwerk.

Beispiel: Coating von Eisenoxid-Nanopartikeln mit Silica¹⁷

Eine Forschungsgruppe der Universität von Washington (USA) umhüllte magnetische Eisenoxid-Nanopartikel mit amorphem Silica mittels modifiziertem Sol-Gel-Verfahren (Stöber Methode). Dazu wurden in einem Reagenzgefäß 0,3 ml wasserbasiertes Ferrofluid mit 4 ml deionisiertem (demineralisiertem) Wasser und 20 ml 2-Propanol verdünnt. Unter ständigem Rühren wurden 0,5 ml Ammoniumlösung (30 Gewichts%) als Katalysator und unterschiedliche Mengen von Tetraethylorthosilikat (TEOS) als Präkursor zugefügt. Die chemischen Reaktionen liefen unter Raumtemperatur und kontinuierlichem Rühren in einem Zeitraum von ca. 3 Stunden ab. Der Prozess der Abscheidung der Silica-Hülle auf den Eisenoxid-Nanopartikeln umfasste die basenbasierte Hydrolyse von TEOS und die Kondensation von Silica an den Oberflächen der Nanopartikel. Die Schichtdicke der Silica-Umhüllung konnte durch geänderte Konzentrationen des TEOS-Präkursors festgelegt werden. Die „Kern/Schale“-Nanopartikel wurden mittels Zentrifugation bei ca. 4000 rpm (Umdrehungen pro Minute) aus dem Reaktionsmedium entfernt und wieder in deionisiertem Wasser dispergiert.

Kombination aus „Top-down“- und „Bottom-up“-Verfahren hergestellt werden, etwa indem mittels Mahlprozessen hergestellte Nanopartikel in einem weiteren Arbeitsschritt durch ein „Bottom-up“-Verfahren (z. B. Sol-Gel) umhüllt werden. „Bottom-up“-Verfahren werden laufend weiterentwickelt und verbessert, um Partikel mit enger Größenverteilung und genau bestimmbarer Form bzw. Dicke der Schale auf kostengünstige Weise herzustellen. Dazu gehört etwa die „Atomic Layer Deposition“ – ein stark verändertes Gasphasenabscheidungs-Verfahren („Chemical Vapor Deposition“, CVD), bei dem die Abscheidung sehr dünner und gleichmäßiger Umhüllungen auf Nanopartikeln möglich ist.¹⁶

Anmerkungen und Literaturhinweise

¹ siehe Greßler S. & Gazsó A. (2013): Definition des Begriffs „Nanomaterial“. NanoTrust Dossier Nr. 039, April 2013. http://hw.oew.ac.at/0xc1aa500e_0x002df14b.pdf.

² Chaudhuri R.G. & Paria S. (2012): Core/Shell Nanoparticles: Classes, Properties, Synthesis Mechanisms, Characterization, and Applications. Chem. Rev. 112, 2373-2433. http://www.researchgate.net/profile/Santanu_Paria/publication/51954885_CoreShell_Nanoparticles_Classes_Properties_Synthesis_Mechanisms_Characterization_and_Applications/links/00463521b70a39f561000000.pdf?ev=pub_ext_doc_dl&origin=publication_detail&inViewer=true.

³ Ramasamy M., Das M., An A.S.S., Yi D.K. (2014): Role of surface modification in zinc oxide nanoparticles and its toxicity assessment toward human dermal fibroblast cells. International Journal of Nanomedicine 9, 3707-3718. <http://www.dovepress.com/getfile.php?fileID=21120>.

⁴ Nanocytes – maßgeschneiderte Kern-Schale-Partikel für Chemie, Medizin, Pharmazie und Umwelt. Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB. http://www.igb.fraunhofer.de/content/dam/igb/de/documents/broschueren/Nanocytes_Massgeschneiderte_Kern_Schale_Partikel_fuer_Chemie_Medizin_Pharmazie_und_Umwelt.pdf.

⁵ Kango S., Kalia S., Celli A., Njuguna J., Habibi Y. & Kumar R. (2013): Surface modification of inorganic nanoparticles for development of organic-inorganic nanocomposites – A review. Progress in Polymer Science 38, 1232-1261.

⁶ Smijs G.T. & Pavel S. (2011): Titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles in sunscreens: focus on their safety and effectiveness. Nanotechnology, Science and Applications 4, 95-112. <http://www.dovepress.com/getfile.php?fileID=11179>.

⁷ Faure B., Salazar-Alvarez G., Ahnizay A., Villuluenga I., Berriozabal G. & De Mieguel R. Y. (2013): Dispersion and surface functionalization of oxide nanoparticles for transparent photocatalytic and UV-protecting coatings and sunscreens. Sci. Technol. Adv. Mater. 14, 23pp. http://iopscience.iop.org/1468-6996/14/2/023001/pdf/1468-6996_14_2_023001.pdf.

⁸ Uyanik M. (2008): Synthesis and characterization of TiO₂ nanostars. Dissertation. Universität Saarbrücken. <https://www.deutsche-digitale-bibliothek.de/binary/YOWTFQLN3WSS5KHVZ2QICXQQCMTS4UX/full/1.pdf>.

⁹ Für einen umfassenden Review siehe: Chaudhuri R.G. & Paria S. (2012): Core/Shell Nanoparticles: Classes, Properties, Synthesis Mechanisms, Characterization, and Applications. Chem. Rev. 112, 2373-2433. http://www.researchgate.net/profile/Santanu_Paria/publication/51954885_CoreShell_Nanoparticles_Classes_Properties_Synthesis_Mechanisms_Characterization_and_Applications/links/00463521b70a39f561000000.pdf?ev=pub_ext_doc_dl&origin=publication_detail&inViewer=true.

¹⁰ Bildquelle: <http://interfaceposts.org/core-shell/>; ergänzt.

¹¹ Shen L. (2011): Biocompatible Polymer/Quantum Dots Hybrid Materials: Current Status and Future Developments. Journal of Functional Biomaterials 2, 355-372. <http://www.mdpi.com/2079-4983/2/4/355/pdf>.

¹² Verordnung (EG) Nr. 1223/2009 des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. November 2009 über kosmetische Mittel. Amtsblatt der Europäischen Union L 342/59. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:342:0059:0209:de:PDF>.

¹³ Greßler S., Gazsó A., Simkó M., Nentwich M. & Fiedeler U. (2008): Nanopartikel und nanostrukturierte Materialien in der Lebensmittelindustrie. NanoTrust Dossiers, Nr. 4, Mai 2008. http://epub.oew.ac.at/0xc1aa500e_0x001a2437.pdf. Greßler, S., Gazsó A., Simkó M., Fiedeler U. & Nentwich M. (2009): Nanotechnologie in Kosmetika. NanoTrust Dossiers, Nr. 8, Jänner 2009. http://epub.oew.ac.at/0xc1aa500e_0x001d4f40.pdf.

¹⁴ siehe Raab C., Simkó M., Fiedeler U., Nentwich M. & Gazsó A. (2008): Herstellungsverfahren von Nanopartikeln und Nanomaterialien. NanoTrust Dossier Nr. 006, November 2008. http://epub.oew.ac.at/0xc1aa500e_0x001c3203.pdf.

¹⁵ Raab C., Simkó M., Fiedeler U., Nentwich M. & Gazsó A. (2008): Herstellungsverfahren von Nanopartikeln und Nanomaterialien. NanoTrust Dossier Nr. 006, November 2008. http://epub.oew.ac.at/0xc1aa500e_0x001c3203.pdf.

¹⁶ Hakim L.F., King D.M., Zhou Y., Gump Ch.J., George St.M. & Weimer A.W. (2007): Nanoparticle Coating for Advanced Optical, Mechanical and Rheological Properties. Adv. Funct. Mater., 17, 3175-3181.

¹⁷ Lu Y., Yin Y., Mayers B. T. & Xia Y. (2002): Modifying the Surface Properties of Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles through A Sol-Gel Approach. Nano Letters Vol. 2, No. 3, 183-186.

IMPRESSUM:

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

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

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

NanoTrust-Dossier Nr. 046, Mai 2016: epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier046.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