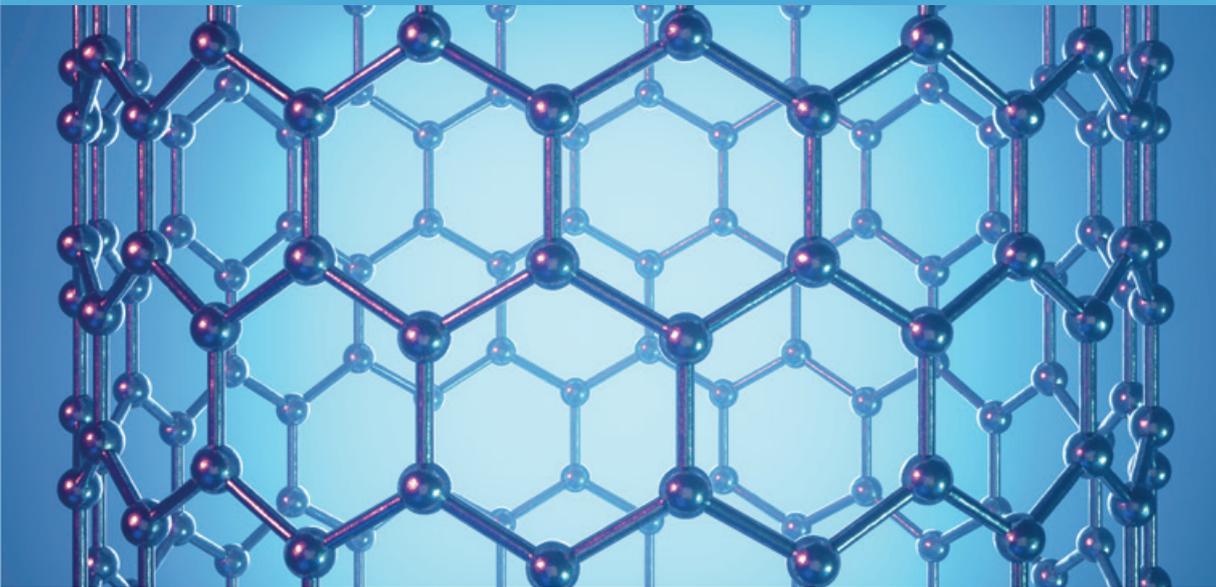




Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



Umweltverträgliche Nanotechnologie für den Klimaschutz

Inhalt

Das Thema in Kürze	4
Was ist Nanotechnologie?	6
Definitionen	7
Herstellungsverfahren	10
Risiken und Umweltaspekte	12
<hr/>	
Anwendungen im Klimaschutz	14
Energiegewinnung	15
Energiewandlung	15
Energieverteilung	16
Energiespeicherung	17
Energienutzung	17
<hr/>	
Beispiele aus der Praxis	18
Cluster Nanotechnologie, Würzburg	18
Nanotechnologie für den Klimaschutz	
va-Q-tec AG, Würzburg	20
Nanotechnologie in der Fassadendämmung	
SGL Carbon GmbH, Meitingen	22
Nanomaterialien für eine klimafreundliche Mobilität	
ARMOR solar power films GmbH, Kitzingen	24
Lichtaktive Nanoschichten zur effizienten Nutzung von Sonnenenergie	
Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach	26
Nanostrukturierte Beschichtungen leisten maßgeblichen Beitrag zur Senkung von CO₂-Emissionen	
<hr/>	
Glossar	28
Quellenverzeichnis	30
Weitere Fachinformationen	34
Impressum	36
<hr/>	

Das Thema in Kürze

Nanotechnologie beschäftigt sich mit der Untersuchung, Herstellung und Anwendung von Materialien mit Abmessungen im Bereich von etwa 1 Nanometer bis 100 Nanometer (Nanoskala) in mindestens einer Dimension. Entscheidend ist dabei, dass Nanomaterialien neuartige Eigenschaften aufweisen können, die weder die Atome bzw. Moleküle noch das Volumenmaterial des gleichen Stoffs besitzen. Diese Eigenschaften werden hervorgerufen durch die zunehmende Dominanz von Oberflächeneffekten gegenüber Volumeneffekten bei abnehmender Teilchengröße. Sie hat das Potenzial für tiefgreifende Innovationen in einer Vielzahl von Bereichen und nutzt als Querschnittsdisziplin Methoden aus den Natur- und Ingenieurwissenschaften.

Für Nanomaterialien existieren Definitionen von verschiedenen internationalen Institutionen. Während die Definitionen von ISO und OECD das Auftreten neuartiger Eigenschaften auf der Nanoskala als Kriterium zur Einstufung als Nanomaterial ansehen, zieht die EU für regulatorische Zwecke einzig Teilchengröße und Teilchengrößenverteilung der Materialien als Kriterium heran.

Herstellungsverfahren von Nanomaterialien können in zwei prinzipiell unterschiedliche Verfahrensrouten eingeteilt werden: Bottom-up und Top-down. Bei Bottom-up-Verfahren werden Nanomaterialien aus kleineren Bausteinen wie Atomen oder Molekülen synthetisiert. Beispiele sind Verfahren der Gasphasenabscheidung und Selbstorganisation. Top-down-Ansätze zerkleinern oder strukturieren größere Materialstücke auf Nanoskala. Oftmals kommen dabei Prozesse aus der Mikrosystemtechnik zum Einsatz.

Zur Abschätzung des Risikos von Nanomaterialien für die Umwelt werden Expositionsdaten sowie Kenntnisse über die Wirkung des Materials in der Umwelt benötigt. Fehlen geeignete Analyseverfahren muss für Expositionsdaten auf Berechnungsmodelle zurückgegriffen werden. Für viele Materialien existieren bereits ökotoxikologische Untersuchungen. Angesichts der Fülle an Materialien, möglichen Untersuchungszeiträumen, relevanten Stoffkonzentrationen, zu testenden Organismen und Umgebungsparametern kann allerdings noch keine abschließende Risikoabschätzung für Nanomaterialien gegeben werden.

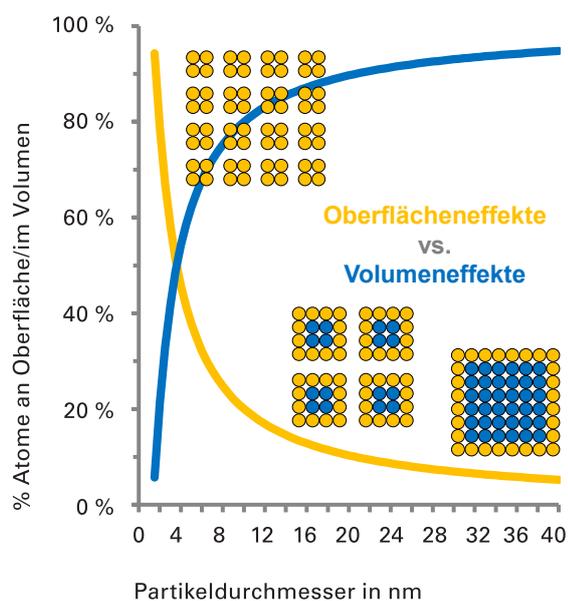
Im Klimaschutz leistet die Nanotechnologie bisher in erster Linie Beiträge zur Reduzierung von Treibhausgasen. Dabei findet sie hauptsächlich Anwendung auf den verschiedenen Wertschöpfungsstufen des Energiesektors. So verbessern Nanostrukturen bei der Energiegewinnung beispielsweise die Effizienz neuartiger Solarzellen. Auf der Stufe der Energiewandlung können Nanomaterialien in Brennstoffzellen deren Effizienz und Haltbarkeit optimieren. Bei der Energieverteilung senken hohe Spannungen in der Stromübertragung die elektrischen Verluste. Nanofüllstoffe können hier die Eigenschaften von Isolatoren verbessern. Energiespeicher sind ein Baustein der Energiewende. Nanostrukturierte Elektroden in Lithium-Ionen-Akkus dienen dabei zur Erhöhung der Speicherkapazitäten. Für eine effiziente Nutzung der Energie stellt die Nanotechnologie ebenfalls Innovationen bereit. So sorgen z. B. organische Leuchtdioden für großflächige Beleuchtung mit hohem Wirkungsgrad.

Was ist Nanotechnologie?

Nanotechnologie beschäftigt sich mit der Untersuchung, Herstellung und Anwendung von Materialien mit Abmessungen zwischen 1 Nanometer und 100 Nanometer in mindestens einer Dimension. Der Begriff „Nano“ leitet sich vom altgriechischen Wort „nanos“ (Zwerg) ab und steht für den Wert 10^{-9} , d. h. eine Milliardstel. Ein menschliches Haar hat beispielsweise einen Durchmesser von bis zu Hunderttausend Nanometern.

Nanopartikel können in der Natur entstehen, etwa in Stäuben oder Vulkanaschen. Als Nebenprodukt treten sie beispielsweise in manchen Abgasen oder beim Abbrennen von Kerzen auf [1]. Synthetische Nanomaterialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften werden erst seit einigen Jahrzehnten industriell hergestellt. Aufgrund ihrer Vielseitigkeit machen sie neue Anwendungen in verschiedenen Bereichen erst möglich. Die besonderen Eigenschaften von Nanomaterialien beruhen auf ihrer geringen Größe. Bei geringeren Materialabmessungen gibt es verhältnismäßig mehr Oberflächenatome (unten). Diese sind aufgrund ihrer Lage anders gebunden und weisen andere physikalische und chemische Eigenschaften als Atome im Volumen auf. Man spricht bei Nanomaterialien davon, dass die Oberflächeneigenschaften die Volumeneigenschaften dominieren. Zudem können bei diesen Abmessungen bereits Phänomene auftreten, die auf Eigenschaften und Vorgängen im atomaren und subatomaren Bereich beruhen (Quanteneffekte). Dies erklärt, warum sich ein und dieselbe Substanz als Nanomaterial anders verhalten kann als in herkömmlichem Volumenmaterial.

Zunahme der Oberflächenatome bei Verringerung der Partikelgröße und konstanter Gesamtmasse eines Materials



Schon in der Antike und im Mittelalter wurden Nanomaterialien benutzt. So wurde rot gefärbtes Glas für Kirchenfenster mit Goldpartikeln im Nanomaßstab erzeugt. Man spricht jedoch erst seit etwa den 1980er Jahren von Nanotechnologie. Mit der Erfindung der Rastersondenmikroskopie wurde einer der Grundsteine für gezieltere Untersuchungen der Phänomene gelegt, da damit auch Strukturen im Nanometerbereich sichtbar gemacht werden können. Inzwischen umfasst das Instrumentarium der Nanotechnologie naturwissenschaftliche sowie ingenieurwissenschaftliche Methoden. Daher wird sie oft auch als eine Querschnittsdisziplin betrachtet und findet in einer Vielzahl von Bereichen Anwendung. Ihr wird das Potenzial für tiefgreifende Innovationen zugesprochen.

Definitionen

Verschiedene internationale Organisationen haben Definitionen von Nanotechnologie oder verwandten Begriffen veröffentlicht. Drei der wichtigsten Definitionen stammen von der internationalen Organisation für Normung (ISO), der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) sowie der Europäischen Union (EU). Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Ziele und Anwendungsbereiche. Die Definition der ISO dient als Grundlage.

Was ist Nanotechnologie?

Definitionen Nanotechnologie und verwandte Begriffe durch ISO, OECD und EU

ISO	
Ziel	Harmonisierung zur Förderung des gemeinschaftlichen Verständnisses und der einheitlichen Verwendung der Terminologie.
Nanoskala	Längenbereich von in etwa 1 nm bis 100 nm. (Kriterium: Einsetzen von größenabhängigen Eigenschaften ungleich denen des Volumensmaterials und denen von Atomen und Molekülen.)
Nanowissenschaften	Studium von Materie im Bereich der Nanoskala.
Nanotechnologie	Anwendung des Wissens zur Manipulation von Materie auf Nanoskala.
Nanomaterialien	<ul style="list-style-type: none">• Äußere Abmessungen auf der Nanoskala (Nanoobjekte).• Innere Struktur oder Oberflächenstruktur auf der Nanoskala (nanostrukturierte Materialien).

Quellenangaben: ISO [2], OECD [3], EU [4] – [8]

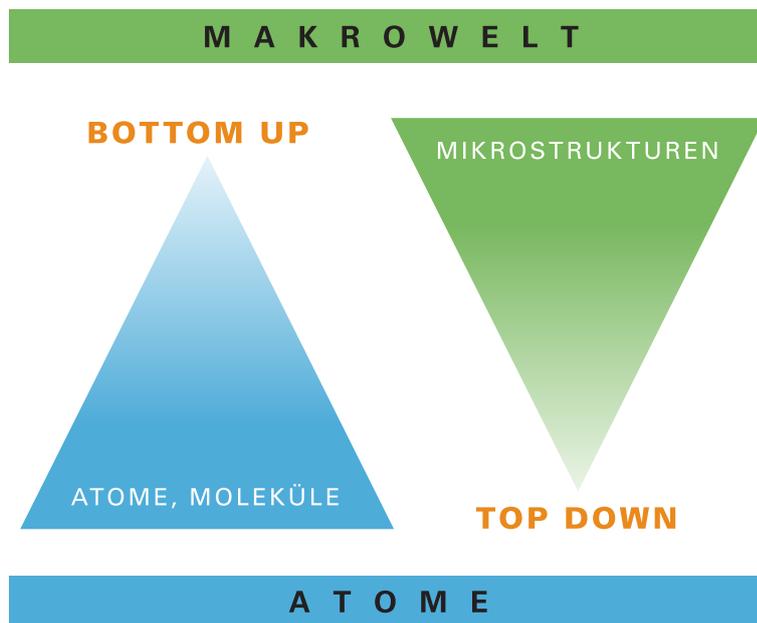
OECD	EU
<p>Abgrenzung des Technologiefeldes für statistische Zwecke.</p>	<p>Eindeutige Identifizierung von Materialien, für die regulatorische Vorschriften für Nanomaterialien gelten sollen.</p>
<p>Längenskala im Nanometerbereich, nicht ausschließlich im Bereich von unter 100 nm. (Kriterium: Einsetzen von größenabhängigen Eigenschaften ungleich denen des Volumenmaterials und denen von Atomen und Molekülen.)</p>	<p>Nanoskala reicht exakt von 1 nm bis 100 nm.</p>
<p>Die OECD stuft Nanowissenschaften als Bestandteil der Nanotechnologie ein.</p>	<p>Wird nicht definiert.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Weitgehend identisch mit ISO-Definition. • Zusätzlich Positivliste mit Subfeldern der Nanotechnologie. 	<p>Wird nicht definiert.</p>
<p>Weitgehend identisch mit ISO-Definition.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Definition bezieht sich nur auf Nanoobjekte, nicht auf nanostrukturierte Materialien. • Nur Größe und Anzahlgrößenverteilung der Partikel entscheidet über die Einordnung als Nanomaterial. • Mindestens 50 % der Nanoobjekte besitzen eine äußere Abmessung von 1 nm bis 100 nm in mindestens einer Dimension.

Was ist Nanotechnologie?

Herstellungsverfahren

Es gibt zwei prinzipiell verschiedene Herstellungsmöglichkeiten für Nanomaterialien: Bottom-up und Top-down (unten). Beim Bottom-up-Ansatz entstehen Nanomaterialien ausgehend vom unteren Ende der Nanoskala. Dabei werden einzelne Atome oder Moleküle, die selbst in der Regel Abmessungen von weniger als einem Nanometer haben, zu größeren Nanostrukturen zusammengefügt. Dies kann unter geeigneten Reaktionsbedingungen eigenständig geschehen. Man spricht dann oftmals von Selbstorganisation oder Selbstassemblierung. Der Top-down-Ansatz geht den umgekehrten Weg: Ein Nanomaterial wird ausgehend vom oberen Ende der Nanoskala durch Zerkleinern oder Entfernen von Material aus einem größeren Materialblock hergestellt. Dabei kommen häufig modifizierte Verfahren aus der Mikrosystemtechnik zum Einsatz. Am Ende beider Prozesse steht ein Nanomaterial, das Eigenschaften aufweist, die sich von denen des Ausgangsmaterials unterscheiden.

*Herstellungswege
von Nanomaterialien:
Top-down und
Bottom-up.
Darstellung nach [9]*



Beispiele für Bottom-up-Verfahren zur Herstellung von Nanomaterialien: [10]

Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD): Ablagerung dünner Schichten auf einer Unterlage. Die aufzutragende Schicht muss zuvor beispielsweise durch Gaskondensation oder Sputtern in die Gasphase überführt werden.

Sol-Gel-Prozess: Herstellung von Nanomaterialien aus einer kolloidalen Suspension (engl. *solution*, Sol). Die Ausgangsmaterialien verbinden sich zu einem Netzwerk von Partikeln oder Polymeren (Gel). Trocknung und weitere Verfahrensschritte beeinflussen die Eigenschaften des Produkts.

Selbstorganisation: Aggregation suspendierter Partikel zur gewünschten Struktur. Aufgrund der Art der ablaufenden Reaktionen sind die Zielstrukturen relativ frei von Defekten.

Beispiele für Top-down-Verfahren zur Herstellung von Nanomaterialien:

Mahlen: Pulver eines Materials wird z. B. in einer Kugelmühle gemahlen, bis Nanoobjekte in gewünschter Größe entstanden sind. [11]

Optische Lithographie: Übertragung von Strukturen einer Maske auf einen Fotolack mittels Licht. Nach Entwicklung des Lacks werden die Nanostrukturen durch Ätzen auf das Substrat übertragen.

Nanoimprint: Mechanische Methode, bei der das Muster eines nanostrukturierten Stempels direkt auf die Oberfläche eines Positivs (meist ein Polymer) geprägt wird. Zur Übertragung der Strukturen auf das Substrat folgt ein Ätzschritt. [12]

Was ist Nanotechnologie?

Risiken und Umweltaspekte

Für die Risikobewertung eines Stoffes werden Daten zum Gefährdungspotenzial sowie zur Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadens benötigt. Die Gefährdung lässt sich durch den Zusammenhang von Dosis und Wirkung beschreiben, während die Schadenswahrscheinlichkeit von der Exposition gegenüber einem Stoff abhängt.

Um die Konzentrationen von Nanomaterialien in der Umwelt und damit die Exposition zu messen, werden Nachweismethoden mit hoher Empfindlichkeit und hoher Selektivität benötigt. Solche Methoden stehen für Nanomaterialien nur bedingt zur Verfügung [z. B. 15], was mitunter eine aufwändige Kombination mehrerer Methoden erforderlich macht. Quantitative Daten zur Umweltexposition mit künstlich hergestellten Nanomaterialien werden daher häufig modelliert. Ein solcher Ansatz zielt darauf ab, den mengenmäßigen Eintrag von synthetisch erzeugten Nanomaterialien in die Umwelt möglichst exakt abzubilden (unten).

Modellierung der Eintragswege von Nanomaterialien (NM) in die Umwelt in Anlehnung an [13]



Neben den in die Umwelt gelangten Mengen an Nanomaterialien muss auch deren Verhalten in der Umwelt untersucht werden. Die Wirkung eines Nanomaterials wird u. a. von dessen geometrischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften bestimmt. Umgebungsparameter wie etwa pH-Wert oder Salzgehalt der Umgebung üben zusätzlich einen wichtigen Einfluss darauf aus, ob und wie Nanomaterialien sich auf ihre Umwelt auswirken. [14]

Viele ökotoxikologische Untersuchungen werden über kurze Testzeiträume durchgeführt. Die eingesetzten Konzentrationen der Nanomaterialien liegen in der Regel wesentlich höher als in der Umwelt zu erwarten. Beispielhafte Befunde lauten: [15][16][17]

Nano-Silber: Nanopartikel mit antimikrobieller Wirkung. Messungen in Gewässern direkt am Ablauf von bayerischen Kläranlagen ergaben Konzentrationen von meist weniger als 12 ng/l, in einigen Fällen bis zu 69 ng/l. Verdünnung im weiteren Flussverlauf stets auf unter 5 ng/l. Ökotoxische Wirkung auf aquatische Organismen ab einer vielfach höheren Konzentration.

Nano-Titandioxid: Bestandteil von Sonnencremes, wasserunlöslich. Konzentration von 4 µg/l im Kläranlagenablauf. Geringe Toxizität des Materials beobachtet.

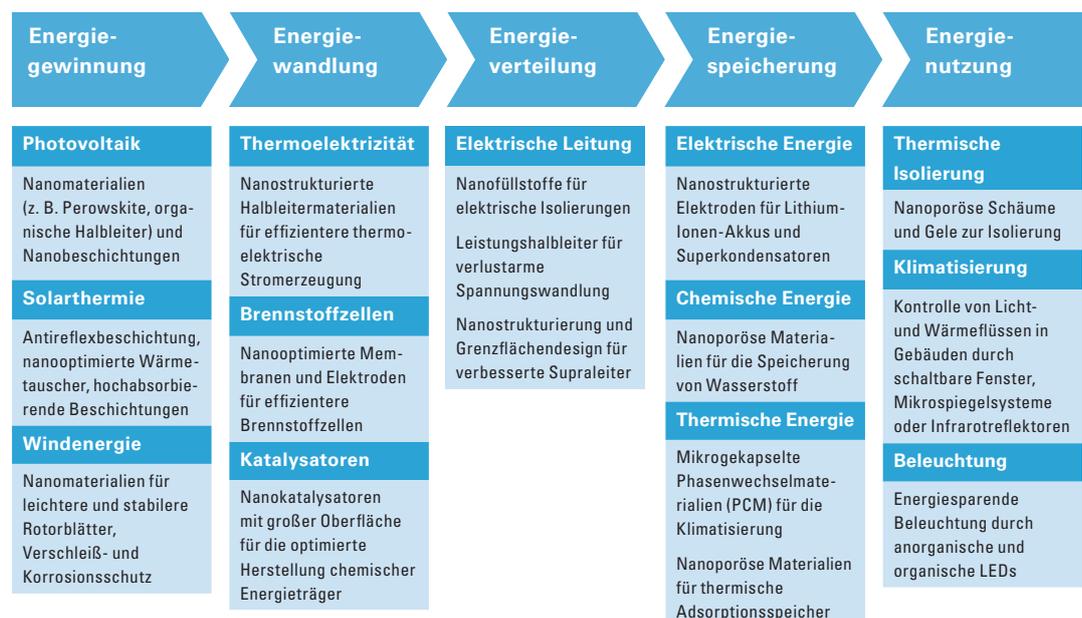
Aufgrund der bisherigen Datenlage kann das Risiko für die Umwelt durch Nanomaterialien jedoch noch nicht abschließend beurteilt werden.

Anwendungen im Klimaschutz

Klimaschutz bündelt Maßnahmen, die der vom Menschen verursachten globalen Erwärmung entgegenwirken sollen. Dabei gibt es zwei Hauptansätze: die Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen und die Erhaltung von Kohlenstoffsenken (z. B. Wälder). Die Nanotechnologie ermöglicht technische Innovationen und kann daher Beiträge zur Senkung des Treibhausgasausstoßes liefern. Kohlenstoffdioxid ist das wichtigste Treibhausgas und entsteht vorrangig bei der energetischen Nutzung fossiler Rohstoffe. Durch Anpassungen im Energiesektor bei der Gewinnung, Wandlung, Verteilung, Speicherung und Nutzung von Energie besteht ein großes Potenzial zur Einsparung von CO₂. Vielfach kann Nanotechnologie dabei helfen, diese Einsparpotenziale zu realisieren. Weitere Treibhausgase sind Methan, Lachgas, Schwefelhexafluorid (SF₆) sowie fluorierte Kohlenwasserstoffverbindungen. Einige davon entstehen auch auf natürlichem Weg. Da sie teilweise sehr viel stärker klimawirksam sind als Kohlenstoffdioxid, ist die Senkung des anthropogenen Teils der Emissionen in die Atmosphäre ebenfalls ein wichtiger Baustein für den Klimaschutz. Nanotechnologie kann für die Analytik und Sensorik dieser Treibhausgase eingesetzt werden. Als Bestandteil von Regelkreisen in technischen Prozessen können entsprechende Bauteile eine Rolle bei der Emissionsvermeidung spielen.

Die meisten Einsatzmöglichkeiten nanotechnologischer Innovationen gibt es im Energiesektor. In jeder Stufe der Wertschöpfungskette finden sich Anwendungen, die entweder bestehende Technologien effizienter machen oder neue, emissionsarme Technologien einführen.

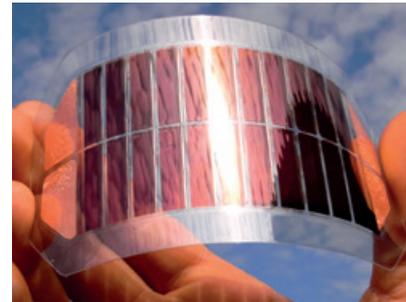
Beispiele potenzieller Anwendungen der Nanotechnologie im Energiesektor mit dem Ziel des Klimaschutzes [19]



Energiegewinnung

Auf der Stufe der Energiegewinnung gibt es im Bereich der erneuerbaren Energien gleich mehrere Anwendungsmöglichkeiten.

Photovoltaik: In diesem Anwendungsbereich gibt es mit der Erfindung der Farbstoffsolarzellen die erste Technik mit nanoskaligen Aktivmaterialien. Organische Farbstoffe werden dabei auf nanoskaligen Trägermaterialien angeordnet. Dies steigert die Lichtabsorption. Weitere nanoskalige Schichten sorgen für Schutz vor Umwelteinflüssen. Die mit den Farbstoffsolarzellen verwandten organischen Solarzellen bestehen aus sehr dünnen Schichten von Polymeren und Fullerenen. Die Zellen sind flexibel und kostengünstig herzustellen, haben allerdings auf Grund ihrer noch geringen Lebensdauer von etwa drei bis fünf Jahren und dem geringen Wirkungsgrad den Sprung in den Massenmarkt noch nicht geschafft.



Farbstoffsolarzellen

Windenergie: Für Windenergieanlagen sind verschiedene Einsatzmöglichkeiten für Nanomaterialien denkbar. So können Kohlenstoffnanoröhren (engl. *carbon nanotubes*, CNT) in den Kompositmaterialien für Rotorblätter für ein geringeres Gewicht bei erhöhter Stabilität sorgen. Dies ermöglicht größere Rotoren und damit eine höhere Leistung der Anlagen. Weiterhin werden Beschichtungen aus CNT oder Graphen erprobt, die die Eisbildung oder Verschmutzung auf den Rotorblättern reduzieren und so für eine gleichbleibende Aerodynamik sorgen sollen. Auch durch die Verringerung der mechanischen Reibung im Getriebe durch Nanobeschichtungen kann eine Steigerung des Wirkungsgrads erreicht werden. [18]

Energiewandlung

Auf der Stufe der Energiewandlung besitzen Brennstoffzellen ein großes Potenzial zur Einsparung von Treibhausgasen.

Brennstoffzellen: In ihnen wird chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt. Als Energieträger dienen beispielsweise Wasserstoff, Methan oder Methanol. Nanomaterialien können in der Brennstoffzelle als Elektroden- oder Membranmaterial zum Einsatz kommen und Leistung, Wirkungsgrad und Haltbarkeit erhöhen. Graphen, CNT oder nanoporöses Platin werden beispielsweise als Kathodenmaterial erforscht. [18]



Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle

Anwendungen im Klimaschutz

Energieverteilung

Der steigende Anteil von Strom aus regenerativen Quellen erfordert einen Umbau der Stromverteilungsnetzwerke. Dabei sollen hohe Leistungen bei geringen Verlusten übertragen werden können.

Supraleiter: Die verlustfreie Übertragung von Strom in Supraleitern kommt bisher nur in Nischenanwendungen zum Einsatz. Grund sind vor allem hohe Kosten für die Kühlung sowie die technisch anspruchsvolle Herstellung von Hochtemperatursupraleitern. Diese Klasse von Supraleitern besteht aus Metallkeramiken, die zunächst in Pulverform vorliegen und anschließend gesintert werden. Dabei spielt die richtige Größenverteilung der Partikel eine wichtige Rolle. Ein geeigneter Anteil an Nanopartikeln sorgt später für eine maximale Stromtragfähigkeit des Supraleiters.

Konventionelle Stromübertragung: Hier sind die Übertragungsverluste umso geringer, je höher die Spannung ist. Daher ist die Hochspannungstechnik besonders für den effizienten, verlustarmen Stromtransport über weite Entfernungen wichtig. Für den Einsatz höherer Übertragungsspannungen werden aber auch verbesserte Eigenschaften der Isolatoren benötigt. Durch Manipulation der Isolatormaterialien auf der Nanoskala kann beispielsweise eine höhere Durchbruchspannung erzielt werden. [19]

*Isolatoren in einem
Umspannwerk*



Energiespeicherung

Im Zuge der Energiewende wird der Ausbau von naturgemäß schwankenden erneuerbaren Energiequellen wie Wind- und Solarenergie vorangetrieben. Neben Optionen wie dem intelligenten Lastmanagement müssen künftig vermehrt auch Energiespeicher eingesetzt werden, um das Angebot mit der Nachfrage in Deckung zu bringen. Elektrische Energie muss jedoch zur Speicherung erst in andere Energieformen umgewandelt werden.

Lithium-Ionen-Batterien: Zu den chemischen Energiespeichern gehören u. a. Lithium-Ionen-Batterien, in denen eine Strukturierung der Elektroden auf Nanoskala zu einer erhöhten Speicherkapazität führt.

Superkondensatoren: Bei diesem Energiespeichertyp handelt es sich um eine Weiterentwicklung der Doppelschichtkondensatoren. Superkondensatoren besitzen zwar eine geringere Kapazität als Lithium-Ionen-Batterien, können aber sehr viel schneller und häufiger ge- und entladen werden. Auch hier erhöht der Einsatz von Nanomaterialien wie etwa CNT die elektrische Speicherfähigkeit. [20]

Energienutzung

Auf der Stufe der Energienutzung stehen vor allem Effizienzmaßnahmen im Vordergrund.

Beleuchtung: Im Bereich von Beleuchtung und Displays können organische Leuchtdioden (engl. *organic light emitting diode*, OLED) für Einsparungen sorgen. Sie bestehen aus nanostrukturierten organischen Halbleitern und können durch Druckverfahren kostengünstig produziert werden. Da OLED selbstleuchtend sind, benötigen sie keine Hintergrundbeleuchtung und erzielen hohe Kontrastwerte. [21]

Thermische Isolierung: Im Gebäudebereich werden Vakuumisulationspaneele aus nanoporösen Materialien als Fassadendämmung mit hoher Dämmwirkung eingesetzt. Die thermische Isolationswirkung basiert neben der Evakuierung des porösen Paneelmaterials auf der Unterdrückung der Konvektion des Restgases im Inneren der Paneele.



Lithium-Ionen-Akku



OLED-Display

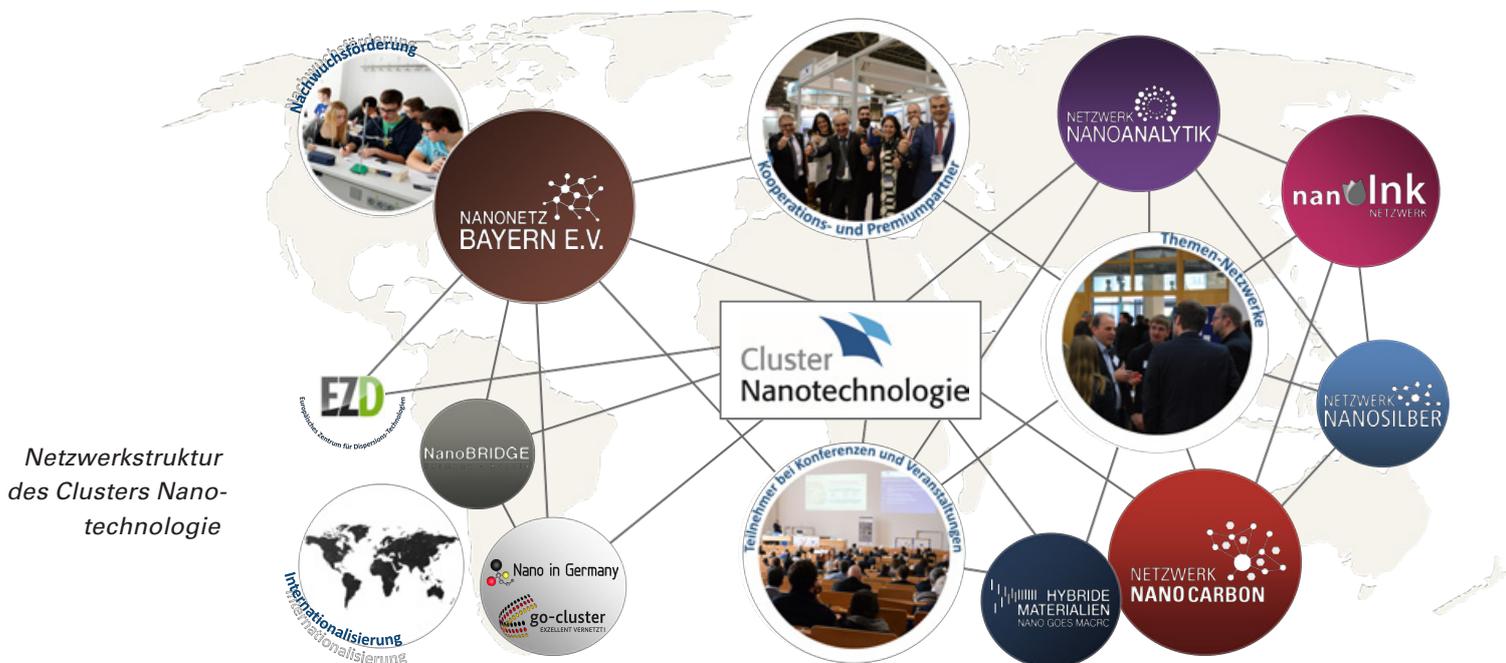
Beispiele aus der Praxis

Cluster Nanotechnologie, Würzburg

Nanotechnologie für den Klimaschutz

Durch die zunehmende industrielle Beherrschung der Nanoskaligkeit bei der Herstellung und Weiterverarbeitung von Materialien ergeben sich noch nie dagewesene Systemeigenschaften und Funktionalitäten. Dies führt zu völlig neuartigen und erheblich verbesserten Produkteigenschaften, die zudem einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten können.

Seit knapp 15 Jahren gestaltet der Cluster Nanotechnologie mit seinen Akteuren Projekte und Netzwerke für eine nachhaltige Zukunft. Hierfür liegt in vielen Bereichen der Schlüssel zur Innovation und damit zur Zukunftsgestaltung im Verständnis der Materialien, deren Verfügbarkeit und deren Verarbeitbarkeit. Nanotechnologie als Querschnittstechnologie spielt dabei eine herausragende Rolle und hat sich mittlerweile in vielen Industriebereichen etabliert. Der Cluster sorgt mit seinen Themen-Netzwerken NanoCarbon, NanoSilber, nanoInk, NanoAnalytik und Hybride Materialien für den Transfer von Wissen und Technologien. Durch die Unterstützung von Know-how-Transfer in der



regionalen, nationalen und internationalen Netzwerkarbeit nimmt der Cluster Nanotechnologie eine bedeutende Rolle in der Kommunikation und Informationsverarbeitung ein. Ziel ist es, gemeinsam Prozesse zu optimieren und neue Materialien zu entwickeln, die den Klimaschutz positiv unterstützen.

Der Einsatz von Nanotechnologie ist inzwischen häufig das Zünglein an der Waage, wenn es darum geht, durch exzellente Materialeigenschaften einen entscheidenden Vorteil gegenüber herkömmlichen Technologien herauszuarbeiten. So kommen beispielsweise Nanoschäume mit verbesserten Isolationseigenschaften bei der Gebäudedämmung zum Einsatz (vgl. va-Q-tec AG, Würzburg, S. 20). Mit Graphen, also einer einzigen Atomschicht Kohlenstoff, können extrem hohe Gasdichtigkeiten erreicht werden. Außerdem weist dieser nanoskalige Werkstoff eine sehr hohe Leitfähigkeit auf und ist mechanisch äußerst stabil. Verbunden mit dem Vorteil der großen Wirkoberfläche sind solche Materialien geradezu prädestiniert für den Einsatz in modernen Energiespeichern (vgl. SGL Carbon GmbH, Meitingen, S. 22), die für eine klimafreundliche Mobilität entscheidend sind. Völlig neue Wege für die Energiegewinnung eröffnet die gebäudeintegrierte organische Photovoltaik (vgl. ARMOR solar power films GmbH, Kitzingen, S. 24) und schon heute können durch reibungsreduzierende Schichten im Nanometerbereich bis zu 2 % CO₂ eingespart werden (vgl. Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach, S. 26).

Nanomaterialien werden auch weiterhin grundlegend neue Lösungsansätze und effizientere Methoden erlauben, um den Klimaschutz voranzutreiben.

Beispiele aus der Praxis

va-Q-tec AG, Würzburg

Nanotechnologie in der Fassadendämmung

Ein großer Teil des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen stehen in direktem Zusammenhang mit dem Gebäudebereich. Innovative Dämm Lösungen mit Vakuumisolationspaneelen (VIP) helfen bei der Einsparung von Heizenergie. Nanoporöse Materialien im Inneren der Paneele unterdrücken dabei die Wärmeleitung und verstärken so die Funktion des Dämmstoffs. Gleichzeitig benötigen VIP nur wenig Platz und machen sie besonders dort attraktiv, wo der Raum begrenzt ist.

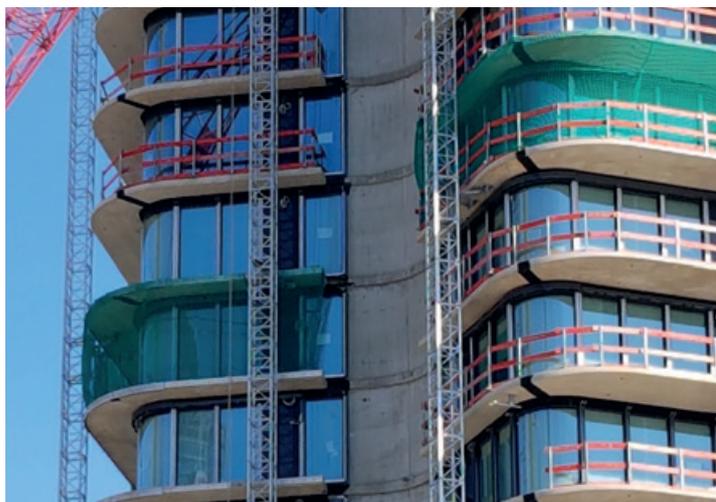
Mitte 2020 wurde am Rande des Europaviertels in Frankfurt am Main der Grand Tower Frankfurt fertiggestellt (unten). Das Objekt ist derzeit mit 180 Metern und 413 Wohnungen Deutschlands höchstes Wohngebäude. Die Fassade des Hochhauses wird im Bereich der Versorgungsschächte mit Vakuumisolationspaneelen von va-Q-tec gedämmt (rechts unten). Die nur 50 mm dicken VIP ersetzen etwa 250 mm dicke gewöhnliche Dämmplatten bei identischen Dämmwerten und geben pro Stockwerk knapp drei Quadratmeter Wohnfläche frei. Hochgerechnet auf alle 47 Etagen summiert sich dies auf 123 m², was der Wohnfläche von ein bis zwei weiteren Apartments entspricht.

*Visualisierung des
Grand Tower*



Das Kernmaterial von VIP kann z. B. aus verpresstem, mikro- bis nanoporösem Kieselsäurepulver bestehen. Dessen Festkörpergerüst ist stark verzweigt und besitzt eine geringe Dichte. Die in Festkörpern für die Wärmeübertragung verantwortliche Wärmeleitung durch Gitterschwingungen wird hier stark verringert, da der direkte Kontakt im Material oft unterbrochen ist. Der Pulverkern ist zudem mit einer Hochbarrierefolie gasdicht verpackt und evakuiert. Unter diesen Bedingungen verhindern Nanoporen effektiv die Bewegung der verbliebenen Luftmoleküle, was auch bei mäßigem Vakuum zu geringem Wärmetransport durch Gaswärmeleitung führt. So werden mit der Wärmeleitung über den nanoporösen Festkern und dem Restgas zwei der drei wesentlichen Mechanismen der Wärmeübertragung abgeschwächt.

Effiziente Fassadendämmung auf Basis von Nanomaterialien leistet einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung klimaschädlicher Treibhausgase im Gebäudesektor, indem sie Wärmeverluste minimieren und dadurch den Energieverbrauch senken.



*Fassadenmontage
am Grand Tower*

Beispiele aus der Praxis

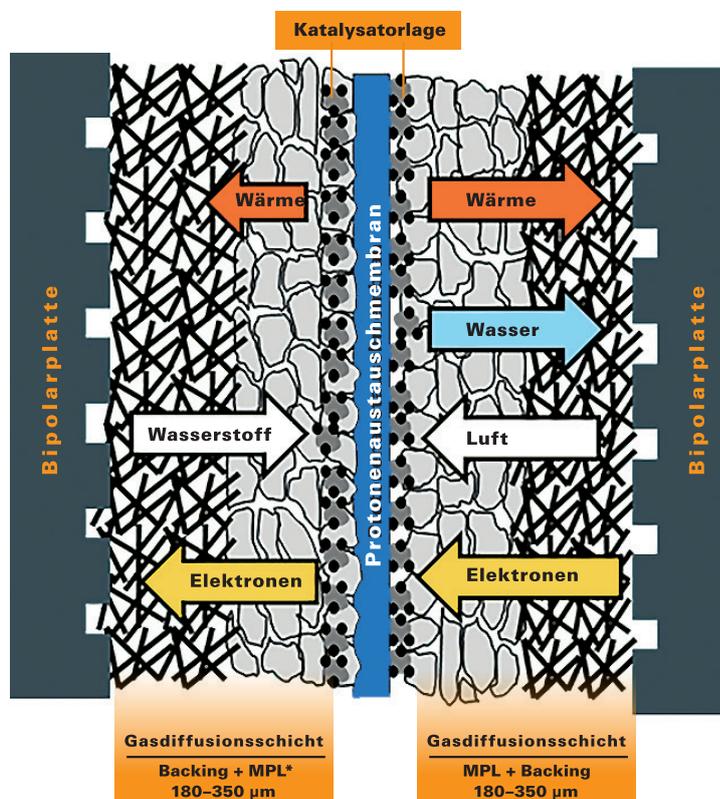
SGL Carbon GmbH, Meitingen

Nanomaterialien für eine klimafreundliche Mobilität

Mobilität ist ein Grundbedürfnis einer modernen Gesellschaft. Unsere derzeitige Mobilität auf Basis fossiler Brennstoffe trägt jedoch wesentlich zur Klima- und Umweltbelastung bei. Ein wichtiger Baustein, den CO₂-Ausstoß sowie die Luftbelastung mit schädlichen NO_x-Gasen zu reduzieren, ist die E-Mobilität in Kombination mit regenerativer Energieerzeugung. Eine Schlüsseltechnologie dafür ist die Brennstoffzelle. Für deren Weiterentwicklung haben Nanomaterialien eine wichtige Bedeutung.

Die Abbildung unten zeigt die Zelle eines Brennstoffzellenstapels. In der Brennstoffzelle wird Wasserstoff und Luftsauerstoff mit Hilfe von Katalysatoren kontrolliert in elektrische Energie und Wasserdampf umgewandelt. Wesentliche Vorteile der E-Mobilität auf Basis der Brennstoffzelle sind die hohe Reichweite und die von Verbrennungsmotoren gewohnten kurzen Tankzeiten. Neben dem Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft muss weiter an der Effizienz des

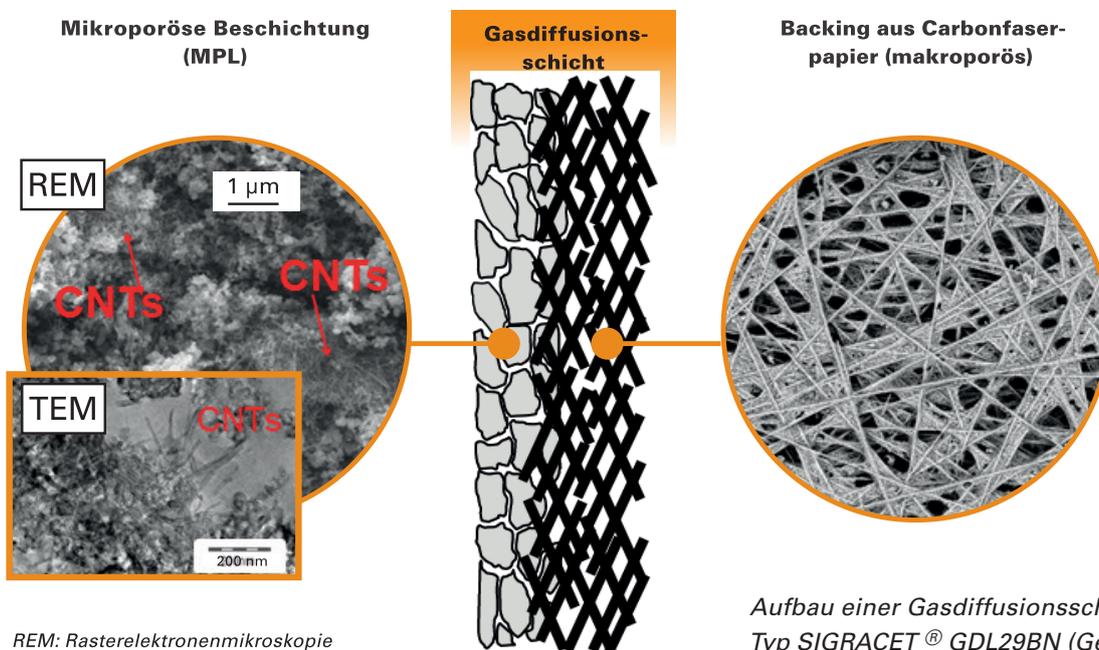
Schematischer Aufbau einer Brennstoffzelle (Einzeller) mit Bipolarplatten, Gasdiffusionsschichten, Katalysator und Protonenaustauschmembran



* MPL: Mikroporöse Lage

Materialeinsatzes im Brennstoffzellenstapel gearbeitet werden. Mit Hilfe der Nanotechnologie kann der Platineinsatz im Katalysator reduziert und die Stromdichte im Stapel erhöht werden. Ermöglicht wird dies durch den Einsatz von Kohlenstoffnanoröhren (engl. *carbon nanotubes*, CNT) in der mikroporösen Schicht der sogenannten Gasdiffusionsschichten (unten). Aufgrund der hervorragenden elektrischen und thermischen Leitfähigkeit der CNT können die Spannungsverluste reduziert und die Temperaturkontrolle verbessert werden. Zusätzliche positive Nebeneffekte auf das Wassermanagement führen zu einer höheren Nutzung des Katalysators.

Nanomaterialien steigern die Leistung von Brennstoffzellen bei verringertem Materialeinsatz. Sie können daher einen wesentlichen Beitrag zu einer klimafreundlichen Mobilität leisten.



REM: Rasterelektronenmikroskopie
TEM: Transmissionselektronenmikroskopie

Aufbau einer Gasdiffusionsschicht vom Typ SIGRACET® GDL29BN (Gesamtdicke: 220 µm und Flächengewicht: 65 g/m²) bestehend aus einem Carbonfaserpapier-Backing und einer mit CNT versetzten mikroporösen Beschichtung (MPL)

Beispiele aus der Praxis

ARMOR solar power films GmbH, Kitzingen

Lichtaktive Nanoschichten zur effizienten Nutzung von Sonnenenergie

Regenerative Energietechnologien, wie z. B. die Photovoltaik, helfen dem Klimaschutz, indem sie fossile Energieträger ersetzen, und sind somit ein wichtiger Baustein der Energiewende. Solarzellen aus organischen Halbleitern versprechen neue Einsatzgebiete durch kostengünstige, schnelle und energiesparende Herstellungsverfahren sowie flexible Trägermaterialien. Für die Herstellung effizienter Zellen ist eine gezielte Nanostrukturierung der organischen Halbleiterschichten nötig.

Organische Photovoltaik (OPV) ist eine Dünnschichttechnologie, die einen Rolle-zu-Rolle (R2R) Druckprozess nutzt. Dabei werden elektronische Bauteile auf einer flexiblen Folie kostengünstig, energiesparend und schnell gedruckt. Nanotechnologie findet sich bei der organischen Photovoltaik in der aktiven Schicht. Bei der von ARMOR solar power films eingesetzten Technologie besteht diese aus einer Mischung lichtaktiver Polymere und Kohlenstoffverbindungen. Nur in unmittelbarer Nähe zur Grenzfläche (~10 – 20 nm) der beiden Komponenten

*Ansicht des
Aufzugsschachts mit
OPV-Integration*



können Ladungsträger effizient getrennt und aus der Solarzelle geleitet werden. Aus diesem Grund sind fein verteilte innere Grenzschichten mit großer Oberfläche vorteilhaft. Durch Maßnahmen zur Nanostrukturierung kann dies erreicht werden. Zukünftig ist eine Herstellung der Komponenten aus nachwachsenden Rohstoffen geplant. Im Fertigungsprozess kommen keine umweltbelastenden Materialien zum Einsatz.

Ein gewerblich genutzter Altbau wurde mit einem externen Aufzugsschacht ausgestattet (links unten). Für die Abdeckung der Aufzugs konstruktion wurde eine Glasfassade mit 91 integrierten OPV-Modulen („BI-Powersol“) speziell angefertigt (unten). Der von den OPV-Modulen in der Fassade erzeugte Strom wird zum Betrieb der Belüftung der Aufzugs konstruktion verwendet.

Organische Photovoltaik kann künftig einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Nanostrukturierte Materialien sorgen dabei für eine erhöhte Effizienz der Solarzellen.



*Glasfassade
mit integrierten
OPV-Modulen*

Beispiele aus der Praxis

Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach

Nanostrukturierte Beschichtungen leisten maßgeblichen Beitrag zur Senkung von CO₂-Emissionen

Energieeffizienz in Form von Reibungsreduzierung durch moderne Oberflächentechnik leistet einen wichtigen Beitrag zur Senkung von CO₂-Emissionen in der Automobilindustrie. Vor allem gesetzliche Vorgaben, wie die Regulierung des Flottenverbrauchs bzw. deren Grenzwerte für CO₂-Emissionen durch die Europäische Union, sind treibende Kraft zur Steigerung der Energieeffizienz von Verbrennungsmotoren. Vor diesem Hintergrund spielt die Optimierung der Oberflächen von Bauteilen, an denen es im Gleitkontakt zu Reibungsverlusten kommt, eine immer wichtigere Rolle. Hierbei kommen verstärkt sogenannte tribologisch wirksame Schichtsysteme zum Einsatz. Dies ist zum Beispiel bei hochbeanspruchten Komponenten im Ventiltrieb von großer Bedeutung (unten).

Zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß werden bei Schaeffler zunehmend Dünnschichten der Familie Triondur[®] eingesetzt, welche mittels physikalischer Gasphasenabscheidung (PVD) oder plasmaunterstützter chemischer

Unterschiedliche Ventiltriebkomponenten:



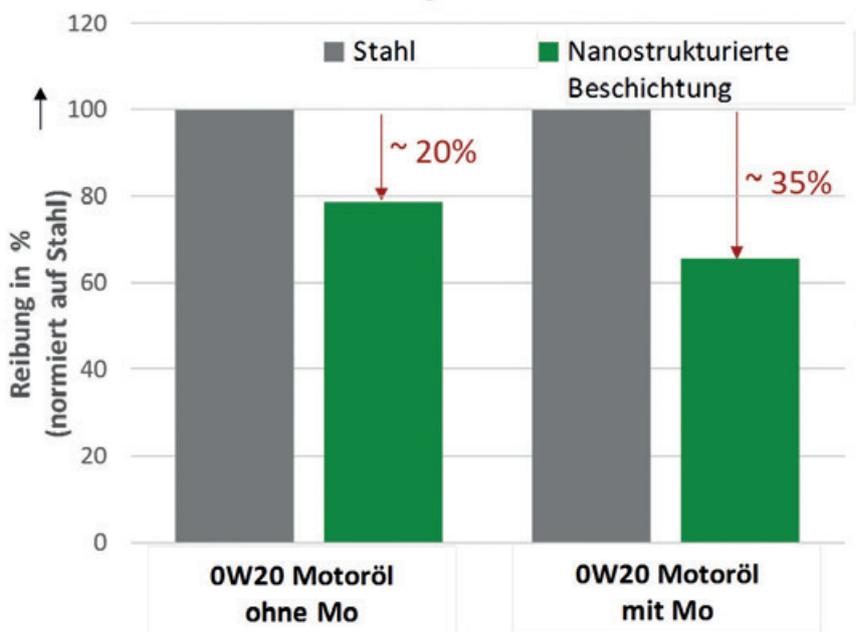
*Mechanischer
Tassenstößel*



*Rollenschlepphebel
mit hydraulischem
Ventilspielausgleich*

Gasphasenabscheidung (PACVD) als dünne Schichten hergestellt werden. Neu ist dabei beispielsweise eine nitridische Nanoschichtstruktur. Diese bietet im Vergleich zu konventionellen nitridischen Schichten hohe Härten sowie eine sehr hohe Temperaturstabilität von bis zu 600° C. Zudem weist dieses System aufgrund seiner Nanostruktur und der Zusammensetzung sehr niedrige Reibwerte und eine sehr gute Verschleißbeständigkeit auch bei hoher mechanischer Beanspruchung auf. In Kombination mit speziellen Schmierstoffen mit Molybdänzusatz kann das nanostrukturierte System darüber hinaus auch aktiv triboologisch wirksame Oberflächen ausbilden, welche zu einer weiteren deutlichen Reduktion der Reibung führen (unten).

Somit lassen sich bis zu 35 % Reibungsreduzierung alleine in diesem Anwendungsbereich erzielen. Dieser Effekt liefert einen wichtigen Beitrag zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emission in der Automobilindustrie.



Reibungsreduzierung in % von unbeschichteten und beschichteten Versuchsteilen und Ölen mit/ohne Molybdän-Additiven

Fullerene

Modifikation des Elements Kohlenstoff: Hohle, geschlossene Moleküle aus Kohlenstoffatomen, angeordnet in Fünf- und Sechsecken (vergleichbar mit einem Fußball).

Graphen

Modifikation des Elements Kohlenstoff: Einlagige Kohlenstoffschicht mit zweidimensionaler bienenwabenartiger Struktur („zweidimensionaler Graphit“).

Kohlenstoffnanoröhren (CNT)

Kohlenstoffnanoröhren (engl. *carbon nanotubes*, CNT) sind zylindrische Moleküle, die aus gerolltem Graphen bestehen. Sie können ein- oder mehrwandig vorliegen. Meist beträgt ihr Durchmesser nur wenige Nanometer, sie können aber in Einzelfällen bis zu mehreren Millimetern lang sein.

Kolloid

Fein verteilte Teilchen oder Tröpfchen in einem Dispersionsmedium.

Nanoporöse Materialien

Materialien bestehend aus einem organischen oder anorganischen Grundgerüst. Dazwischen besteht eine poröse Struktur mit Porengrößen im Nanobereich.

Nitride

Als Nitride werden bestimmte chemische Verbindungen des Stickstoffs (lat. *Nitrogenium*) bezeichnet, in denen dem chemischen Element Stickstoff formal eine dreifach negative Ladung zukommt. Die meisten technisch genutzten Nitride werden zur Oberflächenvergütung eingesetzt.

Rasterelektronenmikroskopie / Transmissionselektronenmikroskopie

Bei der Rasterelektronenmikroskopie (REM) bzw. Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) handelt es sich um Spezialformen der Elektronenmikroskopie, bei denen ein Elektronenstrahl über eine Probe geführt („gerastert“, REM) bzw. eine Probe durchstrahlt (TEM) wird. Die Wechselwirkungen zwischen den Elektronen und dem Objekt wird zur Erzeugung eines Bildes genutzt.

Rastersondenmikroskopie

Das Bild entsteht nicht durch eine optische Abbildung, sondern durch Aufnehmen der Wechselwirkung zwischen einer Probe und einer Sonde. Nachdem die Probe Punkt für Punkt abgetastet wurde, werden die einzelnen Aufnahmen digital zu einem Bild zusammengefügt.

Sintern

Verfahren zur Herstellung oder Veränderung von Werkstoffen. Pulverförmige bis feinkörnige keramische oder metallische Stoffe werden, oft unter erhöhtem Druck, durch Erhitzen bis unterhalb des Schmelzpunktes der Hauptausgangsstoffe unter Beibehaltung der Form verfestigt („zusammengebacken“).

Sputtern

Herauslösen von Atomen aus einem Festkörper durch Beschuss mit energiereichen Ionen. Die herausgelösten Atome gehen in die Gasphase über. Technische Bedeutung hat das Verfahren bei einem Teilschritt einer speziellen Oberflächenbeschichtungstechnik.

Superkondensator

Bauteil zur Speicherung elektrischer Energie. Die Speicherung erfolgt sowohl elektrostatisch in einer Doppelschichtkapazität als auch elektrochemisch in einer Pseudokapazität.

Supraleiter

Unterhalb einer bestimmten Sprungtemperatur fällt der elektrische Widerstand des Materials auf null. Hochtemperatursupraleiter können bereits mit flüssigem Stickstoff (-196° C) gekühlt werden.

Tribologie

Wissenschaft von Reibung, Verschleiß und Schmierung gegeneinander bewegter Oberflächen. Als tribologische Systeme werden technologische Systeme bezeichnet, bei denen Reibungsvorgänge optimiert werden.

Quellenverzeichnis

- [1] European Union Observatory for Nanomaterials (EUON) (2020):
Nanomaterials
Internet: <https://euon.echa.europa.eu/general-information>
Zuletzt abgerufen: 01.11.2020
- [2] Internationale Organisation für Normung (ISO) (Hrsg.) (2015):
Technische Spezifikation ISO/TS 80004-1:2015:
Nanotechnologies – Vocabulary – Part 1
Internet: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:80004:-2:ed-1:v1:en>
- [3] Friedrichs, S.; van Beuzekom, B. (2018):
Revised proposal for the revision of the statistical definitions of biotechnology and nanotechnology, OECD Science, Technology and Industry Working Papers, No. 2018/01, OECD Publishing, Paris
Internet: <https://doi.org/10.1787/085e0151-en>
Zuletzt abgerufen: 01.11.2020
- [4] **Empfehlung der Kommission vom 18. Oktober 2011 zur Definition von Nanomaterialien (2011/696/EU)**
Amtsblatt der Europäischen Union, L 275/38
- [5] **VERORDNUNG (EU) 2018/1881 DER KOMMISSION vom 3. Dezember 2018 zur Änderung der Anhänge I, III, VI, VII, VIII, IX, X, XI und XII der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH) zwecks Berücksichtigung der Nanoformen von Stoffen**
Amtsblatt der Europäischen Union, L 308/1
- [6] **VERORDNUNG (EU) 2015/2283 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 25. November 2015 über neuartige Lebensmittel, zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 1169/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 258/97 des Europäischen Parlaments und des Rates und der Verordnung (EG) Nr. 1852/2001 der Kommission**
Amtsblatt der Europäischen Union, L 327/1

- [7] **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
- [8] **VERORDNUNG (EU) Nr. 528/2012 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 22. Mai 2012 über die Bereitstellung auf dem Markt und die Verwendung von Biozidprodukten**
Amtsblatt der Europäischen Union, L 167/1
- [9] Nanowerk LLC:
Nanoparticle production – How nanoparticles are made
Internet: https://www.nanowerk.com/how_nanoparticles_are_made.php
Zuletzt abgerufen: 01.11.2020
- [10] Fahrner, W. (Hrsg.) (2017):
Nanotechnologie und Nanoprozesse
Springer Vieweg, Berlin, 2. Auflage, ISBN 978-3-662-48907-9
- [11] Murty, B. S.; Shankar, P.; Raj, B.; Rath, B. B.; Murday, J. (Hrsg.) (2013):
Textbook of Nanoscience and Nanotechnology
Universities Press, e-ISBN 978-3-642-28030-6
- [12] Bhushan, B. (Hrsg.) (2017):
Springer Handbook of Nanotechnology
Springer Nature, Berlin, 4. Auflage, ISBN 978-3-662-54357-3
- [13] Sun, T. Y.; Gottschalk, F.; Hungerbühler, K.; Nowack, B. (2014):
Comprehensive probabilistic modelling of environmental emissions of engineered nanomaterials, Environmental Pollution
Volume 185, pp. 69-76, DOI: 10.1016/j.envpol.2013.10.004:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749113005241?via%3Dihub>
Zuletzt abgerufen: 01.11.2020

- [14] Schwirn, K.; Völker, D. (2016):
Nanomaterialien in der Umwelt – Aktueller Stand der Wissenschaft und Regulierungen zur Chemikaliensicherheit. Empfehlungen des Umweltbundesamtes.
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/>
- [15] Maier, M.; Wegenke, M. (2014):
Umweltaspekte der Nanotechnologie
Bayerisches Landesamt für Umwelt
Internet: https://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/nanopartikel/index.htm
Zuletzt abgerufen: 01.11.2020
- [16] Wimmer, A.; Schuster, M.:
Den Silbernanopartikeln auf der Spur
GIT-Laborzeitschrift 11/2016, Seiten 26-29
- [17] Wimmer, A.; Markus, A. A.; Schuster, M. (2019):
Silver Nanoparticle Levels in River Water. Real Environmental Measurements and Modeling Approaches. A Comparative Study.
Environ. Sci. Technol. Lett. 2019, 6, 6, pp. 353-358
- [18] Liesegang, C.; Dubbert, W.; Schwirn, K.; Völker, D.; Saleka, H.; Werlein, M.; Nunweiler, E. (2016):
Einsatz von Nanomaterialien in der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/>

- [19] Luther, W.; Eickenbusch, H.; Kaiser, O. S.; Brand, L. (2015):
Einsatz von Nanotechnologien im Energiesektor
Band 9 der Schriftenreihe der Technologieline Hessen-Nanotech
des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung. Hes-
sen Trade & Invest GmbH, Wiesbaden
- [20] Dubbert, W.; Schwirn, K.; Völker, D.; Apel, P. (2015):
Einsatz von Nanomaterialien in der Energiespeicherung
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/>
- [21] Apel, P.; Dubbert, W.; Mordziol, C.; Oehme, I.; Schwirn, K.; Völker, D. (2013):
**Nanobasierte Beleuchtungssysteme: Organische Licht emittierende
Diode (OLED), Datenblatt Nanoprodukte**
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/>

Weitere Fachinformationen

Nanowissen Bayern:

Informationsportal des Bayerischen Landesamts für
Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL)
rund um das Thema Nanotechnologie, Nanomaterialien und
den sicheren Umgang mit Nanomaterialien
www.nanowissen.bayern.de

Bayerisches Landesamt für Umwelt

<https://www.lfu.bayern.de/index.htm>,
https://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/nanopartikel/index.htm

Umweltbundesamt

www.umweltbundesamt.de/

Cluster Nanotechnologie

www.nanoinitiative-bayern.de/

DaNa2.0 – Daten und Wissen zu Nanomaterialien

Datenbank und Informationsportal zu Nanomaterialien und
deren Auswirkungen auf den Menschen und die Umwelt.
Anbieter ist das Karlsruher Institut für Technologie
zusammen mit DECHEMA e. V.
www.nanopartikel.info.

Herausgeber: Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
Rosenkavalierplatz 2
81925 München

Internet: www.stmuv.bayern.de

E-Mail: poststelle@stmuv.bayern.de

Autoren: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Mayer und Dipl.-Ing. Wolfgang Krätschmer,
Hochschule für angewandte Wissenschaften Kempten

Bildnachweis: Titelseite: panthermedia, Rost9
S.6–14: Hochschule für angewandte Wissenschaften Kempten
S.15–17: Panthermedia: Ludya, F-Racer, Peter38, malpetr; S.18: StMUV, Dr.-Ing. P. Grambow;
S.20–21: RIVA GmbH Engineering; S.22–23: SGL Carbon GmbH; S.24–25: ARMOR solar power
films GmbH; S.26–27: Schaeffler Technologies AG & Co. KG.

Druck: StMUV

Gestaltung: StMUV, PKG

Stand: November 2020

© StMUV, alle Rechte vorbehalten

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt. Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN|DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.