

René Fries,
Myrtil Simkó*

Nano-Titandioxid – Teil 1: Grundlagen, Herstellung, Anwendung

Zusammenfassung

Der Grundbestandteil des Titandioxids (TiO_2) ist das Element Titan, das zu den zehn häufigsten Metallen der Erdkruste zählt. TiO_2 kommt in der Natur in drei unterschiedlichen Kristallstrukturen vor, wobei alle Formen unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen, die unterschiedlich genutzt werden. Daher ist auch TiO_2 ein weit verbreiteter Produktbestandteil von Farben und Lacken, Kosmetika, Textilien, Papier, Kunststoffen und auch in Lebensmitteln für die Verbesserung der Textur. In Sonnenschutzmitteln wird nano- TiO_2 etwa seit dem Jahr 1990 als sogenannter physikalischer UV-Filter eingesetzt. Die photokatalytische Wirkung von nano- TiO_2 wird ebenfalls vielfältig verwendet. Das hohe Oxidationsvermögen von nano- TiO_2 -Beschichtungen soll z. B. selbstreinigende Oberflächen ermöglichen, da sie organische Verschmutzungen abbauen und somit auch Bakterien abtöten. Zukünftig sollen die photochromische und elektrochromische Eigenschaften (reversible Farbveränderung durch Licht oder Spannung) mehr genutzt werden und auch die Verwendung von nano- TiO_2 im Bereich der alternativen Energieerzeugung wird erforscht.

Einleitung

Titandioxid (TiO_2) ist ein weit verbreiteter Produktbestandteil in vielen Konsumgütern wie Farben und Lacken, Kosmetika, Textilien, Papier, Kunststoffen und Lebensmitteln. 2011 wurden weltweit mehr als 5 Mio t TiO_2 produziert. TiO_2 kann sowohl in regulärer Größe (mikroskalig) als auch nanoskalig hergestellt werden. Bedingt durch ihre Größe haben TiO_2 -Nanopartikel (NPs) spezifische physikalische und chemische Eigenschaften, die zunehmend in unterschiedlichen Bereichen (Informatik, Chemie, Kosmetik, Medizin) genutzt werden. Um in die Endprodukte eingebracht werden zu können, sind NPs oft oberflächenmodifiziert. TiO_2 -NPs werden häufig als physikalische UV-Filter in Sonnencremes oder Außenfarben, aber auch wegen ihrer photokatalytischen Aktivität in Glas oder Zement verwendet. Dieses Dossier gibt einen Überblick über Eigenschaften, Herstellung und Anwendungen von regulärem und nano- TiO_2 .

Grundlegende Eigenschaften von Titandioxid

Der Grundbestandteil des TiO_2 , das Element Titan (Ti), zählt zu den zehn häufigsten Metallen der Erdkruste. TiO_2 kommt in der Natur in drei unterschiedlichen Kristallstrukturen vor: Rutil, Anatas und Brookit (Abb. 1). Industriell kann TiO_2 aus dem Titanerz Ilmenit (FeTiO_3 , auch als Titaneisen bekannt) hergestellt werden. Titandioxid hat die Form eines in Wasser und in organischen Lösungsmitteln unlöslichen weißen Pulvers, das unbrennbar, geruchlos und kristallin ist. Wegen der hohen Stabilität, des niedrigen Preises (weniger als 5 US \$/kg)¹ und der vielen Anwendungsmöglichkeiten wie auch der vorteilhaften optischen Eigenschaften wird TiO_2 bereits seit 1916 kommerziell hergestellt. Es ist das am meisten verwendete Weiß-Pigment (hohe Brechungsindex: 2.7-2.55 in Abhängigkeit von der Kristallform), mit einem sehr hohen Deck- und ausgezeichnetem Aufhellvermögen. Die drei Kristallstrukturen des TiO_2 unterscheiden sich neben der äußeren Erscheinung auch in ihren elektronischen und photoaktiven Eigenschaften (Reaktionen unter dem Einfluss von Licht), sowie der Dichte und dem Brechungsindex.

Abbildung 1:

Die drei in der Natur vorkommenden Kristallformen von TiO_2 (aus 16)



* Korrespondenzautorin

Das Rutil-Kristall ist die thermodynamisch stabilere Form des Titandioxids; Anatas hat die am meisten ausgeprägte photoaktive Eigenschaft. Beide Formen absorbieren sowohl UV-Strahlung als auch Anteile des sichtbaren Lichtes. Bei Temperaturen oberhalb von 915 °C wandelt sich Anatas monotrop (nur in eine Richtung) in Rutil um. Die dritte Kristallform, das Brookit, hat derzeit keine besondere wirtschaftliche Bedeutung.

Titandioxid ist in elektronischer Hinsicht ein Halbleiter. Das bedeutet, dass die Leitfähigkeit des Metalls zwischen dem eines leitenden Metalls und dem eines Isolators liegt. Grund dafür ist, dass zwischen dem Energieniveau, das von den Elektronen im Material eingenommen wird (dem Valenzband) und dem Niveau des nächst höheren unbesetzten Bandes (Leitungsband) eine energetische Lücke liegt. Das Leitungsband ist daher frei von Elektronen, die den elektrischen Strom leiten könnten. Da diese Bandlücke jedoch relativ klein ist und nur im Bereich einiger Elektronenvolt (eV) liegt, können die Elektronen des vollbesetzten Valenzbandes durch die Energie von Wärmeschwingungen oder auch durch Absorption von Licht ins Leitungsband gehoben werden. Dafür ist eine Anregungsenergie von 3.2 eV für TiO₂-Anatas und 3.0 eV für Rutil erforderlich. Um diese Energie zuzuführen, ist UV-Licht (Wellenlänge unterhalb von 380 nm) ausreichend, welches sehr effektiv absorbiert wird (Resonanzabsorption). Sichtbares Licht mit höheren Wellenlängen wird von TiO₂-Partikeln reflektiert oder in Form von Licht mit längeren Wellenlängen emittiert.

Der angeregte Zustand eines Halbleiters ist generell instabil, da die angeregten Elektronen bald wieder auf das Valenzband zurückfallen. Die Dauer dieses Anregungszustandes ist für TiO₂ länger als für andere Halbleiter. Für kommerziell verfügbare TiO₂-Partikel ist dies im Bereich von Nanosekunden, aber es wurden Abklingreaktionen bis in den Sekundenbereich gemessen (z. B. P25, Degussa)². Im diesem angeregten Zustand können durch TiO₂-Partikel oxidative Prozesse (z. B. Bildung freier Radikale) ausgelöst werden, welche positiv genutzt werden können. Diese exzellente photokatalytische Aktivität hat eine Reihe von Anwendungsmöglichkeiten eröffnet, wobei solche Prozesse gewünschte, aber auch ungewollte Effekte verursachen können.

Herstellung von Titandioxid

Über mehr als fünfzig Jahren wurde für die Herstellung und Verarbeitung vor allem zwei Produktionsverfahren eingesetzt¹. Zunächst der Sulfat-Prozess bei der das zerkleinerte und angereicherte Titanerz mit konzentrierter Schwefelsäure vorbehandelt und anschließend zu TiO₂ x TiO₂ oxidiert, abfiltriert und danach im Drehrohrofen bei 800-1.000° C geglüht wird. Bei diesem Verfahren lässt sich die Kristallstruktur (Anatas oder Rutil) und die Korngröße der Pigmente durch die Auswahl der Temperatur steuern. Während des Prozesses entsteht verdünnte (25 %-ige) Schwefelsäure als Abfallprodukt (Dünnsäure), die auch Schwermetalle aus dem Erz enthalten kann. Bis zum Ende der 1980er Jahre wurde der größte Teil dieser Chemikalienfracht (von ca. 5. Mill. Jahrestonnen in Europa) von Frachtschiffen auf hoher See in die Nordsee geleitet. Seit 1989 wird ein umweltschonenderes Recycling-Verfahren dieser Schwefelsäure in Deutschland und später auch in Großbritannien eingeführt, das jedoch höhere Kosten mit sich bringt.

Der vorwiegend verwendete Herstellungsprozess – etwa die Hälfte der weltweiten TiO₂-Produktion – ist das Chlorid-Verfahren (1940 von der Firma DuPont lizenziert und weiterentwickelt). Dabei wird Titanerz mit Chlor und Koks bei hohen Temperaturen in Titan-Tetrachlorid-Dampf überführt. Nach Reinigung und Destillationsvorgängen wird daraus Rutil-TiO₂ gewonnen. Das eingesetzte Chlor kann wieder zurück gewonnen werden. Wegen günstigerer Betriebskosten und der Vermeidung von umweltbelastendem Abfall wird dieses Chloridverfahren bei der Errichtung neuer Anlagen bevorzugt¹.

Für die Herstellung von TiO₂-NPs sind weitere Verfahren in Anwendung, die eine bessere Kontrolle der Form und der Größe der entstehenden TiO₂-Partikel und damit auch eine höhere Ausbeute an NPs erlauben. So z. B. das Sol-Gel Verfahren, die Hydrolyse sowie Prozesse, bei denen die entstehende Partikel über die Abscheidung aus der Gas-Phase erzeugt werden (chemical vapor deposition, CVD, siehe dazu³). Ein anschließender Mahlvorgang in wässriger Phase kann sicherstellen, dass die TiO₂-NPs einen Durchmesser zwischen 20 und 100 nm aufweisen.

Die oben beschriebenen Eigenschaften von TiO₂ wie auch die Produktionsverfahren gelten grundsätzlich sowohl für die seit über neunzig Jahren kommerziell hergestellten regulären TiO₂-Weißpigmente wie auch für die erst seit etwa einem Jahrzehnt gezielt erzeug-

ten TiO₂-NP. Einer der wesentlichen Unterschiede zwischen konventionellem bzw. mikroskaligem und nanoskaligem TiO₂ beruht auf der um vieles größeren Oberfläche der Nanopartikel bei gleichem Gesamtgewicht (siehe dazu⁴). Mit der größeren Oberfläche gehen besondere Eigenschaften einher wie katalytische Aktivität und hohes Lichtabsorptionsvermögen. Diese Eigenschaften sind der Grund für die vielfältigen Anwendungsgebiete der TiO₂-NP. Allerdings haben sich die Größenbereiche der regulären und der Nanopartikel einander angenähert, sodass eine eindeutige Unterscheidung kaum möglich ist. So werden z. B. die als Weißpigment verwendeten TiO₂-Partikel zumeist mit mittleren Durchmesser von 250-350 nm hergestellt⁵, also nahe den Dimensionen der Nanopartikel (kleiner als 100 nm). Durch die breite Größenverteilung der Pigment-Partikel können diese auch signifikante Mengen von Nanopartikeln enthalten. In eine Studie wurde darauf hingewiesen, dass die als Lebensmittelzusatzstoff (E 171) in Nahrungsmitteln enthaltenen TiO₂-Partikel zu mehr als einem Drittel Durchmesser unter 100 nm aufwiesen⁶.

Produktionsmengen von Titandioxid

Für die Herstellung von TiO₂ wird nahezu die Gesamtmenge (95 %) des geschürften Titanerzes verwendet. Das restliche 5 % ist das metallische Titan, welches hauptsächlich für Flugzeug-, Fahrzeug- und Anlagenbau verwendet wird. Weiterhin spielt TiO₂ auch im Bereich der Medizintechnik eine wichtige Rolle, wie etwa für die Herstellung von Implantaten.

Die weltweite Produktionsmenge für 2011 wurde mit mehr als 5 Millionen Tonnen Titan-Pigment geschätzt, davon 1,4 Mill. Tonnen allein in den USA und etwa 2 Mill. Tonnen Jahresproduktion in China. Weitere bedeutende Produzenten sind Deutschland mit etwa 400 Tausend Tonnen und Japan mit ca. 300 Tausend Tonnen⁷.

Über den Umfang der Produktion von in Nanogröße hergestellten TiO₂ liegen nur unvollständige und zum Teil widersprechende Angaben vor. Der Gesamtumfang der Weltproduktion im Jahr 2005 wird mit ca. 5.000 Tonnen angegeben, ebenso auch für die Zeiträume 2006-2010. Für die Periode 2011-2014 wurden mehr als 10.000 Tonnen geschätzt⁸. In der Abschätzung der US-Umweltbehörde EPA wurden 3.630 Tonnen nano-

TiO₂ für das Jahr 2007 in den USA und für die gesamte Welt 12.500 Tonnen angegeben⁵. Erheblich höhere Produktionsmengen wurden in einer 2009 vorgelegten Studie¹ bereits für das Jahr 2002 genannt, wonach allein in den USA ca. 3.000 Tonnen nano-TiO₂ hergestellt wurden. Diese Autoren sehen zudem Anzeichen für eine starke Zunahme, bis auf etwa 44.000 Tonnen Jahresproduktion bis 2009, das nach EPA-Angabe wohl nicht erreicht wurde. In der weiteren Abschätzung schätzen die Autoren diesen Anstieg bis 2015 auf etwa 10 %, also auf eine Menge von 260.000 Tonnen TiO₂. Sie begründen diese Annahme mit dem zunehmenden Ersatz von regulärem TiO₂ durch nano-TiO₂ sowie mit der Eröffnung weiterer und neuerer Produktionsbetriebe mit sinkenden Herstellungskosten. Diese Annahme ist sehr fragwürdig, denn das Pigment TiO₂ kann eindeutig nicht durch nano-TiO₂ ersetzt werden, was die Hauptproduktionsmenge darstellt. Die Angaben in einer weiteren Veröffentlichung⁹ stimmen mit den Abschätzungen der EPA und der UNEP weitgehend überein. Jene Autoren schätzen die weltweite Produktionsmenge von nano-TiO₂ mit ca. 5.000 Jahrestonnen im Zeitraum 2006 bis 2010 und erwarten eine Zunahme auf ca. 10.000 Jahrestonnen 2011-2014. Außer Zweifel steht, dass nano-TiO₂ gegenwärtig eines der am weitesten verbreiteten Nanomaterialien ist und dass eine Verdoppelung der Produktion im kommenden Jahrzehnt als wahrscheinlich angesehen wird⁸⁻¹⁰.

Anwendungsbereiche

Titandioxid hat bei kostengünstigen Herstellungsverfahren zahlreiche vorteilhafte Eigenschaften wie Korrosionsbeständigkeit, brillantes Weiß und Deckkraft und eine hohe Wirksamkeit bei der Abschwächung von ultraviolettem Licht. TiO₂ ist das weltweit am meisten verwendete Pigment (ca. 70 % der Pigmente). Der hauptsächliche Einsatz liegt in der Beschichtung von Oberflächen, sowohl in Form von flüssigen Farzubereitungen wie auch als Pulverbeschichtungen (USA: ca. 57 % des Gesamtvolumens 2007)⁵. Eine wichtige Anwendung stellt die Papierproduktion dar, bei der Rutil-TiO₂ als optischer Aufheller beigemischt wird (USA: ca. 13 % des Gesamtvolumens). Wegen seiner UV-blockierenden Eigenschaft wird TiO₂ in geringen Konzentrationen (weniger als 3 % des Gesamtvolumens der Endprodukte) auch Plastikwerkstoffen zugesetzt (USA: ca. 26 % des Gesamtvolumens), aus denen unterschiedliche Gegenstände hergestellt werden.

TiO₂ wird auch als Bestandteil von Keramik, Katalysatoren und auch als Beschichtung für Textilien verwendet (USA: ca. 4 % des Gesamtvolumens)⁵. Eine weitere und wichtige Anwendung von TiO₂ liegt in der Kosmetik- und Lebensmittelindustrie. Mit der Bezeichnung E 171 wird TiO₂ als Lebensmittelzusatzstoff für die Verbesserung der Textur und in Kosmetika für Färbzwecke sowie als UV-Schutz eingesetzt.

Viele der vorteilhaften Eigenschaften des regulären TiO₂ sind auch für nano-TiO₂ zu beobachten. Wegen der Transparenz des nano-TiO₂ für sichtbares Licht können diese nicht als Weißpigment verwenden. Beimischungen von nano-TiO₂ zu Farzubereitungen werden jedoch zunehmend durchgeführt, da diese Nanopartikel die Oberflächeneigenschaften wie Härte, Reflexion und Wischfestigkeit verbessern.

Photokatalytische und biozide Eigenschaften

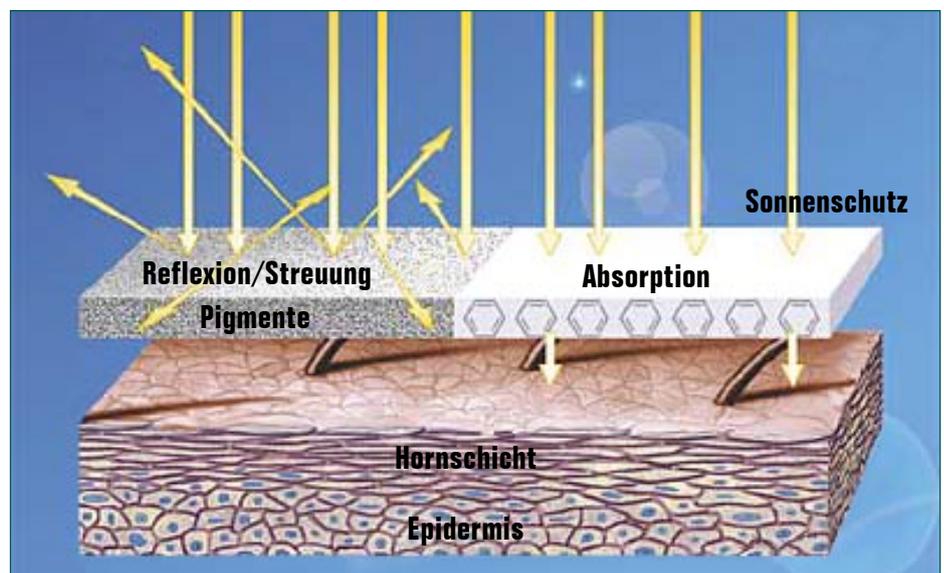
Wie zuvor beschrieben, ist TiO₂ (Anatase) ein wirksamer Photokatalysator. Die besonders große Oberfläche der NPs trägt zur Verstärkung der photokatalytischen Wirkung bei. Dabei werden durch UV-Strahlung (z. B. Sonneneinstrahlung) organische Verunreinigungen in Gegenwart von Sauerstoff vollständig oxidiert und es entsteht Kohlendioxid und Wasser. TiO₂ kann allerdings auch Wasser oxidieren, wobei Hydroxylradikale (-OH) entstehen (siehe dazu¹¹). Diese Wirkung(en) werden für den Abbau von Verschmutzungen z. B. des Trinkwassers und der Luft ausgenutzt. Das hohe Oxidationsvermögen von nano-TiO₂-Beschichtungen soll selbstreinigende Oberflächen ermöglichen, da sie organische Verschmutzungen abbauen und so

mit auch Bakterien abtöten können. Die photokatalytischen Eigenschaften werden durch geringe Teilchengröße und gezielte Beimischungen anderer Elemente (u. a. Al³⁺, Fe³⁺, La³⁺, Be²⁺) verstärkt. Kommerziell werden bereits selbstreinigende Produkte wie Kacheln, Spiegel und Glasscheiben angeboten. Ihre Eigenschaften verdanken sie einem ca. 40 nm dünnen Film aus TiO₂, der durch einen CVD Prozess aufgebracht wurde (siehe dazu³).

UV-blockierende Eigenschaft (UV Absorber)

In Sonnenschutzmitteln wird nano-TiO₂ etwa seit dem Jahr 1990 als sogenannter physikalische UV-Filter eingesetzt. Im Gegensatz zu den chemischen UV-Schutzsubstanzen absorbieren physikalische UV-Filter die UV-Strahlung nicht, sondern reflektieren bzw. streuen sie, sodass sie nicht bis zur Hautoberfläche durchdringt (Abb. 2). Ein Merkmal von Nanopartikeln ist auch die Durchsichtigkeit für sichtbares Licht. Sie hinterlassen keinen milchig-weißen Film auf der Haut wie die regulär TiO₂-haltige Sonnencremes. UV-Strahlung wird in zwei wichtigen Wellenlängenbereichen, UV-A (320-400 nm) und UV-B (290-320 nm), unterschieden. Der UV-B Anteil ist vorrangig für die Bräunungsreaktion der Haut bestimmend. Sowohl UV-A wie auch UV-B werden als Ursache für Hautalterung, Faltenbildung und Hautkrebs angesehen. In den Bewertungssystemen vieler Länder (SPF, sun protection factor) wird bislang nur die Schutzwirkung gegenüber dem UV-B-Anteil berücksichtigt. In Sonnenschutzmitteln wer-

Abbildung 2: Wirkung physikalischer (links) und chemischer (rechts) UV-Filter¹⁷



den TiO₂-NP von ca. 50 nm Ø verwendet, die für beide UV-Anteile guten Schutz bieten, und zwar mit einem Gewichtsanteil von ca. 10-15 %. In der EU, Kanada und Australien wurde eine Obergrenze für die Beimischung von TiO₂-NPs von 25 % festgelegt. Überdies ist TiO₂ in Sonnenschutzmitteln sowohl in herkömmlicher als auch in Nanogröße mit organischen Verbindungen und Metalloxiden wie Kieselsäure oder Aluminium beschichtet, um die photokatalytische Reaktivität (siehe oben) zu vermindern und die Bildung reaktiver Radikale zu verhindern¹. Da Sonnenschutzcremes für AllergikerInnen keine chemischen UV-Filter enthalten sollen, sind TiO₂-NP-haltige Schutzcremes eine gute Alternative.

Für den Schutz von Farben und Gegenständen vor energiereichen Sonnenstrahlen werden TiO₂-NPs auch in UV-beständigen Beschichtungen und als Bestandteil von Plastikgegenständen eingesetzt. Auch Stofffasern von Lichtschutzkleidung enthalten TiO₂.

Zukünftige Anwendungen

Bereits jetzt werden – in kleinem Maßstab für Spezialanwendungen – dünne Schichten aus TiO₂-Partikeln auf Glasplatten erzeugt. Sie sind ein wesentlicher Bestandteil von photochromischen und elektrochromischen Gläsern, die unter dem Einfluss von Sonnenlicht bzw. beim Anlegen einer elektrischen Spannung ihre Färbung verändern. Der Übergang vom farblosen Zustand zur Undurchlässigkeit für sichtbares Licht und Wärmestrahlung ermöglicht auch ihren Einsatz in besonders wärmedämmende Fenstern¹².

Die Verwendung von TiO₂-NPs wird außerdem auch für einige neuartige Entwicklung im Bereich der alternativen Energieerzeugung und Energiespeicherung untersucht. So ist die photokatalytische Zerlegung von Wasser in H₂ und O₂ unter dem Einfluss von Sonnenlicht, und auch die Konversion von CO₂ zu Treibstoff an einer nano-TiO₂-Elektrode möglich¹³. Ebenso kann eine Verbesserung des Wirkungsgrades von Farbstoff-solarzellen (Grätzel-Zellen, Dye sensitized solar cell) durch die Verwendung von TiO₂-NPs erfolgen.

Als Speichermedium für Wasserstoff (H₂) erscheinen Nanoröhrchen aus Titandioxid geeignet. Solche Systeme könnten als Energieträger für Kraftfahrzeuge zum Einsatz kommen und auch für die Erhöhung der Speicherkapazität von elektrischen Batterien wird nano-TiO₂ als vielversprechender Bestandteil eingesetzt¹⁴.

Schließlich erscheinen Materialien aus nano-TiO₂ auch für neuartige optische und elektronische Speichermedien gut geeignet, wobei die Speicherkapazität von CDs auf 25 Terabyte erhöht werden soll. So konnte an nano-Ti₃O₅ der reversible Übergang zwischen einer metallischen und einer halbleitenden Form durch Laserlichtpulse ausgelöst werden¹⁵. Diese Verbindung wird aus kommerziellen photokatalytischen nano-TiO₂ in einer Wasserstoff-Atmosphäre unter Erhitzung hergestellt. Die Ti₃O₅-Verbindung liegt in Form von ca. 20 nm kleinen Kristallen vor, und ist bei Zimmertemperatur stabil. Die Belichtung mit einem ultravioletten Laserimpuls geringer Intensität löst den Übergang vom metallischen Zustand in den halbleitenden Zustand des Ti₃O₅ aus. Wegen der niedrigen Wellenlängen und der bereits sehr hohen Nanostrukturierung des Materials sind die Voraussetzungen für hohe Speicherdichten gegeben¹⁵.

Fazit siehe *Dossier 035*

Anmerkungen und Literaturhinweise

- ¹ Robichaud, C. O., Uyar, A. E., Darby, M. R., Zucker, L. G. und Wiesner, M. R., 2009, Estimates of upper bounds and trends in nano-TiO₂ production as a basis for exposure assessment, *Environ Sci Technol* 43(12), 4227-33.
- ² DFG-Senatskommission, 2012, DFG/MAK Collection for Occupational Safety and Health, *Titandioxid – einatembare Staubfraktion*; <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/3527600418.mb1346367d0047/pdf>>.
- ³ NanoTrust-Dossier 006.
- ⁴ NanoTrust-Dossier 002.
- ⁵ EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2010, *State of the Science Literature Review: Nano Titanium Dioxide Environmental Matters. Scientific, Technical, Research, Engineering and Modeling Support (STREAMS) Final Report*, Nr. EPA/600/R-10/089, August 2010.

- ⁶ Weir, A., Westerhoff, P., Fabricius, L., Hristovski, K. und von Goetz, N., 2012, Titanium dioxide nanoparticles in food and personal care products, *Environ Sci Technol* 46(4), 2242-50.
- ⁷ USGS (United States Geological Survey), 2012, *Minerals Information. Titanium Statistics and Information Website*; Letzte Aktualisierung: 01-Jun-2012.2012] <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/titanium/index.html>>.
- ⁸ EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2007, *Emerging Challenges – Nanotechnology and the environment*.
- ⁹ Mueller, N. C. und Nowack, B., 2008, Exposure modeling of engineered nanoparticles in the environment, *Environ Sci Technol* 42(12), 4447-53.
- ¹⁰ Hendren, C. O., Mesnard, X., Droge, J. und Wiesner, M. R., 2011, Estimating production data for five engineered nanomaterials as a basis for exposure assessment, *Environ Sci Technol* 45(7), 2562-9.
- ¹¹ NanoTrust-Dossier 012.
- ¹² Kosteci, R., Richardson, T. und McLarnon, F., 1998, Photochemical and Photoelectrochemical Behaviour of a Novel TiO₂/Ni(OH)₂ 'Electrode', *J. Electrochem. Society*, 145(7), 2380-2385.
- ¹³ Varghese, O. K., Paulose, M., Latempa, T. J. und Grimes, C. A., 2009, High-rate solar photocatalytic conversion of CO₂ and water vapor to hydrocarbon fuels, *Nano Lett* 9(2), 731-7.
- ¹⁴ Kang, H.-Y., 2010, *Analysis of the California Nanoindustry Focused on Carbon Nanotubes and TiO₂ Nanomaterials*, 09/2010: Department of Toxic Substances Control, Pollution Prevention and Green Technology.
- ¹⁵ Ohkoshi, S., Tsunobuchi, Y., Matsuda, T., Hashimoto, K., Namai, A., Hakoe, F. und Tokoro, H., 2010, Synthesis of a metal oxide with a room-temperature photoreversible phase transition, *Nat Chem* 2(7), 539-45.
- ¹⁶ Lauf, R. J., 2009, *The Collector's Guide to the Three Phases of Titania: Rutile, Anatase, and Brookite*: Schiffer Earth Science Monographs.
- ¹⁷ <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/sonnenschutz/sonnenschutz.htm>.

IMPRESSUM:

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

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

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

NanoTrust-Dossier Nr. 033, September 2012: epub.oeww.ac.at/ita/nanotruster-dossiers/dossier033.pdf

ISSN: 1998-7293



Dieses Dossier steht unter der Creative Commons (Namensnennung-NichtKommerziell-KeineBearbeitung 2.0 Österreich) Lizenz: creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/at/deed.de