

# Synthetische Nanomaterialien im Abfall





# Synthetische Nanomaterialien im Abfall



<b>HERAUSGEBER</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg 76231 Karlsruhe, Postfach 100163 <a href="http://www.lubw.de">www.lubw.de</a>
<b>BEARBEITUNG</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Sabina Drechsler Eine Zusammenstellung auf Grundlage einer Studienarbeit von Iryna Lautermilch, DHBW
<b>REDAKTION</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Arbeitsgemeinschaft Nanomaterialien (ARGE Nano) Leitung Johannes Schanz
<b>BEZUG</b>	Download unter <a href="http://www.lubw.de">www.lubw.de</a>
<b>STAND</b>	März 2018
<b>BILDNACHWEIS TITELBILD</b>	Nano-Zinkoxid (Quelle: BASF)

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>7</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>9</b>
<b>2 CHARAKTERISIERUNG SYNTHETISCHER NANOMATERIALIEN</b>	<b>10</b>
2.1 Eigenschaften von Nanoteilchen	11
2.2 Definition Nanoabfall und nanomaterialhaltige Abfälle	11
2.3 Kohlenstoffnanoröhren (Carbon Nanotubes, CNT)	11
2.4 Fullerene	12
2.5 Carbon Black (CB), Industrieruß	12
2.6 Nano-Siliziumdioxid (Nano-SiO <sub>2</sub> )	13
2.7 Nano-Silber (Nano-Ag)	13
2.8 Nano-Titandioxid (Nano-TiO <sub>2</sub> )	13
2.9 Nano-Titannitrid (Nano-TiN)	14
2.10 Nano-Zinkoxid (Nano-ZnO)	14
2.11 Nano-Cerioxid (Nano-CeO <sub>2</sub> )	14
2.12 Nano-Aluminiumoxid (Nano-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	14
2.13 Nano-Ton	15
2.14 Quantum-Dots	15
<b>3 ANWENDUNGEN SYNTHETISCHER NANOMATERIALIEN</b>	<b>17</b>
<b>4 NANOMATERIALIEN IM ABFALL</b>	<b>21</b>
4.1 Materialflussanalyse synthetischer Nanomaterialien in Konsumgütern	22
4.2 Stoffliche Verwertung, Recycling von Siedlungs- und Gewerbeabfällen	24
4.3 Biologische Verwertung	24
4.4 Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm	25
4.5 Energetische Verwertung und thermische Beseitigung	25
4.6 Mechanisch-biologische Behandlungsanlage (MBA)	26
<b>5 AUSBLICK</b>	<b>27</b>
<b>6 LITERATUR UND QUELLEN</b>	<b>28</b>



# Zusammenfassung

Die Nanotechnologie hat sich zu einer Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts entwickelt. Eine Vielzahl unterschiedlicher nanomaterialhaltiger Produkte sind Teil unseres Alltags geworden, als UV-Schutz in Sonnencremes oder Lacken, als Beschichtung von Textilien, in Bildschirmen zur Erzeugung von brillanteren Farben, verbunden mit einem geringeren Stromverbrauch, um nur einige wenige Beispiele zu nennen. Allerdings liegt europaweit keine Kennzeichnungspflicht nanomaterialhaltiger Produkte vor.

Diese nanomaterialhaltigen Produkte werden, entweder durch ihre Verwendung oder am Ende ihrer Lebenszeit, zu Abfall. Ziel dieses Berichtes ist es, einen Überblick zu geben, in wie weit während der unterschiedlichen Abfallbehandlungsverfahren Risiken im Umgang mit nanomaterialhaltigen Abfällen zu erwarten sind.

Eine Stoffstromanalyse für Nano-Titandioxid in Sonnencremes zeigt diffuse Emissionsquellen in die Umwelt auf. Der Teil der nanomaterialhaltigen Sonnencreme, der mit der Verpackung in den Stoffkreislauf der Abfallbehandlung eingetragen wird, landet zuverlässig über die Abfallverbrennung in den Filtern der Rauchgasreinigung oder in der Verbrennungsschlacke und wird dem Stoffkreislauf durch Deponierung entzogen. Ein Teil der nanomaterialhaltigen Sonnencreme landet über das Abwasser in der Kläranlage und wird zu mehr als 95 % im Klärschlamm zurückgehalten. Da der Klärschlamm in Baden-Württemberg zu mehr als 90 % verbrannt wird, ist auch dieser Stoffstrom am Ende der Abfallbehandlung aus dem Stoffkreislauf ausgeschleust.

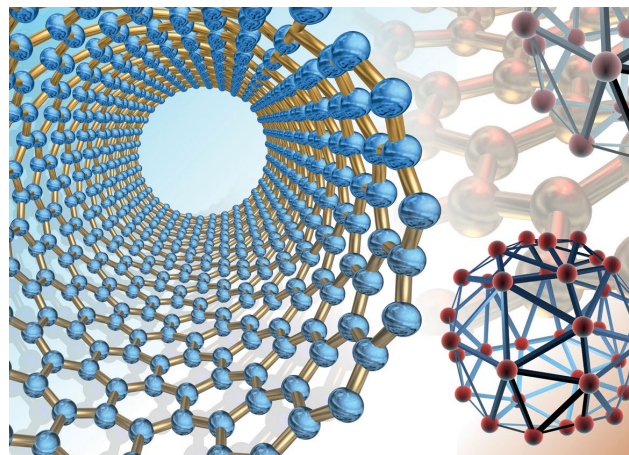


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Carbon Nanotubes [Promotive/Shutterstock.com]

Eine weitere Stoffstromanalyse zu nanomaterialhaltigem Silber in Lacken lässt keine diffusen Emissionsquellen entlang der unterschiedlichen Abfallbehandlungspfade erkennen. Das Nano-Silber ist am Ende der Abfallbehandlungskaskade ebenfalls in den Filterstäuben oder der Verbrennungsschlacke enthalten.

Auf Bundesebene wurde die Wissenslücke zur Freisetzung von Nanomaterialien aus Abfällen und der sich daraus möglicherweise ergebenden Auswirkungen auf die Umwelt erkannt und in der gemeinsamen Nano-Forschungsstrategie der Bundesbehörden aufgegriffen. Diese Nano-Strategie ist Teil des Aktionsplans Nanotechnologie 2020, der 2016 vom Bundeskabinett verabschiedet wurde. Mit weiteren Forschungsergebnissen zu Nanomaterialien im Abfall ist in den kommenden Jahren zu rechnen.





# 1 Einleitung

„ ... jedes Material, das man in den Nanomaßstab bringt, besitzt einzigartige Eigenschaften – sowohl physikalisch, chemisch, morphologisch wie auch biologisch“ [1].

Weltweit wird im nanoskaligen Bereich geforscht. Die Nanotechnologie gilt als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts und bietet ungeahnte Möglichkeiten in der Anwendung von synthetisch hergestellten Nanomaterialien. Beispielsweise lässt sich durch Ummantelung von Sand mit speziellen hydrophoben Nanomaterialien Brems sand für Züge und Straßenbahnen herstellen, der nicht mehr nass wird und dadurch seine Brems eigenschaften wetterunabhängig beibehält. Heute existieren bereits weltweit mehr als 1 300 Produkte, die synthetische Nanomaterialien enthalten [2]. Diese Zahl steigt von Jahr zu Jahr und damit die Menge an zu erwartenden nanomaterialhaltigen Abfällen.

Eine Vielzahl unterschiedlicher wissenschaftlicher Einrichtungen arbeitet an der Bewertung möglicher Herausforderungen und Risiken synthetischer nanomaterialhaltiger Abfälle im Rahmen der Entsorgung. Diese Untersuchungen zielen darauf ab, belastbare Daten zu liefern, ob und wenn ja, welche Risiken während der Abfallentsorgung für die Umwelt entstehen können.



Abbildung 2: Siedlungsabfall mit Schaufelbagger [LUBW]

Die vorliegende Literaturstudie ist ein weiterer Baustein der Publikationsreihe der LUBW zu Nanomaterialien. Inhaltlich wird darin der Wissensstand über synthetische Nanomaterialien im Abfall kurz skizziert, Hinweise auf Herausforderungen für die unterschiedlichen kreislaufwirtschaftlichen Prozesse gegeben sowie auf noch bestehende Wissenslücken und den Stand der derzeitigen Abfallgesetzgebung in Bezug auf synthetische Nanomaterialien hingewiesen.

## 2 Charakterisierung synthetischer Nanomaterialien

Die verschiedenen Definitionen für Nanomaterialien wurden bereits in der Veröffentlichung der LUBW „Nanomaterialien – Charakterisierung und Messung“ ausführlich beschrieben [3].

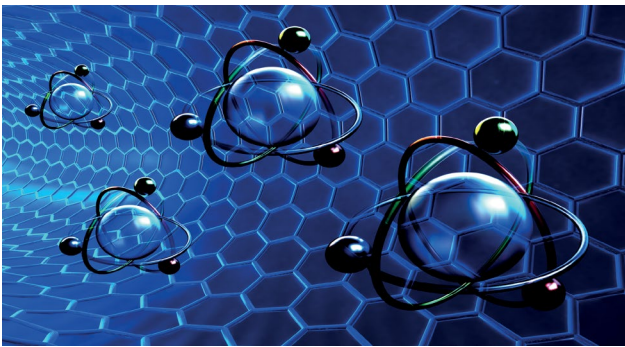


Abbildung 3: Nanopartikel-Strukturen [cybrain/Shutterstock.com]

So schlägt das ISO Technical Committee 229 eine Unterteilung von Nanomaterialien in Nanoobjekte und nanostrukturiertes Material (Abbildung 4) mit folgenden Definitionen vor:

„Nanoobjekte sind Materialien, die entweder in ein, zwei oder drei äußeren Dimensionen nanoskalig (näherungsweise 1 nm bis 100 nm) sind. Typische Vertreter sind Nanopartikel, Nanofasern und Nanoplättchen. Nanoobjekte kommen dabei häufig in Gruppen vor. Nanostrukturierte Materialien haben eine innere nanoskalige Struktur und treten in der Regel als Verbundsysteme von Nanoobjekten auf (auch > 100 nm)“ [4].

Die EU-Kommission weitet den Begriff auf ein Gemisch aus, in dem mindestens 50 % der Partikel in der Anzahlgrößenverteilung ein oder mehrere Außenmaße im Bereich von 1 nm bis 100 nm aufweisen. Die Definition gilt gleichermaßen für synthetische und natürlich entstandene Nanomaterialien. Davon abweichend gelten auch Fullereene, Graphenflocken und einwandige Kohlenstoff-Nanoröhren mit einem oder mehreren Außenmaßen kleiner als 1 nm als synthetische Nanomaterialien („engineered nanomaterials“, ENM) [5].

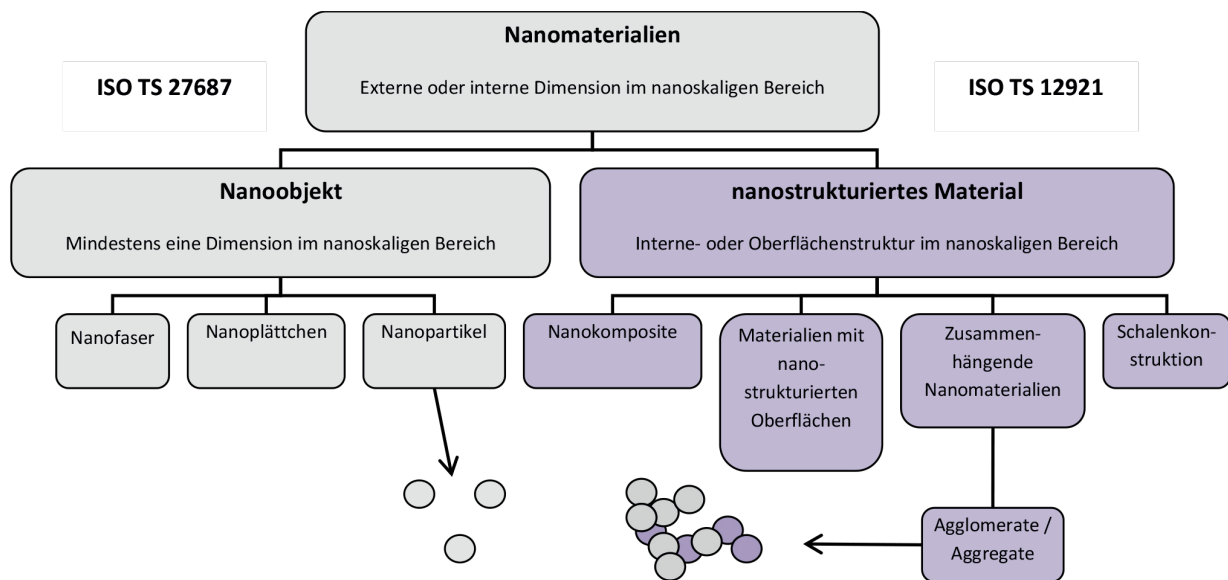


Abbildung 4: Definition von Nanomaterialien in Anlehnung an ISO Technical Committee 229 [6]

## 2.1 Eigenschaften von Nanoteilchen

Wie eingangs erwähnt, besitzen Nanoteilchen sowohl chemische als auch physikalische Eigenschaften, die sich deutlich von denen der größeren Teilchen desselben Stoffes unterscheiden. Dies sind exemplarisch:

- Eine höhere chemische Reaktivität, bedingt durch die größere Teilchenoberfläche im Verhältnis zum Volumen des Teilchens
- Eine Zunahme des Einflusses von Oberflächenkräften (z. B. van-der-Waals-Kraft) und eine Abnahme des Einflusses von Massenkraften (Gewichtskraft)
- Stärkerer Einfluss thermodynamischer Effekte (z. B. Brownsche Molekularbewegung)
- Spezielle optische Eigenschaften

## 2.2 Definition Nanoabfall und nanomaterialhaltige Abfälle

Man unterscheidet zwei Arten von Abfällen, die synthetische Nanomaterialien enthalten. Dies sind einerseits Abfälle aus der Produktion und Verarbeitung von synthetischen Nanomaterialien in industriellen und gewerblichen Prozessen. Sie werden als „Nanoabfall“ bezeichnet. Die Zusammensetzung ist dem Abfallerzeuger bekannt. Abfälle von Produkten (Stoffgemische und Erzeugnisse im Sinne des Chemikalienrechts), die synthetische Nanomaterialien enthalten, werden als „nanomaterialhaltige Abfälle“ bezeichnet [6]. Da keine Kennzeichnungs- oder Registrierungspflicht für den Hersteller besteht, ist in der Regel nicht erkennbar, welche Produkte synthetische Nanomaterialien enthalten und in welchen Mengen.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) informiert in seinem Bericht „Winzige Riesen in unserem Alltag“ ausführlich über die Chancen und Risiken der synthetischen Nanomaterialien [7].

Die Nanotechnologien gelten als Innovationsmotor nicht nur für die deutsche Wirtschaft, sondern weltweit. Zum besseren Verständnis dieses großen Potenzials werden die unterschiedlichen synthetischen Nanomaterialien in den folgenden Kapiteln kurz charakterisiert.

## 2.3 Kohlenstoffnanoröhren (Carbon Nanotubes, CNT)

Die Carbon Nanotubes (CNT) stellen die bedeutendste Gruppe innerhalb der synthetischen Nanomaterialien dar und bieten ein breites Eigenschafts- und Anwendungsspektrum. Die Zugfestigkeit der CNT ist 50-fach höher als die von Stahl. Dies ist ein Indiz für die hohe Stabilität der Röhren. Diese Eigenschaft wird bei der Herstellung von Kunststoffen genutzt [8]. Nachfolgend einige Anwendungsbeispiele:

CNT in Kunststoffen:

CNT werden mit herkömmlichem Kunststoff gemischt, was zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe wie z. B. der Zugfestigkeit führt. Dies machen sich Firmen z. B. bei der Produktion von Tennisschlägern zu Nutze.

CNT-verstärktes Aluminium:

Auch CNT-verstärkte Fahrradrahmen sind bereits auf dem Markt erhältlich [9]. Sie sind leichter als ausschließlich aus Aluminium bestehende Rahmen und gleichzeitig steifer. Das Fahrrad lässt sich durch starkes Antreten kaum in Schwingung versetzen. Dieser Verbundwerkstoff soll auch im Automobil- und Flugzeugbau eingesetzt werden.

CNT in der Elektronik:

Für die Elektronikindustrie sind vor allem die Strombelastbarkeit und die Wärmeleitfähigkeit interessant: Die Strombelastbarkeit beträgt etwa das 1 000-fache der Belastbarkeit von Kupferdrähten. Die Wärmeleitfähigkeit von CNT ist doppelt so hoch wie die von natürlichem Diamant, dem besten natürlich vorkommenden Wärmeleiter. Da CNT auch Halbleiter sein können, lassen sich aus ihnen Transistoren fertigen, die höhere Spannungen und Temperaturen als Siliziumtransistoren aushalten.

CNT-Speicher:

Mit Hilfe von CNT können nichtflüchtige Datenspeicher realisiert werden. Dabei werden die Nanoröhren zwischen zwei Elektroden angeordnet. Ein elektrisches Feld zwischen den beiden Elektroden lässt die Nanoröhre sich stetig zusammenziehen oder strecken. Im gestreckten Zustand stellt sie einen elektrischen Kontakt zu einer

Substratelektrode dar und ermöglicht so einen Stromfluss. Anschließend zieht sich die Nanoröhre wieder zusammen.

CNT-haltige Displays:

Es lassen sich Felder von parallel aufgestellten Nanoröhren herstellen und als Bauteil für flache und selbstleuchtende Feldemissionsbildschirme nutzen. Dabei dienen die scharfen Spitzen der Nanoröhren als Quelle für Elektronen durch Feldemission (winzige Elektronenkanone, Kaltkathode schon bei relativ geringen Spannungen), die wie beim herkömmlichen Fernsehgerät gegen einen Leuchtschirm beschleunigt werden. Die Bildschärfe nimmt zu und der Bildschirm kann flacher gebaut werden.



Abbildung 5: Display [gutetsk7/Shutterstock.com]

CNT in Sonnenkollektoren:

Eine Oberfläche, die mit unterschiedlich langen Nanoröhren dicht besetzt ist, reflektiert nur 0,045 % des einfallenden Lichts. Dadurch können extrem schwarze Oberflächen hergestellt werden. Dies wird in der Produktion von Sonnenkollektoren genutzt.



Abbildung 6: Sonnenkollektoren [Peangdao/Shutterstock.com]

## 2.4 Fullerene

Mit 0,7 nm im Durchmesser sind Fullerene laut Definition zu klein, um als Nanomaterialien zu gelten. Die Definition der Nanomaterialien enthält daher für diese Moleküle eine Ausnahmeregelung. Ähnlich wie die CNT werden die Fullerene in der Sportgeräteherstellung, vor allem beim Bau von Tennis-, Badminton- oder Golfschlägern, eingesetzt. Die  $C_{60}$ -Moleküle werden in Schaft und Rahmen verbaut. Dies ermöglicht sehr dünnwandige und dadurch leichte und gleichzeitig stabile Carbon-Konstruktionen. In Anti-Aging-Cremes wird das  $C_{60}$ -Molekül als Radikalfänger verwendet. Das Wegfangen der freien Radikale (reaktive molekulare Spezies), dient zur Verlangsamung des Alterungsprozesses der Haut [10].

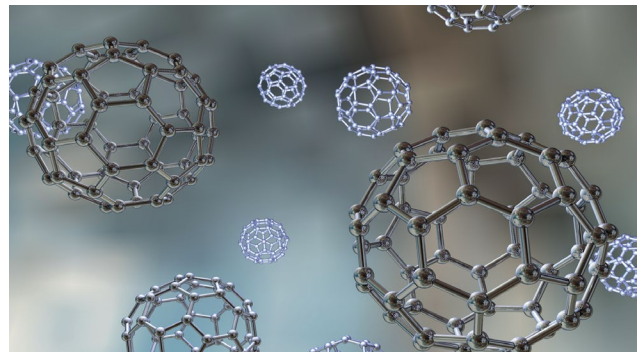


Abbildung 7: Fulleren-C60-Ring [Kateryna Kon/Shutterstock.com]

## 2.5 Carbon Black (CB), Industrieruß

Carbon Black ist ein gezielt industriell hergestellter Ruß, der ein hohes Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis aufweist. Die hohe Anzahl an Oxidgruppen an der Porenoberfläche des Graphits sind für die Fähigkeit Wasser zu adsorbieren sowie die katalytische, chemische und elektrische Reaktivität verantwortlich. Solche Aktivruße können mit einem Massenanteil von bis zu 15 % an funktionellen Sauerstoffgruppen hergestellt werden [11] und werden als vierte Stufe in Kläranlagen eingesetzt.



Abbildung 8: Carbon Black [Fablok/Shutterstock.com]



## 2.6 Nano-Siliziumdioxid (Nano-SiO<sub>2</sub>)

Synthetisches, amorphes Nano-SiO<sub>2</sub> [12] wird als Füllstoff in Kunststoffen, Gummi, Farben und Klebstoffen verwendet. Es dient als Adsorbens oder Rieselhilfsmittel. Bei Oberflächenbeschichtungen und in Lacken dient es hauptsächlich zur Erhöhung der Härte und Kratzfestigkeit der Oberflächen. Zwar besitzt SiO<sub>2</sub> eine geringere Härte als das alternativ verwendete Aluminiumoxid, jedoch ist die Transparenz von Klarlacken mit Nano-SiO<sub>2</sub> deutlich besser. Nanoskaliges Siliziumdioxid wird zu dem in steigendem Maße bei der Herstellung von Autoreifen angewandt. Wird dem Reifen neben Industrieruß (Carbon Black) auch amorphes SiO<sub>2</sub> als Füllstoff zugemischt, verringert sich der Rollwiderstand des Reifens und der Spritverbrauch sinkt um bis zu fünf Prozent und dadurch auch der CO<sub>2</sub>-Ausstoß [13]. Hochdisperses (nanoskaliges), amorphes SiO<sub>2</sub> ist auch in verschiedenen Erzeugnissen der Pharmaindustrie wie bspw. Tabletten, Zäpfchen, Gels und Cremes enthalten [14]. In der Textilindustrie dienen amorphe Siliziumdioxid-Nanopartikel dazu wasserabweisende Baumwolle herzustellen. In der Elektronikindustrie werden sie als Schleifmittel eingesetzt [15].

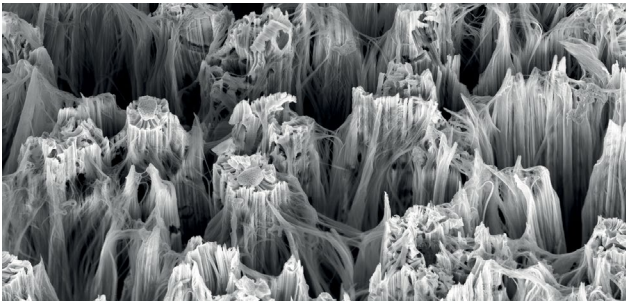


Abbildung 9: Silikon-Nanodrähte [Roberto Lo Savio/Shutterstock.com]

## 2.7 Nano-Silber (Nano-Ag)

Die unterschiedlichen Eigenschaften von Nano-Silber [16] stellen die Grundlage für das große technische Potenzial dar. Die antimikrobielle Wirkung von Nanosilber beruht auf der Bildung von Silberionen (Ag<sup>+</sup>) an der Oberfläche von Silbernanopartikeln. Die Silberionen wirken abtötend auf Bakterien, Hefen, Pilze und Viren. Diese Eigenschaft wird in der Textilindustrie z. B. bei Strümpfen, T-Shirts, im medizinischen Bereich bei Pflastern oder bei der Beschichtung von Kühlschränken genutzt. Silber ist im Periodensystem zudem das Element mit der höchsten Wärmeleit-

fähigkeit und elektrischen Leitfähigkeit [17]. In Form von Nano-Partikeln können diese Eigenschaften materialsparend für die Elektronik, z. B. für transparente und gleichzeitig elektrisch leitfähige Folien, verwendet werden. Silber-Nanopartikel weisen außerdem eine hohe Effizienz bei der Lichtabsorption und -streuung auf. Diese Eigenschaften ermöglichen die Anwendung bei Sensoren oder in der Spektroskopie [18]. Die starke Oberflächenreaktivität von Silber-Nanopartikeln basiert auf einem hohen Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis. Diese Reaktivität beschleunigt katalytische oder adsorptive Prozesse. Die Silber-Nanopartikel werden dabei oftmals auf ein Trägermaterial gebracht [19] und z. B. in der chemischen Industrie eingesetzt.



Abbildung 10: Nano-Silber [Kateryna Kon/Shutterstock.com]

## 2.8 Nano-Titandioxid (Nano-TiO<sub>2</sub>)

TiO<sub>2</sub> ist im nanoskaligen Bereich transparent, im mikroskaligen dagegen weiß. Deshalb ist Nano-TiO<sub>2</sub> nicht nur als Inhaltsstoff in Sonnenschutzmitteln interessant, sondern auch für Lebensmittel-Verpackungen und als Coating für die Lebensmittel selbst. Durch seine Lichtdurchlässigkeit dient es außerdem als Grundlage der neuartigen Interferenzfarbstoffe [20].



Abbildung 11: Sonnenschutzmittel [Zerbor/Shutterstock.com]

## 2.9 Nano-Titannitrid (Nano-TiN)

Titannitrid (TiN) ist ein extrem harter Werkstoff, in seiner Nanoform werden mit ihm Werkzeuge und Implantate beschichtet. Das Material wird auch Kunststoffen zugesetzt, insbesondere PET-Flaschen. Titannitrid verbessert die Eigenschaften des PET und beschleunigt den Herstellungsprozess der Flaschen [21].

## 2.10 Nano-Zinkoxid (Nano-ZnO)

Nano-Zinkoxid dient ebenso wie Carbon Nanotubes zur Erstellung logischer Schaltkreise im Nanobereich. Da diese Schaltkreise im sichtbaren Wellenlängenspektrum unsichtbar sind, eignen sie sich für eine transparente Elektronik.

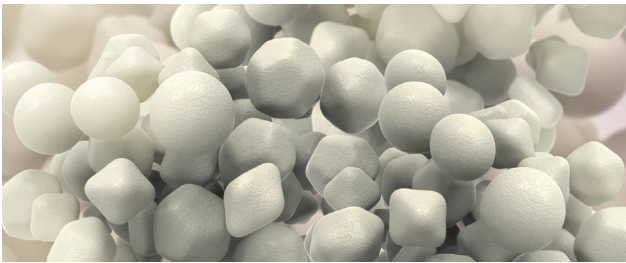


Abbildung 12: Nano-Zinkoxid [Fablok/Shutterstock.com]

## 2.11 Nano-Cerdiioxid (Nano-CeO<sub>2</sub>)

"Cerdiioxid (CeO<sub>2</sub>) ist ein Oxid des Seltenerd-Metalls Cer [22]. Technisches CeO<sub>2</sub> liegt allgemein als mikro- oder nanoskaliges weißes bis schwach gelbliches Pulver vor. CeO<sub>2</sub> wird als Antireflexbeschichtung für Infrarotfilter und beim Bau von Farbfernsehröhren eingesetzt. Zusammen mit Cobalt werden leistungsfähige Magnete gefertigt. Da CeO<sub>2</sub> bei Erwärmung stark leuchtet, wird es in Kombination mit anderen Seltenerdmetalloxiden in Glühstrümpfen verwendet, die die Lichtausbeute von Gaslampen deutlich verbessern. Zudem wird CeO<sub>2</sub> traditionsgemäß beim Schleifen und Polieren von Gläsern eingesetzt, z. B. bei der Fertigung von Flachbildschirmen bzw. von Linsen für Handy-Kameras oder der Laseroptik von CD-Spielern. Ein großer Markt für nanoskaliges CeO<sub>2</sub> ist das Reinigen und Polieren von Silicium-Wafern, wie sie in großen Mengen in der Elektronikindustrie für hochmoderne Chipssysteme oder für Solarzellen benötigt werden. CeO<sub>2</sub> reagiert mit dem zu bearbeitenden Material, so dass es extrem fein dosiert abgetragen werden kann. Es ermöglicht so die Herstellung ultra-glatte Oberflächen, die die Voraussetzung

für die Miniaturisierung von Schaltkreisen darstellen. CeO<sub>2</sub> stellt zusammen mit Aluminiumoxid das Material der Wahl beim chemisch-mechanischen Polieren dar. Nanoskaliges CeO<sub>2</sub> wird zudem in Autoabgaskatalysatoren von Kraftfahrzeugen eingesetzt. Hier dient es dazu, eine Sauerstoffspeicherfunktion zur Verfügung zu stellen. Es oxidiert Kohlenstoffmonoxid und überschüssige Kohlenwasserstoffe auch dann noch zu CO<sub>2</sub>, wenn im Abgasgemisch kurzzeitig Sauerstoffmangel auftritt. Dabei wird CeO<sub>2</sub> zu Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reduziert, das später wieder zurück oxidiert wird, sobald wieder genügend Sauerstoff im Abgas vorhanden ist. Neben dem Einsatz in Abgaskatalysatoren, wo es gegenüber dem deutlich aktiveren, jedoch auch teureren, Platin nur eine Unterstützerrolle einnimmt, ist auch eine unmittlere Zugabe zum Kraftstoff vorgesehen. Die CeO<sub>2</sub>-Nanopartikel sollen zu einer Verminderung des Verbrauchs sowie der Rußpartikelemission von Dieselmotoren führen. In Brennstoffzellen werden mit weiteren Seltenerdmetalloxiden beschichtete CeO<sub>2</sub>-Nanopartikel zur Verbesserung der Sauerstoffionenleitfähigkeit eingesetzt, um niedrigere Betriebstemperaturen zu ermöglichen. Ebenso stellt Nano-CeO<sub>2</sub> einen idealen UV-Absorber dar und wird deshalb als Additiv in Lacken und Beschichtungen für Holzschutzanwendungen verwandt, um deren UV-Stabilität zu steigern."

## 2.12 Nano-Aluminiumoxid (Nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Nanoskalige Aluminiumoxide [23] dienen in der Erdöl- und chemischen Industrie wegen ihrer thermischen Beständigkeit als Katalysatorträger und Adsorbentien. Nanoskaliges Aluminiumoxid kann, zu porösen Strukturen versintert und auf einem gröber strukturierten Träger aufgebracht, auch zur Nanofiltration benutzt werden. Nanoskaliges Aluminiumhydroxid Al(OH)<sub>3</sub> dient in Pulverform als Flammenschutzmittel sowie als Füllstoff in Teppichbelägen, Gummi, Kunst- und Schaumstoffen. Weiterhin wird es in Zahnpasta und Kosmetika verwendet. Im Allgemeinen dienen nanoskalige Aluminiumoxide und -hydroxide in der Farb- und Kunststoffindustrie als Verdickungs- und Füllmittel und werden auch für das Herabsetzen der Klebrigkeit und zur Erhöhung der Kratzfestigkeit eingesetzt. Auch die Farbbrillanz von Lacken kann positiv beeinflusst werden.

## 2.13 Nano-Ton

Nanotone [24], englisch Nanoclays (clay = englisch: Tonmineral), basiert auf natürlich vorkommenden Tonen, welche hauptsächlich aus feinteiligen Mineralpartikeln bestehen. Die mineralischen Partikel der Tone bestehen aus Schichtsilikaten, Verbindungen auf Basis der Elemente Silizium und Sauerstoff und anderen Elementen. Man kann sie sich als „Stapel“ von 2-dimensionalen Einfach-, Doppel- oder Mehrfachschichten vorstellen, die aus eckenverknüpften  $\text{SiO}_4$ -Tetraedern bestehen. Die Schichten sind untereinander nicht miteinander verknüpft und können zwischen den Ebenen Wasser und andere Substanzen aufnehmen oder abgeben und dadurch anschwellen oder schwinden, was starre Gerüstsilikate (siehe auch Zeolithe) nicht können. Zu den Schichtsilikaten zählen Gruppen von Mineralen wie z. B. Glimmer, Talk, Kaolin oder Montmorillonit. Sie unterscheiden sich unter anderem in der Größe und Abfolge der Bereiche, in denen die  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder in den Ebenen nach oben oder unten orientiert sind. Weiterhin unterscheiden sie sich in der Art der eingelagerten Ionen. Montmorillonit, das technisch bedeutsamste Tonmineral als Hauptbestandteil von Bentonit, ist aufgebaut aus  $\text{SiO}_4$ -Tetraederdoppelschichten mit eingelagerten Oktaederschichten aus Aluminium-, Hydroxid- und Eisenionen. Ein typisches Montmorillonit-Teilchen besteht aus ca. 1 nm dicken Alumosilikatschichten mit lateralen Abmessungen im Bereich von mehreren hundert Nanometern bis ca. 10 Mikrometern, die sich zu großen Stapeln zusammenfügen. Nanoclays sind nicht brennbar. Das wird im Flamm- und Brandschutz für Kunststoffe genutzt. Sie werden in den Kunststoff eingemischt, wodurch sich die Menge an brennbarem Material verringert. Brennt der Kunststoff, bildet sich eine Trennschicht, die verhindert, dass dieser weiterbrennt. Daher sind Nanoclays heutzutage für die Elektro- und Elektronikindustrie nicht mehr wegzudenken. Nanoclays können Cäsium binden und zur Reduzierung radioaktiver Kontaminationen genutzt werden. Für den Einsatz als Katzenstreu wird eine Mischung aus üblicherweise Zeolithe, Sepiolithe oder Bentonite bzw. Montmorillonite verwendet. Sie zeichnen sich durch eine hohe Aufnahmefähigkeit für Wasser und geruchsverursachende Bestandteile des Katzenurins und Kots aus.

Auch der Einsatz von Schichtsilikaten als Füllstoffe für Polymerbeschichtungen auf Textilien wurde untersucht. Weitere Anwendungsgebiete sind beispielsweise als Kunststoffzusatz in Lebensmittelverpackungsfolien und Plastikflaschen (nicht in der EU zugelassen). Mit Nanoton versetzte Kunststoffe besitzen oftmals eine höhere Zugfestigkeit, verbesserte Barriere- und Abrasionseigenschaften, hervorragende Oberflächenqualitäten, geringe thermische Ausdehnung und sehr gute Fließ- und Verarbeitungseigenschaften.

Dieses herausragende Eigenschaftsprofil macht Kunststoff-Nanoton-Komposite zu einer interessanten Alternative zu konventionell verstärkten Werkstoffen.

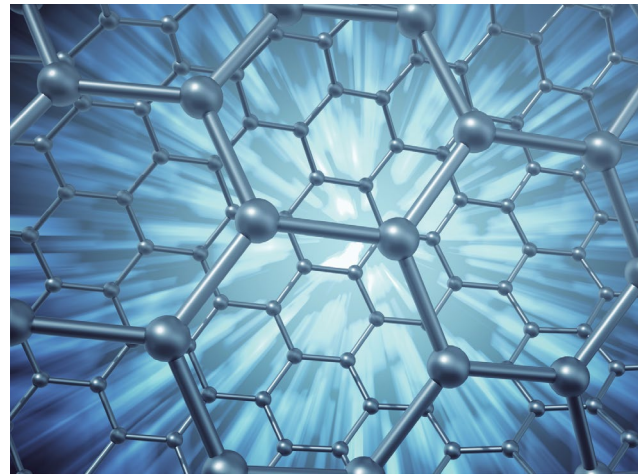


Abbildung 13: 3D hexagonale Molekülstruktur [Rost9/Shutterstock.com]

## 2.14 Quantum-Dots

Nanokristalle, in denen aufgrund ihrer äußerst kleinen Durchmesser (im Bereich weniger Nanometer) sogenannte Quanteneffekte auftreten, werden als Quantenpunkte (engl. Quantum Dots, QD[25]) bezeichnet. Quantenpunkte sind eine Klasse von "Nanokristallen" mit einem sehr kleinen Durchmesser von häufig nur einem oder wenigen Nanometern. Wegen ihrer besonderen Eigenschaften werden sie in optischen oder elektronischen Anwendungen eingesetzt, z. B. in der Photovoltaik für Solarzellen. QDs werden auch im medizinischen Bereich erprobt, da die winzigen Teilchen über ihre optischen Eigenschaften beispielsweise Tumore im Gewebe sichtbar machen können (sogenanntes „Tumor targeting“).



Quantenpunkte sind also kein einheitliches Material, sondern eine Klasse von Materialien, die so bezeichnet werden, wenn sie Quanteneffekte aufweisen. Diese Quanteneffekte sorgen dafür, dass die Nanokristalle außerordentlich interessante optische, magnetische und auch elektronische Eigenschaften besitzen. So können Sie z. B. mit Hilfe von Licht leuchten, sehr effizient Strom liefern oder als superkleine Informationsspeicher oder Prozessorelemente dienen.

Man unterscheidet hauptsächlich zwischen drei Arten von Quantenpunkten:

1. Quantenpunkte aus Elementen der Hauptgruppe III des Periodensystems der Elemente (Bor, Aluminium, Gallium, Indium) und Hauptgruppe V (Stickstoff, Phosphor, Arsen, Antimon, Wismut)
2. II-VI-Halbleiter: aus Elementen der Nebengruppe II (Zink, Cadmium) und der Hauptgruppe VI (Sauerstoff, Schwefel, Selen, Tellur)
3. Silizium (Si), das Standardmaterial der Halbleiter- und Chip-Industrie

In der aktuellen Siliziumelektronik könnten Si-Quantenpunkte als Bestandteil von Optikchips, Prozessoren, optischen Sensoren etc. dienen. Durch den Einsatz von Si-Quantenpunkten in der Photovoltaik ließen sich beispielsweise große Effizienzsprünge realisieren. Derzeit finden derartige Si-Materialien aufgrund des hohen Preises aber vornehmlich Verwendung in der Raumfahrtindustrie.

Bei den III-V-Halbleitern sticht vor allem Galliumarsenid (GaAs) hervor. GaAs bietet sich im Bereich der optischen Datenverarbeitung vor allem als Lichtquelle an. Zudem findet es Einsatz als Verstärkungsmedium in Lasern.

Prominenteste Vertreter der II-VI-Halbleiter-Quantenpunkte sind Cadmiumselenid (CdSe) und Cadmiumtellurid (CdTe). Aber auch Zinkoxid (ZnO), das in Form von Mikro- und Nanopartikeln bereits vielfältige Verwendung findet, wird zunehmend für die Verwendung als Quantenpunkt in Betracht gezogen. Die ersten, Mitte der 1990er Jahre entwickelten, Quantenpunkte bestanden beispielsweise aus einem Kern aus Cadmiumselenid (CdSe) mit einer Schale aus Zinksulfid (ZnS). Noch heute ist dieses Material eines der am häufigsten eingesetzten und erforschten für Quantenpunkte. Auch die II-VI-Halbleitermaterialien finden Verwendung in der Elektronik, Photonik, Photovoltaik und Biomedizin. Vor allem die herausragenden Fluoreszenzeigenschaften von Quantenpunkten aus II-VI-Halbleitern machen sie für Beleuchtungsanwendungen sowie für Displays auf der Basis von Quantenpunkt-LEDs interessant. Hier wird vornehmlich CdSe eingesetzt. Cadmiumtellurid wird derzeit für den Einsatz in Dünnschichtsolarzellen getestet. Mit Hilfe solcher Quantenpunkte erhofft man sich eine deutliche Effizienzsteigerung der Solarmodule.

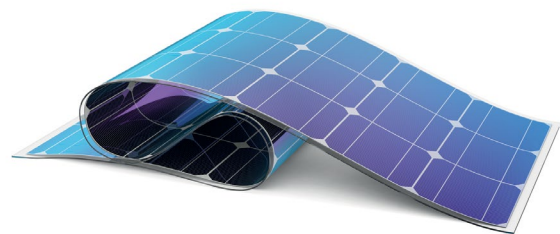


Abbildung 14: Dünnschicht-Solarzellen [Iaremenko Sergii/Shutterstock.com]



### 3 Anwendungen synthetischer Nanomaterialien

Um abschätzen zu können, in welchen Abfallströmen welche synthetischen Nanomaterialien vorkommen können, ist es wichtig zu wissen, in welchen Produkten und in welchen Mengen synthetische Nanomaterialien bereits eingesetzt werden. Ein Produktregister mit detaillierten Angaben zu den bereits verwendeten synthetischen Nanomaterialien wird seitens des Verbandes der Chemischen Industrie Deutschlands als nicht zielführend angesehen [26].

Die EU-Kommission hat bisher die gleiche Sichtweise. Neben Frankreich (2013) hat Belgien als zweiter EU-Mitgliedsstaat 2016 begonnen, ein nationales Register für nanomaterialhaltige Produkte aufzubauen [27]. Die zusammenfassende Darstellung von Anwendungen der bereits charakterisierten synthetischen Nanomaterialien in Tabelle 1 entstammt dem bereits zitierten Bericht des BMBF „Winzige Riesen in unserem Alltag“ [28].

Tabelle 1: Anwendungsbereiche unterschiedlicher synthetischer Nanomaterialien. Kursive Einträge in der Tabelle besagen, dass sich die Produkte noch in der Entwicklung befinden oder keine zuverlässigen Angaben zur Marktverfügbarkeit gemacht werden können.

Anwendungsbereich	Produkte	Nanomaterial	Funktion
<b>Automobil</b>	Autoscheibe	Titandioxid	Anti-Beschlagwirkung
	Autoreifen	Kohlenstoff (Carbon Black)	Verbesserung der Haftung, Verringerung des Verschleißes
		Siliziumdioxid	Optimierung des Rollwiderstands und der Nässehaftung, Kraftstoffersparnis
	Politur für Autolack	Diamant	Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Politur (Resistenz gegen Steinschlag, verbesserter Korrosionsschutz)
	Schmieröl	Kupfer	Verringerung des Motorverschleißes
	Dieselsatzstoff	Cerdioxid	Verringerung des Verbrauchs und der Rußpartikelemission
	Abgaskatalysator	Cerdioxid, Platin	Abgasreinigung
<b>Nahrungsmittel</b>	Nahrungsergänzungsmittel	Zeolithe	verbesserte Mineralstoffaufnahme
		Calciumsalze	verbesserte Aufnahme durch den Körper
		Siliziumdioxid (amorph)	Füllstoff in Kapseln
		<i>Eisen</i>	<i>verbesserte Aufnahme durch den Körper</i>
	Zusatzstoff	Siliziumdioxid (amorph)	Rieselhilfe: Trägerstoff für Emulgatoren, Farbstoffe und Aromen (Lebensmittelzusatzstoff E551)
Alkoholfreies Bier	Zeolithe	Filter für Alkohohl + selbstkühlendes Bierfass	
<b>Landwirtschaft und Tierhaltung</b>	Dünger	Zeolithe	verbesserte Mineralstoffspeicherung in Böden



Anwendungsbereich	Produkte	Nanomaterial	Funktion
Medizin/Pharmazie	Implantate	Titandioxid	biokompatible Beschichtung zum Schutz vor allergieauslösenden Metallionen
		Cellulose	Stütz- und Gerüstfunktion
		Zirkoniumdioxid	Bruchbeständigkeit
	Kontrastmittel	Bariumsulfat	Verbesserung der Bildgebung und Verringerung der Strahlenbelastung
		Eisen und Eisenoxid	Verringerung der Strahlenbelastung durch magnetische Bildgebungsverfahren
Medizinische Instrumente	Zirkoniumdioxid	Bruchbeständigkeit	
Medizin/Pharmazie	Zahnersatz	Zirkoniumdioxid	höhere Festigkeit und Bruchzähigkeit bei guter Bioverträglichkeit und farblicher Anpassungsfähigkeit
	Wundverband	Cellulose	Wundschutz, Barrierefunktion gegen Fremdorganismen
	Pflaster	Silber	antimikrobielle Wirkung
	Biomarker	Quantum Dots	Markierung von Biomolekülen für bildgebende Nachweisverfahren
	Tumorthapeutika	Eisen	Tumorbekämpfung
		Gold	Tumorbekämpfung
	Impfmittel, Schnelldiagnostika	Gold	Schnellerkennung von bspw. Bakterien oder Erkrankungen
Tabletten, Zäpfchen, Gels und Cremes	Siliziumdioxid (amorph)	Wirkstofftransport, Wirkstoffdepot, verbessertes Fließverhalten von Gelen und Cremes	
Kosmetik	Sonnencreme	Titandioxid, Zinkoxid	UV-Schutz
	Cremes, Lotionen, Make-up	Siliziumdioxid	Verbesserung sensorischer Eigenschaften, wie Aussehen, Streichfähigkeit, Fließverhalten und Textur
	Anti-Aging-Creme	Fullerene	Radikalfänger
	Wimperntusche	Kohlenstoff (Industrieruß)	Farbgebung
Textilien	Beschichtungsmittel	Titandioxid	schmutz- und wasserabweisende Oberflächen, UV-Schutz, antibakterielle und pilzhemmende Wirkung
		Zinkoxid	UV-Schutz, antibakterielle und pilzhemmende Wirkung
		Silber	antimikrobielle Wirkung
		Siliziumdioxid	schmutz- und wasserabweisende Oberflächen, erhöhte Strapazierfähigkeit
Baumaterialien	Pflastersteine	Titandioxid	selbstreinigende und schmutzabbauende Oberfläche
	Asphalt	Zeolithe	Füllstoff, Verbesserung der Stabilität
	Leichtbau	Kohlenstoff (Nanoröhren)	Verbesserung der Stabilität und der Zugfestigkeit
	Zement	Siliziumdioxid	Bindemittel
		Zeolithe	Verbesserung der Stabilität, Korrosionsschutz

Anwendungsbereich	Produkte	Nanomaterial	Funktion
Farben und Lacke	Holzschutzmittel	Kupferoxide	Schutz vor holzerstörenden Pilzen und Insekten
		Titandioxid	Schutz vor holzerstörenden Pilzen und Insekten, Erhalt der Farbbrillanz durch UV-Schutz
	Wand- und Fassadenfarbe	Titandioxid	selbstreinigende und schmutzabbauende Oberflächen
	Glaspigment	Gold	Rotfärbung
	Klarlack	Zinkoxid	Erhalt der Farbbrillanz durch UV-Schutz, antibakterielle und pilzhemmende Wirkung
		Siliziumdioxid	Verbesserung der Transparenz
	Lack	Zirkoniumdioxid	Verbesserung der Kratzfestigkeit
		Aluminiumoxid	Verbesserung der Farbbrillanz
Farben und Lacke	Lack und Beschichtung	Siliziumdioxid	Verbesserung der Kratzfestigkeit und Härte
		Cerdioxid	Steigerung der UV-Stabilität
	Lack und Farbe	Kohlenstoff (Industrieruß)	verbesserte schwarze Farbgebung
		Siliziumdioxid	Füllstoff
	Beschichtung	Indiumzinnoxid (ITO)	Erhöhung der Leitfähigkeit und der Reflexion von infraroter Strahlung, Wärmeschutz auf Glasscheiben
	Druckfarbe und Toner	Kohlenstoff (Industrieruß)	verbesserte schwarze Farbgebung
	Toner	Eisenoxid	Haftung des Toners an der elektrisch geladenen Bildtrommel
	elektrische Heizbeschichtung für Flächen-, Wand-, Fußbodenheizung etc.	Kohlenstoff (Nanoröhrchen)	gleichmäßiges Erwärmen von Flächen ohne Wärmespitzen
Elektronik, Kommunikations- und Informationstechnik	Leiterplattenbeschichtung	Bariumsulfat	Pigment-Stabilisierung
	Touch-Screen	Indiumzinnoxid (ITO)	Transparenz von Elektroden und Halbleitern, Abschirmung elektrischer Felder
	Elektronik	Kohlenstoff (Nanoröhrchen)	isolierend, halbleitend oder metallisch-leitend
	Bildschirm	Quantum Dots	sattere Farben und deutlich geringerer Stromverbrauch
	organische Leuchtdioden	Quantum Dots	Beleuchtungsanwendungen
	Schleif- und Poliermittel für Elektronikbauteile	Cerdioxid, Siliziumdioxid, Aluminiumoxid	Verbesserung der Oberflächenglätte
	Drucktinte für Kunststoffe	Gold	Leitfähigkeit von Drucktinten
	Elektroden	Diamant	Kontaktierung
Sportartikel	Tennis-, Golf- und Badmintonschläger	Kohlenstoff (Fullerene und Nanoröhrchen)	Verbesserung der Stabilität, Reduzierung des Gewichts

Anwendungsbereich	Produkte	Nanomaterial	Funktion
<b>Kunst- und Klebstoffe</b>	PET-Flaschen	Titannitrid	Erhöhung der Produktionseffizienz
	Zusatzstoff	Zeolithe	Verstärkung, Füllstoff
	Zusatzstoff	Diamant	Verbesserung der Verarbeitungs- und Werkstoffeigenschaften, Reduktion der Materialkosten
	Oberflächenbeschichtung	Indiumzinnoxid (ITO)	Verhinderung der elektrischen Aufladung
	Verpackungsfolie	Titandioxid	transparenter UV-Schutz
	Beschichtung, Kunststofffilme	Zinkoxid	transparenter UV-Schutz
	technische Gummiartikel	Kohlenstoff (Industrieruß)	Verstärkung, Füllstoff
	Klebstoff	Kohlenstoff (Nanoröhrchen)	Verbesserung der elektrischen, wärmeleitfähigen und mechanischen Eigenschaften
<b>Kunst- und Klebstoffe</b>	Kunststoffe	Kohlenstoff (Industrieruß)	schwarze Farbgebung, UV-Schutz, Verbesserung der Leitfähigkeit
	Zusatzstoff	Kohlenstoff (Nanoröhrchen)	Erzeugung elektrischer Leitfähigkeit
	Folien	Siliziumdioxid	Verlängerung der Produkthaltbarkeit
	Zusatzstoff	Aluminiumoxid	Verdickungs- und Füllmittel, Verminderung der Klebrigkeit, Erhöhung der Kratzfestigkeit
	Zusatzstoff	Cerdioxid Cellulose	Erhöhung der UV-Stabilität Erhöhung der Zugfestigkeit
<b>Erneuerbare Energien</b>	Solarzellen	Titandioxid	Halbleiter
	Brennstoffzelle	Zirkoniumdioxid	Steigerung der Effizienz durch verbesserte Sauerstoff-Leitfähigkeit
		Platin Cerdioxid, Gold	Steigerung der Effizienz Steigerung der Effizienz
<b>Wasser- und Abwasser- aufbereitung, Bodensanierung</b>	Waschmittel	Zeolith	Wasserenthärtung
	Abwasserreiniger	Zeolith	Bindung von radioaktiven Substanzen und anderen Schadstoffen
	Filter	Zeolith	Sauberhaltung von Aquarien und Fischteichen, Schwimmbad
	Elektrode für die sogenannte Inlinedesinfektion	Diamant	Wasserreinigung, Oxidation und Desinfektion von Abwässern, Prozesswässern etc.
	Mittel zur Wasser- und Bodensanierung	Eisen	chemischer Abbau von Schadstoffen
	Mittel zur Reinigung von Luft und Wasser	Gold	Bindung von Quecksilber und anderen Schadstoffen
<b>Chemische Industrie</b>	Katalysator	Zeolith	Katalyse chemischer Prozesse, Rauchgasentschwefelung
	Katalysator	Gold, Platin	Katalyse chemischer Prozesse
	Filter	Zeolith	Trennung chemischer Gemische
Aluminium/-oxid		Abtrennung von Nanoobjekten	

## 4 Nanomaterialien im Abfall

Einige Institutionen wie die OECD [29] oder das dänische Umweltministerium [30] wiesen bereits auf die fehlenden Untersuchungen über mögliche Auswirkungen nanomaterialhaltiger Abfälle auf die Abfall- und Kreislaufwirtschaft hin. Im Rahmen des Nanodialogs [31] der Bundesregierung forderten die beteiligten Akteure nachdrücklich dazu auf sich des Themas auf Bundesebene anzunehmen. Die Bundesregierung griff dies im November 2016 in der Fortschreibung der gemeinsamen Forschungsstrategie der Bundesbehörden [32] auf. Der Bereich Entsorgung nanomaterialhaltiger Abfälle wurde in allen vier Forschungsschwerpunkten berücksichtigt.

Die Freisetzung der synthetischen Nanomaterialien kann während der Abfallentsorgung, wie in Abbildung 15 dargestellt, auf verschiedenen Wegen stattfinden:

Mittels einer Materialflussanalyse werden im nachstehenden Kapitel die zu erwartenden Mengen eines Nanomaterials entlang der möglichen Emissionspfade abgeschätzt, der sich eine Beschreibung erster Hinweise auf Störfaktoren eines Eintrags nanomaterialhaltiger Abfälle in die verschiedenen Prozesse der Abfallentsorgung anschließt. Dabei werden die in Abbildung 15 gezeigten möglichen Emissionspfade von synthetischen Nanomaterialien, wie

- stoffliche Verwertung von Siedlungs- und Gewerbeabfällen,
  - biologische Verwertung und Klärschlammverwertung,
  - energetische Verwertung und thermische Beseitigung sowie
  - mineralische Bauabfälle und Deponierung
- näher betrachtet.

### Mögliche Emissionspfade von „Nanoabfällen“

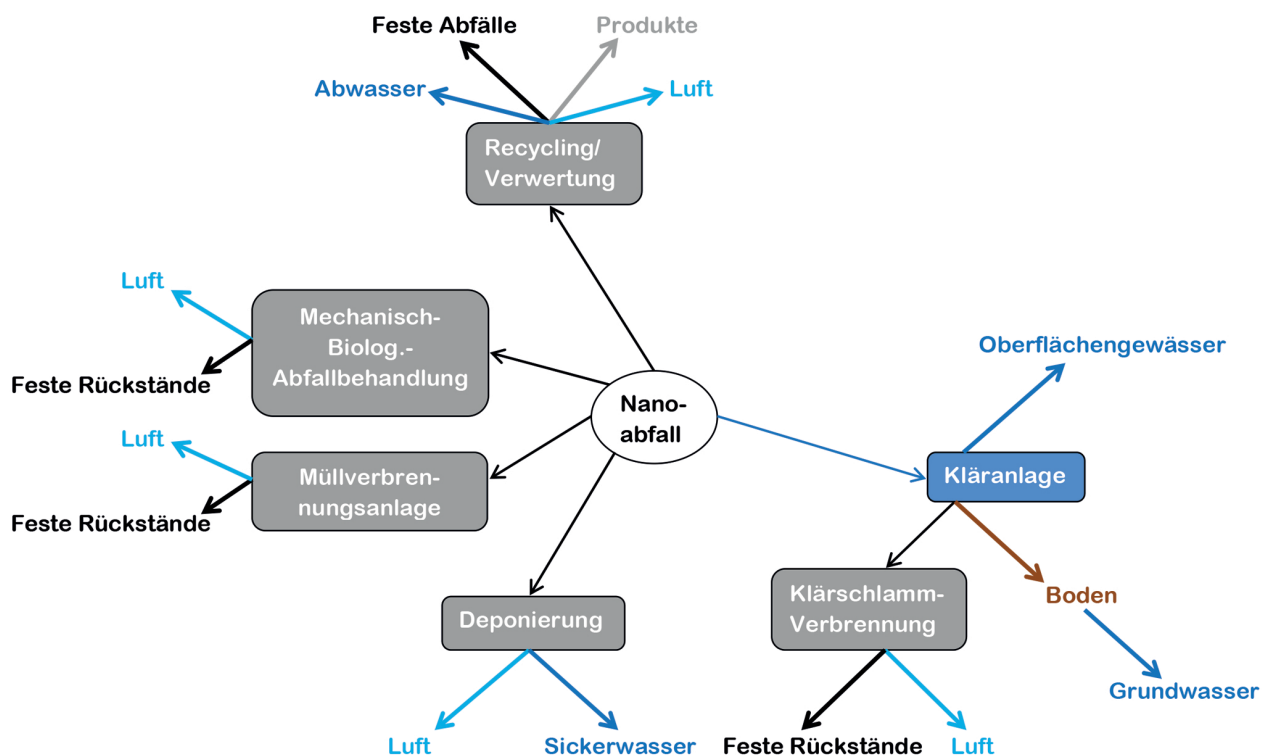


Abbildung 15: Darstellung möglicher Emissionspfade der nanomaterialhaltigen Abfälle [33]

#### 4.1 Materialflussanalyse synthetischer Nanomaterialien in Konsumgütern

Für eine Materialflussanalyse eignet sich Nano-TiO<sub>2</sub> besonders, da es als stabiles anorganisches synthetisches Nanomaterial in den unterschiedlichen Materialströmen in der Regel erhalten bleibt und keinen Umwandlungs- oder Auflösungsprozessen unterliegt. Der Abschätzung der Partikel an Nano-TiO<sub>2</sub> liegt die Annahme zu Grunde, dass die Nano-TiO<sub>2</sub>-Partikel nicht agglomerieren und in ihrer nanoskaligen Form erhalten bleiben.

Ein Beispiel für eine Verteilung von Nanomaterialien im österreichischen Abfallwirtschaftssystem publizierten Part et al. [35]. Es handelt sich dabei um eine Materialflussanalyse für Österreich von Nano-TiO<sub>2</sub> in Sonnencremes für das Jahr 2014 (Abbildung 16). Die österreichischen Daten können für Baden-Württemberg als Anhaltspunkt dienen, da 2014 in Österreich 8,51 Mio. und in Baden-Württemberg 10,7 Mio. Menschen lebten. Schätzungsweise 20 % des Jahresverbrauchs an Nano-TiO<sub>2</sub> in Sonnenschutzcremes werden durch das Baden und Schwimmen diffus in Bade- und Fließgewässer ausgetragen. Diese Menge wird daher nicht in kommunalen Kläranlagen bzw. Abfallsammelsystemen erfasst. Zusätzlich finden diffuse Einträge in Oberflächengewässern bei der Sammlung der kommunalen Abwässer (6 %) und bei der Abwasserreinigung (6 %) statt.

Rund 65 % der Nano-TiO<sub>2</sub>-Menge in Sonnencremes gelangen in die Abwasserreinigung. Part et al. verwendet aus der wissenschaftlichen Literatur entnommene nanospezifische Transferkoeffizienten. Diese Transferkoeffizienten erlauben z. B. eine Abschätzung, wie hoch der Anteil an Nano-TiO<sub>2</sub> ist, der während der biologischen Reinigung im Klärschlamm zurückgehalten werden kann, und wieviel in den Oberflächengewässern, dem Abwasser sowie im Abfall landet. Der Input-Massenstrom an Nano-TiO<sub>2</sub> aus Sonnencremes teilt sich danach in folgende Massenströme auf:

Teilstrom 1: 65 % Sammlung von kommunalem Abwasser

Teilstrom 2: 9 % Sammlung von Wertstoffen (Kunststoffverpackungen)

Teilstrom 3: 6 % Sammlung von Restmüll

Teilstrom 4: 20 % diffuse Einträge in Oberflächengewässer durch Baden und Schwimmen

Mit diesen Annahmen landet das Nano-TiO<sub>2</sub> aus Sonnencremes nach Durchlaufen der unterschiedlichen Abfallentsorgungsprozesse in Österreich letztendlich zu

- 48 % auf der Deponie
- 33 % als diffuser Eintrag direkt in der Umwelt und
- 19 % über Kompost und Klärschlamm in der Landwirtschaft oder in anderen Recyclingprodukten, z. B. Ersatzbaustoffen.

In Baden-Württemberg wird Klärschlamm weitgehend nicht mehr in der Landwirtschaft verwertet, so dass hier dieser Pfad bedeutungslos ist. Ebenso wenig trifft der für Österreich beschriebene Eintrag von Nano-TiO<sub>2</sub> über den Kompost auf Baden-Württemberg zu, da, anders als in Österreich, in der baden-württembergischen mechanisch-biologischen Behandlungsanlage (MBA) für Restmüll kein Kompost produziert wird.

Die Umweltauswirkungen dieses diffusen Eintrags an metallischem Nano-TiO<sub>2</sub> in die Oberflächengewässer lassen sich zum jetzigen Zeitpunkt nur lückenhaft abschätzen. Bisherige Untersuchungen (siehe Kapitel 2) geben keine Hinweise auf eine nennenswerte aquatoxische Wirkung von Nano-TiO<sub>2</sub>. Weitere Untersuchungen hierzu sind jedoch nötig. Hier sei noch erwähnt, dass einige EU-Staaten eine Einstufung von TiO<sub>2</sub> als humantoxisch, bezogen auf eine respiratorische Aufnahme, also über die Einatmung, anstreben.

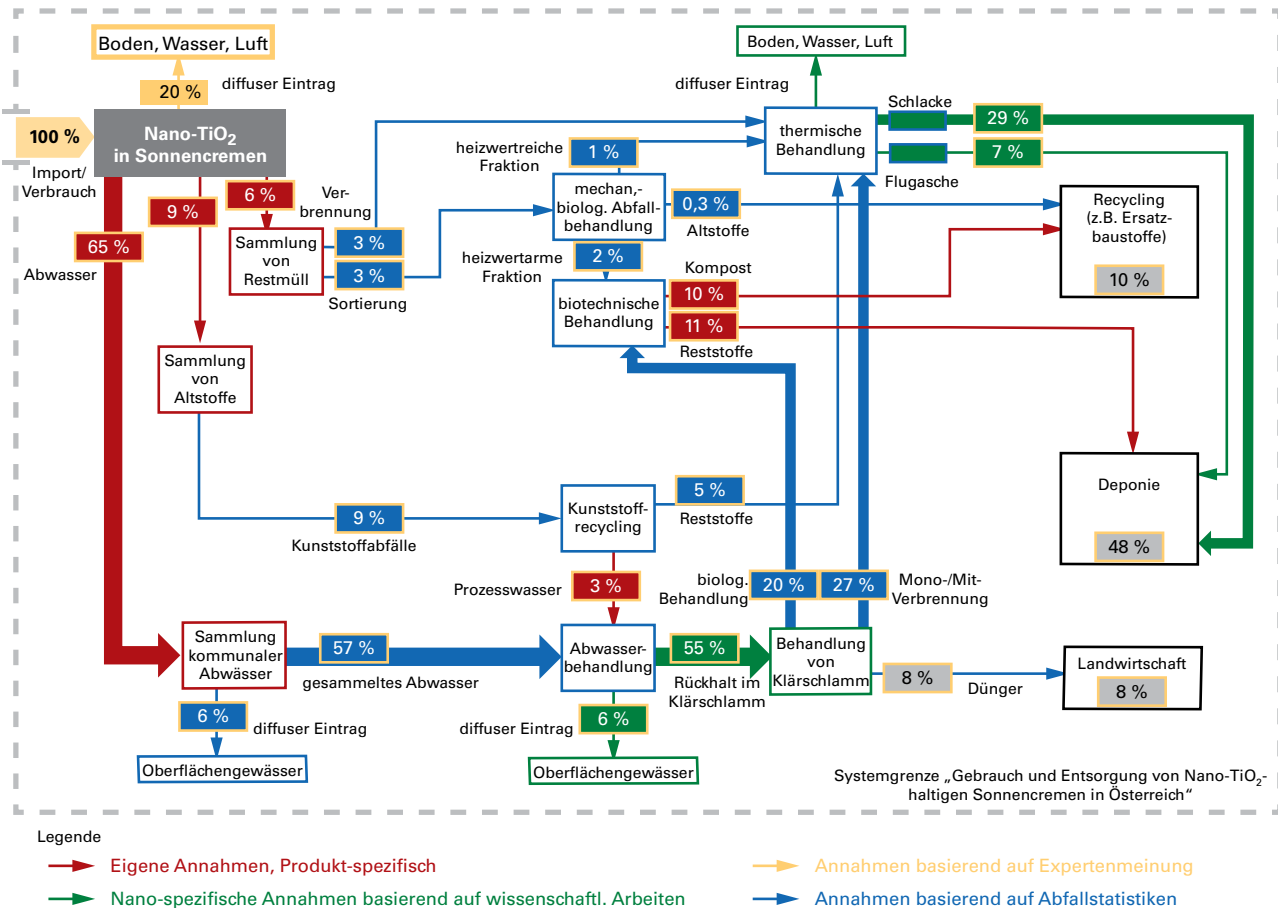


Abbildung 16: Materialfluss von Nanotitandioxid in Sonnencremes für das Jahr 2014: Abschätzung von in Österreich jährlich verbrauchtem Nano-TiO<sub>2</sub> [in Prozent bezogen auf die pro Jahr in Sonnencremes eingesetzte Masse an Nano-TiO<sub>2</sub> in kg] in Sonnencremes sowie der durch den Gebrauch entstehenden nanomaterialhaltigen Abfallmengen.

Eine ähnliche Abschätzung eines Materialflusses von Nano-Silber (Nano-Ag) in der Abfallwirtschaft wurde ebenfalls von Part et al. veröffentlicht. Grundlage hierfür war der Nano-Ag-Gehalt in Innenwandfarben.

Der Input-Massenstrom an Nano-Ag in Innenwandfarben befindet sich – dieser Abschätzung zu Folge – nach der Abfall- und Abwasserbehandlung zu

- 93 % auf der Deponie,
- 0,1 % als Klärschlammdünger in der Landwirtschaft,
- 6,5 % als Recyclingmaterial ebenfalls in der Landwirtschaft,
- 0,1 % als diffuse Emission vor und während der Abwasserbehandlung in die Oberflächengewässer.



Abbildung 17: Molekulare Verbindungen nanostrukturierter Materialien [cybrain/Shutterstock.com]

Nano-Ag ist im Gegensatz zu Nano-TiO<sub>2</sub> keineswegs chemisch inert, sondern kann sich, je nach vorherrschendem chemischen Milieu, auflösen und in ionischer Form z. B. schwerlösliches Silbersulfid Ag<sub>2</sub>S bilden, möglicherweise ebenfalls in der nanoskaligen Form. Das Ag<sub>2</sub>S ist kaum bioverfügbar und hat keine antibakterielle Wirkung. Diffuse Einträge sind bei Nano-Ag aus Innenraumfarben nicht zu erwarten, da diese Produkte als nanomaterialhaltige Abfälle direkt in den Kreislauf der Abfallwirtschaft gelangen. Einzig bei Verwendung von Nano-Ag in Fassadenfarben kann Nano-Ag ausgewaschen und über den Regen bei nicht ausreichend dimensionierten Regenrückhaltebecken durch Starkregenereignisse direkt in Oberflächengewässer eingetragen werden. Hierzu liegen jedoch keine konkreten



Daten vor. Die mangelnde Kennzeichnungspflicht für in Konsumprodukten verwendete synthetische Nanomaterialien erschwert bisher eine aussagekräftige Materialflussanalyse der Stoffströme von nanomaterialhaltigen Abfällen.

## 4.2 Stoffliche Verwertung, Recycling von Siedlungs- und Gewerbeabfällen

Trotz der stetig wachsenden Menge an nanomaterialhaltigen Produkten existieren kaum Untersuchungen darüber, inwieweit in den verschiedenen Recyclingprozessen die Nanomaterialien aus den Altprodukten freigesetzt werden können. Es ist auch nicht bekannt, ob synthetische Nanomaterialien die Recyclingprozesse stören können und Einfluss auf die Materialqualität der Recyclingprodukte haben [36].

Verschiedene Wege der Freisetzung von Nanomaterialien während des Recyclings [37] sind denkbar:

- durch Abrieb von Produkten mit Nanomaterialien, freigesetzt als Schwebstaub während des Transports, beim Zerkleinern, Vermahlen und bei Schüttvorgängen
- durch Abwaschen von Produkten oder durch Reinigen
- von Anlagen, Geräten und Böden
- durch den Übergang der Nanomaterialien ins Abgas beim Schmelzen oder Verbrennen von Produkten
- durch Verdampfung bei stark erhitzten Medien

Einer dänischen Studie zufolge ist eine Extraktion von Nanomaterialien aus Recyclingprodukten möglich. Nanomaterialhaltige Feinstäube können vor allem in Form von Emissionen während der Recyclingprozesse (Zerkleinerungs-,

Mahl-, Sortier- und Transportprozesse), z. B. bei der Verwertung von Altreifen oder PET-Flaschen [38], freigesetzt werden.

Die synthetischen Nanomaterialien sind zudem sowohl in den Altreifen als auch in den Kunststoffen fest in eine Matrix eingebettet, bei den Kunststoffen oftmals chemisch im Kunststoffpolymer gebunden. Daher ist nicht von einer direkten Freisetzung der im Produkt befindlichen synthetischen Nanomaterialien auszugehen. Eine Bewertung des Recyclens von Elektronik- und Elektroaltgeräten, die Nanomaterialien enthalten, ist nach derzeitigem Kenntnisstand nicht möglich [38]. Jedoch sind auch hier die synthetischen Nanomaterialien fest in einer metallenen Matrix oder einer Kunststoffmatrix gebunden. Dies verhindert ein direktes Freisetzen der synthetischen Nanomaterialien.

## 4.3 Biologische Verwertung

Die technischen Verfahren der Bioabfallverwertung basieren auf mikrobiologischen Stoffwechselprozessen wie sie in der Vergärung oder Kompostierung genutzt werden. Eine empfindliche Störung dieser Stoffwechselprozesse durch synthetische Nanomaterialien ist denkbar. Ein Eintrag dieser synthetischen Nanomaterialien kann theoretisch über Lebensmittelverpackungen erfolgen, wenn Lebensmittelhersteller oder der Handel größere Mengen bereits verpackter Lebensmittel bei einer Biogasanlage anliefern. Die Lebensmittel werden dort entpackt, das Verpackungsmaterial separiert und gesondert verwertet. Da die synthetischen Nanomaterialien fest in der Kunststoffmatrix gebunden sind, gilt ein Eintrag synthetischer Nanomaterialien in die Bioabfallverwertung als wenig realistisch.



Abbildung 18: PET-Flaschen [Bignai/Shutterstock.com]



Abbildung 19: Lotuseffekt auf Blattoberfläche [Miss Kanithar Aiumlaor/Shutterstock.com]



#### 4.4 Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm

Seit Jahren werden Textilien durch das Aufbringen dünner Schichten synthetischer Nanomaterialien imprägniert und so ein wasserabweisender „Lotuseffekt“ erzielt. Des Weiteren dienen synthetische Nano-Silberpartikel zur Hemmung einer Geruchsbildung in Funktionsbekleidung wie sie beim Sport getragen wird. Durch Waschvorgänge gelangen diese synthetischen Nanomaterialien ins Abwasser und darüber in die kommunalen Kläranlagen. Mit weiteren Einträgen, z. B. durch das Auswaschen von Fassadenfarben, die synthetische Nanomaterialien enthalten, muss gerechnet werden.

Laut den Ergebnissen verschiedener Studien wurden im Klärschlamm ca. 85 bis 95 % der im Abwasser enthaltenen synthetischen Nano-Silberpartikel unter 700 nm gefunden. Der Rest wird über den Einleiter der Kläranlage direkt in die Oberflächengewässer eingetragen. Ähnliche Rückhaltequoten von 95 – 98 % wurden für synthetische Nano-Ceroxid-Partikel unter 200 nm ermittelt [39]. Untersuchungen an Modellkläranlagen stützen diese Ergebnisse [40].

Ergebnisse einer Studie des Fraunhofer-Instituts UMSICHT zeigen, dass synthetische Nano-Silberpartikel sowie ähnliche Nanomaterialien in einem Klärschlamm-Boden-Gemisch gebunden werden und sich im Boden anreichern können. Synthetische Nano-Silberpartikel sowie Eisenoxid-Nanopartikel können zur Hemmung der Aktivität von Bodenmikroorganismen (schon bei sehr geringen Konzentrationen) und zur Störung natürlicher Prozesse im Boden führen [41].

Die Verwendung von synthetischen Nanomaterialien enthaltendem Klärschlamm auf landwirtschaftlichen Flächen kann zu Umweltemissionen synthetischer Nanomaterialien führen und sich negativ auf Böden auswirken. Eine Aufnahme pflanzenverfügbarer synthetischer Nanomaterialien aus Böden oder eine von synthetischen Nanomaterialien verursachte verbesserte Pflanzenverfügbarkeit von im Boden immobilisierten Schadstoffen ist ebenfalls denkbar.

Da nahezu der gesamte Klärschlamm in Baden-Württemberg verbrannt wird [42], sind die oben skizzierten denkbaren Risiken in Baden-Württemberg von untergeordneter Bedeutung.



Abbildung 20: Luftaufnahme einer Kläranlage [LUBW]

#### 4.5 Energetische Verwertung und thermische Beseitigung

Eine steigende Anzahl nanomaterialhaltiger Produkte bewirkt zwangsläufig eine erhöhte Menge nanomaterialhaltiger Abfälle im Siedlungsabfall und damit auch in der Abfallverbrennung. Der Verbleib des nicht reaktiven synthetischen Nanomaterials Titandioxid nach der Abfallverbrennung war Gegenstand umfangreicher Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes „NanoEmission“ an der RWTH Aachen [43]. Die Versuche wurden sowohl in einer Technikums-Verbrennungsanlage als auch an der Müllverbrennungsanlage im nordrheinwestfälischen Weisweiler durchgeführt. In Laboruntersuchungen wurde bereits im Vorfeld nachgewiesen, dass das Verhalten synthetischer Nanomaterialien in thermischen Prozessen durch ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften beeinflusst wird, und dass sich diese Eigenschaften stark von den makroskaligen Formen desselben Stoffes unterscheiden.

In der thermischen Verbrennung sind zwei verschiedene Wege der Freisetzung von Nanomaterialien denkbar. Einer stellt die homogene Nukleation des Schwermetалldampfes nach der Verbrennung mit anschließendem Wachstum der Flugstaubpartikel durch Koagulation und Kondensation anderer verdunsteter Materialien auf einem nanoskaligen Kondensationskeim dar. Eine weitere Möglichkeit ist die Freisetzung synthetischer Nanomaterialien aus nanomaterialhaltigen Produkten [44] während des Verbrennungsprozesses.

Zwei Grundfaktoren bestimmen das Verhalten der synthetischen Nanomaterialien während der Verbrennung. Der eine Faktor ist die Bindungsintensität eines nanoskaligen Objekts an bzw. in einer Matrix. Ist ein nanoskaliges Objekt nicht fest an eine Matrix gebunden, so ist die Wahrscheinlichkeit als sehr hoch anzusehen, dass dieses Objekt mit dem Rauchgas aus dem Feuerungsraum ausgetragen wird (Flugasche). Ist das nanoskalige Objekt hingegen fest in eine Matrix eingebunden, ist die Wahrscheinlichkeit stark erhöht, dass dieses in die Rostasche (Schlacke) eingetragen wird. Der zweite Einflussfaktor ist der Siede- bzw. Schmelzpunkt des nanoskaligen Materials. Liegt der Siedepunkt oder Schmelzpunkt eines nanoskaligen Materials unter der Verbrennungstemperatur, so wird dieses verdampfen und nach Unterschreiten der Verbrennungstemperatur kondensieren. Bei dieser Kondensation wird davon ausgegangen, dass das Material nicht erneut eine nanoskalige Form annimmt. Dies gilt analog für geschmolzene Materialien [45, 46]. Der Siedepunkt des in der RWTH-Studie untersuchten nanoskaligen  $\text{TiO}_2$  liegt bei  $2900\text{ }^\circ\text{C}$ . Deshalb ist davon auszugehen, dass es seine nanoskalige Form sowohl während des Verbrennungsprozesses, als auch danach, beibehält.

Entsprechend den Ergebnissen der Arbeitsgruppe Walser et al. [47] gelangt der größte Anteil an nanoskaligem Ceroxid ( $\text{CeO}_2$ ) in die Rostschlacke (81 % bei Zugabe von Nano- $\text{CeO}_2$  zum Restmüll, 53 % bei Direkteindüsung in den Brennraum) und die Flugasche (19 % bzw. 45 %). Im Prozesswasser wurden 0,02 % bzw. 1,7 % und im gereinigten Abgas nach der Rauchgasreinigung 0 % bzw. 0,0004 % gemessen. Grundbedingung ist jedoch eine Verbrennung synthetischer Nanomaterialien mit ausreichender Verweildauer bei Temperaturen  $> 850\text{ }^\circ\text{C}$ . Diese Bedingungen entsprechen den Anforderungen an Müllverbrennungsanlagen nach der 17. BImSchV. Die Rauchgasreinigung hält Nano-Titandioxid und Nano- $\text{CeO}_2$  gut zurück [48]. Eingesetzte synthetische Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT) werden bei ausreichend hoher Verbrennungstemperatur ( $> 850\text{ }^\circ\text{C}$ ) vollständig zerstört [49].

Labortechnische Untersuchungen von Vejerano et al. [50] hatten zum Ziel, die Einflüsse synthetischer Nanomaterialien (nano- $\text{TiO}_2$ , -NiO, -Ag, - $\text{CeO}_2$ , - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , CdSe/ZnS Quantum Dots und Fullerene) auf Verbrennungsprozesse und auf die Bildung von Feinstaub zu analysieren. Es konnten keine bedeutenden Auswirkungen synthetischer Nanomaterialien auf die Feinstaubbildung festgestellt werden, d. h. der Feinstaubanteil nahm nicht zu. Außerdem reduzierte die Verbrennung synthetischer metalloxidhaltiger Nanomaterialien die Bildung von PAK, die als Nebenprodukt in Verbrennungsprozessen entstehen.

Müllverbrennungsanlagen, die mit Rauchgaswäscher, Elektro- und Gewebefilter ausgestattet sind, setzten nach Liesen et al. [51] nur etwa 0,021 Gew.-% bis 0,25 Gew.-% der synthetischen Nanomaterialien in die Atmosphäre frei. Nach der Verbrennung lassen sich die synthetischen Nanomaterialien mit bis zu 99,75 % - 99,98 % hauptsächlich in Verbrennungsrückständen (Schlacke, Flugasche) und den Filterstäuben nachweisen. Demzufolge ist die Freisetzung der Nanopartikel mit dem Abgas vernachlässigbar klein, sofern eine Rauchgasreinigung nach dem Stand der Technik verwendet wird.

Untersuchungen mit synthetischem Nano-Bariumsulfat zeigten, dass nach den Verbrennungsprozessen ein relativ hoher Anteil von Nanopartikeln im Abgas vor der Abgasreinigung zu finden ist (8,8 % des Bariums  $\text{BaSO}_4$  in Flugasche) [52]. Weitere Versuche mit unterschiedlichen synthetischen Nanomaterialien sind jedoch nötig.

#### **4.6 Mechanisch-biologische Behandlungsanlage (MBA)**

In einer mechanisch-biologischen Behandlungsanlage können aus Restabfällen Wertstoffe, heizwertreiche Fraktionen als Ersatzbrennstoffe sowie verwertbare oder deponierbare mineralische Fraktionen gewonnen werden. Für die Betrachtung des stofflichen Recyclings der Wertstoffe und der energetischen Verwertung der Ersatzbrennstoffe wird auf die Kap. 4.2 und 4.5 verwiesen.

## 5 Ausblick

Anhand der bisherigen wissenschaftlichen Studien lassen sich noch keine konkreten Aussagen über das Verhalten synthetischer Nanomaterialien während der Entsorgungsprozesse und davon ausgehende Risiken machen. Zu den einzelnen Entsorgungswegen sind bisher nur sehr wenige Untersuchungen durchgeführt worden. Erste Ergebnisse geben keine Hinweise auf Risiken für Mensch und Umwelt, die bei der Verwertung und Entsorgung nanomaterialhaltiger Abfälle entstehen können. Mit weiteren Forschungsergebnissen kann in den kommenden Jahren gerechnet werden.

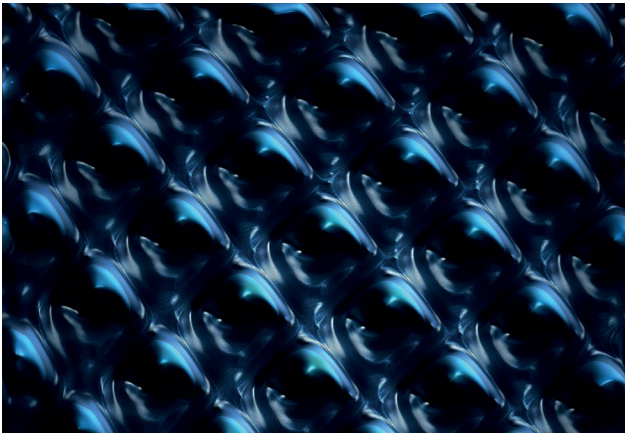


Abbildung 21: CNT-Textur, blau [Ljubomir Arsic/Shutterstock.com]

Eine einheitliche Definition für synthetische Nanomaterialien auf Bundesebene ist zu begrüßen. Zudem sollte eine Kennzeichnungspflicht für Produkte mit synthetischen Nanomaterialien eingeführt werden. Es sind weitere Untersuchungen im Bereich Marktüberwachung von Produkten und in den verschiedenen Abfallströmen nötig. Bereits bestehende Messmethoden im Umweltmonitoring müssen zukünftig um die Untersuchung synthetischer Nanomaterialien in der Umwelt erweitert und angepasst werden, um die langfristigen Umweltauswirkungen synthetischer Nanomaterialien auf die Umwelt bewerten zu können. Geeignete Analyseverfahren sind weltweit unter der Schirmherrschaft der OECD in der Entwicklung. Erste verwendbare Analysevorschriften wurden seitens der OECD bereits publiziert.

Die Fortschreibung der Nano-Forschungsstrategie der Bundesbehörden greift die bestehenden Wissenslücken auf. Die gemeinsame Forschungsstrategie ist Teil des am 14. September 2016 vom Bundeskabinett verabschiedeten Aktionsplans Nanotechnologie 2020 der Bundesregierung. In dieser Strategie sind in allen vier Forschungsschwerpunkten Forschungsziele aus dem Abfallbereich verankert.

# 6 Literatur und Quellen

Hinweis: sämtliche Internet-Downloads waren mit Stand vom Oktober 2017 verfügbar wie angegeben.

- [1] Democritou P. : (2014)  
[http://www.deutschlandfunk.de/nanotechnologie-nano-bomben-aus-wasser.676.de.html?dram:article\\_id=274034](http://www.deutschlandfunk.de/nanotechnologie-nano-bomben-aus-wasser.676.de.html?dram:article_id=274034)
- [2] (OECD) (2016): "Nanomaterials in Waste Streams: Current Knowledge on Risks and Impacts"  
<http://dx.doi.org/10.1787/9789264249752-en>
- [3] LUBW (2014) - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, - „Nanomaterialien – Charakterisierung und Messung“  
<http://www4.lubw.de/servlet/is/237490/?shop=true&shop-View=6644>
- [4] Börner, R. et al.: Untersuchung möglicher Umweltauswirkungen bei der Entsorgung nanomaterialhaltiger Abfälle in Abfallbehandlungsanlagen. TEXTE37/2016 Umweltforschungsplan des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl 3712 33 327. Dessau-Roßlau (2016)  
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/untersuchung-moeglicher-umweltauswirkungen-bei-der>
- [5] [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2011.275.01.0038.01.DEU&toc=OJ.L:2011:275:TOC](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2011.275.01.0038.01.DEU&toc=OJ.L:2011:275:TOC), [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1454326807978&uri=CELEX:32011H0696R\(03\)](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1454326807978&uri=CELEX:32011H0696R(03))
- [6] BMUB (2015): „Nanotechnologien und Abfall“ Bericht des BMUB, S. 4 , [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Nanotechnologie/nanodialog\\_4\\_fd3\\_bericht\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nanotechnologie/nanodialog_4_fd3_bericht_bf.pdf)
- [7] BMBF (2016): „Winzige Riesen in unserem Alltag“ [www.bmbf.de](http://www.bmbf.de)
- [8] [http://www.vditz.de/fileadmin/media/publications/pdf/79\\_ZTC-Studie\\_CNT.pdf](http://www.vditz.de/fileadmin/media/publications/pdf/79_ZTC-Studie_CNT.pdf)
- [9] <http://www.roadbike.de/rennraeder/test-merida-scultura-evo-909-e.366544.9.htm>
- [10] <http://nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/fullerene/materialinfo-fullerene>
- [11] Bansal R. et. Al (1988): „Active Carbons“, Marcel Dekker, New York/Basel, ISBN 0-8247-7842-1
- [12] <http://nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/siliziumdioxid/materialinfo-siliziumdioxid>
- [13] Hessen-Nanotech NEWS 4/2006. Nano-Produktion – Herstellung von und mit Nanotechnologie, Band 9
- [14] Europäisches Arzneibuch (Pharmacopoea Europaea) (2008), 6. Ausgabe, Grundwerk, Deutscher Apotheker Verlag Stuttgart. ISBN 978-3769253832
- [15] Som, C et al. (Mar 2010). Nanomaterialien in Textilien: Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheits-Aspekte, Fokus: synthetische Nanopartikel. Empa und TVS Textilverband Schweiz, St. Gallen 2010
- [16] <http://www.nanosilber.de/nanosilber/potential-von-nanosilber/>
- [17] N. Kanani, Galvanotechnik, Hanser Verlag, 2009, 697-699
- [18] G. Doria et al, Sensors, 2012, 12, 1657-1687
- [19] S.J.Yu et al., Environ. Sci.: Processes Impacts, 2013, 15, 78-92
- [20] <https://www.zusatzstoffmuseum.de/lexikon-der-zusatzstoffe/titandioxid.html>
- [21] <http://nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/titan-nitrid>
- [22] <http://nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/cer-dioxid/materialinfo-cer-dioxid>

- [23] <http://nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/aluminiumoxid/materialinfo-aluminiumoxid>
- [24] <http://nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/nanoclays/materialinfo-nanoclays>
- [25] <http://nanopartikel.info/nanoinfo/materialien>
- [26] Verband der Chemischen Industrie VCI (2017) [www.vci.de/vci/downloads-vci/top-thema/argumente-positionen-nanomaterialien-de.pdf](http://www.vci.de/vci/downloads-vci/top-thema/argumente-positionen-nanomaterialien-de.pdf)
- [27] [Pressecenter.org/fr/pressrelease/20140208/la-belgique-met-en-place-un-registre-des-nanomateriaux](http://Pressecenter.org/fr/pressrelease/20140208/la-belgique-met-en-place-un-registre-des-nanomateriaux)
- [28] BMBF (2016): „Winzige Riesen in unserem Alltag“ [www.bmbf.de](http://www.bmbf.de)
- [29] OECD (2016) “Nanomaterials in Waste Streams: Current Knowledge on Risks and Impacts, OECD Publishing, Paris
- [30] Danish Ministry of the environment (2014) “Nanomaterials in Waste” Environmental Project No. 1608
- [31] BMUB (2015) “Nanotechnologien und Abfall”, NanoDialog 5 der Bundesregierung [http://www.oekopol.de/wp-content/uploads/05\\_FD3\\_Nanomaterialien\\_und\\_Abfall\\_Bericht\\_bf.pdf](http://www.oekopol.de/wp-content/uploads/05_FD3_Nanomaterialien_und_Abfall_Bericht_bf.pdf)
- [32] UBA (2016) “Fortschreibung der gemeinsamen Forschungsstrategie der Bundesbehörden”
- [33] Vogel J.: Umwelt- und Gesundheitsaspekte der Nanotechnologie: Nanoabfälle - Gibt es ein Problem? Umweltbundesamt (2015) [http://www.oekopol.de/wp-content/uploads/05\\_Vogel\\_Nanos\\_in\\_Abfall\\_Fragestellung.pdf](http://www.oekopol.de/wp-content/uploads/05_Vogel_Nanos_in_Abfall_Fragestellung.pdf)
- [34] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktionsicherheit (BMUB): Nanotechnologien und Abfall. NanoDialog der Bundesregierung. Bericht des BMUB, S. 11-15 (2015) [http://www.bmub.bund.de/themen/gesundheit-chemikalien/nanotechnologie/details-nanotechnologie/artikel/4-dialogphase-fachdialog-3-abfall-und-entsorgung/?tx\\_ttnews-%5BbackPid%5D=2227](http://www.bmub.bund.de/themen/gesundheit-chemikalien/nanotechnologie/details-nanotechnologie/artikel/4-dialogphase-fachdialog-3-abfall-und-entsorgung/?tx_ttnews-%5BbackPid%5D=2227)
- [35] Part. F. et. Al (2017) “Synthetisch hergestellte Nanomaterialien in Konsumprodukten und deren Verbleib am Ende der Nutzungsphase“, Österr Wasser- und Abfallw 69: 43-50 <https://static-content.springer.com/pdf/art%3A10.1007%2Fs00506-016-0364-x.pdf?token=1498471973357--66ae518ab1fa7faa1bcb56c8cf29ceec792d61228147964024d3a1b0a1ef0d826f956d90bc3d374892fbab51ee63477ba25995fad5d81cae8dfc39bc01bc115c>
- [36] Danish Ministry of the Environment: Nanomaterials in Waste, Environment Projekt No. 1608 (2014) <http://mst.dk/service/publikationer/publikationsarkiv/2014/nov/nano-affaldsrapport/>
- [37] Struwe J., Schindler E.: Nanopartikel in End-of-life-Produkten wie PET-Flaschen, Kunststoffen und Reifen. Herausforderungen für die Recyclingbranche. Recycling und Rohstoffe, Band 6, S. 293-314 (2013) [http://www.vivis.de/phocadownload/2013\\_rur/2013\\_RuR\\_293\\_314\\_Struwe.pdf](http://www.vivis.de/phocadownload/2013_rur/2013_RuR_293_314_Struwe.pdf)
- [38] Fachdialog 3 „Nanotechnologien und Abfall“, Zusammenfassung der Diskussion vom FachDialog 3 am 28. Und 29. Oktober 2014 in Berlin, Dezember 2014
- [39] Kuhlbusch T. et al.: Emission von Nanopartikeln aus ausgewählten Produkten in ihrem Lebenszyklus. Umweltbundesamt – Texte 52/2010 (2010)
- [40] Gómez-Rivera, F., et al.: Fate of cerium dioxide (CeO<sub>2</sub>) nanoparticles in municipal wastewater during activated sludge treatment. Biores Technol 108, S. 300-304 (2012). Wang, Y., et al.: Fate and biological effects of silver, titanium dioxide, and C60 (fullerene) nanomaterials during simulated wastewater treatment processes. J Hazard Mater 201202, S. 16-22 (2012)

- [41] Nogowski A., Stintz M.: Abschätzung der Umweltgefährdung durch Silber-Nanomaterialien: vom chemischen Partikel bis zum technischen Produkt. Umsicht, Technische Universität Dresden (2014)  
[http://www.nanopartikel.info/files/projekte/Umsicht/UMSICHT-Abschlussbericht\\_TU-Dresden.pdf](http://www.nanopartikel.info/files/projekte/Umsicht/UMSICHT-Abschlussbericht_TU-Dresden.pdf)
- [42] Abfallbilanz 2016 Baden-Württemberg, Ressourcen aus unserer kommunalen Kreislaufwirtschaft
- [43] Baran et al (2017) „Verbleib und Verhalten von Nanopartikeln bei der Abfallverbrennung“ Österr Wasser- und Abfallw 69:51-65
- [44] Kumar P., Pirjola L., Ketzler M. (2013) „Nanoparticle emissions from 11 non-vehicle exhaust sources – a review: Atmospheric Environment 67, S252-277  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.011>
- [45] Müller N. et al (2012) „Nanomaterials in waste incineration and landfills“. Internal Empa-report.  
[http://www.empa.ch/plugin/template/empa/\\*124595](http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*124595)
- [46] Müller N. et al (2013) „Modelling the flows of engineered nanomaterials during waste handling“. Environmental Science: Processes & impacts 15 S 251-259.  
 Doi:10.1039/c2em30761h
- [47] Walser T, et al (2012) „Persistence of engineered nanoparticles in a municipal solidwaste incineration plant“, Nat Nano 7 (8), 520-524  
<http://dx.doi.org/10.1038/nnano.2012.64>
- [48] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktionsicherheit (BMUB): Nanotechnologien und Abfall. NanoDialog der Bundesregierung. Bericht des BMUB, S. 11-15 (2015)  
[http://www.bmub.bund.de/themen/gesundheit-chemikalien/nanotechnologie/details-nanotechnologie/artikel/4-dialogphase-fachdialog-3-abfall-und-entsorgung/?tx\\_ttnews-%5BbackPid%5D=2227](http://www.bmub.bund.de/themen/gesundheit-chemikalien/nanotechnologie/details-nanotechnologie/artikel/4-dialogphase-fachdialog-3-abfall-und-entsorgung/?tx_ttnews-%5BbackPid%5D=2227)
- [49] Danish Ministry of the Environment: Nanomaterials in Waste, Environment Projekt No. 1608 (2014)  
<http://mst.dk/service/publikationer/publikationsarkiv/2014/nov/nano-affaldsrapport/>
- [50] Vejerano, Eric P., et al., Emissions of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Polychlorinated Dibenzo-p-Doixins, and Dibenzofurans from Incineration of Nanomaterials, Environmental Science & Technology 47, S. 4866-4874 (2013)
- [51] Liesen, I.-M., et al., Freisetzung von Nanopartikeln bei der thermischen Abfallentsorgung – Stabilität von Nanopartikeln in Flamen. 4. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft vom 27-28., Münster: Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V. (2014)  
[http://www.dgaw.de/files/uploaded/140326\\_Stabilitat\\_von\\_NP\\_DGAW\\_Vortrag\\_Liesen.pdf](http://www.dgaw.de/files/uploaded/140326_Stabilitat_von_NP_DGAW_Vortrag_Liesen.pdf)
- [52] Baran P. J.: Untersuchung des Emissionsverhaltens von Nanopartikeln bei der Abfallverbrennung. RWTH Aachen. 5. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft (2015)  
[http://www.dgaw.de/files/uploaded/Wiko\\_Baran.pdf](http://www.dgaw.de/files/uploaded/Wiko_Baran.pdf)



