

Nanomaterialien: Anwendungen und Chancen

– eine Beispielsammlung von DECHEMA und VCI –

Stand: 18. August 2009

	Seite
1. Einleitung	1
2. Nanomaterialien in markteingeführten Produkten bzw. in Produkten in der Markteinführung oder Entwicklung	2
3. Forschung für neue Anwendungen	7

1. Einleitung

Die Nanotechnologie hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen.

Unter der Bezeichnung „Nanotechnologie“ wird eine Vielzahl von verschiedensten Innovationen und Entwicklungen zusammengefasst. Gemeinsames Merkmal dieser Technologien sind die verhältnismäßig kleinen Abmessungen der erzeugten mechanischen oder elektronischen Bauteile sowie von Partikeln verschiedenster chemischer Elemente und Verbindungen.

Als „nanoskalig“ versteht man im Kontext der Nanotechnologie einen Größenbereich zwischen etwa 1 und 100 Nanometern (nm). „Nanomaterialien“ haben Teilchengrößen bzw. Strukturen im nanoskaligen Bereich. „Nanopartikel“ sind in allen drei Dimensionen nanoskalig, „Nanofasern“ in zwei Dimension und „Nanoplättchen“ in einer Dimension.

Die chemische Industrie stellt schon heute viele Produkte unter Verwendung von Teilchen oder Strukturen her, die Abmessungen von etwa 1 bis 100 nm haben. Sie liegen z. B. als Kugeln, Plättchen, Fasern, Röhren, unregelmäßige Partikel oder Schichten vor. Optische, elektrische und magnetische Eigenschaften, aber auch Härte, Zähigkeit und Schmelzverhalten von Nanomaterialien unterscheiden sich teilweise deutlich von herkömmlichen Materialien. Ihr Einsatz eröffnet die Möglichkeit, völlig neuartige Werkstoffe zu schaffen, die speziell auf die jeweiligen Einsatzbedürfnisse zugeschnitten sind. Keramiken, Metalle oder Kunststoffe, die Nanomaterialien enthalten oder mit ihnen beschichtet wurden, sind beispielsweise kratzfest, entspiegelt bzw. Wasser, Fett und Schmutz abweisend. Auch Oberflächen, die Bakterien abtöten oder chemische Reaktionen katalysieren, werden durch Nanomaterialien ermöglicht.



Nanomaterialien werden u. a. in einer sehr heißen Gasflamme oder in wässriger Phase hergestellt. In den Herstellungsprozessen entstehen üblicherweise zunächst „primäre“ Nanopartikel. Diese sind sehr reaktiv und reagieren in wenigen tausendstel Sekunden mit anderen primären Nanopartikeln zu (sekundären) Aggregaten. Die Bestandteile der Aggregate sind chemisch verbunden und trennen sich – auch bei der späteren Verwendung des Produktes – nur sehr schwer oder gar nicht mehr. Die Aggregate lagern sich ihrerseits mit anderen Aggregaten zu (tertiären) Agglomeraten zusammen; diese Agglomerate lassen sich durch geeignete Maßnahmen wieder aufbrechen.

Da ein Aggregat durch seinen Zusammenschluss aus primären Nanopartikeln Strukturen im nanoskaligen Bereich aufweist, bleiben manche „Nano-Eigenschaften“ erhalten. Neue technische Eigenschaften durch die nanoskalige Strukturen und Teilchengröße von Aggregaten oberhalb von 100 nm sind somit kein Widerspruch.

In Endanwender-Produkten kommen freie Nanopartikel praktisch nicht vor – es sei denn, sie werden für spezielle Anwendungen (z. B. in der Medizin) mit erheblichem Aufwand hergestellt. Bei den in den folgenden Kapiteln beispielhaft aufgeführten Nanomaterialien handelt es sich in der Regel um größere nanostrukturierte Teilchen, nicht um singuläre Nanopartikel.

Wie bei allen Produkten müssen auch bei Nanomaterialien die individuellen toxikologischen und ökotoxikologischen Eigenschaften untersucht werden, wenn eine Exposition (d. h. eine Freisetzung in die Umwelt oder der Kontakt mit dem Menschen) nicht ausgeschlossen werden kann. Hierbei spielt die Verwendung der Nanomaterialien natürlich eine wesentliche Rolle. Generelle Aussagen zu Risiken von Nanomaterialien sind aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften und Anwendungsbedingungen nicht möglich. Wie bei allen Chemikalien ist auch bei Nanomaterialien das Risiko einzelfallbezogen zu bewerten.

2. Nanomaterialien in bereits markteingeführten Produkten bzw. in Produkten in der Markteinführung oder Entwicklung

Aluminiumoxid

Schmutzabweisende Sanitärkeramiken werden durch Zusatz von nanostrukturiertem Aluminiumoxid in die Glasur hergestellt.

Um Möbel und Parkett- bzw. PVC-Böden kratzfester zu machen, wird nanostrukturiertes Aluminiumoxid als Zusatzstoff in Lacke eingearbeitet. Diese Lacke werden zurzeit auf ihre Marktchancen getestet.



Carbon Black

Seit über hundert Jahren wird Industrieruß (Carbon Black) bei der Herstellung von Autoreifen verwendet. Die Rußteilchen setzen sich in das polymere Netzwerk aus Gummi-Molekülen. So wird der Reifen mechanisch verstärkt und der Verschleiß verringert.

Carbon Nanotubes

Nanoröhrchen aus Kohlenstoff (Carbon Nanotubes, CNT) zeichnen sich durch hervorragende Werkstoffeigenschaften aus, die für die mechanische Verstärkung von Kunststoffen ideal sind. Erste Produkte für den Freizeitbereich sind bereits auf dem Markt, z. B. Eishockeyschläger, Tennisschläger und Golfschläger aus CNT-verstärkten Kunststoffen. Auch in Flügeln von Windkraftwerken finden CNT Einsatz: Dank geringerem Gewicht und höherer mechanischer Belastbarkeit kann die Spannweite der Flügel erhöht und so die Windenergie effizienter in elektrischen Strom umgewandelt werden.

Carbon Nanotubes und Nanofasern aus Kohlenstoff können nicht nur mechanische, sondern auch andere physikalischen Eigenschaften von Kunststoffen verändern und damit neue Anwendungen ermöglichen. So sind nach den üblichen Synthesemethoden hergestellte Carbon Nanotubes und Kohlenstoff-Nanofasern gute thermische Leiter. Sie können aber auch so hergestellt werden, dass sie entweder elektrische Leiter- oder aber Halbleitereigenschaften aufweisen. Anwendungen leitender Nanotubes und Nanofasern sind z. B. antistatisch ausgerüstete Polymere.

Carbon Nanotubes (CNT) können auch die physikalischen Eigenschaften von Metallen verändern. Ein Zusatz von CNT kann z. B. die mechanischen Eigenschaften von Aluminium erheblich verbessern. Neuartige CNT-Aluminium-Composite besitzen fast die Festigkeit von Stahl, sind aber nur halb so schwer. Dadurch haben sie überall dort Einsatzchancen, wo Gewicht und Energieverbrauch durch Leichtbau gesenkt werden sollen – beispielweise in der Auto- und Flugzeugindustrie.

Eisenoxid

Ferrofluide (Dispersionen mit nanopartikulärem Eisenoxid oder anderen magnetischen Materialien) werden z. B. in schnell rotierenden Computerfestplatten als flüssige Dichtungen eingesetzt.

Ein neuer Klebstoff soll ermöglichen, dass sich eine Klebeverbindung „per Knopfdruck“ ausbilden und wieder lösen lässt. Im Kleber schwimmen dabei nanopartikuläre reine und dotierte Eisenoxid-Partikel. Mit Hilfe eines Magnetwechselfeldes erhitzen die winzigen Partikel den Klebstoff, der dabei aushärtet. Ein stärkeres Feld und höhere Temperaturen können die Stoffe später wieder trennen.

Beschichtetes nanopartikuläres Eisenoxid wird in der Kernspintomografie als bildgebendes Kontrastmittel benutzt.



In der Medizin wird mit nanopartikulärem magnetischen Eisenoxid geforscht: Zum einen werden magnetische Eisenpartikel in Tumore gespritzt und mittels magnetischer Wechselfelder erhitzt, damit der Tumor durch die entstehende Wärme zerstört wird; dieses Verfahren befindet sich im letzten Stadium der klinischen Prüfung. Zum anderen sollten mit Wirkstoffen beladene Nanopartikel im Körper durch ein Magnetfeld gezielt in ein Organ gesteuert werden und dort ihre Fracht abladen. Diese Arbeiten, die an der Berliner Charité durchgeführt werden, befinden sich noch im frühen Stadium der klinischen Forschung.

Polymere

Polymerdispersionen, die Polymerteilchen in der Größenordnung von 10 nm bis einigen 100 nm enthalten, finden z. B. als Bindemittel für Fliesenkleber und Anstrichfarben sowie zur Veredlung von Papier, Textilien und Leder Anwendung.

Silber

Ein neu entwickelter Lack enthält mit Silber beschichtetes nanostrukturiertes Titandioxid, um Bakterien und Pilze abtöten zu können. Der für das sichtbare Licht durchlässige Lack kann auf Metall, Kunststoff oder Glas aufgebracht werden.

Silber-Nanopartikel werden auch in medizinischen Gegenständen als antibakterielle Komponente und für Selbstreinigungseffekte eingesetzt.

Siliziumdioxid

Synthetische amorphe Kieselsäuren (amorphes Siliziumdioxid) werden seit Jahrzehnten in den verschiedensten Bereichen verwendet. Bei den amorphen Kieselsäuren werden schon im Herstellungsprozess aus den primär erzeugten Nanopartikeln recht stabile amorphe Strukturen im Mikrometerbereich aufgebaut. Amorphe Kieselsäuren dienen als Verstärkungsmittel in Siliconkautschuk, als Gelbildner in Kosmetika sowie als Fließ- bzw. Rieselverbesserer bei der Tablettenherstellung. In Lacken und in Kleb- und Dichtstoffen sorgen sie für die richtige Viskosität. Sie sind Hauptbestandteil bei der Herstellung leistungsfähiger Hochtemperatur-Isolationsmaterialien und dienen in der Mikrochipindustrie als ultrafeines Poliermittel.

In Reinigungsmitteln wird amorphes Siliziumdioxid als Verdicker und als Hilfsmittel zur Veränderung von Oberflächeneigenschaften eingesetzt. Wassertröpfchen benetzen die mit diesen Reinigungsmitteln behandelten Fensterscheiben sofort und fließen augenblicklich zusammen; die Scheibe beschlägt deshalb auch nicht. Der Vorteil für den Verbraucher ist ein geringerer Reinigungsaufwand aufgrund der besseren bzw. gleichmäßigeren Benetzungseigenschaften.

Schmutzabweisende Sanitärkeramiken werden durch Zusatz von nanostrukturiertem Siliziumdioxid in die Glasur hergestellt.



Mit Hilfe eines neu entwickelten hydrophoben – also Wasser abstoßenden – nanostrukturierten Siliziumdioxids, das in einem organischen Lösungsmittel dispergierbar ist, können auf verschiedenen Werkstoffen Schichten aufgebracht werden, die der Oberfläche selbstreinigende Eigenschaften verleihen. Beispielsweise können Fässer, Becher, Pipetten und Schüsseln innen so beschichtet werden, dass diese rückstandslos entleert werden können. Eine Beschichtung mit dieser neuen Siliziumdioxid-Formulierung liefert auch bei vielen Gewebearten selbstreinigende Textilien, die zudem wasserabweisend sind. Die Atmungsaktivität bleibt dennoch erhalten.

Mit Hilfe eines Sols, in dem 20 - 50 nm große Siliziumdioxid-Kügelchen enthalten sind, wird antireflexbeschichtetes Einscheibensicherheitsglas für den Schutz von Sonnenkollektoren und Photovoltaikanlagen hergestellt. Dank einer dünnen Schicht aus Siliziumdioxid kann nahezu das gesamte energetisch nutzbare Spektrum des Sonnenlichts die Abdeckscheibe durchdringen. Die Reflexion wird von acht auf zwei Prozent reduziert und so die Energieausbeute von Solaranlagen deutlich erhöht.

Seit längerem ist ein speziell beschichtetes Papier für Tintenstrahldrucker auf dem Markt. Eine poröse Schicht aus nanostrukturiertem Siliziumdioxid adsorbiert die fein versprühte Tinte sofort und erlaubt damit eine hohe Druckgeschwindigkeit.

Titandioxid

Viele Sonnencremes enthalten nanostrukturiertes Titandioxid. Die Creme bleibt auf der Haut transparent, denn die vor der UV-Strahlung schützenden Oxid-Partikel sind so klein, dass sie für das langwelligere sichtbare Licht durchlässig sind. Die schädlichen UV-Strahlen mit einer kürzeren Wellenlänge werden zuverlässig blockiert.

Auch in neuartigen Polyamidfasern blockiert nanostrukturiertes Titandioxid die schädlichen UV-Strahlen. Es kann so ein Lichtschutzfaktor von bis zu 80 realisiert werden.

In der Glasur neuartiger keramischer Wand- und Bodenfliesen ist nanostrukturiertes Titandioxid verteilt. Dieses ist photokatalytisch aktiv und bildet bei Lichteinfall mit Sauerstoff oder Wasser reaktive Radikale, die unerwünschte Stoffe in toxikologisch unbedenkliche Substanzen zersetzen können. Bei der Anregung durch UV-Strahlung, z. B. Sonnenlicht, lassen sich mit Hilfe von nanostrukturiertem Titandioxid in Fassadenfarben oder Betonoberflächen durch Oxidation Luftschadstoffe wie Stickoxide vermindern. Wird für die Anregung sichtbares Licht (es reicht bereits die Innenraumbeleuchtung aus) verwendet, können entsprechend ausgerüstete Innenwandfarben Gerüche beseitigen. Auch andere Selbstreinigungseffekte sind mit Hilfe der Photokatalyse möglich: Die gebildeten Radikale können Bakterien, Pilze, Algen und Moose zerstören und die Entstehung neuer Erreger verhindern.



Tonerden

Nanostrukturierte Tonerden („Nano-Bentonite“) können als Füllstoffe für Polymere zur Herstellung so genannter „Nanocomposit-Polymere“ verwendet werden. Ein Zusatz von bis zu 5 Prozent nanostrukturierter Tonerde kann die Steifigkeit von Polyolefinen deutlich verbessern. Außerdem wird das Schrumpfverhalten verringert und die Thermostabilität zusammen mit der Chemikalienresistenz erhöht. Zudem sind die mit Tonerde verstärkten Polymere im Vergleich zu mit Glasfasern verstärkten Polymeren leichter. Tonerde enthaltende Nanocomposit-Polymere lassen sich schwer entflammen und tropfen beim Brennen weniger – sie reduzieren so die Gefahr schwerer Brandwunden. Auch technische Kunststoffe wie Polyamid lassen sich mit nanostrukturierten Tonerden qualitativ verbessern. Wie bei den Polyolefinen verbessern sich Schrumpfverhalten, Thermostabilität und Chemikalienresistenz; zudem können dünnwandigere Teile hergestellt werden. Anwendungen sind Stoßstangen, Innenverkleidungen von Autos, Chemikalienbehälter, aber auch Textilien.

Polymer-Composite mit nanostrukturierter Tonerde können auch zur Herstellung neuartiger Folien genutzt werden. Je nach Zusammensetzung und Matrix können die Tonerden als Barriestoffe für Wasser, Sauerstoff oder Kohlendioxid eingesetzt werden (Anwendung z. B. in PET- und Polypropylen-Flaschen bzw. generell bei Materialien im Verpackungsbereich).

Zinkoxid

Einige Sonnencremes enthalten nanostrukturiertes Zinkoxid. Die Creme bleibt auf der Haut transparent, denn die vor der UV-Strahlung schützenden Oxid-Partikel sind so klein, dass sie für das langwelligere sichtbare Licht durchlässig sind. Die schädlichen UV-Strahlen mit einer kürzeren Wellenlänge werden zuverlässig blockiert.

Weitere Stoffe

Kunststoffbrillengläser werden dank einer Oberflächenveredelung mit nanostrukturierten **Zirkondioxid-** und **Titandioxid-**Teilchen, die mit Siliziumdioxid ummantelt sind, kratzfester.

In Lacken, insbesondere Metallic-Lacken für die Automobilindustrie und Holzlacken für Möbel und Parkett, werden seit langem **transparente Buntpigmente** mit Partikelgrößen von unter 100 nm eingesetzt. Beispiele sind transparente **Phthalocyanin-Pigmente**.

Sensoren spielen in der Arbeitssicherheit, im Umweltschutz und bei chemischen Prozessen eine wichtige Rolle. Nanostrukturiertes **Indiumoxid**, **Zinnoxid** und **Wolframoxid** ändern ihre elektrische Leitfähigkeit in Gegenwart von bestimmten Gasen und eignen sich dadurch hervorragend als Sensormaterial zum Aufspüren von Gasen oder höhermolekularen Kohlenwasserstoffen. Die Empfindlichkeit solcher Sensoren hängt stark von der Struktur ihrer Oberfläche ab – diese Struktur wird von der Feinkörnigkeit der verwendeten Oxide beeinflusst.



„Nanophosphore“ sind fluoreszierende Teilchen mit einer Teilchengröße unter 10 nm, die beispielsweise aus **Metall-Silikaten, -Oxiden, -Sulfaten** oder **-Phosphaten** bestehen, in deren Kristallgitter z. B. einzelne **Lanthanid**-Ionen eingebaut sind. Die Wellenlänge ihres Emissionslichts hängt von der Art der verwendeten Lanthanid-Ionen ab. Nanophosphore sollen Untersuchungen von Blut-, Speichel-, Urin- und Haarproben in Zukunft noch schneller und sicherer machen.

3. Forschung für neue Anwendungen

Die Nanotechnologie hat Querschnittscharakter und ermöglicht völlig neue Produkte und Anwendungen in den verschiedensten Branchen. Einige nanotechnologiebasierte Produkte sind bereits weit entwickelt bzw. sogar schon seit vielen Jahren im Markt etabliert.

Trotzdem befindet sich die Nanotechnologie insgesamt gesehen dennoch in einem frühen Stadium der Entwicklung. Dies betrifft vor allem das Potential für neue und besondere Funktionalitäten in den Bereichen:

- Elektronik und Optik
- Gesundheit
- Energie
- Bauwesen

Im Folgenden sind exemplarisch einige Forschungsfelder mit hohem Anwendungspotential skizziert. Die Auswahl umfasst Partikel-Systeme, Schichten sowie poröse Systeme mit einer Dimensionierung im Nanometerbereich.

Elektronik und Optik

Preiswerte **elektronische Bauelemente und Sensoren**, die aus nanostrukturierten Materialien aufgebaut werden, haben ausgezeichnete Marktchancen. Hier sind Forschungsarbeiten hinsichtlich der Zusammensetzung und Formulierung der Materialien sowie der Entwicklung unkonventioneller neuer Produktionstechniken, z. B. dem Ink-Jet-Verfahren, notwendig.

Langfristig wird am Einsatz von Carbon Nanotubes in einer neuen Generation von **Computerchips** gearbeitet. Die Nanotubes sollen – auf einen geeigneten Kunststoffträger aufgebracht – als Leiterbahnen und Transistoren agieren. So sollen Chips mit einer um den Faktor eine Million höheren Speicherdichte als durch die herkömmliche Silizium-Technologie realisiert werden.

Forschungsbedarf besteht weiterhin bei der Herstellung **transparenter elektrisch leitfähiger Beschichtungen**, z. B. für Flachbildschirme, die über eine geeignete Oberflächenstrukturierung im Nanometerbereich bzw. über das Aufbringen von funktionalisierten Nanopartikeln erzeugt werden können.



In der **Polymerelektronik** werden derzeit OLEDs (Organic Light Emitting Diodes) mit Schichtdicken im Nanometerbereich für Anwendungen in Farbdisplays getestet. Forschungsbedarf besteht hier insbesondere bei der Lebensdauer der OLEDs, die bislang für den Alltagseinsatz zu gering ist.

Von hohem Interesse sind auch **einstellbare bzw. schaltbare Systeme** mit variabler Hydrophobie/Hydrophilie oder variablem Magnetismus.

Gesundheit

Wirkstoffträger aus nanopartikulären oder nanostrukturierten Materialien können für die Behandlung bislang nicht oder nur schwer therapierbarer Krankheiten, z. B. Krebs, Demenzerkrankungen oder Diabetes, wesentliche Fortschritte bringen. In den meisten Fällen werden dabei Nanopartikel als Transportvehikel für Wirkstoffe eingesetzt. Dadurch kann der Wirkstoff gegen vorzeitige Zersetzung geschützt oder besser vom Körper aufgenommen werden. Auch schwer lösliche Wirkstoffe könnten so effektiver transportiert werden. Vielfältige Möglichkeiten bieten dabei unterschiedliche chemische Veränderungen der Oberfläche der nanopartikulären Wirkstoffträger. Durch Einführen spezieller biologischer Funktionalitäten kann eine gerichtete Wirkstofffreisetzung am Zielort erreicht und hierdurch die Wirksamkeit des Medikamentes erhöht und Nebenwirkungen verringert werden. Auch können nanopartikuläre Transportsysteme eine Möglichkeit sein, körpereigene Barrieren wie beispielsweise die Blut-Hirn-Schranke zu überwinden und so Medikamente direkt ins Gehirn zu transportieren. Nanopartikuläre Wirkstoffträger können zudem mit Markierungen versehen werden, die es möglich machen, die Verfügbarkeit der Wirkstoffe am Zielort zu überprüfen.

Energie

Forschungsbedarf besteht bei der Synthese und Formulierung von nanostrukturierten Materialien für **Super-Kondensatoren** für die kurzfristige Energiespeicherung, z. B. in Verbindung mit Solarzellen. Diese Superkondensatoren ließen sich auch zur kurzfristigen Speicherung großer Energiemengen, z. B. im Automobilbereich zur Speicherung von Bewegungsenergie, verwenden.

Ebenso werden durch Verwendung nanostrukturierter Materialien verbesserte **Akkumulatoren als Energiespeicher** (beispielsweise neue Lithium-Ionen-Batterien) und leistungsfähigere **Katalysatoren für Brennstoffzellen** erwartet.

Zur **Speicherung von Wasserstoff** für Brennstoffzellen werden neben Carbon Nanotubes vor allem metallorganische Nanostrukturen untersucht. Mit nanoporösen Netzwerken, die aus solchen Strukturen (z. B. Zeolithen) aufgebaut sind, lassen sich heute bereits Wasserstoffspeicherdichten bis 1,8 Gewichtsprozent erreichen. Ziel ist es, die Speicherdichte bis auf ca. 6,5 Gewichtsprozent zu erhöhen – dann werden diese Speicher z. B. für Wasserstoff-Brennstoffzellen im Auto interessant.



Bauwesen

Das Verständnis nanoporöser Systeme ist für neue und entscheidend verbesserte Anwendungen in der Isolationstechnik von großem Interesse. So könnten **Isolationsmaterialien** mit Poren im Nanometerbereich für eine verbesserte Isolationswirkung bei Dämmmaterialien im Gebäudebau, aber auch im Flugzeug- und Fahrzeugbau, führen.