

Datenblatt

Einsatz von Nanomaterialien in Beschichtungen

1. Beschreibung der Anwendung

1.1 Produkte und Zweck des Einsatzes von Nanomaterialien¹

Kraftfahrzeuge, Flugzeuge, Schiffe, Maschinen, Fassaden und Innenräume von Häusern, Möbel, Haushaltsgeräte, Zeitschriften, Poster und Datenträger: Die Liste der Produkte, die mit Lacken und Anstrichen beschichtet sind, lässt sich beliebig fortsetzen. In Deutschland wurden 2012 etwa 2,6 Millionen Tonnen Lacke, Anstriche sowie Druckfarben produziert (VdL 2013). Der Bezug zu unserem Alltag ist also allgegenwärtig. Die Beschichtungen durch Lacke und Anstriche dienen sowohl dem Schutz vor mechanischen, chemischen und witterungsbedingten Belastungen als auch der ästhetischen Veredelung von Oberflächen. Um den steigenden Anforderungen an moderne Beschichtungen zu begegnen, ist die Lackindustrie bestrebt ihre Produkte immer weiter zu verbessern. So hat die Nanotechnik in den vergangenen Jahren zunehmend Bedeutung bei der Entwicklung von Beschichtungen gewonnen. Der Verband der deutschen Lack- und Druckfarbenindustrie (VdL) geht davon aus, dass in den kommenden 10 Jahren in Deutschland etwa 20 Prozent des Branchenumsatzes auf die Nutzung von Nanotechniken in Form von so genannten „Smart Coatings²“ beruhen werden (VdL 2010).

Bei der Herstellung von Lacken werden Einsatzstoffe, die nanoskalige Materialien enthalten, bereits seit jeher verwendet, wie Bariumsulfat und Eisenoxid als farbgebende Pigmente oder pyrogene Kieselsäuren zur Beeinflussung der Fließfähigkeit von Lacken. Die Entwicklung moderner Techniken zur Sichtbarmachung und wissenschaftlichen Beschreibung von Materialien und Strukturen im Nanometerbereich macht es in jüngster Zeit möglich, diese Nanomaterialien und -strukturen gezielter für die Be-

¹ Nanomaterialien bestehen aus abgrenzbaren strukturellen Bestandteilen in einer Größenordnung von 1 - 100 Nanometern ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) in mindestens einer Dimension (siehe auch die Empfehlung der Kommission vom 18.10.2011 zur Definition von Nanomaterialien (2011/696/EU)). Nanopartikel sind eine Teilmenge der Nanomaterialien und weisen in allen drei Dimensionen die o.g. Größenordnung auf. In der Umwelt kommen sowohl natürliche als auch anthropogene Nanomaterialien vor. In der Nanotechnik werden technisch erzeugte Nanomaterialien genutzt.

² „Smart Coatings“ sind Beschichtungen mit zusätzlichen Eigenschaften wie beispielsweise Wärmedämmung, Selbstreinigung, Abgabe von Wirkstoffen oder Selbstheilung.

schichtungstechnik herzustellen und zu nutzen. Darüber hinaus werden heute neuartige, nanobasierte Beschichtungen weitverbreitet angewendet, beispielsweise dienen sie zur Funktionalisierung der Oberflächen, zum Schutz vor Korrosion und Verunreinigung, Anhaftungen von Mikroorganismen³ und Graffiti oder sie sorgen für ein ansprechendes Design durch spezielle Farbeffekte (Luther und Zweck 2006).

1.2 In Beschichtungen enthaltene Nanomaterialien

Was ist eine „Beschichtung“?

Eine Beschichtung entsteht als durchgehende Schicht aus dem ein- oder mehrmaligen Auftragen eines Beschichtungsstoffs auf ein Substrat (DIN EN ISO 4618; 2.52)¹. Ausgehend von der bestehenden Norm (DIN EN ISO 4618; 2.53) ist ein Beschichtungsstoff ein flüssiges, pastöses oder pulverförmiges Produkt, das nach seiner Anwendung eine schützende und dekorative Beschichtung ergibt. Beschichtungsstoffe sind komplexe chemische Produkte; sie schließen Benennungen wie „Lack“, „Anstrichstoff“ und ähnliche Produkte ein. Vom stofflichen Aufbau her bestehen sie zumeist aus vier Gruppen von Bestandteilen:

- ▶ Bindemittel (auch als Filmbildner bezeichnet)
Die Bindemittel, zumeist auf Basis organischer Polymere oder Vorprodukte, sorgen dafür, dass bei der Trocknung und Härtung des Lacks eine zusammenhängende Beschichtung entsteht.
- ▶ Pigmente und Füllstoffe
Pigmente, zumeist unlösliche Farbkörper, dienen der Farbgebung.
Füllstoffe dienen der Erreichung und Beeinflussung bestimmter physikalischer Eigenschaften und sind meist mineralisch und ebenfalls unlöslich in Lösemitteln oder Bindemitteln.
- ▶ Lösemittel
Lösemittel sind aus einer oder mehreren Komponenten bestehende Flüssigkeiten, die andere Stoffe in Lösung bringen, ohne mit ihnen zu reagieren (Ausnahme: reaktive Lösemittel). Für konventionelle Lacke kommen organische Lösemittel wie Ester, Glykolether oder aliphatische Kohlenwasserstoffe in Frage.
Organische Lösemittel werden zunehmend durch Wasser ersetzt. Wasserbasierte Lacke haben andere Bindemittelsysteme; die Bindemittel sind zumeist auch nicht gelöst, sondern liegen in Form von Dispersionen vor („Dispersionslacke“).
- ▶ Additive
Additive sind aus Sicht ihrer chemischen Zusammensetzung sehr unterschiedliche Hilfsstoffe, die dem Beschichtungsstoff in der Regel nur in sehr kleiner Menge zugesetzt werden. Ihre Zugabe steuert eine Vielzahl von Eigenschaften der Beschichtung wie Fließverhalten, Oberflächenspannung, Glanz, Struktur, UV- oder Wetterbeständigkeit.

Nanomaterialien in den verschiedenen Beschichtungssystemen haben je nach Funktion einen unterschiedlichen Masseanteil. Werden einem Lack Nanomaterialien als Additiv beispielsweise zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit zugesetzt, beträgt ihr Masseanteil 3-7 Prozent (Deutsches Lackinstitut 2011). Nanotechnisch funktionalisierte Beschichtungen enthalten als Additive vor allem folgende Stoffe, die gezielt als Nanomaterialien zugegeben werden: Titandioxid, Siliziumdioxid, Carbon Black, Eisenoxid, Zinkoxid und Silber. Weitere in Beschichtungen enthaltene Nanomaterialien sind in Tabelle 1 aufgeführt.

³ Bauschäden, die durch anhaftende Mikroorganismen auf Fassadenoberflächen verursacht werden, liegen in Deutschland in einer geschätzten Größenordnung von jährlich 2-4 Mrd. Euro.

In der Praxis liegt niemals nur eine Teilchengröße vor, vielmehr liegen die Partikel in einer Verteilung aus verschiedenen Partikelgrößen über mindestens eine Größenordnung vor. Bei Pigmenten reicht die Teilchengröße vor der Weiterverarbeitung von einigen zehn Nanometern bis zu einigen tausend Nanometern⁴. Bindemittel, die sich mit Hilfe von Stabilisatoren auch in Wasser dispergieren lassen, bilden feine Teilchen mit einem Durchmesser von 50 bis etwa 500 Nanometer, die beim Trocknen der Beschichtung verschmelzen. Für Anwendungen, die eine bestimmte technische Eigenschaft (z.B. Kratzfestigkeit) erfordern, wird die Herstellung von Partikeln mit einer engen Teilchengrößenverteilung (Monodispersität) angestrebt. *Wenn im Folgenden von Nanomaterialien gesprochen wird, sind diese Materialien gemeint.*

Tabelle 1

Anwendungsbeispiele von Nanomaterialien in Beschichtungen und ihre Funktion (nach Paschen et al. 2003, Deutsches Lackinstitut 2012)

Funktion	Nanomaterial (Beispiel)	Nutzen/Wirkung	Branche
Farbbrillanz, Farbton, Farbefekte (Flip-Flop-Effekt), reproduzierbare Farben, gut dispergierbare Farben	Ruß (Carbon Black); Oxide (TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , SiO ₂ , Cr ₂ O ₃)(auf Glimmerplättchen oder SiO ₂ -Kugeln, mit Metallpigmenten), ZnO	Effektverstärkung von Metallpigmenten; Stabilisierung von Pigmenten und Füllstoffen; in Dispersionsfarben; Verhinderung von Rissbildungen (Schicht- und Blattsilikate); transparente Verbesserung der Lichteinheit	Fahrzeugtechnik, Konsumgüter (Möbel), Bautechnik
selbstreinigend („Easy-to-Clean“)	Anorganisch-organische Hybridpolymere (organisch modifizierte Keramiken), Nanosilikate/Kieselsole in Kunstharzteilchen einpolymerisiert; Silane (Siliziumbasisatom mit Zumischung chemischer Stoffe (z.B. Fluorverbindungen)); TiO ₂	Abweisung von Wasser und Schmutz, Schutz vor Algen- und Pilzbefall; Anti-Graffiti-Schutz: leichteres Entfernen unerwünschter Farbe	Fahrzeugtechnik, Bautechnik (Fassaden), Glas
schaltbar (elektrochrom, photochrom, thermochem)	Wolframoxid (WO ₃)(elektrochrom)	Farbefeekte	Fahrzeugtechnik
„Self-Assembly“	Polymer-Gel, Ormocere	selbstheilende Oberflächen	Fahrzeugtechnik, Kosmetik
monolagige Verbindungsschichten	Polymere	ultradünne Schichten	Fahrzeugtechnik, Konsumgüter
Kratzfestigkeit	Oxid (pyrogene Kieselsäure/Aerosil, SiO ₂ , Al ₂ O ₃)	Erhöhung der Kratzfestigkeit	Fahrzeugtechnik, I&K, Parkettböden, Kon-

⁴ Der Farbeindruck wird bei Pigmenten maßgeblich durch die Teilchengröße bestimmt. Je kleiner die Teilchen, umso kräftiger sind die Farben. Mit zunehmender Teilchengröße verschiebt sich auch der Farbton.

Funktion	Nanomaterial (Beispiel)	Nutzen/Wirkung	Branche
			sumgüter (Möbel), Optik (Brillengläser)
optimal eingestellte Fließeigenschaften	Oxid (pyrogene Kieselsäure/Aerosil)	Bewirkung neuer rheologischer Eigenschaften (Verformbarkeit, Fließeigenschaften, Thixotropierung)	Diverse
leitfähige Lacke für elektrostatische Sprühlackierung	Kohlenstoff: Fullerene, CNT	Optimierung des Sprühprozesses	Fahrzeugtechnik
photokatalytische Wirkung, antimikrobielle Wirkung	TiO ₂ , ZnO ⁵ , Ag	Beseitigung von Fetten, Schmutz, Algen, Bakterien, Pilzen, Geruchs- und Schadstoffen, Umwandlung von Stickoxid und Ozon aus Luft in unschädliche Verbindungen	Bautechnik (Fassaden, Schallmauern, Kacheln), Straßenbelag, Fahrzeuge Holzschutz, Glas
feuerhemmende Wirkung	SiO ₂	Beim Überschreiten einer bestimmten Temperatur Ausbildung eines Kohlenstoffschlums an der Holzoberfläche, der gegen Hitze isoliert, und nachfolgend Bildung einer flamm-schützenden Keramikschiicht	Bautechnik, Brandschutz bei Holz
Korrosionsschutz, Holzschutz	Zink- oder Aluminium ge-coated mit Nano-TiO ₂ , Nanoton (wie Hydrotalcit Mg ₄ Al ₂ (OH) ₁₂ CO ₃ xH ₂ O)	Nanoton-Beschichtung verzögert das Verblässen von Holz durch Ausbluten komplexer Chemikalien (wie Tannine)	Bautechnik, Fahrzeugtechnik, Holzschutz
UV-Schutz, IR-reflektierend bzw. absorbierend	(TiO ₂ ; ZnO, CeO ₂ , Eisenoxidpigmente (TEO; Nadellänge 50-100 nm, Nadeldicke 2 nm)	bessere UV-Beständigkeit, Blockierung von IR- und sichtbarem Licht, Raumklimakontrolle	Bautechnik (Fassaden), Holzschutz, Glas, Kunststoff

Durch den Einsatz von Nanomaterialien soll ein besserer Deckungsgrad, ein besseres Zusammenspiel zwischen Beschichtung und Oberfläche und eine langlebigere Beschichtung erreicht werden. Aufgrund der geringen Partikelgrößen von 100 nm und weniger eignen sich einige Nanomaterialien auch für den Einsatz in transparenten Beschichtungssystemen. Die Transparenz dieser Nanomaterialien, z.B. TiO₂ im sichtbaren Licht, ermöglicht zudem neuartige Additive mit spezifischen Eigenschaften für normalerweise nicht-transparente Beschichtungen.

⁵ Zinkoxid wird in der angegebenen Literaturquelle für antimikrobielle Eigenschaften in Lacken genannt. Es ist darauf hinzuweisen, dass dieser Stoff aber nicht im Biozid-Wirkstoffverfahren oder in den Anhängen der Biozid-Richtlinie gelistet ist. Daher darf er weder in dieser Funktion eingesetzt noch als im Lack antimikrobiell wirkend ausgelobt werden.

Nanobasierte Beschichtungen fallen sehr häufig, je nach Art der Struktur, unter die Begriffe der Nanokomposit- oder Hybridmaterialien. Dabei werden durch Kombination von Werkstoffen Materialeigenschaften realisiert, die keine der reinen Komponenten aufweisen, sondern durch ihre Mischung definiert sind. Dadurch können z.B. gegensätzliche Dinge wie Härte und Elastizität anstelle von Härte und Sprödigkeit miteinander kombiniert werden.

Beschichtungen, die Nanomaterialien enthalten, können ein deutlich besseres Eigenschafts- und Verarbeitungsprofil als konventionelle Beschichtungen zeigen (z.B. Erhöhung der Eindringhärte, hohe Dehnbarkeit, schnelles Trocknen, keine Quellung bei Wasserbelastung und hohe Wasserdampfdurchlässigkeit). Mit diesen Eigenschaften können zum Beispiel Holzlasuren auf Nanokompositbasis formuliert werden, die über ein schnelleres Aushärten (Frühblockfestigkeit) verfügen und zugleich eine höhere Dehnbarkeit aufweisen (Leuninger et al. 2004).

Photokatalytische TiO₂-Beschichtungen bieten selbstreinigende Eigenschaften mit gleichzeitiger antimikrobieller Wirkung. Da diese Oberflächen auch stark wasserabweisend sind, eignen sie sich für die Anwendung auf u.a. Spiegeln, selbstreinigenden Fenstern, Fensterrahmen, Ziegeln, Wandfarben, Fliesen, Flachglas.

Der Zusatz von Nanomaterialien in Beschichtungen soll den Ersatz umweltschädlicher halogenhaltiger Brandschutzmittel ermöglichen. So können diese Beschichtungsstoffe zum Brandschutz auf das zu schützende Material (Glas, Holz, Metall, Kunststoff oder Beton) appliziert werden. Im Brandfall entsteht dadurch innerhalb von Sekunden eine keramische Schicht, die wärmedämmend wirkt und die Rauchgasentwicklung drastisch reduziert (Luther und Zweck 2006). Im Zusammenhang mit brandhemmenden Beschichtungen werden vermehrt auch Kohlenstoff-Nanoröhren (CNT) diskutiert (Rössler 2007).

Weitere Anwendungsfelder für spezielle Beschichtungen sind Bereiche mit hohen Anforderungen an Transmission und Entspiegelung: als Abdeckglas für Photovoltaik-Module und Warmwasser-Kollektoren, Architektur- und Gewächshausanwendungen. Hier kann durch eine Antireflexschicht die Energiedurchlässigkeit von Glas um 6% erhöht werden (Hofmann 2006).

Der Einsatz von nanomaterialhaltigen Beschichtungen auf Stahloberflächen könnte den Korrosionsschutz verbessern und dabei den Einsatz von umweltschädlichem Chromat überflüssig machen (Goedicke 2009).

1.3 Herstellung

In ihrer Anwendung müssen nanobasierte Beschichtungen genauso wie konventionelle Systeme verschiedensten Anforderungen genügen und alle Praxistests meistern.

Je nach Einsatzgebiet der nanobasierten Beschichtungen ist eine genau definierte und enge Partikelgrößenverteilung (Monodispersität) der Nanomaterialien erforderlich. Mit Hilfe bestimmter Syntheseverfahren können gezielt Nanomaterialien hergestellt werden. Für die Herstellung von Nanomaterialien werden grundsätzlich zwei Strategien verfolgt: „Top-Down“ und „Bottom-Up“⁶. Im Folgenden werden beispielhaft wesentliche Herstellungsverfahren beschrieben. Es gibt für die verschiedenen Anwendungen sehr spezifische Herstellungsprozesse, sodass eine umfassende Wiedergabe aller möglichen Verfahren an dieser Stelle nicht möglich ist. Ein wichtiger Prozess bei der Herstellung von nanobasierten Beschichtungen ist das so genannte Sol-Gel-Verfahren. Hierbei wird ein Sol (eine viskose, kolloidale Dispersion) auf eine Oberfläche mittels herkömmlicher industrieller Verfahren (Tauchbeschichtung, Sprühen, Rotationsbeschichtung) aufgebracht. Die entstehenden Schichten sind zwischen 0,5 und 3 µm dünn, können im Extremfall auch nur wenige Nanometer dünn und transparent sein. Die Beschichtung kann bei hohen Temperaturen in die Oberfläche eingebrannt werden, wodurch die Beständigkeit der Beschichtung erhöht wird. Wenn beispielsweise auf diese Weise ein poröses SiO₂-Schichtsystem auf Glas aufgebracht und anschließend thermisch gehärtet wird, erhält man, bedingt durch die Porosität dieses einfachen SiO₂-Einschichtsystems, ein Antireflexverhalten über einen sehr weiten Spektralbereich.

Sole, die bei Raumtemperatur zu einer festen Schicht austrocknen, sind in einer Reihe von Produkten (in flüssiger Form oder als Spray) im Handel für die nachträgliche Behandlung von Oberflächen (Fensterglas, Kacheln) erhältlich; diese Beschichtungen sind aber nicht dauerhaft (Greßler et al. 2010).

Der Einsatz von nanobasierten Beschichtungen im Bereich Außenfassaden beruht auf der Anwendung von anorganisch/organischen Nanokompositen als Bindemittel für wasserbasierte Fassadenbeschichtungen. Die Nanokomposite werden durch Emulsionspolymerisation von Acrylaten in Silica-Solen hergestellt. Hierdurch wird eine gleichmäßige Verteilung der Siliziumdioxidnanopartikel im Polymer erreicht und es kann ein Silica-Gehalt von bis zu 50 % in den Nanokompositen erzielt werden. Durch den anorganischen Anteil werden Kratzfestigkeit und Härte der Beschichtung wesentlich verbessert. Gleichzeitig erhält die Oberfläche durch die hohe

⁶ Top-Down: die mechanische Zerkleinerung des Ursprungmaterials mittels Malprozess; Bottom-Up: Strukturen werden über einen chemischen Prozess aufgebaut.

Konzentration polarer Silanol-Gruppen superhydrophile Eigenschaften, die zu einem Selbstreinigungseffekt auf der Fassadenfläche führen (Luther und Zweck 2006).

Photokatalytische Beschichtungen mit nanoskaligem TiO_2 werden üblicherweise durch eine chemische Gasphasenabscheidung (Chemical Vapor Deposition, CVD)⁷ auf Oberflächen aufgebracht. Neben Glasoberflächen werden auch Oberflächen von Kunststoffen (PVC), Lärmschutzplatten, Fliesen, Dachziegeln oder Betonplatten mit diesen Beschichtungen versehen. Die Wahl des Herstellungsverfahrens orientiert sich am Anwendungsbereich und an den Anforderungen an die Beschichtung. Die Anwendung des Sol-Gel-Verfahrens kann für den Hersteller auf Grund von niedrigeren Temperaturen während des Herstellungsprozesses, kürzerer Prozessführung und geringerem Energieeinsatz günstiger sein.

1.4 Freisetzung von Nanomaterialien

Die mögliche Freisetzung von Nanomaterialien aus Beschichtungen war bereits Gegenstand einer Reihe von Untersuchungen (Vorbau et al. 2009, Guiot et al. 2009, Göhler et al. 2010, Göhler et al. 2013). In Abrieb-, Schleif- und Alterungsversuchen wurden Partikel kleiner als 100 nm freigesetzt, die zugesetzten Nanopartikel waren allerdings immer fest in die Bindemittelmatrix eingebunden. Simuliert wurde die normale Nutzung beschichteter Oberflächen (Parkett) mittels Abrasionsversuchen, das Abschleifen von Altanstrichen mittels Plan-Umfangs-Längs-Schleifen (DREMEL), der Einfluss der Alterung sowie der Einfluss wetterbedingter Oberflächenverwitterung. Unter anderem wurden die Freisetzung von TiO_2 -Nanomaterialien aus einer Beschichtung auf unterschiedlichem Untergrund (Holz, Kunststoff, Ziegelstein) und die Beanspruchung (z.B. Witterung, mechanische Beanspruchung) untersucht. Gemessen wurde eine Partikelgrößenverteilung zwischen 15 und 616 nm mit maximal 630 Partikeln pro cm^3 Luft (Hsu und Chein 2007). Eine Freisetzung isolierter TiO_2 -Nanopartikel konnte nicht nachgewiesen werden. Die Partikelgrößenverteilung unterschied sich nicht signifikant bei Beschichtungen mit und ohne zugesetzte Nanomaterialien. Im Allgemeinen nehmen die Experten an, dass eine Freisetzung isolierter Nanoobjekte aus Beschichtungen nur durch einen chemisch oder thermisch bedingten Abbau des Matrixmaterials, nicht jedoch durch mechanische Behandlung möglich ist (Göhler et al. 2013). Offen bleibt, ob freigesetztes nanomaterialhaltiges Matrixmaterial in der Umwelt Prozessen unterliegt, die zu ihrem weiteren Abbau führen und nachfolgend damit auch zu einer Freisetzung isolierter Nanomaterialien.

⁷ Bei der chemischen Gasphasenabscheidung wird an der Oberfläche eines Substrates aufgrund einer chemischen Reaktion aus der Gasphase eine Feststoffkomponente abgeschieden. Dieses Beschichtungsverfahren ermöglicht auch die gleichmäßige Beschichtung von feinsten Vertiefungen oder der Innenseite von Hohlkörpern.

Möglich erscheint eine Freisetzung von Nanomaterialien durch Verwitterung der Trägermatrix, etwa bei photochemisch abbaubaren Materialien. Untersuchungen (Kaegi et al. 2008, Kaegi et al. 2010) zeigten, dass aus Fassadenfarben geringe Mengen synthetischer TiO₂-Partikel in Größen von 20 bis 300 nm bzw. Nanosilberpartikel in Größen von unter 15 nm durch Verwitterungsprozesse freigesetzt und durch Regenwasserablauf in die Umwelt gelangen können. Aus getrockneten Beschichtungen laugt Nano-TiO₂ nicht aus, kann aber in die Atemluft geraten, wenn es zusammen mit dem Bindemittel während des Verschleißes frei wird (Kaegi et al. 2008).

2. Umwelt- und Gesundheitsaspekte

2.1 Umweltentlastungspotenzial

Die wichtigste Aufgabe von Beschichtungen ist der Schutz von Bauwerken, Maschinen, Fahrzeugen und Gebrauchsgegenständen. So leisten sie auf Oberflächen von Metall, Holz und weiteren Werkstoffen einen bedeutenden Beitrag zur Schonung von Ressourcen durch Erhöhung der Lebensdauer und Verringerung der notwendigen Ersatzintervalle von Bauwerken und Gebrauchsgütern.

Auch Nanotechnik-basierte Beschichtungen können zur weiteren Entlastung der Umwelt beitragen (Steinfeldt et al. 2004). Durch die Reduzierung der notwendigen Beschichtungsdicke – der Nanolack benötigt häufig nur 1/10 der Menge herkömmlichen Lacks – können Rohstoffe eingespart werden. Vorteile aus der Gebrauchsphase sind insbesondere im Transportsektor im Zuge des Leichtbautrends zu erwarten. Neben der Automobilindustrie könnten sich diese Potenziale auch stark in der Flugzeugindustrie und Bahnindustrie auswirken. Weiteres Optimierungspotenzial besteht darin, den Lösemittelanteil sowie den Anteil an toxischen Verbindungen (z.B. Chromverbindungen) in der Lackapplikation zu senken oder zu substituieren.

Selbstreinigende bzw. leicht zu reinigende Oberflächen können den Reinigungsaufwand reduzieren. Insbesondere bei der Gebäudereinigung können der Verbrauch von Energie und Reinigungsmitteln reduziert und die Lebensdauer des zu schützenden Gegenstandes verlängert werden. Bei UV-härtbaren Beschichtungen auf Basis anorganisch-organischer Bindemittel, die unter UV-Bestrahlung im Sekundenbereich trocknen, kann der Energieaufwand beim Lackierprozess durch Wegfall langer Trocknungsstrecken verringert werden. Flüchtige Lösemittel sind in der Regel weniger oder gar nicht enthalten.

Eine Reihe von Umweltentlastungen über nanomaterialhaltige Beschichtungen ist also prinzipiell zu erwarten. Allerdings gibt es derzeit keine verlässlichen quantitativen Studien zu den tatsächlichen Entlastungspotenzialen. In der Regel fehlt bei der Beschreibung von Umweltvorteilen von Produkten eine Analyse und Bewertung des Rohstoff- und Energieverbrauchs bei deren Herstellung sowie des Verbleibs und des Verhaltens von Materialien nach Ablauf ihrer Lebensdauer (Abfallphase).

2.2 Umweltauswirkungen

Das Umweltrisiko durch Beschichtungen, in denen Nanomaterialien fest in eine Trägermatrix eingebunden sind, wird auf Grund der eingeschränkten Freisetzung isolierter Nanomaterialien derzeit als gering eingeschätzt. Bisher gibt es keine Hinweise auf eine mögliche Umweltgefährdung durch nanobasierte Oberflächenbeschichtungen. Dennoch besteht die Möglichkeit, dass die in den Beschichtungen enthaltenen Nanomaterialien z.B. – wie bereits im Abschnitt 1.4 beschrieben – durch Verwitterungsprozesse austreten können. Laborstudien zeigen, dass photokatalytisch aktives TiO_2 unter Einfluss von simuliertem Sonnenlicht auf Grund der Bildung freier Sauerstoffradikale toxisch auf aquatische Organismen wirkt (Ma et al. 2012). Nanosilber, als weiteres in Beschichtungen vorkommendes Nanomaterial, wird vor allem wegen seiner antibakteriellen Wirkung durch die Freisetzung von Silberionen und der daraus resultierenden Hemmung des Wachstums von Mikroorganismen eingesetzt. Kolloidales Silber wirkt toxisch auf Wasserorganismen und ist daher als stark wassergefährdend (Wassergefährdungsklasse 3) eingestuft. Zahlreiche Studien zeigen die aquatoxische Wirkung von Nanosilber; darüber hinaus wurden auch Effekte auf bodenlebende Organismen gefunden (Asghari et al. 2012, Bilberg et al. 2012, Wang et al. 2012, Schlich et al. 2013, Volker et al. 2013, Ribeiro et al. 2014). Die gefundenen toxischen Effekte von nanoskaligem Silber werden dabei hauptsächlich durch die freigesetzten Silberionen hervorgerufen. Diese Freisetzung ist allerdings von Stabilität, Form und Coating des Nanosilbers, als auch von den umgebenden Umweltbedingungen abhängig (Gondikas et al. 2012, Kennedy et al. 2012, Tejamaya et al. 2012). Darüber hinaus gibt es Studien, die auf einen zusätzlichen Partikeleffekt hindeuten (Bilberg et al. 2012). Dies ist insbesondere hinsichtlich einer möglichen Langzeitwirkung zu berücksichtigen. Zu weiteren in Beschichtungen denkbaren Nanomaterialien wie nanoskaligem Zinkoxid, Eisenoxid oder Carbon Black liegen Daten zur Ökotoxikologie vor. Wie auch bei nanoskaligem TiO_2 und Silber ist jedoch die Informationslage hinsichtlich möglicher schädigender Wirkungen – vor allem nach Langzeitexposition – nicht ausreichend, um abschließende Aussagen vornehmen zu können.

Aktuelle Umweltkonzentrationen von den in Beschichtungen eingesetzten Nanomaterialien sind bislang nicht bekannt. Bei der Entwicklung von Nanobeschichtungen sollte ein entsprechendes Design berücksichtigt werden, mittels dessen ein Eintrag in die Umwelt über den gesamten Lebenszyklus zumindest weitgehend vermieden kann.

2.3 Gesundheitliche Auswirkungen

Die bestimmungsgemäße Verwendung von Produkten, deren Oberflächen mit fest in eine Matrix eingebundenen Nanomaterialien beschichtet sind, birgt für den Verbraucher nach derzeitigem Stand des Wissens kein quantifizierbares nanospezifisches Gesundheitsrisiko. Potenzielle Gesundheitsrisiken bestehen vorrangig beim Einatmen von Staub, der bei der Herstellung und Verarbeitung der Nanomaterialien oder beim Schleifen, Schneiden, Bohren oder Fräsen der Beschichtungen entsteht. Das Auftragen von Lacken in Form von Sprays kann die Gesundheit von Verbrauchern und Verbraucherinnen gefährden, wenn sie nicht sachgemäß angewendet werden. Treibgassprays produzieren Aerosole (feinste Flüssigkeitströpfchen) in der Größe von einigen Dutzend Nanometern bis zu rund hundert Mikrometern. Tröpfchen kleiner als 10 Mikrometer können tief in die Lunge eindringen, unter Umständen bis zu den Lungenbläschen (Alveolen), die durch das Einwirken oberflächenaktiver Substanzen aus Imprägnierungssprays kollabieren können (BAG 2007). Ein Einatmen des Sprühnebels aus solchen Produkten ist daher auf jeden Fall zu vermeiden – unabhängig davon, ob sie herkömmliche oberflächenaktive Substanzen beinhalten oder laut Herstellerangaben auf Nanotechnik beruhen – und die Anwendungsvorschriften sind genau zu beachten. Eine Anwendung in geschlossenen Räumen ist keinesfalls anzuraten.

Zur chronischen Inhalationstoxizität von synthetischen Nanomaterialien liegen bislang nur wenige Studien (zu TiO₂ und Industrieruß) vor. Diese zeigten bei Ratten deutliche Effekte wie entzündliche Reaktionen und Tumoren. Allerdings ist derzeit strittig, ob primäre gentoxische Effekte oder die Folgen von Überladung und Entzündung für die Kanzerogenität bestimmter Nanomaterialien ursächlich sind. Auch ist unklar, ob im umweltrelevanten Niedrigdosisbereich Effekte zu erwarten sind. Aus diesem Grund hat das Bundesumweltministerium (BMUB) zusammen mit der BASF eine umfangreiche chronische *in vivo*-Inhalationsstudie an Ratten initiiert, im Rahmen derer die Wirkung am Beispiel von nanoskaligem Cerdioxid (Nano-CeO₂) in verschiedenen Konzentrationen analysiert wird. Die Untersuchung ist auf vier Jahre ausgelegt und richtet sich nach den Prüfvorgaben der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD). Das Umweltbundesamt (UBA), das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) und die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) übernehmen als unabhängige Fachbehörden die

anschließende Auswertung der Studie (siehe auch Pressemitteilung des BMUB Nr. 066/12 vom 15.05.2012).

Denkbar wäre auch eine dermale Aufnahme von Nanomaterialien bei der Herstellung und Aufbringung Nanomaterial-haltiger Lacke und Anstriche oder bei Abbau des Matrixmaterials bestehender Nanomaterial-haltiger Beschichtungen. Zahlreiche Studien zeigen, dass gesunde, unversehrte Haut eine gute Barriere für solche TiO₂- und ZnO-Nanopartikel darstellt, die auch in Sonnenschutzcremes Verwendung finden: Die Nanopartikel verblieben in den oberen Schichten der Hornschicht oder wurden wieder an die Hautoberfläche transportiert und abgerieben (EU-Projekt „Nanoderm“⁸). Für andere Nanopartikel gibt es allerdings Hinweise, dass sie in tiefer gelegene Schichten der Haut gelangen können: So durchdrangen Gold-Nanopartikel (Durchmesser 5 nm) die Hornschicht intakter Mäusehaut (Huang et al. 2010) und Quantenpunkte⁹ (Ø 4,5 nm - 12 nm) drangen bei Schweinen bis in die Lederhaut vor (Ryman-Rasmussen et al. 2006). Derzeit gibt es keine Hinweise dafür, dass derartig kleine Nanopartikel als freie Partikel aus Lacken und Anstrichen freigesetzt werden können.

Für Beschichtungen, die Nanosilber enthalten, ist nicht geklärt, ob eine unkontrollierte, großflächige und niedrig dosierte Anwendung in Alltagsprodukten zur Selektion von silberresistenten Mikroorganismen führt. Da Silberresistenzgene und Antibiotikaresistenzgene in Bakterien oft auf denselben Plasmiden liegen und diese an andere Bakterien weitergegeben werden können, könnte dies (unter entsprechenden Selektionsbedingungen) somit nicht nur zu einer Silberresistenz, sondern auch zu einer Antibiotikaresistenz in bisher nicht resistenten Stämmen führen (Pressemitteilung BfR Nr. 08/2012 vom 27.02.2012).

3. Rechtliche Rahmenbedingen

Hersteller der Lackindustrie sind derzeit nicht verpflichtet, Produkte mit Nanomaterialien als solche zu kennzeichnen.

Die Ausrüstung von Beschichtungen mit Bioziden wird über die Biozid-Verordnung 528/2012 geregelt, die seit September 2013 anzuwenden ist. In der Biozid-Verordnung sind Nanomaterialien ausdrücklich geregelt: Enthält ein Biozidprodukt Nanomaterialien, müssen für diese die Risiken sowohl für die Gesundheit von Mensch und Tier als auch für die Umwelt gesondert betrachtet werden. Weiterhin müssen auf dem Etikett von

⁸ NANODERM - Quality of Skin as a Barrier to ultra-fine Particles. Das Forschungsprojekt wurde durch die Europäische Kommission gefördert. Project ID: QLK4-CT-2002-02678 (Butz et al. 2007)

⁹ Ein Quantenpunkt (engl. *quantum dot*) ist eine meist aus Halbleitermaterial bestehende nanoskopische Materialstruktur.

Biozidprodukten sowohl die verwendeten bioziden Wirkstoffe als auch die Namen aller in den Biozidprodukten enthaltenen Nanomaterialien mit der anschließenden Angabe „Nano“ in Klammern angegeben werden. Dabei wird die Definitionsempfehlung der EU-Kommission zu Nanomaterialien rechtlich verbindlich umgesetzt.

Im Rahmen der Europäischen Chemikalienverordnung REACH werden Nanomaterialien grundsätzlich zwar erfasst, aber es bestehen bisher keine spezifischen Anforderungen hinsichtlich der Datenbasis und Risikobewertung. Auf europäischer Ebene werden zurzeit verschiedene Anpassungsoptionen diskutiert. Auch die Bundesoberbehörden (BAuA, BfR und UBA) haben ein gemeinsames Konzept hierzu entwickelt (UBA et al. 2013). Hinsichtlich der Arbeitssicherheit hat die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) gemeinsam mit dem Verband der Chemischen Industrie (VCI) einen Leitfaden für Tätigkeiten mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz erstellt (BAuA-VCI 2012). Der Verband der deutschen Lack- und Druckfarbenindustrie hat speziell für seine Branche einen Leitfaden für den Umgang mit Nanoobjekten am Arbeitsplatz veröffentlicht (VDL 2010).

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Nanomaterialien aus Abfällen, die nanomaterialhaltige Beschichtungen haben, durch Auswaschung in die Umwelt gelangen. Gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) trägt der Abfallerzeuger bis zur endgültigen Entsorgung seiner Abfälle die Verantwortung.

4. Instrumente zur Verbraucherinformation

Große Unsicherheit herrscht bei Verbrauchern, ob es sich bei Produkten, die mit dem Schlagwort „Nano“ beworben werden, tatsächlich um nanomaterialhaltige Produkte handelt. Eine verpflichtende Kennzeichnungs- oder Meldepflicht für nanomaterialhaltige Beschichtungen, solange diese nicht unter die EU-Biozid-Verordnung fallen, gibt es nicht. Allerdings wird die Notwendigkeit dieser Instrumente zur Verbesserung der Transparenz in Deutschland und auf europäischer Ebene von den verschiedenen Interessensgruppen kontrovers diskutiert. Verschiedene europäische Mitgliedstaaten haben ein nationales Register für nanomaterialhaltige Produkte eingeführt oder sind im Begriff dieses zu tun. Allerdings wird von diesen und anderen Mitgliedstaaten ein europäisches Register bevorzugt. Die EU-Kommission prüft derzeit noch, ob sie einen Nanoproduktregister einrichten wird. Das UBA hat im Juni 2012 ein eigenes Konzept für ein teilöffentliches europäisches Register für nanomaterialhaltige Produkte veröffentlicht (UBA 2012).

5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Über die in Beschichtungen eingesetzten Nanomaterialien bestehen weiterhin Wissens- und Informationslücken zur Exposition, zum Umweltverhalten, zu human- und öko-toxikologischen Effekten sowie hinsichtlich der Nachhaltigkeit solcher Beschichtungen. Aus Umweltsicht besteht daher ein vielfältiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Erforderlich ist die

- ▶ Entwicklung und Anpassung geeigneter standardisierter Mess-, Prüf- und Analysenverfahren zur Expositionsmessung von Nanomaterialien aus Beschichtungen in den verschiedenen Umweltkompartimenten (Wasser, Boden, Luft). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Nanomaterialien meist nicht als einzelne Nanopartikel in die Umwelt gelangen, sondern an und in Beschichtungsmaterialien gebunden sein können;
- ▶ Entwicklung und Anpassung von Testrichtlinien, die eine Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen zu Umweltwirkung und -verhalten von Nanomaterialien ermöglichen;
- ▶ Entwicklung von Methoden, die die Freisetzung von Nanomaterialien beim Gebrauch und bei der Entsorgung von Produkten mit nanomaterialhaltigen Beschichtungen über ihren Lebenszyklus erfassen; Einzelfallbetrachtung von Nanomaterialien über den Produktlebenszyklus: Ermittlung ihrer Stabilität in den Beschichtungen, ihres Verbleibs und Verhaltens in der Umwelt nach z.B. Verwitterung oder Abrieb;
- ▶ Untersuchung der Biopersistenz - vor allem in der Lunge - sowie der Bioverfügbarkeit und (Öko-)Toxizität von solchen Nanomaterialien, die in Beschichtungen verwendet werden;
 - ▶ ökobilanzielle Betrachtung zur Beurteilung der Vorteile von nanomaterialhaltigen Beschichtungen und deren Produkten im Vergleich zu konventionellen Produkten unter Einbezug der Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit über den Produktlebenszyklus. Das in den Lebenszyklus- und ökobilanziellen Analysen generierte Wissen kann für die Entwicklung umweltverträglicher Beschichtungen genutzt werden.
 - ▶ Untersuchung der Entsorgung von nanomaterialhaltigen Beschichtungen, z.B. bei der Verbrennung oder im Recycling, da hier bisher kaum Wissen über das Verhalten und die Freisetzung von Nanomaterialien und deren Auswirkung auf die stattfindenden Prozesse vorliegt. Ggf. Entwicklung von Konzepten zur sachgerechten Entsorgung.

6. Fazit

Neuartige Anwendungen sind grundsätzlich dem Vorsorgeprinzip entsprechend vor ihrer Markteinführung auf ihre Unbedenklichkeit für die menschliche Gesundheit und die Umwelt zu prüfen. Eine Risikobewertung soll eine Besorgnis ausschließen oder Risikomanagementmaßnahmen aufzeigen, mit denen das Risiko auf ein vertretbares Maß reduziert werden kann.

Für das Umweltbundesamt ist die Umweltverträglichkeit von Nanomaterialien und deren Anwendung ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Diskussion ihrer Chancen und Risiken. Dies gilt insbesondere dann, wenn Nanomaterialien in unmittelbarem Kontakt mit Menschen kommen oder in ihrem Lebenszyklus in die Umwelt gelangen können. Zu toxikologischen und ökotoxikologischen Eigenschaften der dabei verwendeten Nanomaterialien liegen zwar Daten vor, sie sind aber oft nicht vollständig und vergleichbar, so dass derzeit keine abschließende Bewertung der Risiken möglich ist. Der Grundsatz, je stabiler die Einbettung der Nanomaterialien in Beschichtungen, desto sicherer für Umwelt und Gesundheit, sollte daher bei der Herstellung berücksichtigt werden.

Nanotechnik-basierte Beschichtungen können durch die Reduzierung der notwendigen Beschichtungsdicke, die Senkung des Lösemittelanteils sowie des Anteils an toxischen Verbindungen (z.B. Chromverbindungen) in der Lackapplikation zur Entlastung der Umwelt beitragen. Selbstreinigende bzw. leicht zu reinigende Oberflächen können zudem den Reinigungsaufwand und damit den Verbrauch von Energie und Reinigungsmitteln reduzieren und die Lebensdauer des zu schützenden Gegenstandes verlängern.

Neben den Chancen für den Umweltschutz sollten auch Risiken von Nanomaterialien und ihrer Anwendung bereits in einer frühen Entwicklungsphase untersucht werden, um die Sicherheit der nanomaterialhaltigen Beschichtungen zu gewährleisten. Das Umweltbundesamt empfiehlt die Entwicklung und Standardisierung geeigneter Mess- und Analytikmethoden, die einen besseren Nachweis und eine zutreffende Expositionsschätzung ermöglichen. Beschichtungen sollten bereits vor ihrer Vermarktung hinsichtlich der möglichen Freisetzung der enthaltenen Nanomaterialien über ihren gesamten Lebenszyklus untersucht werden. Außerdem ist die ökologische Nachhaltigkeit der Produkte unter Berücksichtigung von Materialströmen, Energieverbrauch, Abfällen und Emissionen zu prüfen.

Bisher gibt es keine umfassenden Informationen, in welcher Form Nanomaterialien in Beschichtungen auf den Markt kommen. Um für Akteure in der Wertschöpfungskette sowie für Verbraucher Transparenz hinsichtlich

der Produkte mit den genannten Inhaltsstoffen zu schaffen, sollten solche nanomaterialhaltigen Beschichtungsstoffe in einem Register für nanomaterialhaltige Produkte erfasst werden, für die eine Freisetzung der Nanomaterialien (im Sinne der Definition von Seite 2 unten) über den gesamten Lebenszyklus nicht ausgeschlossen werden kann.

Die Verbraucher sollten sowohl über den möglichen Umweltnutzen als auch über das mögliche Umweltrisiko der mit Nanomaterialien versehenen Beschichtungen aufgeklärt und über besondere Handhabungsanforderungen informiert werden. Der Informationsaustausch zwischen Forschern, Produktentwicklern, Verbrauchern und Entscheidungsträgern sollte auch im Interesse des Umweltschutzes kontinuierlich weitergeführt werden.

7. Quellen- und Literaturverzeichnis

- Asghari, S., Johari, S.A., Lee, J.H., Kim, Y.S., Jeon, Y.B., Choi, H.J., Moon, M.C., Yu, I.J. (2012): *Toxicity of various silver nanoparticles compared to silver ions in Daphnia magna*. J Nanobiotechnology 10, 14.
- BAG (2007): *Treibgassprays: ein Gesundheitsrisiko?* Bundesamt für Gesundheit (BAG) Schweiz, 12/07.
www.bag.admin.ch/themen/chemikalien/00228/04394/index.html?lang=de
- BAuA-VCI (2012): *Empfehlung für die Gefährdungsbeurteilung bei Tätigkeiten mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz*.
http://www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/Gd4.html;jsessionid=F8436F0141A96907EC623477C6CCE38B.1_cid380
- Bilberg, K., Hovgaard, M.B., Besenbacher, F., Baatrup, E. (2012): *In Vivo Toxicity of Silver Nanoparticles and Silver Ions in Zebrafish (Danio rerio)*. J Toxicol 2012, 293784.
- Butz, T. et al. (2007): *NANODERM - Quality of Skin as a Barrier to ultra-fine Particles*. Final Report. <http://www.uni-leipzig.de/~nanoderm/Downloads/downloads.html>
- Deutsches Lackinstitut (2011): *Nanolack-Studie – Entweichen Nanoteilchen aus dem Lack?* Lack im Gespräch, Informationsdienst Deutsches Lackinstitut Nr. 110, Seite 9-11. http://www.lacke-und-farben.de/fileadmin/templates/img/pdf/LIG_110.pdf
- Deutsches Lackinstitut (2012): *Brandschutz-Beschichtungen – 40 Minuten können Leben retten*. Lack im Gespräch, Informationsdienst Deutsches Lackinstitut Nr. 112, Seite 5. http://www.lacke-und-farben.de/fileadmin/templates/img/pdf/LIG_112.pdf
- Goedicke, S. (2009): *High temperature protection – Novel pigments in sol-gel coatings inhibit corrosion at up to 1300°C*. European Coatings Journal 09/2009, pp.34-37.
- Göhler, D., Stintz, M., Hillemann, L., Vorbau, M. (2010): *Characterization of nanoparticle release from surface coatings by the simulation of sanding process*. Ann. Occup. Hyg., 54 (6), 615-624, 2010.
<http://annhyg.oxfordjournals.org/content/54/6/615.abstract>
- Göhler, D., Nogowski, A., Fiala, P., Stintz, M. (2013): *Nanoparticle release from nanocomposites due to mechanical treatment at two stages of the life-cycle*. J. Phys.: Conf. Ser. 429 012045. DOI: 10.1088/1742-6596/429/1/012045.
- Gondikas, A.P., Morris, A., Reinsch, B.C., Marinakos, S.M., Lowry, G.V., Hsu-Kim, H. (2012): *Cysteine-Induced Modifications of Zero-valent Silver Nanomaterials: Implications for Particle Surface Chemistry, Aggregation, Dissolution, and Silver Speciation*. Environmental Science & Technology 46(13), 7037-7045.
- Greßler, S., Fiedeler U., Simkó M., Gazzó A., Nentwich M. (2010): *Selbstreinigende, schmutz- und wasserabweisende Beschichtungen auf Basis von Nanotechnologie*. ÖAW-ITA-Nanotrusterdossiers Nr. 020, Juli 2010.

- Guiot, A., Golanski, L., Tardif, F. (2009): *Measurement of nanoparticle removal by abrasion*. Journal of Physics: Conference Series 170 (2009) 012014, Doi: 10.1088/1742-6596/170/1/012014.
- Hofmann, T. (2006): *Nanobeschichtung für Architektur- und Solargläser – Smart Glazing*. In Luther und Zweck (2006).
- Hsu, L., Chein, H. (2007): *Evaluation of nanoparticle emission for TiO₂ nanopowder coating materials*. Journal of Nanoparticle Research 2007;9:157–63
- Huang, Y., Yu F., Park Y.S. et al. (2010): *Coadministration of protein drugs with gold nanoparticles to enable percutaneous delivery*. Biomaterials 31, 9086–91.
- Kaegi, R., Ulrich, A., Sinnet, B., Vonbank, R., Wichser, A., Zuleeg, S., Simmler, H., Brunner, S., Vonmont, H., Burkhardt, M., Boller, M. (2008): *Synthetic TiO₂ nanoparticle emission from exterior facades into the aquatic environment*. Environmental Pollution 156, 233-239.
- Kaegi, R., Sinnet, B., Zuleeg, S., Hagedorfer, H., Mueller, E., Vonbank, R., Boller, M., Burkhardt, M. (2010): *Release of silver nanoparticles from outdoor facades*. Environmental Pollution 158, 2900-2905.
- Kennedy, A.J., Chappell, M.A., Bednar, A.J., Ryan, A.C., Laird, J.G., Stanley, J.K., Steevens, J.A. (2012): *Impact of organic carbon on the stability and toxicity of fresh and stored silver nanoparticles*. Environ Sci Technol 46(19), 10772-10780.
- Leuninger, J., Tiarks, F., Wiese, H., Schuler, B. (2004): *Wässrige Nanokomposite*. Farbe & Lack 10/2004 S. 30. <http://www.european-coatings.com>.
- Luther, W., Zweck, A. (2006): *Innovationsbegleitung Nanotechnologie: Nanotechnologie in Architektur und Bauwesen*. Zukünftige Technologien Nr. 62
- Ma, H., Brennan, A., Diamond, S.A. (2012): *Phototoxicity of TiO₂ nanoparticles under solar radiation to two aquatic species: Daphnia magna and Japanese medaka*. Environ.Toxicol.Chem. 31(7), 1621-1629.
- Paschen H., Coenen C., Fleischer T., Grünwald R., Oertel D., Revermann C. (2003): *TA-Projekt Nanotechnologie Endbericht*. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB).
- Ribeiro, F., Gallego-Urrea, J.A., Jurkschat, K., Crossley, A., Hassellöv, M., Taylor, C., Soares, A.M.V.M., Loureiro, S. (2014): *Silver nanoparticles and silver nitrate induce high toxicity to Pseudokirchneriella subcapitata, Daphnia magna and Danio rerio*. Science of The Total Environment 466–467(0), 232-241.
- Rössler, A. (2007): *Nanotechnologie in der Farben und Lackindustrie*. <http://www.aktuelle-wochenschau.de/2007/woche17/woche17.html> (Abruf 08.03.2012)
- Ryman-Rasmussen, J.P., Riviere, J.E., Monteiro-Riviere, N.A. (2006): *Penetration of intact skin by quantum dots with diverse physicochemical properties*. Toxicol.Sci. 91(1): 159-165.

- Schlich, K., Klawonn, T., Terytze, K., Hund-Rinke, K. (2013): *Effects of silver nanoparticles and silver nitrate in the earthworm reproduction test*. Environ Toxicol Chem 32(1), 181-188.
- Steinfeldt, M., v.Gleich, A., Petschow, U., Haum, R., Chudoba, T., Haubold, S. (2004): *Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte*. Schriftenreihe des IÖW 17704. Berlin.
http://www.bmbf.de/pub/nano_nachhaltigkeit_ioew_endbericht.pdf
- Tejamaya, M., Römer, I., Merrifield, R.C., Lead, J.R. (2012): *Stability of Citrate, PVP, and PEG Coated Silver Nanoparticles in Ecotoxicology Media*. Environmental Science & Technology 46(13), 7011-7017.
- Umweltbundesamt (2012): *Konzept für ein europäisches Register für nanomaterialhaltige Produkte*.
<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/konzept-fuer-ein-europaeisches-register-fuer>
- Umweltbundesamt, Bundesinstitut für Risikobewertung, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2013): *Nanomaterialien und REACH – Hintergrundpapier zur Position der deutschen Bundesbehörden*.
<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/nanomaterialien-reach>
- VdL (2010): *VdL-Leitfaden für den Umgang mit Nanoobjekten am Arbeitsplatz*. Verband der deutschen Lack- und Druckfarbenindustrie e.V., Juni 2010.
- VdL (2013): *Jahresbericht 2012/2013*. Verband der deutschen Lack- und Druckfarbenindustrie e.V.
http://www.lackindustrie.de/Publikationen_/VdL-Jahresberichte/Seiten/Jahresbericht-2013.aspx
- Volker, C., Boedicker, C., Daubenthaler, J., Oetken, M., Oehlmann, J. (2013): *Comparative toxicity assessment of nanosilver on three Daphnia species in acute, chronic and multi-generation experiments*. PLoS One 8(10), e75026.
- Vorbau, M., Hillemann, L., Stintz, M. (2009): *Method for the characterization of the abrasion induced nanoparticle release into air from surface coatings*. Journal of Aerosol Science 40/3, S. 209-217
- Wang, Z., Chen, J., Li, X., Shao, J., Peijnenburg, W.J. (2012): *Aquatic toxicity of nanosilver colloids to different trophic organisms: contributions of particles and free silver ion*. Environ Toxicol Chem 31(10), 2408-2413.

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de
http://fuer-mensch-und-umwelt.de

 / www.facebook.com/umweltbundesamt.de

 / www.twitter.com/umweltbundesamt

Autoren:

Das Datenblatt wurde von Mitgliedern des Arbeitskreises „Nanotechnik“ des Umweltbundesamtes erstellt. Insbesondere haben daran mitgewirkt:

Dr. Wolfgang Dubbert (III 2.1 – Übergreifende Angelegenheiten, Chemische Industrie, Feuerungsanlagen)

Dr. Kathrin Schwirn (IV 2.2 – Arzneimittel, Wasch- und Reinigungsmittel, Nanomaterialien)

Dr. Doris Völker (IV 2.2 – Arzneimittel, Wasch- und Reinigungsmittel, Nanomaterialien)

Petra Apel (II 1.2 – Toxikologie, Gesundheitsbezogene Umweltbeobachtung)

Dessau-Roßlau, 09. April 2014