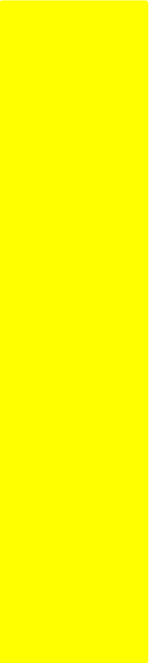


MAS Umwelttechnik und -management

Masterthesis 2017



Rechtliche Aspekte zur Dissipation von synthetischen Stoffen am Beispiel von Nano-Titandioxid im Wasser

Autor:

Adrian Ettwein, lic. iur. HSG

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Thesis Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Alle Stellen meiner Arbeit, die wörtlich oder sinngemäss aus anderen Werken, einschliesslich Werken aus dem Internet, entnommen sind, habe ich unter Angabe der Quelle unmissverständlich als Entlehnung gekennzeichnet. Dasselbe gilt sinngemäss für bildliche Darstellungen, Tabellen und Ähnliches.

Ort / Datum

Unterschrift

Start der Masterthesis:	01. Juli 2016
Datum des Fachgesprächs:	12. Juli 2017
Begleitdozentin:	Corinne Wacker, Dr.
Begleitdozent:	Armin Reller, Prof. Dr.
Expertin:	Daniela Thurnherr, Prof. Dr. iur.
Auftraggeber:	keinen
Status der Masterthesis:	öffentlich

© FHNW

Fachhochschule Nordwestschweiz

Hochschule für Life Sciences

Gründenstrasse 40

CH-4132 Muttenz

Telefon +41 61 467 42 42

eMail weiterbildung.lifesciences@fhnw.ch

Web www.fhnw.ch/lifesciences/weiterbildung/mas

Danksagung

Mein Dank geht zunächst Prof. Dr. Daniela Thurnherr, für die Bereitschaft, die Aufgabe als Expertin zu übernehmen. Mein spezieller Dank geht an Prof. Dr. Armin Reller, der mich bei der Auswahl des Themas massgeblich unterstützte, und an Dr. Corinne Wacker, die während der Entstehung der Arbeit mit ihren Fragen dafür sorgte, dass mein Blick aufs Ganze geschärft blieb. Beide haben zudem mit ihrem grossen Interesse an der Arbeit und ihrer Gesprächsbereitschaft unentbehrliche fachliche und persönliche Unterstützung geleistet. Herzlich danken möchte ich auch meinen Kolleginnen Cordelia Bähr und Sylvia Schüpbach, die meinen Text sehr sorgfältig gegengelesen haben und Sue Thöni, ohne deren Hilfe weder mein Text noch das Inhaltsverzeichnis innert nützlicher Zeit Eingang ins Template gefunden hätten.

Danken möchte ich schliesslich auch meiner Familie und meinen Freunden, die in vielfältiger Weise Anteil an meiner Arbeit genommen haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
2	Grundlagen der Technik	9
2.1	Vorkommen von Titandioxid	9
2.2	Prozesse zur Herstellung von Titandioxid	9
2.3	Eigenschaften von Titandioxid	10
2.3.1	Allgemeines	10
2.3.2	Heterogene Photokatalyse	11
2.4	Verwendungsarten und Funktionspotential von Titandioxid	13
2.4.1	Allgemeines	13
2.4.2	Farben mit Titandioxid	13
2.4.3	Desinfektion, Mineralisierung und Reinigung mittels Titandioxid	13
2.4.4	Titandioxid als „Funktionsmaterial“	14
2.5	Zur Toxikologie	16
2.5.1	Einleitung	16
2.5.2	Ökotoxikologie	16
2.5.3	Genotoxikologie	18
2.5.4	Nationalfondsprojekt 64 zu Nanomaterialien	19
2.6	Ergebnis	19
3	Die Situation betreffend die Dissipation von Nano-TiO₂ in die Gewässer in der Schweiz	20
3.1	Einführung	20
3.2	Dissipation von Nano-TiO ₂ in die Gewässer der Schweiz	20
4	Rechtliche Regelungen zur Verhinderung des Einbringens von Nano-TiO₂ in die Schweizer Gewässer	22
4.1	Einleitung	22
4.2	Die Selbstkontrolle nach den Regelungen im Schweizerischen Umweltschutzgesetz	22

4.2.1	Einleitung	22
4.2.2	Der Grundsatz der Selbstkontrolle	23
4.2.3	Der Stoffbegriff	25
4.2.4	Fazit	25
4.3	Die Umsetzung der Selbstkontrolle nach Art. 26 USG gemäss der Stoffverordnung und der Chemikalienverordnung	25
4.3.1	Einleitung	25
4.3.2	Die Selbstkontrolle gemäss Stoffverordnung vom 1. September 1986 bis 31. Juli 2005	26
4.3.3	Die Selbstkontrolle nach den Regelungen der ChemV ab 1. August 2005 bis heute	28
4.4	Die Selbstkontrolle nach Art. 26 USG bei Arzneimitteln und Medizinprodukten	31
4.5	Die Selbstkontrolle nach Art. 26 USG bei Lebensmitteln	32
4.6	Die Selbstkontrolle nach Art. 26 USG bei Kosmetika	33
4.7	Die Selbstkontrolle nach Art. 26 USG bei Nanopartikeln	33
4.7.1	Einführung	33
4.7.2	Die Revision der ChemV	34
4.7.3	Bewertung im Lichte von Nano-TiO ₂	34
4.8	Das Gewässerschutzrecht	35
4.8.1	Einleitung	35
4.8.2	Der Stoffbegriff nach Gewässerschutzrecht	35
4.8.3	Die Sorgfaltspflicht im Gewässerschutz	36
4.8.4	Das Verbot, Gewässer zu verunreinigen	37
5	Fazit	39
	Abkürzungsverzeichnis	41
	Abbildungsverzeichnis	43
	Literaturverzeichnis	44
	Materialienverzeichnis	50

Zusammenfassung

Nano-Titandioxid ist ein faszinierender Stoff. Er bietet Lösungen für verschiedenste technische Fragestellungen, weil er sich dafür vielfältig verändern bzw. funktionalisieren lässt, vor allem was seine photokatalytischen Eigenschaften betrifft. Die Vorteile dieses Materials sind auch gleichzeitig seine Nachteile, wenn es während oder nach der Nutzung dissipiert, also in die Umwelt gelangt und sich dort unkontrolliert verbreitet. Die Eigenschaften des Materials bleiben weiterhin erhalten und aktiv.

In der Umwelt entfaltet Nano-Titandioxid auf Grund seiner photokatalytischen Eigenschaften ökotoxische und genotoxische Wirkungen, was seit Jahren bekannt ist. Ebenso seit Jahren bekannt ist, dass die Gewässer in der Schweiz in teilweise erheblichem Masse mit Nano-Titandioxid kontaminiert sind.

Das fand bisher offensichtlich weder bei Industrie noch bei Behörden Beachtung. Diese Tatsachen müssten jedoch Eingang finden in die Beurteilung und die Einstufung, die im Rahmen der Selbstkontrolle nach Art. 26 des Schweizerischen Umweltschutzgesetzes seit 1983 von Herstellern und Importeuren von Stoffen verlangt wird. Damit soll die Umwelt direkt und indirekt vor Stoffen, ihren Folgeprodukten oder Abfälle geschützt werden, die trotz vorschriftsgemäsem Umgang die Umwelt gefährden können.

Über die Regelungen zur Umsetzung dieser Selbstkontrolle engten die Behörden – aus welchen Gründen auch immer – die Pflichten der Selbstkontrolle zunehmend ein.

Eine solche Einengung entbindet jedoch Hersteller und Importeur nicht, eine Selbstkontrolle nach Art. 26 des Schweizerischen Umweltschutzgesetzes vorzunehmen. Sie dürfen sich nicht lediglich auf die Ausführungsverordnungen der Behörden stützen, denn die Selbstkontrolle heisst insbesondere, eine eigenverantwortliche Einstufung aufgrund einer eigenen Beurteilung des Gefährdungspotentials, das von einem Stoff ausgehen kann, vorzunehmen. Dafür sind oder wären die hier recherchierten und zusammengetragenen Tatsachen über Ökotoxikologie und Genotoxikologie sowie Verbreitung in den Schweizer Gewässer mit zu berücksichtigen gewesen.

Offen bleiben hierzu allfällige haftungs- und strafrechtliche Konsequenzen.

1 Einleitung

Titandioxid (TiO_2) ist ein Material, dem wir im Alltag fast überall begegnen. Wir finden es als Pigment u.a. in Farben und Lacken für Aussen- und innenanstrich von Gebäuden und als Farbe in Gebrauchsgegenständen (Kleider, Möbel, Geschirr, Servietten, Papier, Medizinprodukte, Fahrzeuge etc.), in Arzneimitteln (Tabletten und Salben etc.), in Kosmetika (Puder, Lippenstift, Sonnencreme etc.) und in Lebensmitteln (Lebensmittelfarbstoff E 171).

Bekannt wurde TiO_2 vor allem, weil es ab der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts das giftige Bleiweiss zu ersetzen begann. Zu unrühmlicher Bekanntheit gelangte TiO_2 in den 80er Jahren, als Nebenprodukte aus seiner Produktion, vor allem Dünnsäure und Schwermetalle, in die Nordsee eingebracht wurden. Dabei kam es zu grossen Protesten und Aktionen von Umweltorganisationen in der Nordsee, die grosse Schiffe am Verklappen dieser Abfälle hindern wollten. Die Europäische Gemeinschaft erliess in der Folge am 3. Dezember 1982 eine Richtlinie über die Einzelheiten der Überwachung und Kontrolle der durch die Ableitung aus der Titandioxidproduktion betroffenen Umweltmedien (82/883/EWG), die die Mitgliedländer zu einem Umweltmonitoring verpflichtete, was in der Folge in der Industrie in Europa zu einer Aufbereitung von Dünnsäure und weiteren Nebenprodukten wie Schwermetalle, führte.¹

Ziel dieser Arbeit ist herauszufinden, ob und wenn ja, was man seit wann über ein mögliches toxisches Potential von TiO_2 sowie Nano- TiO_2 weiss. Weiter gilt herauszufinden, ob und wenn ja, wie TiO_2 sowie Nano- TiO_2 in der Schweiz während und nach der Nutzung unkontrolliert in die Umwelt gelangt, also dissipiert. Anschliessend wird abgeklärt, ob und wenn ja, welche rechtlichen Grundlagen seit wann in der Schweiz bestehen, um eine Dissipation von TiO_2 sowie Nano- TiO_2 zu verhindern oder mindestens zu minimieren.

¹ GRABERT-CARLSON, Bericht, S. 7, 63 ff.

2 Grundlagen der Technik

2.1 Vorkommen von Titandioxid

Titan ist auf der Erde sehr weit verbreitet. Als reines Metall existiert es in der Natur nicht, denn es gehört zu den «unedlen» Metallen wie beispielsweise Aluminium, das sofort eine sehr stabile Oxidschicht bildet. In der Erdkruste beträgt sein Anteil 0.42 %, es kommt also noch häufiger vor als Kohlenstoff, Kupfer, Zink, Chlor oder Stickstoff und ist damit das zehnthäufigste Element auf der Erde. Als vierthäufigstes Metall auf der Erde findet man es in der Natur in Gesteinen und Mineralien. Während der Titananteil in Gesteinen relativ gering ist und in der Regel unter einem Prozent liegt, kann er in Mineralien einen Anteil von bis zu über 95 % haben. Diejenigen Mineralien mit dem höchsten Titananteil sind Oxide, sehr viel kleinere Titananteile sind in Silikaten vorhanden. Daher sind für industrielle Gewinnung von Titan und das für die vorliegende Arbeit zentrale TiO_2 vor allem die Oxide von Interesse.²

In der Natur existiert TiO_2 in drei Kristallformen, nämlich als Anatas, Rutil und Brookit. Weitere titanhaltige Oxide sind die Mineralien Ilmenit (FeTiO_3), Perowskit (CaTiO_3) und Titanit ($\text{CaTiO}[\text{SiO}_4]$) sowie Magnetit (Fe_3O_4). Von diesen Oxiden und Mineralien wiederum werden vor allem Ilmenit und Rutil zur industriellen Herstellung von TiO_2 verwendet.

Die Gewinnung der Ausgangsmaterialien zur Herstellung von reinem TiO_2 für gewerbliche und industrielle Zwecke, erfolgt über die ganze Welt verteilt. Ilmenit wird vor allem in China, Australien, Mozambique, Südafrika, Vietnam und Norwegen gefördert, wogegen Rutil mehrheitlich in Sierra Leone, Ukraine, Kenia und Madagaskar abgebaut wird. Im Jahre 2015 sind insgesamt etwas mehr als 6 Mio. Tonnen an Ilmenit und Rutil zur Herstellung von TiO_2 und Nano- TiO_2 abgebaut worden, wobei der Anteil an Rutil mit 480'000 Tonnen gerade mal 8 % ausmachte. Die weltweite Produktionskapazität von TiO_2 Pigmenten lag 2016 bei 7.2 Mio. Tonnen.³

2.2 Prozesse zur Herstellung von Titandioxid

Natürlich vorkommendes TiO_2 und Ilmenit sind vor allem durch Eisenoxide sowie andere Metalle wie z.B. Chrom, Kupfer, Zink, Vanadium, Blei, Nickel, Cadmium, Quecksilber und Arsen⁴ verunreinigt. Daher müssen sie für ihre weitere Verwendung zuerst gereinigt werden. Aufgrund seiner hohen chemischen Stabilität ist der Reinigungs- und Herstellprozess von TiO_2 sehr kompliziert. Die Industrie hat dafür zwei Verfahren entwickelt, einerseits das seit 1917 praktizierte Sulfatverfahren und andererseits das 1958 eingeführte Chloridverfahren. Der Prozess des Sulfatverfahrens läuft über Ilmenit als Ausgangsmaterial und die Verwendung von konzentrierter Schwefelsäure ab. Dabei fallen Anatas und Rutil sowie Dünnsäure an. Ausgangsmaterial für das Chloridverfahren ist Rutil, das mittels Einsatz von Chlor gereinigt wird. Das verwendete Chlor wird am Schluss des Prozesses wieder vollständig zurückgewonnen und

² BERTAU, anorg. Chemie, S. 297; FORCE, Geology, S. 3 f.; WINKLER, Titandioxid, S. 31;

³ United States Geological Survey, 2016, S. 177 und 179;

⁴ GRABERT-CARLSON, Bericht, S. 32 ff.;

wiederverwendet. Diese Prozesse bestehen aus zahlreichen Verfahrensschritten, die relativ viel Zeit in Anspruch nehmen.⁵

2.3 Eigenschaften von Titandioxid

2.3.1 Allgemeines

Auf Grund seiner physikalischen und chemischen Eigenschaften findet TiO_2 seit Jahrzehnten viele Anwendungsbereiche im Alltag. Jeder Mensch kann ohne weiteres selber feststellen, wo und wie er täglich mit TiO_2 in Kontakt kommt. Die Eigenschaften stehen zu einem wesentlichen Teil in Zusammenhang mit seiner Kristallform (Modifikation), die sich in den drei Oxiden Anatas, Rutil und Brookit unterscheidet. Da Brookit bis zum heutigen Zeitpunkt keine wirtschaftliche Bedeutung zugekommen ist, wird in den weiteren Ausführungen nicht mehr auf diese TiO_2 -Kristallform (Modifikation) eingegangen.

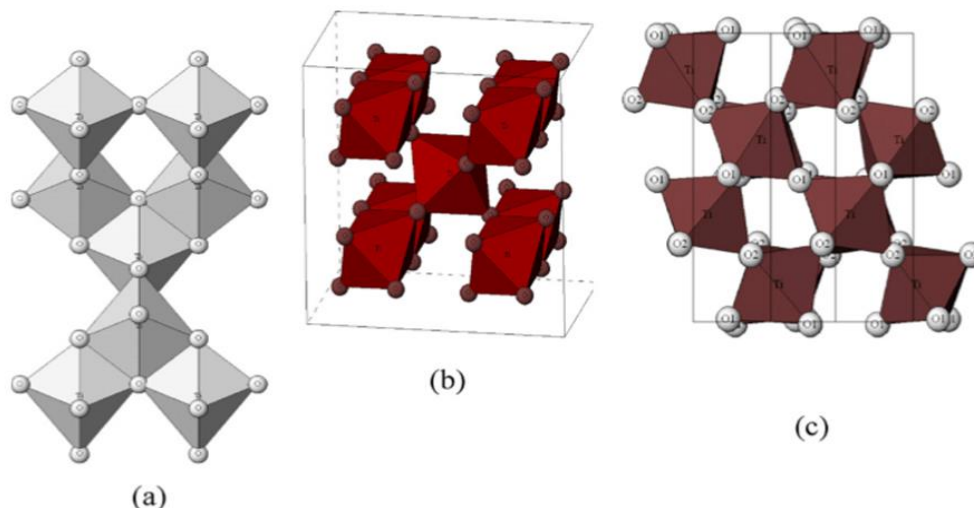


Abbildung 1: Kristallstrukturen von Titandioxid (a) Anatas, (b) Rutil, (c) Brookit

Bei Anatas sind die Oktaeder einer Schicht jeweils über zwei Kanten resp. vier Ecken mit den Oktaedern der oberen sowie der unteren Schicht verbunden; wogegen die Oktaeder bei Rutil jeweils über die Ecken – ohne Kante – verbunden sind. Das führt dazu, dass sich Anatas und Rutil zwar in vielen Punkten wie beispielsweise hinsichtlich thermodynamischer Stabilität, Härte, Brechzahl, Absorptionsspektrum, Photoaktivität, Blaustich und Remission im Einzelnen unterscheiden.⁶ Diese Unterschiede sind aber nicht so stark, dass nicht trotzdem von typischen Eigenschaften von TiO_2 gesprochen werden könnte.

Zu diesen speziellen Eigenschaften von TiO_2 gehört seine thermische Stabilität. TiO_2 ist bis zu sehr hohen Temperaturen beständig ist (Rutil bis 1830° C, Anatas wird bei ca. 950° C in Rutil umgewandelt).

Weiter gehört seine chemische Stabilität dazu. Sie hängt von der thermischen Vorbehandlung ab. TiO_2 ist unlöslich in Wasser, organischen Lösungsmitteln, verdünnten Laugen und Säuren, weshalb es als chemisch inert bezeichnet wird. Um TiO_2 industriell aufzubereiten zu können, muss man sich daher stärkeren Mitteln

⁵ BERTAU, anorg. Chemie, S. 680 ff.; FALBE, Lexikon Chemie, S. 4564; HOLLEMAN, Lehrbuch, S. 1526 f.; HOUSECROFT, anorg. Chemie, S. 663, 1521, 1526 ff.; HOUSECROFT, Inorganic, S. 723; RIEDEL, anorg. Chemie, S. 798 f.; WINKLER, Titandioxid, S. 31 ff.;

⁶ WINKLER, Titandioxid, S. 11 ff.;

bedienen. TiO_2 wird in heisser konzentrierter Schwefelsäure, Flusssäure sowie geschmolzenen Alkalihydroxiden und -carbonaten löslich.

Neben thermischer und chemischer Stabilität verfügt TiO_2 über einen hohen Brechungsindex (Anatas 2.55, Rutil 2.75).

Vor allem die chemische Stabilität und der hohe Brechungsindex führten zu Beginn des letzten Jahrhunderts dazu, dass in der Farbenindustrie das giftige «Bleiweiss» (Blei(II)-carbonat PbCO_3) fast vollständig durch Pigment aus TiO_2 ersetzt worden ist⁷, wobei dafür grösstenteils Rutil- TiO_2 verwendet wird.⁸

2.3.2 Heterogene Photokatalyse

TiO_2 verfügt noch über eine weitere interessante Eigenschaft. Unter dem Einfluss von UV-Licht, sei es künstlich verursacht oder durch die Sonne, reagieren an seiner Oberfläche andere – vor allem organische – Stoffe. Dieses Phänomen wurde erstmals 1929 in einem Aufsatz von Eberhard Keidel im Zusammenhang mit dem Abblättern von TiO_2 enthaltender Farbe festgehalten, wonach das organische Bindemittel der Titanpigmente durch UV-Strahlen «und wohl auch durch salpetrige Säure» zerstört werde.⁹ Dieses "Verhalten" im Zusammenhang mit TiO_2 war in der Folge schon früh Gegenstand von vielen Untersuchungen.¹⁰ Heutzutage wird dieses Phänomen unter dem Begriff "heterogene Photokatalyse" (nachfolgend: Photokatalyse) diskutiert¹¹, und zwar deshalb, weil sich TiO_2 während und auch nach dem Vorgang resp. der UV-Einstrahlung nicht auflöst oder mit dem anderen Stoff Bindungen eingeht, dieser sich hingegen an der Oberfläche von TiO_2 verändert und beispielsweise abblättert.

Um das Phänomen der Photokatalyse zu erklären, wird bis heute auf ein Modell zurückgegriffen, das von Felix Bloch 1929 in seiner Dissertation bei Werner Heisenberg "Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern" entwickelt worden war, das so genannte "Bändermodell". Dieses Bändermodell wird vor allem für die Erklärung der Funktionsweise eines elektrischen Halbleiters verwendet, was TiO_2 ebenfalls ist. Bloch erklärt die Sache so, dass die Elektronen in einem Kristallgitter in einem "Kraftfeld gedacht"¹² werden und nicht entweder frei fließend oder fest gebunden. TiO_2 hat in so einem Kraftfeld zwei Ebenen mit unterschiedlichen Energieniveaus, die durch eine Ebene bzw. Lücke getrennt werden, die über kein Energieniveau verfügt, man nennt sie "Bandlücke".¹³ Das Band mit dem höheren Energieniveau heisst "Leitungsband". Dasjenige mit dem im Verhältnis tieferen Energieniveau wird als "Valenzband" bezeichnet. Bei Halbleitern wie TiO_2 ist die Lücke zwischen diesen beiden Bändern relativ klein, so dass die beiden Ebenen unter Lichteinstrahlung miteinander in Wechselwirkung treten, indem das energetisch tiefer liegende Valenzband durch Sonnenenergie Elektronen in das Leitungsband abgibt.¹⁴ Dadurch fehlen dem Valenzband nun aber Elektronen, so dass dort positiv geladene Stellen entstehen, sogenannte "positive Löcher". *Gleichzeitig* beginnen im Leitungsband die Elektronen zu fließen.¹⁵ Das wiederum führt einerseits dazu, dass TiO_2 an seiner Oberfläche unter Einwirkung von Sonnenlicht resp. UV-Strahlen Elektronen abgibt

⁷ FALBE, Lexikon Chemie, S. 4564; HOLLEMAN, Lehrbuch, S. 1526 ff. und 1024 f.; HOUSECROFT, Inorganic, S. 722 ff.;

⁸ HOLEMANN, Lehrbuch, S. 1528, 978;

⁹ KEIDEL, Lichtechtheit, S. 1242 f.;

¹⁰ OGUNTKE, Oberflächenstruktur, S. 8 mit weiteren Hinweisen; THULHOFF, Untersuchungen, S. 7ff.;

¹¹ SERPONE, photocatalysis, S. 1121 ff., 1124;

¹² ASHCROFT, Festkörperphysik, S. 163 ff.; BLOCH, Quantenmechanik, S. 556;

¹³ RIEDEL, anorg. Chemie, S. 183.

¹⁴ HOLLEMAN, Lehrbuch, S. 176, 1420 ff.; CARP, titanium dioxide, S. 53 ff.; HASHIMOTO, TiO_2 , S. 8271; HENDRIX, Titania-Silica, S. 162 f.; PELAEZ, titanium dioxide, S. 332 ff.; PFENNIG, Principles, S. 360 ff.; SERPONE, photocatalysis, 1130 ff.; VINU, environmental, S. 191 ff.;

¹⁵ RIEDEL, anorg. Chemie, S. 188;

und dort Sauerstoffradikale resp. Hyperoxide [$O_2^{\bullet-}$] (früher auch Superoxide genannt) ¹⁶ bildet, die als starke Oxidationsmittel sehr heftig mit Wasser reagieren¹⁷. Andererseits bilden sich in wässriger Umgebung an den Löchern wegen den fehlenden Elektronen sogenannte Hydroxyl-Radikale [OH^{\bullet}]. Diese Eigenschaften führen zu einem Abbau von organischen Stoffen¹⁸ und waren der Grund für das von Keidel beobachtete Verhalten von TiO_2 -haltiger Farbe am Sonnenlicht, denn dadurch wurde der die TiO_2 -Pigmente zusammenhaltende organische Klebstoff aufgelöst; Hydroxyl-Radikale sind nämlich die reaktivsten Sauerstoff-Radikale, die bis heute bekannt sind. Sie reagieren sehr schnell mit Molekülen in ihrer nächsten Umgebung.¹⁹ Ihr Oxidationspotential wird nur noch von demjenigen von Fluor übertroffen.²⁰

Bei der Photokatalyse von TiO_2 sind es somit physikalische Eigenschaften des Materials, die sich chemisch manifestieren. TiO_2 bleibt auch danach und auf unbestimmte Zeit stabil, ohne irgendeine Halbwertszeit.

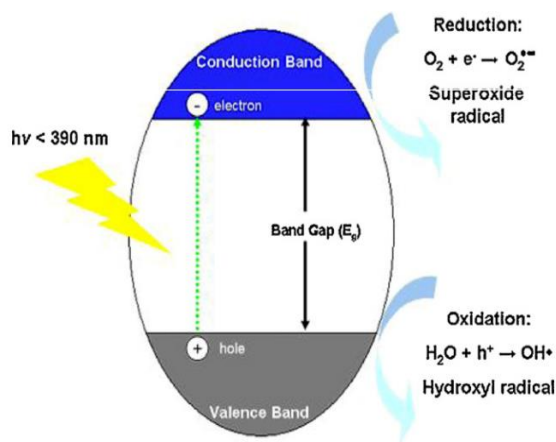


Abbildung 2: Ablauf der Fotokatalyse an TiO_2

In seiner Dissertation von 1975 kam Johann Steinle in seiner Dissertation über photochemische Reaktionen an der TiO_2 -Oberfläche zum Schluss, dass sich dort durch UV-Bestrahlung OH -Radikale bilden.²¹

Der Nachweis der Bildung von Hydroxyl-Radikalen an einer TiO_2 -Oberfläche in wässriger Umgebung mit UV-Bestrahlung gelang Calvin D. Jaeger und Allen J. Bard dann mittels eines neu entwickelten Geräts, einem Elektronen-Spin-Resonanz-Detektionsgerät, und wurde 1979 publiziert.²²

Diese Eigenschaft führte zu neuen Anwendungen von TiO_2 , in denen nicht die Pigmenteigenschaft, sondern die Bildung von Hydroxyl-Radikalen im Vordergrund steht! Je nach Anwendungsbereich steht TiO_2 somit entweder als Farbpigment oder wegen seiner photokatalytischen Eigenschaft im Vordergrund.

¹⁶ HOLLEMAN, Lehrbuch, S. 508;

¹⁷ RIEDEL, anorg. Chemie, S. 464 f.;

¹⁸ HOLLEMAN, Lehrbuch, S. 1528; KIRSCH, visible light, S. 375; OHTANI, Photocatalysis, S. 401 f.;

¹⁹ HALLIWELL, Radicals, S. 41 f.;

²⁰ CARP, titanium dioxide, S. 39;

²¹ STEINLE, Reaktionen, S. 195ff. und 221;

²² JAEGER, Spin Trapping, S. 3146 – 3152; SERPONE, photocatalysis, S. 1135.

2.4 Verwendungsarten und Funktionspotential von Titandioxid

2.4.1 Allgemeines

Will man TiO_2 als Pigment nutzen, so gilt es, die photokatalytische Wirkung möglichst weitgehend zu minimieren. Steht dagegen die photokatalytische Wirkung im Fokus, so versucht man, sie zu verstärken. Weiter spielen auch Form und Oberfläche eine Rolle, beispielsweise beim Verhalten von TiO_2 in der Trägerflüssigkeit oder im Bindemittel (dem sogenannten "Dispersionsmedium"), mit dem es als Gemisch ("Suspension") eingesetzt bzw. appliziert wird, sei es in der Funktion als Farbpigment oder auch als Material, das speziell wegen seiner photokatalytischen Wirkung zum Einsatz kommt. Man spricht dann von "kolloidalem Verhalten".²³ Erkenntnisse dazu sind wichtig, um das Verhalten von TiO_2 beurteilen zu können, wenn es in die Umwelt dissipiert.

2.4.2 Farben mit Titandioxid

Wegen seinem hohen Brechungsindex und seiner chemischen Inertheit hat die Bedeutung von TiO_2 stark zugenommen, so dass sich seine Verwendung sehr ausgebreitet hat. Von weltweit rund 5'000 Tonnen im Jahr 1925²⁴, werden heute jährlich über 5 Millionen Tonnen TiO_2 hergestellt und verarbeitet. Der mit Abstand grösste Teil der Produktion von TiO_2 findet bis heute noch als Pigment für Farben Verwendung.

2.4.3 Desinfektion, Mineralisierung und Reinigung mittels Titandioxid

Die Erkenntnisse über die Funktionsweise der Photokatalyse bei TiO_2 führten zu einer grossen Anzahl von neuen Anwendungsgebieten, in denen diese Eigenschaft im Zentrum steht, und diese Entwicklung ist bei weitem noch lange nicht abgeschlossen. So geht die Entwicklung von UV-Licht zu einem breiteren Lichtspektrum bis hin zu gewöhnlichem Licht²⁵, um die Photokatalyse durchzuführen. Die Photokatalyse mittels TiO_2 kommt für die Reinigung von Wasser und Luft zum Einsatz sowie für die Desinfektion von Oberflächen im weitesten Sinne, weil die gebildeten Hydroxyl-Radikale beispielsweise Bakterien wie *Escherichia Coli* abtöten²⁶. Ein weiterer Einsatz liegt bei der Mineralisierung von Stoffen wie beispielsweise organische Giftstoffe, Arzneimittel, Pestizide, Cyanidgifte, Kunststoffe, flüchtige organische Verbindungen in Form von Stickstoffoxiden, Azeton, Toluol, Benzol etc. sowie die Zerstörung von Krebszellen.²⁷ Weiter kommt die Photokatalyse zum Einsatz, um mittels TiO_2 beschichtete Oberflächen wie Glas und Keramik selbstreinigend zu machen. Zudem verkleinert sich durch die Einwirkung von UV-Licht der Kontaktwinkel von Wasser auf solchen Oberflächen auf bis auf 0° , was die Oberflächenspannung des Wassers auflöst. Dieses Verhalten nennt man hydrophil. Das Wasser kann keine Tropfen mehr bilden, Schmutzpartikel können einfach abgewaschen werden, und bei feuchtem Wetter bildet sich kein Beschlag mehr an

²³ LAUTH, Kolloide, S. 6 ff.;

²⁴ GREENWOOD, Chemistry, S. 1118;

²⁵ PELAEZ, Titanium Dioxide, S. 334 ff.; VINU, environmental, S. 210 f.;

²⁶ MANESS, bacterial activity, S. 4094 ff.;

²⁷ CARP, titanium dioxide, S. 98 ff.; HASHIMOTO, TiO_2 , S. 6 ff.; PELAEZ, Titanium Dioxide, S. 342 ff.; SERPONE, photocatalysis, S. 1133 ff.; VINU, environmental, S. 197ff., 211 ff.;

Scheiben, Rückspiegeln und Brillengläsern (das beginnt ab einem Kontaktwinkel von 20°). Bei Dunkelheit nimmt die Oberflächenspannung jedoch wieder zu und die Oberfläche wird weniger hydrophil.²⁸

2.4.4 Titandioxid als „Funktionsmaterial“

Um mit TiO₂ einen bestimmten Zweck bzw. eine bestimmte Wirkung erzielen zu können, wird dieses durch verschiedene Massnahmen aktiv verändert. Mit einer solchen aktiven Veränderung des Materials zur Erfüllung bestimmter Zwecke wird es "funktionalisiert", man kann daher auch von "Funktionsmaterial" sprechen. Die Möglichkeiten dazu sind, wie nachstehend aufgeführt, vielfältig.²⁹

2.4.4.1 Die Zusammensetzung des Grundkörpers von Titandioxid („Doping“)

Ein Weg der Funktionalisierung ist die Behandlung des Grundkörpers durch so genanntes "Doping".³⁰ Dabei werden anorganische Stoffe in den Grundkörper eingebracht um beispielsweise dessen photokatalytische Wirkung entweder zu stärken oder zu schwächen. So wird das photokatalytische Potential durch das Einbringen von Aluminiumoxid (Al₂O₃) herabgesetzt³¹, während das Einbringen von Chrom, Cobalt, Vanadium, Eisen, Kupfer, Nickel, Mangan, Molybdän, Niob, Wolfram, Ruthenium, Palladium, Gold, Stickstoff, Fluor, Schwefel, Kohlenstoff oder Phosphor³² sowie Kieselsäure (Siliciumdioxid)³³ diese Wirkung erhöht und das Spektrum von UV-Licht auf sichtbares Licht ausdehnt!

Mittels Einbringen von Phosphortrichlorid (PCl₃) sowie Siliciumtetrachlorid (SiCl₄) wird die Teilchengrößenverteilung des Pigments beeinflusst.³⁴

2.4.4.2 Zusammensetzung der Oberfläche von Titandioxid („Coating“)

Eine weitere Möglichkeit der Funktionalisierung erfolgt durch die Behandlung der Oberfläche von TiO₂ mit anorganischen und organischen Stoffen, dem "Coating". Mit der Kombination mit organischen Stoffen ergeben sich sehr viele neue Möglichkeiten. So wird durch das Aufbringen von wasserhaltigen Aluminiumsilikaten und Aluminiumphosphaten auf die Pigmentteilchen die Bildung von Hydroxyl-Radikalen an der Oberfläche von TiO₂ fast vollständig unterbunden. Weiter finden dafür auch Natriumaluminat, Aluminiumsulfat, Natriumsilikat oder Zirkonoxidsulfat Verwendung.³⁵ Ebenso führt Cadmiumsulfid an der Oberfläche von TiO₂ zu einer starken Stabilität vor der Lichteinwirkung.³⁶ Das Anbringen von Edelmetallen wiederum führt zu einer Verstärkung der Photokatalyse unter sichtbarem Licht.³⁷ Die Applikation von Palladium, Platin und Silber an der TiO₂-Oberfläche beeinträchtigt die Zersetzung von Chlorkohlenwasserstoff, erhöht aber den Abbau von Alkohol. Platin an der Oberfläche begünstigt die Zersetzung von Benzol, Trichlorethylen, Phenol, Methanol, Ethanol, Aceton, Acetaldehyde und Ozon. Palladium, Kupfer und Platin zeigen eine verbesserte Zersetzung von 2,4 Dinitrophenol, Trichlorethylen und Formaldehyd.³⁸

²⁸ BAHNEMANN, Titandioxid, S. 44 ff.; CARP, titanium dioxide, S. 144; HASHIMOTO, TiO₂, S. 8 ff.; HENDRIX, Titania-Silica, S. 163 f.

²⁹ DONALDSON, myth, S. 725 ff.; KRUG, Interdisciplinary, S. 1273 ff.;

³⁰ CARP, titanium dioxide, S. 77;

³¹ WINKLER, Titandioxid, S. 36, 38;

³² CARP, titanium dioxide, S. 77 ff.; PELAEZ, titanium dioxide, S. 334 ff.; VINU, environmental, S. 210 ff.;

³³ HENDRIX, Titania-Silica, S. 161 ff.;

³⁴ BERTAU, anorg. Chemie, S. 687; WINKLER, Titandioxid, S. 36, 38;

³⁵ BERTEAU, anorg. Chemie, S. 687; HUPFELD, Titandioxid, S. 17 f., 97; WINKLER, Titandioxid, S. 39 ff.; 93, 96, 100;

³⁶ PELAEZ, titanium dioxide, S. 338;

³⁷ PELAEZ, titanium dioxide, S. 337;

³⁸ CARP, titanium dioxide, S. 83.

2.4.4.3 Grösse und Form von Titandioxid (Nanopartikel)

Die Grösse von Titandioxid

Eine weitere Möglichkeit, die Eigenschaften und die Wirkungen von TiO_2 zu beeinflussen, ist die Gestaltung seiner Grösse, insbesondere die Verkleinerung. Die Vorstellung, grössere technische Möglichkeiten durch Verkleinerung zu gewinnen, geht offenbar auf den Vortrag von Richard P. Feynman vor der «American Physical Society» im Jahre 1959 zurück. In seinem Vortrag «Plenty of Room at the Bottom» befasst er sich mit der «Manipulation und Steuerung von Dingen im winzigen Massstab».³⁹

War TiO_2 ursprünglich grobkörnig, erkannte man im Laufe der Zeit, dass es in einer Grösse unter 100 Nanometer (nm) verschiedene neue technische Anwendungsmöglichkeiten bringt. Mit der Verkleinerung der Partikel erhöht sich deren spezifische Anzahl und spezifische Oberfläche im Verhältnis zu den grösseren Partikeln. Bei gleicher Masse besitzen die Nano- TiO_2 -Partikel eine sehr viel grössere Oberfläche zum Reagieren als die grobkörnigen TiO_2 -Partikel. Das hat einen Einfluss auf die photokatalytische Aktivität, denn diese wird dadurch gegenüber den grobkörnigen Partikeln erhöht.⁴⁰

Die Grösse von Nano- TiO_2 hat einen Einfluss auf die Geschwindigkeit, mit der Hydroxyl-Radikale gebildet werden⁴¹, diese Geschwindigkeit wird zudem auch vom Säure-Base-Gehalt der Umgebung des Nano- TiO_2 beeinflusst!⁴² Das sind wiederum relevante Faktoren bei der Beurteilung von dissipiertem Nano- TiO_2 .

TiO_2 absorbiert zudem keine Wellenlängen des sichtbaren Lichts, die zwischen ungefähr 380 nm und 750 nm liegen. Hingegen absorbiert TiO_2 Licht im UV-Bereich, weshalb es vor UV-Strahlen schützt. Sobald TiO_2 in einer Grösse vorliegt, die kleiner als das sichtbare Licht ist, so wird es für Licht transparent, schützt aber immer noch vor UV-Strahlen. Je kleiner, desto durchsichtiger! Unter einer Grösse von 100 nm spricht man von Nano- TiO_2 ⁴³, und dieses Spektrum findet in vielen Bereichen Anwendung, sei es in Farben und Lacken (z.B. in Glas für Photovoltaikanlagen, Fassadenfarbe, Holzschutzlack) Kosmetika (z.B. Puder, Crèmes, Sonnenschutzmittel) Arzneimittel (z.B. Salben, Tabletten, Kapseln) und macht zwischenzeitlich einen grossen Teil der industriellen Produktion aus.⁴⁴

Die Form bzw. Gestalt von Nano-Titandioxid

Neben der Grösse kann auch die Form von Nano- TiO_2 beeinflusst werden. Das veranlasste die Industrie, dazu Standardisierungen zu Nanomaterial einzuführen, die in den ISO-Regulierungen Nrn. 80004.1 ff. Eingang fanden. Ganz grundsätzlich wird in diesen Regulierungen zwischen "Nanoobjekt" und "nanostrukturiertem Material" unterschieden. Ersteres zeichnet sich durch ein oder mehrere Aussenmasse aus, wogegen beim Zweiten die innere Struktur oder die Oberflächenstruktur im Nanomassstab ausschlaggebend ist. Nanoobjekte wiederum werden – entsprechend den Aussenmassen – eingeteilt in "Nanopartikel" (3 Aussenmasse), "Nanofaser" (2 Aussenmasse) und "Nanoplättchen" (1 Aussenmass). Die Nanofaser ihrerseits wird eingeteilt in "Nanodraht" (elektrisch leitende Nanofaser), "Nanoröhrchen" (hohle Nanofaser) sowie "Nanostäbchen" (starre Nanofaser). Auch mit diesen Strukturen lassen sich sehr viele Kombinationen schaffen!⁴⁵

³⁹ FEYNMANN, Plenty of Room, S. 22 ff.;

⁴⁰ HOLEMANN, Lehrbuch, S. 1432; MARQUART, Toxikologie, S. 904 f.; RIEDEL, anorg. Chemie, S. 232 f. ;

⁴¹ SERPONE, Dynamics, S. 16655 ff. ;

⁴² MOSER, Dynamiques, S. 195 ff. ;

⁴³ HALLIWELL, Radicals, S. 496;

⁴⁴ HOLLEMAN, Lehrbuch, S. 1432; MARQUART, Toxikologie, S. 904; RIEDEL, anorg. Chemie, S. 232 f.; XIAOBO, Titanium Dioxide Nanomaterials, S. 2891 ff.;

⁴⁵ HERRMANN, Wörterbuch, S. 2 ff.;

2.4.4.4 Das Verhalten von Nano-Titandioxid mit der Umgebung

Bekannt ist, dass Nanoteilchen mit der Umgebung interagieren bzw. reagieren und ungewöhnliche physikalische Phänomene zeigen, weil die Atome nicht mehr fest in einen Verband eingebunden sind, sondern vielmehr Teil der Oberfläche sind.⁴⁶ Wie diese Formen im Nanobereich untereinander mit anderen organischen und anorganischen Materialien unter Licht wirken, ist seit Jahrzehnten Gegenstand von Studien auf der ganzen Welt und nach wie vor nicht restlos geklärt.⁴⁷

2.5 Zur Toxikologie

2.5.1 Einleitung

Die Toxikologie befasst sich mit «gesundheitsschädlichen Auswirkungen von chemischen Substanzen oder Substanzgemischen auf Lebewesen» auf der Basis der «Lehre von den Giften und den Gegengiften unter Berücksichtigung der Dosis».⁴⁸ Nach dem gängigen toxikologischen Verständnis ist Nano-TiO₂ somit nicht toxisch, weil es chemisch als inert gilt und nicht direkt mit den Lebewesen in Wechselwirkung tritt. Es haben sich aber auch keine Lebensformen entwickelt, in denen Titan oder TiO₂ essentiell⁴⁹ und damit Teil des natürlichen Metabolismus ist wie beispielsweise Eisen, Zink oder Kalzium. TiO₂ ist ein für biologische Organismen fremder Stoff, genauso wie Aluminium. Dies obschon Titan das 10. häufigste Element und 4. häufigste Metall auf der Welt ist. Auf Grund dieser Ausgangslage stellt sich die Frage, warum Titan oder TiO₂ im Verlauf der Evolution nie essentiell geworden ist, und wie Organismen reagieren, deren Metabolismus mit TiO₂ oder Nano-TiO₂ in Kontakt kommt. Die Recherchen im Rahmen dieser Arbeit ergaben keine Hinweise auf Studien zu dieser Fragestellung.

TiO₂ und vor allem Nano-TiO₂ hat aber durch die Fähigkeit der Photokatalyse eine physikalische Eigenschaft, die sich chemisch manifestieren kann, wenn bestimmte Voraussetzungen in seiner Umgebung wie z.B. das Vorhandensein von Licht und Wasser oder anderen Flüssigkeiten erfüllt sind. Dazu ist in den vergangenen Jahren viel geforscht worden. Der Fokus lag auf der toxikologischen Wirkung auf die Umwelt im Rahmen der Photokatalyse von Nano-TiO₂, der Ökotoxikologie im Allgemeinen sowie der Genotoxikologie im Speziellen.

2.5.2 Ökotoxikologie

MANESS und KollegInnen zeigen 1999 auf, wie Hydroxyl-Radikale von TiO₂ auf die Lipide in der Zellmembran von Coli-Bakterien einwirken und diese so schädigen, dass das zum Zelltod führt (Lipidperoxidation, auch im Alltag bekannt bei Fetten und Ölen, die «ranzig» werden). MANESS und KollegInnen führten dabei aus, dass dieser Mechanismus nicht nur bei Coli-Bakterien, sondern bei allen Zellen von allen Lebensformen funktioniert, die über Zellmembranen mit Lipiden verfügen, seien diese nun mehr oder weniger gesättigt. Explizit weisen sie darauf hin, dass ihre Untersuchung nur die Zelloberfläche betrifft, jedoch nicht das Zellinnere, also die Situation, in der sich Nano-TiO₂ in einer Zelle befindet und über

⁴⁶ RIEDEL, anorg. Chemie, S. 232.

⁴⁷ CARP, titanium dioxide, S. 66; Eine ansatzweise Vertiefung dieses Themas würde den Umfang der vorliegenden Arbeit sprengen, weshalb auf dieses Thema in der vorliegenden Arbeit nicht eingegangen wird.

⁴⁸ VOHR, Toxikologie, S. 3 f.;

⁴⁹ HOLEMAN, anorg. Chemie, S. 1520;

Lichteinwirkung Hydroxyl-Radikale bildet.⁵⁰ CHO und Kollegen zeigten 2004 auf, dass die Konzentration von Hydroxyl-Radikalen direkt in Zusammenhang mit der Anzahl abgetöteter Coli-Bakterien steht, und dass diese Radikale tausend Mal stärker wirken als chemische Desinfektionsmittel wie Chlor, Ozon und Chlordioxid.⁵¹ Die zerstörerische Einwirkung von Hydroxyl-Radikalen aus UV-belichtetem Nano-TiO₂ auf Zellmembranen wird 2011 durch METZLER und Kollegen auch am Beispiel von Algenzellen aufgezeigt.⁵²

RINCON und PULGARIN zeigten 2003 auf, dass in Wasser suspendiertes Nano-TiO₂ (zwischen 21 nm und 25 nm) Coli-Bakterien schneller abtötet als auf einer Unterlage fixiertes Nano-TiO₂. Weiter hielten sie fest, dass das industriell hergestellte bzw. funktionalisierte Nano-TiO₂ P-25 von Degussa (80% Anatas und 20% Rutil) photokatalytisch aktiver ist als gewöhnliches Anatas oder Rutil, also mehr Hydroxyl-Radikale bildet. Zudem zeigen sie auf, dass ein zu hoher Anteil an suspendiertem Nano-TiO₂ wiederum einen negativen Einfluss auf die Zerstörung der Bakterien hat, dass also eine tendenziell kleinere Menge an Nano-TiO₂ eine bessere Wirkung erzielt.⁵³ Diese Resultate bestätigten BENABBOU und Kollegen in ihrem Aufsatz von 2007 u.a. mit der Empfehlung, es seien Studien zu entwickeln, die aufzeigen, ob durch diesen photokatalytischen Prozess, mit dem Coli-Bakterien vernichtet werden, dann an deren Stelle andere «Verunreinigungen» generiert werden.⁵⁴

CARP und Kollegen wiesen 2004 betreffend den Einsatz von Nano-TiO₂ zur Mineralisierung von toxischen Substanzen darauf hin, dass ohne weiteres die Möglichkeit besteht, dass diese Substanzen – als Endprodukt oder (auch langlebiges) Zwischenprodukt (z.B. bei aromatischen Verbindungen in Wasser) – noch toxischer werden können als die Ausgangssubstanz oder dass nicht toxische Substanzen über die Wirkung von Hydroxyl-Radikalen toxisch werden können. Darum müssten im Zusammenhang mit dem Einsatz von Nano-TiO₂ zur Photokatalyse auch geprüft werden, welche Zwischenprodukte entstehen können und welche Lebensdauer diese haben. Dies vor allem darum, weil mit Nano-TiO₂ keine selektive Oxidation erfolgt.⁵⁵ So entsteht beispielsweise über Nano-TiO₂, auf dessen Oberfläche Goldatome eingebaut worden sind, aus Selen (6⁺) der giftige und stark faulig riechende Selenwasserstoff (H₂Se).⁵⁶

HUND-RINKE und SIMON kommen in ihrer Analyse 2006 zum Schluss, dass photokatalytisch aktive Nano-TiO₂ ökotoxische Wirkung haben. Sie zeigen das am Beispiel von Algen und Wasserflöhen (Daphnien). Sie zeigen zudem auf, wie die Ökotoxizität von photokatalytischen Nanopartikeln bestimmt werden kann.⁵⁷

AMIANO und Kollegen kommen 2012 nach Tests mit Wasserflöhen in standardisiertem Wasser und in Flusswasser zum Schluss, dass Nano-TiO₂ für Mikroorganismen im Wasser unter UV-Licht als toxisch zu bezeichnen ist.⁵⁸ Zu diesem Ergebnis kommen MANSFIELD und Kollegen 2014 auch mit ihren Untersuchungen unter normalem, also sichtbarem Licht.⁵⁹

Untersuchungen von FARKAS und Kollegen im Jahre 2015 mit an der Oberfläche unbehandeltem Nano-TiO₂ in drei schwedischen Frischwasserseen kommen zum Schluss, dass der Einfluss eines photokatalytischen Effekts auf dortige Bakterienkolonien u.a. davon abhängt, wie hoch die Konzentration von gelösten

⁵⁰ MANESS, bacterial activity, S. 4098; KRUG, Interdisciplinary, S. 1267 f.;

⁵¹ CHO, Correlation, S. 1069 ff.;

⁵² METZLER, Responses, S. 545;

⁵³ RINCON, inactivation, S. 273 ff., 276 ff., 278 ff.

⁵⁴ BENABBOU, Inactivation, S. 257 ff., S.;

⁵⁵ CARP, titanium dioxide, S. 61 f. 73, 111, 116, 117, 130;

⁵⁶ CARP, titanium dioxide, S. 83;

⁵⁷ HUND-RINKE, Ecotoxic, S. 1 ff.;

⁵⁸ AMIANO, acute toxicity, S. 2564 ff.

⁵⁹ MANSFIELD, toxicity normal sunlight, S. 206 ff.

organischen Stoffen im Wasser ist und in welchem Umfang sich welche chemischen Stoffe darin befinden, aber auch davon, welche Kristallstruktur das Nano-TiO₂ besitzt.⁶⁰

HAYNES und Kollegen halten auf Grund ihrer Studien 2017 fest, dass Nano-TiO₂ die Eigenschaft hat, einen weiten Rahmen von Organismen im Meer zu beeinflussen. Ihre Untersuchungen betreffen ein breiteres Spektrum von Tieren als die bisherigen in dieser Arbeit erwähnten Studien, nämlich die Bandbreite von den kleinsten Bakterien bis zu Muscheln. Sie kritisieren bisherige Studien, soweit diese sich auf Untersuchungen im Wasser beziehen, und bemängeln, die Tests seien zu unterschiedlich angelegt worden, als dass man sie vergleichen könne. Zudem seien viele Tests nicht lebensnah durchgeführt worden. HAYNES und Kollegen schlagen vor, in künftigen Studien die natürlichen Lebensbedingungen- bzw. Umstände der untersuchten Lebewesen mit zu berücksichtigen, insbesondere diejenigen im Meer. Das natürliche System des betreffenden Lebewesens sei für die Studien zu charakterisieren. Ebenso sei zu prüfen und zu berücksichtigen, ob und wenn ja, inwiefern die untersuchten Lebewesen mehr oder weniger sensibel auf durch Nano-TiO₂ hervorgerufene Photokatalyse reagieren.⁶¹

Diese Vorschläge sind sicher gut gemeint und nachvollziehbar. Sie übersehen aber, dass mit der Vielzahl der in der Natur bzw. Umwelt – hier im Wasser – vorkommenden Systemen und Lebewesen eine Variantenvielfalt besteht, die in ihrer Vielzahl auch nicht ansatzweise erfasst werden kann. Diese Vorschläge als Anforderungen formuliert, um eine Toxizität nachzuweisen, führten dazu, dass jegliches Unterfangen von Beginn weg zum Scheitern verurteilt wäre.

2.5.3 Genotoxikologie

Ende 2007 weisen REEVES und Kollegen in ihrer Publikation darauf hin, dass Nano-TiO₂ ein genotoxisches Potential habe (das Potential einer unkontrollierten gentechnischen Veränderung) und sich dieses erhöhe, wenn Nano-TiO₂ in Gewässer dissipiere und sich dort ansammle. Das habe kurz- und langfristige Konsequenzen für Flora und Fauna. Mit Verweis auf entsprechende frühere Studien zeigen sie auf, dass grosse Mengen von funktionalisiertem Nano-TiO₂ industriell hergestellt werden, die dann über den industriellen oder privaten Gebrauch durch den Menschen in die Umwelt, insbesondere Gewässer, dissipieren und sich dort auch ansammeln.⁶² Sie zeigen auf, dass inerte Substanzen toxisch werden können, wenn sie zufolge ihrer Nanoform eine erhöhte Reaktionsfähigkeit erhalten und zellgängig werden.⁶³ Am Beispiel einer In-Vitro-Studie mit Goldfischzellen erklären sie, wie Nano-TiO₂ unter UV-Licht (auch, wenn auch weniger stark, ohne UV-Licht) über Hydroxyl-Radikale Zellen und Gewebe zerstört und DNA beschädigt, somit also zytotoxisch und genotoxisch ist.⁶⁴ Diese Erkenntnis wird durch die In-Vitro-Studie von VEVERS und JHA 2008 am Beispiel von Zellen der Regenbogenforelle und dem Hinweis auf analoge Studien mit Menschenzellen bestätigt. Sie weisen zudem darauf hin, dass verschiedene weitere Faktoren die Toxizität von Nano-TiO₂ beeinflussen können, wie z.B. Form und Grösse des Nano-TiO₂, pH-Wert der Umgebung, Salzgehalt, Wasserhärte, Temperatur sowie die Anwesenheit von anderen organischen Materialien in der Umgebung.⁶⁵ DOMINGOS und Kollegen haben hierzu 2009 im Rahmen ihrer Forschungen herausgefunden, dass Nano-TiO₂ in Anwesenheit von Fulvin-Säuren nicht so stark aggregiert, sondern sich

⁶⁰ FARKAS, Impact, S. 85 ff.

⁶¹ HAYNES, effects, S. 138 ff.

⁶² REEVES, Hydroxyl Radicals, S. 114;

⁶³ REEVES, Hydroxyl Radicals, S. 113;

⁶⁴ REEVES, Hydroxyl Radicals, S. 130 f.; NIOSH, Exposure, S. 23 f.; SHI, review, S. 25;

⁶⁵ VEVERS, Genotoxic and cytotoxic, S. 410 ff.; DOMINGOS, Aggregation, S. 1282.

viel mehr verteilt resp. dissipiert und damit in Kontakt mit weiteren Zellen kommen kann.⁶⁶ Fulvin-Säuren entstehen – wie Humin-Säuren – beim Zersetzungsprozess von Pflanzen und kommen in der Natur in grossen Mengen vor.

2.5.4 Nationalfondsprojekt 64 zu Nanomaterialien

Im November 2007 beauftragte der Bundesrat den Schweizerischen Nationalfonds mit der Durchführung des Nationalfondsprojektes "Chancen und Risiken von Nanomaterialien", das NFP 64.⁶⁷ Dieses Projekt fand am 2. Juli 2017 im Rahmen einer Konferenz in Fribourg seinen Abschluss.⁶⁸ Es widmete sich den Themenblöcken Biomedizinische Anwendung, Umwelt, Nahrungsmittel, Energie, Baumaterialien sowie Medikamente. Eine Analyse der Berichte zu den Einzelprojekten der jeweiligen Blöcke ergab, dass die photokatalytische Wirkung von Nano-TiO₂ nicht Gegenstand spezifischer Abklärungen im NFP 64 war.⁶⁹

2.6 Ergebnis

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass funktionalisiertes Nano-TiO₂ durch das technische Verfügbarmachen während und nach seiner Nutzung durch den Menschen unkontrolliert in Luft, Boden und Wasser gelangt. Dadurch erreicht Nano-TiO₂ eine unkontrollierte Mobilität. Es ändert sich zwar seine Umgebung, jedoch bleibt seine Wirkform, für die es «designed» worden ist, erhalten. Nano-TiO₂ bleibt inert, stabil und somit weiterhin voll funktionsfähig, also insbesondere photokatalytisch, und dafür gibt es keine Halbwertszeit.

Es zeigt sich, dass das klassische Verständnis von Toxikologie die Eigenschaften von Nano-TiO₂ nicht erfasst. Denn sie lässt die chemische Auswirkung von physikalischen Eigenschaften ausser Acht! Dem tragen indessen Entwicklungen in der Toxikologie immer mehr Rechnung, sie befassen sich u.a. mit Mechanismen und Wirkungen von freien Radikalen sowie deren Wechselwirkung mit Proteinen und Nukleinsäuren.⁷⁰

Da Nano-TiO₂ somit auch nach seiner Nutzung durch den Menschen in der Lage ist, unter Einfluss von Licht und Wasser Hydroxyl-Radikale zu bilden, kann es auch weiterhin und bis in alle Ewigkeit mit Stoffen und Organismen in Wechselwirkung treten. Dadurch können neue Stoffe entstehen und neue Metabolismen⁷¹ ausgelöst werden, deren Wirkung niemand kennt. Nano-TiO₂ hat daher unter gewissen Voraussetzungen toxisches Potential⁷², und die im entsprechenden Umfeld gebildeten Radikale haben wegen ihrer hohen Reaktivität eine besondere Toxizität.⁷³ Nano-TiO₂ ist daher besorgniserregend.⁷⁴

⁶⁶ DOMINGOS, Aggregation, S. 1285

⁶⁷ <http://www.nfp64.ch/de/das-nfp>, letztmals aufgerufen am 29. Mai 2017

⁶⁸ <http://www.nfp64.ch/de/News/Seiten/170503-news-nfp64-schlusskonferenz.aspx>, letztmals aufgerufen am 9. Juni 2017

⁶⁹ <http://www.nfp64.ch/de/projekte>, zuletzt aufgerufen am 29. Mai 2017

⁷⁰ VOHR, Toxikologie, 83, 88;

⁷¹ MARQUART, Toxikologie, S. 117 ff.;

⁷² LOHS, Toxikologie, S. 453;

⁷³ MARQUART, Toxikologie, S. 123; CLAASSEN, Toxicology, S. 411 ff.; DONALDSON, myth, S. 730, KRUG, interdisciplinary, S. 1268;

⁷⁴ KRUG, Weg, S. 12515.

3 Die Situation betreffend die Dissipation von Nano-TiO₂ in die Gewässer in der Schweiz

3.1 Einführung

Nach der Beschreibung von Nano-TiO₂ und dem Aufzeigen der Erkenntnisse über seine Wirkungen, seine Anwendungsbereiche und seine Toxizität in der Umwelt, werden in diesem Teil der Arbeit die Verhältnisse in der Schweiz geprüft. Der Fokus liegt auf der Dissipation von Nano-TiO₂ in die Gewässer.

3.2 Dissipation von Nano-TiO₂ in die Gewässer der Schweiz

Studien über die Ökotoxizität von Nano-TiO₂ führten zu Analysen betreffend die Verbreitung von Nano-TiO₂ in der Umwelt, auch in der Schweiz. Über Modellierungen kam man betreffend die Schweiz 2007 zum Schluss, dass Nano-TiO₂ mindestens im Wasser eine Gefahr für die darin lebenden Organismen darstellt.⁷⁵ Weiter ergab 2009 eine Studie, dass die weltweite unkontrollierte Verbreitung von Nano-TiO₂ in Luft, Boden und Wasser massiv zunehmen werde.⁷⁶ In der Schweiz gelangt gemäss Studien von GOTTSCHALK und Kollegen aus 2010 und 2011 Nano-TiO₂ in grossen Mengen vor allem in Kosmetika und Farbstoffen (z.B. Lebensmittelfarbe E 171) über das Abwasser, weiter in Plastik, Tinte sowie Glas und Keramik über Verbrennungsanlagen unkontrolliert in die Umwelt, insbesondere in die Gewässer. Das ist vor allem auf das gut ausgebaute Abwasser- und Abfallsammelsystem in der Schweiz zurückzuführen, das den Nano-TiO₂-Fluss kanalisieren, dieses aber nicht zurückbehalten kann.⁷⁷

Ebenso gelangt, einer Studie der EAWAG von 2008 zufolge, funktionalisiertes Nano-TiO₂ in erheblichen Mengen über Fassadenfarbe unkontrolliert in das Wasser, hier jedoch nicht nur über die Kanalisationen, sondern auch über den die Fassaden umgebenden natürlichen Boden.⁷⁸ Einer Studie von WEIR und Kollegen aus dem Jahre 2012 zufolge, gelangt in den USA ein grosser Teil von Nano-TiO₂ vor allem über Lebensmittelfarbe (E 171 beispielsweise in Süswaren) und Kosmetika (Zahnpasta, Sonnencremes, Rasierschaum, Shampoos, Deodorants, Lippenbalsam etc.) in die Umwelt. In diesem Zusammenhang sei beispielsweise ein Mensch in den USA pro Tag und Kilo Körpergewicht rund 1 mg Nano-TiO₂ ausgesetzt.⁷⁹ Das sind bei einer 75 kg schweren Person rund 27 Gramm pro Jahr, die dann über körperliche Ausscheidungen und Reinigung mindestens teilweise wieder ins Abwasser gelangen. Auf Grund der ähnlichen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Verhältnisse darf angenommen werden, dass sich diese Angaben aus den USA mehr oder weniger im gleichen Umfang auf die Schweiz übertragen lassen.

Eine Prognose aus dem Jahre 2011 über die Verteilung von dissipiertem Nano-TiO₂ in Schweizer Flüssen zeigt die mutmasslichen Konzentrationen auf. Selbst bei einer optimistischen Schätzung ergeben sich hohe Werte in den Ballungsräumen.

⁷⁵ MUELLER, Modelling, S. 4452

⁷⁶ GOTTSCHALK, Modelled Concentrations, S. 9219 ff.

⁷⁷ GOTTSCHALK, Modelled Exposure, S. 1040 ff.; GOTTSCHALK, rivers, S. 3439 ff.; WEIR, food, S. 2242 ff.

⁷⁸ KAEGI, facades, S. 238;

⁷⁹ WEIR, food, S. 1242 ff.;

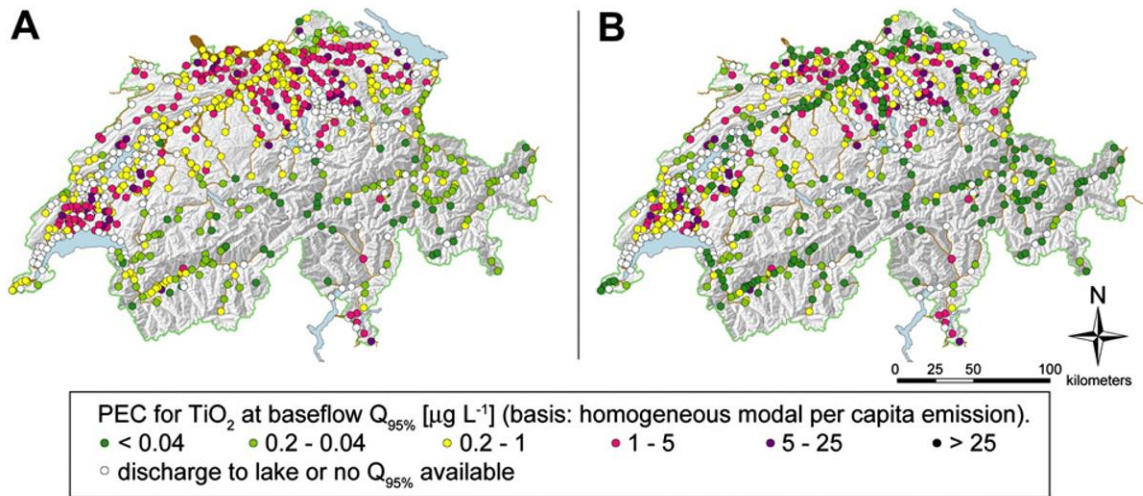


Abbildung 3: Geschätzte Konzentrationen von Nano-TiO₂ in 543 Schweizer Flüssen.

A: konservatives Szenario ohne Entfernung des Materials aus dem Wasser. B: optimistisches Szenario mit einer schnellen Transformation/Sedimentation des Materials

Es zeigt sich somit, dass in Schweizer Gewässer Mengen von Nano-TiO₂ gelangen, die als erheblich zu bezeichnen sind.

4 Rechtliche Regelungen zur Verhinderung des Einbringens von Nano-TiO₂ in die Schweizer Gewässer

4.1 Einleitung

Die vorstehenden Ausführungen haben gezeigt, dass erhebliche Mengen von Nano-TiO₂ in Schweizer Gewässer gelangen. Der zweite Teil dieser Arbeit zeigt zudem auf, welche toxischen Wirkungen Nano-TiO₂ im Gewässer haben kann. Im vierten Schritt dieser Arbeit wird daher geprüft, welche rechtlichen Regeln die Einbringung von Nano-TiO₂ mit seinen öko- und genotoxischen Eigenschaften ins Gewässer verhindern sollten. Dazu wird in erster Linie auf die Selbstkontrolle im Umweltschutzgesetz (nachfolgend: USG) und ihre Bedeutung für das Chemikalien-, Lebensmittel-, Heilmittel- und Kosmetikrecht sowie für Nanopartikel eingegangen. Abschliessend werden die Regelungen im Gewässerschutzrecht mit Blick auf die Einbringung von Nano-TiO₂ untersucht.

4.2 Die Selbstkontrolle nach den Regelungen im Schweizerischen Umweltschutzgesetz

4.2.1 Einleitung

Schon in der ersten Botschaft zum USG im Jahr 1979 wurde vor den Gefahren gewarnt, die durch Dissipation von Stoffen in die Umwelt entstehen können. Die Stoffe gelangten über verschiedene Wege unkontrolliert in die Umwelt und in die Kreisläufe der Natur, wo sie sich auch anreichern könnten. Von dort würden die Stoffe mit der Nahrung aufgenommen, ohne dass man sich dem entziehen könne und ohne dass man deren Auswirkungen auf Menschen, Tiere und Pflanzen kenne. Kenntnisse über allfällige Folgen der Exposition eines Organismus gegenüber Stoffen seien kaum vorhanden, und häufig stelle sich erst nach jahrelanger Einwirkung heraus, dass ein Stoff zu Schäden führe.⁸⁰ Die Regelungen vor dem USG, die sich mit Stoffen befassten, beschränkten sich lediglich auf die unmittelbare Schädigung und Gefährdung von Mensch und Tier im Zusammenhang mit dem direkten Umgang mit den Stoffen, also auf die klassische Gefahrenabwehr. Das betraf vor allem das Giftgesetz (nachfolgend GG) bzw. das dieses ablösende und heute noch geltende Chemikaliengesetz (nachfolgend: ChemG)⁸¹, aber auch das Lebensmittelgesetz (nachfolgend: LMG) und das Heilmittelgesetz (nachfolgend: HMG). Die verfassungsmässige Grundlage für diese als "Gesundheitsschutz" bezeichneten Regelungsbereiche findet sich in Art. 118 der Schweizerischen Bundesverfassung (nachfolgend: BV).⁸²

Eine weitergehende Regelung, die auch den Schutz der Umwelt vor Schäden und Gefahren und damit auch den indirekten, mittelbaren Schutz von Mensch und Tier erfasste, gab es, ausser in einem gewissen Sinne im Gewässerschutz, zu dieser Zeit nicht.⁸³ Um diese Lücke zu füllen, ist das USG geschaffen worden. Und in diesem Rahmen wurde verlangt, dass "die Umweltverträglichkeit von Stoffen und Erzeugnissen, die in die

⁸⁰ BBl 1979 III 801.

⁸¹ BBl 1968 I 1429 f., 1434, 1439; BBl 1979 III 801 f.; BBl 2000 689; LEIMBACHER, in: KELLER USG, Vorbemerkungen zu Art. 26-29 N 6, N 13.

⁸² POLEDNA, St. Galler Kommentar zu Art. 118 BV, Rz. 1 ff. und Rz. 8 ff.

⁸³ BBl 1953 II 1ff.; BBl 1954 I 335 f.

Umwelt gelangen können, rechtzeitig und zuverlässig abgeklärt und kontrolliert werden" muss.⁸⁴ Die verfassungsmässige Grundlage für dieses Gesetz findet sich im heutigen Art. 74 BV.⁸⁵

4.2.2 Der Grundsatz der Selbstkontrolle

Zur Umsetzung der Forderung, auch die Umwelt vor mittelbaren und unmittelbaren Schädigungen zu schützen, statuierte das USG für umweltgefährdende Stoffe 1983 den Grundsatz der Selbstkontrolle, der auch heute noch ein wesentliches Merkmal der Vorsorge vor der Gefahr von Stoffen für die Umwelt ist.⁸⁶ Gemäss dem Vorsorgeprinzip sind "Einwirkungen, die schädlich oder lästig werden könnten, frühzeitig zu begrenzen" (Art. 1 Abs. 2 USG). Damit wird der Schutz einerseits bereits auf eine *mögliche* Umweltbeeinträchtigung vorverlegt,⁸⁷ und andererseits soll er – dem Vorsorgegrundsatz entsprechend – möglichst bereits an der Quelle greifen.

Die Selbstkontrolle ist in Art. 26 USG festgehalten. Demzufolge dürfen keine Stoffe "für Verwendungen in Verkehr gebracht werden, bei denen sie, ihre Folgeprodukte oder Abfälle bei vorschriftsgemäsem Umgang die Umwelt oder mittelbar den Menschen gefährden" (Art. 26 Abs. 1 USG). Zu diesem Zweck hat der Hersteller oder der Importeur eine Selbstkontrolle betreffend den Stoff durchzuführen (Abs. 2 von Art. 26 USG).

Die Selbstkontrolle bedeutet, dass geprüft werden muss, "welche Mengen eines Stoffes bei verschiedenen Anwendungsbedingungen und Anwendungsarten voraussichtlich in die Umwelt gelangen können, wie der Stoff sich dort verhält und mit welchen nachteiligen Wirkungen gerechnet werden muss."⁸⁸ Dazu sind insbesondere folgende Aspekte zu berücksichtigen:

1. «die chemischen, biologischen und physikalischen Eigenschaften eines Stoffes;
2. die Ausbreitung und das Verhalten eines Stoffes in der Umwelt (z.B. Abbaubarkeit, Anreicherung, Umwandlung in gefährliche Folgeprodukte, Wechselwirkungen mit anderen Stoffen);
3. die Gefährlichkeit des Stoffes für Tiere und Pflanzen sowie die Lebensräume und Lebensgemeinschaften;
4. die Gefährlichkeit für die menschliche Gesundheit zufolge Anreicherung in der Nahrungskette.⁸⁹

Dazu gehört auch, dass Abfälle in die Abklärungen mit einzubeziehen sind, denn das Verbot von Art. 26 Abs. 1 USG schliesst sie mit ein. Somit müssen Hersteller und Importeur sich auch mit der Frage auseinandersetzen, ob – und wenn ja, – wie ein Stoff während und nach der Nutzung in die Umwelt gelangt, beispielsweise über deren Ausscheidung durch den Menschen. Ab diesem Moment gilt der Stoff nämlich als Abfall bzw. als "derelinquiert".⁹⁰ Wird "sichergestellt, dass ein Stoff durch die Art seiner Verwendung praktisch nicht in die Umwelt gelangen kann (z.B. geschlossener Kreislauf, umweltgerechte Beseitigung nach Gebrauch), so muss die Selbstkontrolle weniger weit gehen oder kann sogar entfallen."⁹¹

⁸⁴ BBl 1979 III 801.

⁸⁵ MORELL/VALLENDER, St. Galler Kommentar zu Art. 74 BV, Rz. 1 ff. und 10 ff.

⁸⁶ MARTI, Vorsorgeprinzip, S. 155; TSCHANNEN, in: KELLER USG zu Art. 1 N 30

⁸⁷ AEBERLI, Vorsorgeprinzip, S. 49.

⁸⁸ BBl 1979 III 803.

⁸⁹ BBl 1979 III 803.

⁹⁰ LEIMBACHER, in: KELLER USG, zu Art. 26 N 51.

⁹¹ BBl 1979 III 803

Die Selbstkontrolle nach Art. 26 USG hat bereits vor dem Inverkehrbringen zu erfolgen, und ein Stoff darf bereits dann nicht mehr in den Verkehr gebracht werden, wenn eine mittelbar abstrakte und nicht erst eine unmittelbar bevorstehende konkrete Gefährdung der Umwelt zu erwarten ist, obschon bei der Verwendung des Stoffes vorschriftsgemäss vorgegangen werden würde.⁹² Somit dürfen nach Art. 26 USG keine umweltgefährdenden und schon gar keine umweltgefährlichen Stoffe in Verkehr gebracht werden, ausser wenn durch einen bestimmungsgemässen Gebrauch sichergestellt ist, dass weder durch sie noch durch ihre Folgeprodukte und Abfälle eine dieser beiden Gefährdungsarten verursacht wird.

Mit der Selbstkontrolle liegt die primäre Verantwortung dafür, dass keine bei vorschriftsgemässem Umgang schädigende Stoffe in die Umwelt gelangen, nicht mehr beim Staat, sondern bei Hersteller und Importeur. Sie haben entsprechende Abklärungen zu ihren Stoffen, deren Folgeprodukten und Abfällen zu tätigen. Damit wird eine Aufgabe, die dem Gemeinwohl dient und als solche eigentlich hoheitlich umzusetzen wäre, an Private ausgelagert bzw. delegiert. Diese tragen somit die "Erfüllungsverantwortung", während sich die Verantwortung des Staates zur "Gewährleistungsverantwortung" wandelt.⁹³ Man spricht dabei von "regulierter Selbstregulierung".⁹⁴ Der Bundesrat hat zwar nach Art. 26 Abs. 3 USG den Auftrag, "Vorschriften über Art, Umfang und Überprüfung der Selbstkontrolle" zu erlassen, was er – wie weiter unten aufgezeigt wird – auch gemacht hat. Aber selbst wenn der Bundesrat das nicht oder nur unvollständig machen würde, entlässt das weder Hersteller noch Importeur aus seiner primären Verantwortung.⁹⁵ In diesem Falle haben sie die Einstufung in eigenverantwortlicher Art und Weise aufgrund eigener Beurteilung des im Stoff liegenden Gefährdungspotentials vorzunehmen.⁹⁶ Die Selbstkontrolle nach Art. 26 Abs. 2 USG ist ein eigenständiger, unmittelbar anwendbarer und sowohl Hersteller als auch Importeur verpflichtender Rechtssatz.⁹⁷ Er ist gleichzeitig und parallel auch immer dann anwendbar, wenn zum Inverkehrbringen von Stoffen spezialgesetzliche Regelungen zur Anwendung kommen,⁹⁸ sei dies beispielsweise das ChemG, das LMG oder das HMG mit ihren Verordnungen. Der Vorgang von Lex Specialis gilt in diesem Falle nicht. Das ergibt sich auch aus Art. 4 Abs. 2 USG, mit dem sichergestellt werden soll, dass das Schutzziel des USG nicht unterlaufen wird.⁹⁹

Die Überlegung, die zur Einführung der Selbstkontrolle führten, war die Annahme, dass der Staat mit einer umfassenden Kontrolle und Prüfung jedes einzelnen Stoffes überfordert wäre, und die Hersteller in der Privatwirtschaft über ihre eigenen Produkte über einen Wissensvorsprung verfügten, der wegen der dynamischen wissenschaftlichen und technischen Entwicklung durch den Staat kaum aufgeholt werden könnte.¹⁰⁰ Mit der Selbstkontrolle bleibt die behördliche Kontrolle mit Ausnahme von Stoffen, die die Umwelt und mittelbar den Menschen in besonderem Mass gefährden können, auf Stichproben beschränkt.

¹⁰¹ Für diese Stoffe erlässt der Bundesrat nach Art. 29 USG spezielle Vorschriften.¹⁰²

⁹² LEIMBACHER, in: KELLER USG, zu Art. 26 N 2, N 53 f., N 78.

⁹³ ERRASS, Technikregulierung, S. 81, 84 f.; STOCKHAUS, Regulierte Selbstregulierung, S. 31, 55, 78f.

⁹⁴ ERRASS, Technikregulierung, S. 68, 85, 89; THURNHERR, Verfahrensgrundrechte N 392 f.;

⁹⁵ LEIMBACHER, in: KELLER USG, zu Art. 26 N 109.

⁹⁶ STREULI, KAPPES, Leitfasen, N 69.

⁹⁷ LEIMBACHER, in: KELLER USG, zu Art. 26 N 7.

⁹⁸ LEIMBACHER, in: KELLER USG, zu Art. 26 N 15; SEILER, in: KELLER USG, zu Art. 3 N 47.

⁹⁹ BBI 1979 III 781 f.; TSCHANNEN, in: KELLER USG, zu Art. 4 N 1, 19 ff.

¹⁰⁰ BBI 1979 III 802; ERRASS, Innovationsförderung, S. 230; ERRASS, Technikregulierung, S. 78; LEIMBACHER, in: KELLER USG, zu Art. 26 N 109; HETTICH, Risikoversorge, S. 212 ff.

¹⁰¹ LEIMBACHER, in: KELLER USG, zu Art. 26 N 84 und N 105.

¹⁰² BBI 1979 III 805.

4.2.3 Der Stoffbegriff

Bevor wir uns mit der Umsetzung der Selbstkontrolle auseinandersetzen, ist die Frage zu klären, ob Nano-TiO₂ nach dem USG als Stoff zu betrachten ist. Demzufolge sind Stoffe "natürliche oder durch ein Produktionsverfahren hergestellte chemische Elemente und deren Verbindungen. Ihnen gleichgestellt sind Zubereitungen (Gemenge, Gemische, Lösungen) und Gegenstände, die solche Stoffe enthalten (Art. 7 Abs. 5 USG).

Ohne weiteres darf daraus gefolgert werden, dass von Menschen geschaffenes und funktionalisiertes Nano-TiO₂, das so in natürlicher Weise nicht vorkommt, als Stoff im Sinne des USG zu betrachten ist. Ebenso sind Zubereitungen und Gegenstände, die Nano-TiO₂ enthalten, nach USG den Stoffen gleichgestellt.

4.2.4 Fazit

Aus den vorstehenden Ausführungen ergibt sich, dass sämtliche Hersteller und Importeure in der Schweiz zur Vornahme der Selbstkontrolle nach Art. 26 USG verpflichtet sind, wenn sie Nano-TiO₂ oder Zubereitungen und Gegenstände in Verkehr bringen, die Nano-TiO₂ enthalten. Namentlich betrifft das Chemikalien, worunter auch Farben und Lacke zu zählen sind. Weiter betrifft das auch Arzneimittel (z.B. Tabletten, Salben, Pulver und Cremes sowie Nano-TiO₂, an dessen Oberfläche Arzneimittel angebracht worden ist, und das an bestimmte Organe oder Zellen herangeführt wird) und Medizinprodukte (z.B. in Form von Beschichtungen von Implantaten) gemäss HMG, Lebensmittel und deren Zusatzstoffe wie beispielsweise die Lebensmittelfarbe E 171 (Titandioxid) sowie Kosmetika (z.B. Sonnenschutzcremen, Puder, Pulver und Zahnpasta) und Gebrauchsgegenstände wie bspw. Plastikspielzeuge, Kochutensilien und Papiertücher gemäss LMG.

4.3 Die Umsetzung der Selbstkontrolle nach Art. 26 USG gemäss der Stoffverordnung und der Chemikalienverordnung

4.3.1 Einleitung

Erste Vorschriften über Art, Umfang und Überprüfung der Selbstkontrolle nach Art. 26 Abs. 3 USG erliess der Bundesrat in der Stoffverordnung von 1986 (nachfolgend: aStoV). Parallel dazu gab es die auf dem GG basierende Giftverordnung (nachfolgend: GV). 2005 löste die Chemikalienverordnung (nachfolgend: aChemV), welche Ausführungsbestimmungen zum neu geschaffenen ChemG enthielt, die GV ab. Weil im neuen ChemG der Grundsatz der Selbstkontrolle im Zusammenhang mit einer unmittelbaren Gefährdung von Mensch und Tier eingeführt worden war, und weil der Bundesrat die Ausgestaltung dieser Delegationsbestimmung betreffend die Selbstkontrolle mit derjenigen im USG als vergleichbar erachtete, fasste er die Ausführungsbestimmungen der beiden Gesetze (USG und ChemG) in einer einzigen Verordnung, der aChemV, zusammen.¹⁰³

¹⁰³ WILD, Entwicklungen, S. 881.

4.3.2 Die Selbstkontrolle gemäss Stoffverordnung vom 1. September 1986 bis 31. Juli 2005

4.3.2.1 Die alte Stoffverordnung

Die aStoV nahm den Grundsatz des Vorsorgeprinzips aus dem USG auf und hielt fest, dass "die Belastung der Umwelt mit umweltgefährdenden Stoffen vorsorglich" zu begrenzen sei (Art. 1 Bst. b aStoV).

Sie verpflichtete Hersteller und Importeure, die Umweltverträglichkeit eines Stoffes, eines Erzeugnisses oder eines Gegenstandes zu prüfen, ansonsten es ihnen verboten sei, diese Sachen abzugeben, es sei denn, sie wären zur Annahme berechtigt, die Umwelt und mittelbar über die Umwelt der Mensch würden dadurch nicht gefährdet (Art. 12 Abs. 1 aStoV). Für die Beurteilung eines Stoffes wurden alte und neue Stoffe unterschieden (Art. 4 Abs. 1 Bst. a ChemG).

Alte Stoffe waren solche, die im Verzeichnis der giftigen Stoffe des Bundesamtes für Gesundheit oder im Verzeichnis der Europäischen Gemeinschaft über die auf dem Markt vorhandenen chemischen Substanzen (EINECS) aufgeführt waren, oder während 1975 – 1984 nachweislich in einer Menge von insgesamt mehr als 500 kg abgegeben worden waren. Alle übrigen Stoffe galten als neue Stoffe (Art. 5 aStoV).

Die Beurteilung eines neuen Stoffes war in einem Umweltverträglichkeitsbericht festzuhalten und hatte gemäss Art. 13 Abs. 1 und Abs. 3 aStoV nach den folgenden Aspekten zu erfolgen, die, wo keine Unterlagen vorhanden waren, selbst abgeklärt werden mussten:

- das Abbau-, Akkumulations-, Umwandlungs- und Ausbreitungsverhalten in der belebten und unbelebten Umwelt;
- die Auswirkungen auf Mikroorganismen, Pflanzen und Tiere sowie auf Ökosysteme, und
- die mittelbaren langfristigen Wirkungen über die Umwelt auf den Menschen.

Für die Beurteilung alter Stoffe waren lediglich die einschlägigen und zugänglichen Angaben zu den Eigenschaften dieses Stoffes zu beschaffen, auch hinsichtlich der ökologischen Aspekte wie Abbaubarkeit im Wasser, Fischtoxizität, Schwimffähigkeit und Vermehrung von Daphnien sowie bekannte nachteilige Wirkungen auf die Umwelt. Zudem war, soweit als möglich, eine Beurteilung gemäss den Aspekten für die neuen Stoffe nach Art. 13 Abs.1 aStoV vorzunehmen. Zusätzliche Abklärungen zu alten Stoffen waren nur dann vorzunehmen, wenn das Departement sie anordnete, beispielweise wenn die betreffenden Stoffe in grossen Mengen hergestellt wurden, sich in der Umwelt nicht oder nur schwer abbauen liessen, sich in der Nahrungskette anreicherten oder zusammen mit anderen Stoffen verstärkt umweltgefährdend wirkten (Art. 15 aStoV).

Sowohl für alte als auch für neue Stoffe sowie für Erzeugnisse war ein Sicherheitsdatenblatt zu erstellen (Art 35 Abs. 2 i.V.mit Art. 14 Bst. a aStoV). Es führte minimale Parameter auf, über die Angaben gemacht resp. Abklärungen getätigt werden mussten. Das betraf insbesondere physikalisch-chemische Eigenschaften wie bspw. Schmelzpunkt, Siedepunkt, Dichte, Dampfdruck, Wasserlöslichkeit, sowie Angaben zur Ökologie wie bspw. Abbaubarkeit im Wasser, Fischtoxizität, Schwimffähigkeit und Vermehrung von Daphnien sowie bekannte nachteilige Wirkungen auf die Umwelt (Anhang 2.2 und 2.3 der aStoV).

4.3.2.2 Die neue Stoffverordnung

Aufgrund der Ablehnung des Beitritts zum Europäischen Wirtschaftsraum (EWR) holte die Bundesversammlung im Rahmen des sogenannten "autonomen Nachvollzuges" Anpassungen zum erleichterten Chemikalienhandel mit der EG nach¹⁰⁴ und passte das USG am 21. Dezember 1995 entsprechend an.¹⁰⁵ Dazu wurden die Einstufungs- und Kennzeichnungsvorschriften von Chemikalien an diejenigen der EG angepasst, indem über die StoV mit Anpassung vom 4. November 1998 die Kriterien zur Einstufung und Kennzeichnung von Stoffen gemäss Richtlinie 67/548/EWG vom 27. Juni 1967 (Stoffrichtlinie) eingeführt und die Bestimmungen über Inhalt und Angaben von Sicherheitsdatenblättern angeglichen worden sind (Art. 35 Abs. 2 und Art. 36 StoV i.V.mit Anhang 1.1 StoV). Dadurch wurde in der Schweiz – zusätzlich zur Einstufung alte und neue Stoffe – die Unterscheidung zwischen einem umweltgefährdenden und einem umweltgefährlichen Stoff eingeführt. Dies hatte Unterschiede in Beschriftung und Kennzeichnung zur Folge. Zudem musste nur noch für umweltgefährliche Stoffe ein Sicherheitsdatenblatt erstellt, und auch nur noch dann, wenn ein Hersteller den umweltgefährlichen Stoff an jemanden weitergab, der selber beruflich oder gewerbsmässig mit diesem Stoff umging (Art. 38 Abs. 1 StoV).

Als *umweltgefährlich* wird unter diesen neuen Bestimmungen ein Stoff dann bezeichnet, wenn er im Falle eines Eintritts in die Umwelt eine sofortige oder spätere Gefahr für eine oder mehrere Umweltkomponenten zur Folge haben könnte. Die Einschätzung dazu erfolgt "anhand detaillierter naturwissenschaftlicher Kriterien, die laufend dem Stand der Forschung angepasst werden" und betrifft inhärente physikalisch-chemische, toxische und ökotoxische Eigenschaften des Stoffes.¹⁰⁶

Umweltgefährdend ist ein Stoff hingegen dann, wenn er zufolge seiner Eigenschaften die Umwelt gefährden kann. Im Unterschied zur Definition der Umweltgefährlichkeit gab es dafür in der StoV bzw. in der EG-Richtlinie keine Kriterien.¹⁰⁷

Bei der Beurteilung von Erzeugnissen und Gegenständen waren Hersteller und Importeur verpflichtet die Informationen des Lieferanten, insbesondere die Angaben auf der Verpackung, in der Gebrauchsanweisung und auf dem Sicherheitsdatenblatt zu berücksichtigen. Weiter hatten sie allfällige experimentelle Abklärungen sowie eigene Nachforschungen und eigene Erfahrungen mit zu berücksichtigen (Art. 16 Abs. 1 StoV). Reichten die vorhandenen Unterlagen für die Beurteilung nicht aus, hatten sie weitere Auskünfte zu verlangen oder eigene Ermittlungen anzustellen (Art. 16 Abs. 2 StoV). Schliesslich hatten sie Abklärungen vorzunehmen, wenn Anhaltspunkte dafür bestanden, "dass das Zusammenwirken verschiedener Stoffe wesentliche nachteilige Wirkungen für die Umwelt oder mittelbar über die Umwelt für den Menschen" hatte (Art. 16 Abs. 4 StoV).

Hersteller und Importeure hatten Stoffe, Erzeugnisse und Gegenstände neu zu beurteilen oder die Beurteilung zu ergänzen, wenn die Umweltverträglichkeit aufgrund von neuen Angaben oder Erkenntnissen anders zu beurteilen war (Art. 18 Bst. e StoV) oder sie vom Departement dazu aufgefordert worden waren (Art. 15 StoV).

¹⁰⁴ MEIER, EU-Recht, S. 45.

¹⁰⁵ BBI 1993 II 1447 f.

¹⁰⁶ ERRASS, Stoffvorschriften, S. 740; LEIMBACHER, in KELLER USG, Art. 26 N 35.

¹⁰⁷ LEIMBACHER, in KELLER USG, Art. 26 N 35.

4.3.2.3 Bewertung

Die Unterscheidung und die ungleiche Behandlung von alten und neuen Stoffen gemäss aStoV und StoV war und ist im USG nicht vorgesehen. Art. 26 USG umfasste beide Stofftypen. Alte Stoffe mussten gemäss diesen Verordnungen nicht in dem Umfange beurteilt werden wie neue Stoffe, obschon bereits bis zu diesem Zeitpunkt grosse Mengen von Altstoffen im Verkehr waren, die weiter hergestellt oder eingeführt wurden, und zwar ohne dass man über relevante Daten für eine seriöse Selbstkontrolle verfügte. Mit der Einführung einer Unterscheidung zwischen alten und neuen Stoffen sowie einer unterschiedlichen Handhabung dieser Stofftypen bei der Selbstkontrolle wurde der gesetzliche Auftrag in Art. 26 USG über die aStoV erstmals eingeeengt.

Mit der Revision der StoV führte der Bundesrat auf Verordnungsstufe eine Angleichung an das EG-Recht und die Differenzierung zwischen umweltgefährlichen und umweltgefährdenden Stoffen ein. Hersteller und Importeure hatten somit zu prüfen, ob der Stoff gemäss EWG-Richtlinie umweltgefährlich war. Wenn dem nicht so war, war der Stoff "lediglich" umweltgefährdend und damit aus der Optik der EWG-Richtlinie offenbar nicht regelungsbedürftig. Eine solche Differenzierung ist im Verbot von Art. 26 Abs. 1 USG nicht vorgesehen. Art. 26 Abs. 1 USG umfasst sowohl umweltgefährliche als auch umweltgefährdende Stoffe. Mit Einführung der EWG-Richtlinie wurde der gesetzliche Auftrag von Art. 26 USG über die StoV weiter eingeeengt, indem seither auf verordnungsebene nur noch Regelungen für umweltgefährliche Stoffe bestanden.

4.3.3 Die Selbstkontrolle nach den Regelungen der ChemV ab 1. August 2005 bis heute

4.3.3.1 Einführung

Mit der Neugestaltung des Chemikalienrechts in der Schweiz im Jahr 2005, wurde das damals geltende EU-Chemikalienrecht weitgehend übernommen.¹⁰⁸ Das GG wurde durch das ChemG und die StoV durch die Chemikalienverordnung (nachfolgend: aChemV) ersetzt. Auf Grund der dynamischen Entwicklung des europäischen Chemikalienrechts gab es in der Chemikalienverordnung laufend kleinere Anpassungen, bis schliesslich am 1. Juli 2015 eine umfassendere Revision der Chemikalienverordnung (nachfolgend: ChemV) in Kraft trat.¹⁰⁹

Die Vollzugsregelungen zur Selbstkontrolle im USG fanden in der aChemV Eingang. Sie umfasste nunmehr zwei Typen von Selbstkontrolle. Einerseits die Selbstkontrolle nach Art. 26 USG und andererseits die Selbstkontrolle nach Art. 5 ChemG. Letztere ist enger gefasst und betrifft den Gesundheitsschutz auf Grund einer unmittelbaren Gefährdung des Lebens oder der Gesundheit des Menschen. Die ChemV trägt daher seit Beginn zwei "Hüte". Einerseits dient sie der Umsetzung der Selbstkontrolle nach Art. 26 USG, deren Ziel im Schutz der Umwelt und indirekt des Menschen liegt, und andererseits konkretisiert sie die Selbstkontrolle zum direkten unmittelbaren Schutz des Menschen, die auch Gegenstand des EU-Chemikalienrechts ist.

Beibehalten wurde die in der StoV bestehende Unterscheidung zwischen alten und neuen sowie die Einstufung von umweltgefährlichen und die "Nichteinstufung" von umweltgefährdenden Stoffen.

¹⁰⁸ KAPPES / DEPALLENS, Chemikalienrecht, S. 101; MEIER, EU-Recht, S. 50.

¹⁰⁹ KAPPES / DEPALLENS, Chemikalienrecht, S. 104

4.3.3.2 Ausnahmen von der aChemV

Neu von diesen Ausführungsvorschriften ausgenommen wurden Stoffe und Zubereitungen in Form von Fertigerzeugnissen in:

- Lebensmitteln (Art. 1 Abs. 5 Bst. c Ziff. 1 aChemV i.V.mit Art. 3 Lebensmittelgesetz vom 9. Oktober 1992, nachfolgend: aLMG¹¹⁰);
- Arzneimitteln und Medizinprodukten nach Heilmittelgesetz (nachfolgend HMG, Art. 1 Abs. 5 Bst. c Ziff. 2 aChemV i.V.mit Art. 4 Abs. 1 Bst. a und b Heilmittelgesetz, nachfolgend: HMG);

sowie Stoffe, Zubereitungen und Gegenstände, die nach Art. 7 Abs. 6 USG als Abfälle zu bezeichnen sind (Art. 1 Abs. 5 Bst. e aChemV).

Einen solchen Ausschluss gab es in der StoV noch nicht. Da waren lediglich u.a. Nahrungsergänzungsmittel und -zusatzstoffe sowie Arzneimittel von der *Meldepflicht* befreit (Art. 22 Abs. 1 Bst. b und c StoV). Ein solcher Ausschluss war und ist auch nicht in Art. 26 USG vorgesehen. Mit diesen Ausnahmeregelungen erfuhr die Umsetzung der Selbstkontrolle nach Art. 26 USG über die aChemV eine weitere Einschränkung.

Diese Ausnahmen nach aChemV bedeutete jedoch nicht, dass die gesetzliche Pflicht zur Selbstkontrolle nach Art. 26 USG bei diesen Stoffen nicht hätte zur Anwendung kommen müssen. Es bedeutete lediglich, dass die Pflichten gemäss aChemV für Stoffe in diesen Produkten nicht zwingend anwendbar waren. Das entband Hersteller und Importeur jedoch in keiner Weise von der gesetzlichen Pflicht, ihre Produkte und die darin enthaltenen Stoffe gemäss der Selbstkontrolle nach Art. 26 Abs. 1 USG zu beurteilen. Wenn nicht nach aChemV, dann auf anderen Grundlagen, seien es solche aus den entsprechenden Spezialgesetzen oder im Rahmen der Verantwortung auf eigenen Grundlagen, denn das Wissen und die Ressourcen sind bei Hersteller und Importeur viel eher vorhanden als bei den Aufsichtsbehörden (vgl. Ziff. 4.2.2). Eine andere Handhabung würde gegen den klaren Wortlaut von Art. 26 USG verstossen.

4.3.3.3 Die Regelung von Begriffen im USG durch die aChemV

Eingeführt wurde mit der aChemV auch, dass Begriffe im USG im Sinne des ChemG verwendet werden, sollten sie in der ChemV anders verwendet werden (Art. 2 Abs. 3 aChemV).

Damit wurden Begriffe in der aChemV und auch solche in Regelungen des EU-Rechts, die die ChemV übernommen hat, gegenüber den Begriffen die das USG definierte, diesen hierarchisch höher gestellt. Davon betroffen war insbesondere der Stoffbegriff, der im ChemG und in der aChemV enger gefasst war als im USG und der alte von neuen Stoffen unterschied. Den Stoffen gemäss Stoffbegriff des USG waren Zubereitungen und Gegenstände gleichgestellt, was weder im ChemG noch in der aChemV der Fall war. Die Selbstkontrolle nach USG 26 umfasste auch Abfälle. Nach ChemG und ChemV waren letztere nicht erfasst, ja sie wurden explizit von der Anwendung der aChemV ausgenommen.

Nicht erkennbar ist, auf welcher rechtlichen bzw. gesetzlichen Grundlage die Kompetenz in Art. 2 Abs. 3 aChemV basiert, nach der die Begrifflichkeiten im USG gemäss ChemG, und damit auch gemäss ChemV sowie dem darin übernommenen EU-Chemikalienrecht, ausgelegt und verwendet werden sollen. Die Umsetzung bedeutet eine weitere Einschränkung der Selbstkontrolle gemäss Art. 26 USG.

¹¹⁰ Das seit 1. Mai 2017 in Kraft getretene neue LMG regelt in Art. 3 nicht die Definition von Lebensmitteln, sondern deren Ausfuhr. Die ChemV verweist jedoch in ihrer Fassung per 1. Mai 2017 immer noch auf Art. 3 des alten LMG.

4.3.3.4 Die Revision der Chemikalienverordnung per 1. Juli 2015

Die Einführung der REACH- und CLP-Verordnungen (REACH = Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals, CLP = Classification, Labelling and Packaging) in der EU brachte erneut grössere Unterschiede zum Schweizer Chemikalienrecht. Das führte zur Revision der Chemikalienverordnung im Jahre 2015 (nachfolgend: ChemV) und zur Übernahme einiger REACH- und CLP-Elemente.¹¹¹ So erfolgte beispielsweise über die CLP-Verordnung eine Anpassung an das Global harmonisierte System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien der UNO (nachfolgend: GHS). Die Umweltgefährlichkeit eines Stoffes beurteilt sich seither nach der CLP-Verordnung der EU (Art. 3 i.V.mit Art. 5 sowie Anhang 2 Ziff. 1 ChemV). Die Anforderungen an das Sicherheitsdatenblatt wurden denjenigen von REACH angeglichen (Ziff. 3 von Anhang 2 ChemV), ebenso die Anforderungen an das technische Dossier (Anhang 4 ChemV). Gefordert werden in REACH explizit Angaben zur Toxikologie und zur Ökotoxizität, die in einem technischen Dossier festgehalten sein müssen (Art. 12 Abs. 1, Art. 13 Abs. 4 REACH). Ab einer Menge von mehr als 1 Tonne pro Hersteller oder Importeur pro Jahr ist speziell ein Stoffsicherheitsbericht mit Expositionsszenarien zu erstellen (Art. 10b REACH). Das erinnert an die Vorstellungen des Gesetzgebers an die Anforderungen einer Selbstkontrolle nach Art. 26 USG (vgl. Ziff. 4.2.2 vorstehend).

Beibehalten wurden die unter der aChemV erwähnten Unterscheidungen zwischen alten und neuen Stoffen sowie umweltgefährlichen und umweltgefährdenden Stoffen. Ebenso beibehalten wurden die Ausnahmen für Heilmittel, Lebensmittel und Abfälle. Ebenso übernahm die ChemV die Regelung betreffend die Interpretation der Begriffe im USG gemäss ChemG.

Bei REACH gilt grundsätzlich: "ohne Daten kein Markt" (Art. 5 REACH). Das bedeutet, dass nur Stoffe, Zubereitungen oder Erzeugnisse in der EU hergestellt oder in Verkehr gebracht werden dürfen, die registriert sind. Davon ausgenommen sind Stoffe unter einer Menge von 1 Tonne pro Hersteller oder Importeur pro Jahr sowie u.a. Abfälle, Arzneimittel und Lebensmittel (Art. 2 Abs. 2, Abs. 5 Bst. a und b REACH). Die Registrierung von bisherigen Stoffen wird per 1. Juni 2018 abgeschlossen.¹¹² In REACH werden alle Stoffe erfasst, ob umweltgefährdend oder umweltgefährlich. REACH kennt auch keine Unterscheidung zwischen alten und neuen Stoffen.

Wenn der REACH-Grundsatz "ohne Daten kein Markt" von der Schweiz nicht übernommen oder die ChemV nicht entsprechend angepasst wird, werden in der Schweiz weiterhin alte Stoffe im Verkehr bleiben dürfen, bei denen relevante Daten für eine seriöse Selbstkontrolle möglicherweise nicht vorliegen.¹¹³ Hersteller und Importeur wären auch weiterhin über die ChemV nicht gezwungen, eine detaillierte Prüfung hinsichtlich der Auswirkung ihrer alten Stoffe auf die Umwelt vorzunehmen. So wäre weiterhin kein Stoffsicherheitsbericht zu erstellen, der u.a. festhält, ob die Stoffe schädliche Wirkungen auf die Umwelt mit Fokus auf Wasser, Boden, Luft sowie Nahrungsketten und die mikrobiologische Aktivität in Kläranlagen zeigen. Ebenso wären weiterhin keine Expositionsbeurteilungen vorzunehmen und das Risiko zu beschreiben.

Es sei aber darauf hingewiesen, dass die ChemV Hersteller und Importeur nicht von der Pflicht zur Selbstkontrolle entbindet. In diesem Falle hat "eine eigenverantwortliche Einstufung aufgrund (eigener) Beurteilung des Gefährdungspotentials, das von einem Stoff ausgehen kann, zu erfolgen".¹¹⁴ Die Generierung dieser Informationen zur Selbstkontrolle wäre zweifellos mit Kosten verbunden. Es ist nicht

¹¹¹ KAPPES, DEPALLENS, Chemikalienrecht, S. 105.

¹¹² KAPPES, DEPALLENS, Chemikalienrecht, S. 106.

¹¹³ KAPPES, DEPALLENS, Chemikalienrecht, S. 106.

¹¹⁴ STREULI, KAPPES, Leitfaden, N 69.

auszuschliessen, dass seitens der Privatwirtschaft Druck ausgeübt wurde und wird, um REACH aus diesen Gründen nicht vollständig zu übernehmen.

4.3.3.5 Photokatalytische Eigenschaften als Parameter zur Beurteilung der Umweltgefährdung und der Umweltgefährlichkeit

Aus dem zweiten Teil dieser Arbeit geht hervor, dass die photokatalytischen Eigenschaften von Nano-TiO₂ zur Bildung von Hydroxyl-Radikalen unter bestimmten Umständen zu einer Gefährdung und Gefährlichkeit in der Umwelt führen. Es ist diese physikalische Eigenschaft, die sich chemisch manifestiert, obschon das Material selber inert bleibt. Sie hat ökotoxische und genotoxische Wirkungen, kann giftige Stoffe noch giftiger, ungiftige Stoffe giftig und giftige Stoffe ungiftig machen. Über die Bildung von Hydroxyl-Radikalen bei TiO₂ und Nano-TiO₂, deren chemische Reaktivität und die Tatsache, dass Nanomaterial völlig andere Eigenschaften hat als dasselbe Material in der "gewöhnlichen" Grösse, weiss man seit Jahrzehnten Bescheid (vgl. Ziff. 2.5).

Eine Analyse der ChemV sowie der REACH- und der CLP-Verordnung bzw. deren angegliederten Prüfverordnungen ergab keinen Hinweis, dass diese Eigenschaft bei den Behörden bisher ein Thema war. Sie fand keinen Eingang in diese Regelungen. Das Vorliegen dieser Eigenschaft sowie die sich darauf ergebenden Wirkungen gehören jedoch mit in die Beurteilung von Nano-TiO₂ gemäss der Selbstkontrolle nach Art. 26 USG. Auch dann, wenn in den Ausführungsbestimmungen des Chemikalienrechts nicht explizit darauf hingewiesen wird.

Die Aufnahme dieser Eigenschaft in die Regulierungen des Chemikalienrechts würden jedenfalls die Sensibilisierung von Hersteller und Importeur verstärken.

4.3.3.6 Strafbestimmungen

Die Nichtvornahme der Selbstkontrolle ist nicht strafbar. Aber wer Stoffe in Verkehr bringt, die oder deren Folgeprodukte oder Abfälle bei vorschriftsgemäsem Umgang die Umwelt oder mittelbar den Menschen gefährden können, macht sich strafbar. Die Androhung liegt bei einer Freiheitsstrafe bis zu drei Jahre oder einer Geldstrafe. Zudem ist die Tat auch bei Fahrlässigkeit strafbar (Art. 60 Abs. 1 Bst. b USG).

Wie aus dem dritten Teil dieser Arbeit hervorgeht, ist der Nachweis von Nano-TiO₂ in Schweizer Gewässern vollbracht. Ebenso erbracht ist die ökotoxische und genotoxische Wirkung dieses Stoffes. Die Zuordnung der in Schweizer Gewässern aufgefundenen Mengen an Nano-TiO₂ zu einzelnen Herstellern und Importeuren dürfte jedoch nicht ganz einfach sein.

4.4 Die Selbstkontrolle nach Art. 26 USG bei Arzneimitteln und Medizinprodukten

Arzneimittel und Medizinprodukte sind ebenfalls Stoffe nach USG (Art. 7 Abs. 5 USG). Damit fallen deren Hersteller und Importeure unter die Pflicht zur Selbstkontrolle. Auch wenn in der aChemV und der ChemV Arzneimittel und Medizinprodukte explizit ausgenommen sind, ist bei diesen Produkten die Vornahme der Selbstkontrolle nach Art. 26 USG Pflicht, denn die Ausnahme betraf bzw. betrifft lediglich die Pflicht zur Anwendung der Regeln nach aChemV bzw. ChemV. In Anwendung der Selbstkontrolle nach USG sind Hersteller und Importeure auch gehalten, die Abfälle aus ihren Produkten mit in die Abklärungen einzubeziehen. Das betrifft insbesondere den – regelmässigen – Fall, in dem Medikamente und Medizinprodukte nach vorschriftsgemässer Einnahme wieder ausgeschieden bzw. nach der Applikation wieder abgewaschen werden und über das Abwasser via Kläranlagen in die Schweizer Gewässer dissipieren.

Da gehört – neben anderen Stoffen wie beispielsweise Antibiotika, Schmerzmittel und Betablocker – namentlich auch das in Arzneimitteln und Medizinprodukten enthaltene Nano-TiO₂ dazu, wie beispielsweise in Tablette, Salben, Cremes und Pulvern. Hersteller und Importeure von Arzneimitteln und Medizinprodukten können sich nicht darauf berufen, der Bundesrat habe für sie in der ChemV explizit eine Ausnahme vorgesehen, denn die gesetzliche Pflicht zur Selbstkontrolle ist klar und übergeordnet geregelt.

Kommt dazu, dass für die Zulassung von Humanarzneimittel Angaben und Unterlagen zur Ökotoxikologie bei Swissmedic einzureichen sind (Art. 4 Abs. 2 Bst. d Arzneimittelzulassungsverordnung, nachstehend: AMZV; SR 812.212.22). Mit diesem Fokus hat das "Komitee für Humanarzneimittel", eine Untergruppe der "Europäischen Arzneimittel-Agentur", eine Agentur der Europäischen Union mit Sitz in London, am 1. Juni 2006 einen Leitfaden zur Vornahme einer Umweltrisikoprüfung veröffentlicht. Diese Leitlinie zeigt in einem ersten Schritt auf, wie die Exposition eines Stoffes in der Umwelt abgeklärt wird. In einem weiteren Schritt wird erklärt, wie bei der Abklärung eines Umweltrisikos vorzugehen ist und schliesslich wird auf Vorsorgemassnahmen sowie auf die Gestaltung eines Umweltrisikoreports hingewiesen.¹¹⁵

Sind bei Tierarzneimitteln Untersuchungen an Nutztieren gemacht worden, so sind Unterlagen einzureichen, die Aussagen zu Risiken für die Umwelt zu machen, die sich durch die Anwendung dieser Arzneimittel ergeben (Art. 9 Abs. 1 Bst. b AMZV). Weiter sind Unterlagen einzureichen, die Angaben zu mikrobiologischen Eigenschaften von Rückständen sowie zur Ökotoxizität enthalten (Art. 9 Abs. 2 Bst. a und b AMZV). Im Unterschied zu den Humanarzneimitteln erfolgt der Eintrag von ausgeschiedenem TiO₂ und Nano-TiO₂ aus Tierarzneimitteln in die Gewässer nicht über Abwasserkanalisationen und Abwasserreinigungsanlagen, sondern diffus über die Entleerung der Tiere auf den Weiden sowie über ausgebrachten Mist und Gülle. Die Selbstkontrolle nach Art. 26 USG ist jedoch auch über diese Spezialregelung hinaus vorzunehmen.

4.5 Die Selbstkontrolle nach Art. 26 USG bei Lebensmitteln

Nach bisherigem Lebensmittelrecht (nachfolgend: aLMG) galten als Inhaltsstoffe die natürlicherweise in einem bestimmten Lebensmittel vorkommenden Stoffe (Art. 4 Abs. 1 aLMG). Als Zusatzstoffe wurden Stoffe bezeichnet, "die bei der Herstellung von Lebensmitteln zur Erzielung bestimmter Eigenschaften oder Wirkungen verwendet" wurden (Art. 4 Abs. 1 aLMG). Fremdstoffe schliesslich, waren "unerwünschte Stoffe, die natürlicherweise nicht in ein Lebensmittel gehören (wie Rückstände, Verunreinigungen, mikrobielle Stoffwechselprodukte und radioaktive Nuklide)" (Art. 4 Abs. 3 aLMG). Mit dem am 1. Mai 2017 in Kraft getretenen neuen Lebensmittelgesetz (nachfolgend: LMG) gelten als Lebensmittel "alle Stoffe oder Erzeugnisse, die dazu bestimmt sind oder von denen sich vernünftigerweise vorhersehen lässt, dass sie in verarbeitetem, teilweise verarbeitetem oder unverarbeitetem Zustand von Menschen aufgenommen werden" (Art. 4 Abs. 1 LMG). Ebenso gelten als Lebensmittel "alle Stoffe, die dem Lebensmittel bei seiner Herstellung, Verarbeitung oder Bearbeitung absichtlich zugesetzt werden" (Art. 4 Abs. 2 Bst. c LMG).

Nano-TiO₂ ist in der Lebensmittelindustrie ein bekannter Stoff, der den Lebensmitteln als weisses Farbpigment und auch zur Verstärkung der optischen Wirkung anderer Farben beigegeben wird. Er ist darum ein Zusatzstoff, denn als solchen werden Stoffe bezeichnet, "die bei der Herstellung von Lebensmitteln zur Erzielung bestimmter Eigenschaften oder Wirkungen verwendet werden" (Art. 4 Abs. 2

¹¹⁵ http://www.ema.europa.eu/docs/en_GB/document_library/Scientific_guideline/2009/10/WC500003978.pdf (letztmals aufgerufen am 20. Juni 2017)

aLMG). In der neuen Lebensmittelregulierung figuriert TiO_2 explizit als zugelassener Lebensmittelzusatzfarbstoff E 171 (Anhang 1a der Zusatzstoffverordnung (nachfolgend: ZuV)).

Auch wenn für Lebensmittel die Regeln für die Umsetzung der Selbstkontrolle gemäss aChemV und ChemV nicht anwendbar sind, so gilt das nicht für deren Zusatzstoffe. Denn diese sind nicht als Fertigerzeugnisse für die Endverbraucherinnen und Endverbraucher bestimmt (Art. 1 Abs. 5 Bst. c aChemV sowie ChemV). Daher waren bzw. sind für die Beurteilung von Nano- TiO_2 in Nahrungsmitteln im Rahmen der Selbstkontrolle die Regelungen gemäss aChemV und ChemV zwingend anwendbar.¹¹⁶ In diesen werden jedoch umweltgefährdende Stoffe nicht erfasst. Darum ist dieser Aspekt in Nachachtung von Art. 26 Abs. 3 USG im Rahmen einer eigenverantwortlichen Einstufung des Gefährdungspotentials des Stoffes separat zu prüfen. Dazu gehört auch der Aspekt der Dissipation im Sinne von Abfällen, die nach der Ausscheidung direkt oder mittelbar in Gewässer gelangen.

4.6 Die Selbstkontrolle nach Art. 26 USG bei Kosmetika

Unter den Stoffbegriff nach Art. 7 Abs. 5 USG fallen auch Kosmetika. Sie enthalten Nano- TiO_2 vor allem in Sonnenschutzmittel, aber auch in Puder, sowie in Salben und Cremen. Diese werden nach der Nutzung abgewaschen, gelangen so in die Abwassersysteme und dissipieren über die Kläranlagen in die Gewässer.

Hersteller und Importeur sind auch hier zur Selbstkontrolle verpflichtet. Wie sie dabei vorzugehen haben, ergibt aus den Regeln der aChemV und der ChemV (Art. 1 Abs. 4 aChemV und ChemV). Wie bei den Lebensmittelzusatzstoffen berücksichtigen diese Regeln die Beurteilung einer Umweltgefährdung durch einen Stoff gemäss Art. 26 USG nicht. Sie ist im Rahmen der eigenverantwortlichen Einstufung des Gefährdungspotentials separat durchzuführen, wobei die Dissipation über Abfälle mit zu berücksichtigen und zu beurteilen ist.

Für Nanomaterial sieht die Kosmetikverordnung (nachfolgend: VKos) zwar spezielle Abklärungen wie beispielsweise toxikologische Profile vor. Sie beziehen sich jedoch ausschliesslich auf die unmittelbare Gefährdung und Schädigung von Menschen (Art. 4 Abs. 7 sowie Anhang 5 Ziff. 8 VKos). Eine für die Umwelt weitergehende Regelungen für Nanomaterial enthält die VKos nicht.

4.7 Die Selbstkontrolle nach Art. 26 USG bei Nanopartikeln

4.7.1 Einführung

Nanopartikel und damit auch Nano- TiO_2 sind weder im ChemG noch in der ChemV geregelt und werden auch im USG nicht erwähnt. Nano- TiO_2 ist – wie in Ziff. 4.2.3 ausgeführt – als Stoff im Sinne des USG und des ChemG zu betrachten ist.

¹¹⁶ WAGNER-PFEIFFER, *Mélanges*, S. 585.

4.7.2 Die Revision der ChemV

Mit der nächsten geplanten Revision des Chemikalienrechts, die erneut zur Anpassung an das EU-Chemikalienrecht vorgenommen werden soll, sind auch Regelungen betreffend "Nanomaterial" vorgesehen. Zunächst wird in der ChemV Art. 2 Abs. 2 mit einem neuen Bst. q Nanomaterial begrifflich umschrieben und explizit festgehalten, dass Nanomaterial als Stoff im Sinne der ChemV zu gelten habe (E-ChemV).

Nachdem das BAFU bisher für die stichprobenartige Überprüfung der Selbstkontrolle nach Art. 26 USG zuständig war, sollen nun alle Nanomaterialien gemeldet werden müssen, unabhängig davon, ob sie gemäss Art. 3 ChemV als Umweltgefährlich galten oder nicht (Art. 48 Bst. b E-ChemV). Zu melden sind: "die Zusammensetzung, die Teilchenform und die mittlere Korngrösse sowie, soweit vorhanden, die Anzahlgrössenverteilung, das spezifische Oberflächen-Volumen-Verhältnis, die Kristallstruktur, den Aggregationsstatus, die Oberflächenbeschichtung und die Oberflächenfunktionalisierung sowie die voraussichtlich jährlich in Verkehr gebrachte Menge" (Art. 49 Bst. c Ziff. 7 und Bst. d Ziff. 1a E-ChemV). Zudem sind alle verfügbaren Unterlagen und Informationen über die Eigenschaften, die Exposition und die schädliche Wirkung des Stoffes auf Mensch und Umwelt, soweit diese nicht bereits aus dem technischen Dossier hervorgehen, einzureichen (Art. 27 Abs. 2 Bst. e E-ChemV). Dazu sind alle vorhandenen Daten über "physikalisch-chemische, toxikologische und ökotoxikologische Eigenschaften sowie über das Umweltverhalten (z.B. Adsorption an Feststoffen, Hydrolyse, Abbaubarkeit, Bioakkumulation)" zu recherchieren und zu verwenden.¹¹⁷ Wer Nanomaterial zur Herstellung von Stoffen, Zubereitungen oder Gegenständen als solche oder als Bestandteil einer Zubereitung verwendet, muss die erstmalige Verwendung melden (Art. 71a ff. E-ChemG).

4.7.3 Bewertung im Lichte von Nano-TiO₂

Mit der neuen Revision ist auch Nano-TiO₂ betroffen. Die vorstehend aufgezeigten neu geforderten Abklärungen wurden bereits im Rahmen der gebotenen Sorgfalt bei der Erfüllung der Pflicht zur Selbstkontrolle nach Art. 26 USG verlangt.

Es wird sich weisen, was die Behörden mit diesen Angaben machen werden. Es dürfte wohl dazu führen, dass sie sich wissenschaftlich werden aufdotieren müssen, denn es war vor allem das fehlende Wissen über Stoffe bei den Behörden der Grund, die Selbstkontrolle 1983 einzuführen (vgl. Ziff. 4.2.2).

Die zwingende Meldepflicht von Nanomaterialien lässt vermuten, dass die Selbstkontrolle nach Art. 26 USG von Herstellern und Importeuren – aus welchen Gründen auch immer – nicht immer die gebotene Beachtung fand. Klar erscheint jedoch, dass auch mit diesen neuen Regelungen die Verantwortung für die kompetente fachliche und wissenschaftliche Vornahme der Selbstkontrolle und die Beurteilung des Stoffes bei Herstellern und Importeuren bleibt. Keinesfalls kann es sein, dass damit – quasi über die Hintertür – Erfüllungsverantwortlichkeiten zurück an die Behörden gehen. Nach wie vor sind Hersteller und Importeur – auch über die Regelungen nach der ChemV und der neuen ChemV hinaus – verpflichtet, ihre Erkenntnisse über allfällige Umweltgefährdungen ihres Stoffes aktiv zu vermehren. Hierzu erscheint der Fokus auf die photokatalytische Wirkung von Stoffen zentral.

¹¹⁷ BAG, Bericht, S. 16.

Jede Funktionalisierung von Nano-TiO₂ zur Erfüllung neuer Zwecke, sei es eine Veränderung der Zusammensetzung des Grundkörpers oder der Oberfläche, aber auch eine bisher nicht entwickelte neue äussere Form, bewirken neue Eigenschaften. Diese wirken auf vielfältige und unbekannt Weise weiter, wenn das Material unkontrolliert in die Umwelt eingebracht wird. Hersteller und Importeur haben daher bei jeder neuen Funktionalisierung eine neue und separate Selbstkontrolle nach Art. 26 USG durchzuführen. Hierzu ist explizit die photokatalytische Wirkung mit einzubeziehen.

4.8 Das Gewässerschutzrecht

4.8.1 Einleitung

Das GSchG bezweckt den Schutz der Gewässer vor nachteiligen Einwirkungen und dient u.a. "der Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen" sowie "der Erhaltung natürlicher Lebensräume für die einheimische Tier- und Pflanzenwelt" (Art. 1 Abs. 1 Bst. a und c).

Dieser Zweck wird in der Gewässerschutzverordnung (nachfolgend: GSchV) konkretisiert. So soll auch die nachhaltige Nutzung der Gewässer ermöglicht werden (Art. 1 GSchV). Hierzu sind u.a. die ökologischen Ziele für Gewässer gemäss Anhang 1 der GSchV und die Anforderungen an die Wasserqualität zu berücksichtigen (Art. 1 Abs. 2 GSchV und Art. 2 Abs. 1 Bst. a und b GSchV). Die Gewässer sollen vor Eingriffen durch den Menschen, also anthropogenen Eingriffen, geschützt werden.¹¹⁸ Die Wasserqualität muss so beschaffen sein, dass Stoffe, die durch menschliche Tätigkeit ins Gewässer gelangen, die Fortpflanzung, Entwicklung und Gesundheit empfindlicher Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen nicht beeinträchtigen (Art. 1 Ziff. 11 Abs. 1 Bst. f von Anhang 2 GSchV).

Zu den ökologischen Zielen bei Oberflächengewässern (unterirdische Gewässer sind nicht Teil dieser Arbeit) gehört, dass die Lebensgemeinschaften von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen naturnah und standortgerecht sind sowie dass sie sich selbst reproduzieren und regulieren (Ar. 1 Abs. 1 Bst. a von Anhang 1 GSchV). Zudem soll die Wasserqualität so beschaffen sein, dass im Wasser, in den Schwebstoffen und in den Sedimenten keine künstlichen, langlebigen Stoffe enthalten sind (Art. 1 Abs. 2 Bst. b von Anhang 1 GSchV). Stoffe, die Gewässer verunreinigen können und die durch menschliche Tätigkeit ins Wasser gelangen können, dürfen sich weder in Pflanzen, Tieren, Mikroorganismen, Schwebstoffen oder Sedimenten anreichern. Zudem dürfen solche Stoffe keine nachteiligen Einwirkungen auf die Lebensgemeinschaften von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen und auf die Nutzung der Gewässer haben. Sie dürfen auch nicht biologische Prozesse zur Deckung der physiologischen Grundbedürfnisse von Pflanzen und Tieren, wie Stoffwechselforgänge oder die Fortpflanzung von Tieren beeinträchtigen. Schliesslich muss die Konzentration von Stoffen, die natürlicherweise in den Gewässern nicht vorkommen, nahe bei null liegen (Art. 1 Abs. 3 Bst. c von Anhang 1 GSchV).

4.8.2 Der Stoffbegriff nach Gewässerschutzrecht

Bevor wir uns mit der Frage der Verunreinigung auseinandersetzen ist die Frage zu klären, ob Nano-TiO₂ nach GSchG überhaupt als Stoff bezeichnet werden kann. Das GSchG und die GSchV definieren diesen

¹¹⁸ VALLENDER, Kommentar GSchG, Art. 1 N 19.

Begriff nicht. Umschreibungen finden sich sowohl im ChemG und in der ChemV als auch im USG. Demnach ist ein Stoff:

- ein "natürliches oder durch ein Produktionsverfahren hergestelltes chemisches Element und dessen Verbindungen" (Art. 4 Abs. 1 Bst. a ChemG), wobei Zubereitungen, im Sinne von "Gemenge, Gemische und Lösungen, die aus zwei oder mehreren Stoffen bestehen" (Art. 4 Abs. 1 Bst. c ChemG) den Stoffen gleichgestellt sind (Art. 2 Abs. 1 ChemG);
- ein "chemisches Element und seine Verbindungen in natürlicher Form oder gewonnen durch ein Herstellungsverfahren, einschliesslich der zur Wahrung seiner Stabilität notwendigen Zusatzstoffe und der durch das angewandte Verfahren bedingten Verunreinigungen, aber mit Ausnahme von Lösungsmitteln, die von dem Stoff ohne Beeinträchtigung seiner Stabilität und ohne Änderung seiner Zusammensetzung abgetrennt werden können" (Art. 2 Abs. 1 Bst. a ChemV);
- "natürliche oder durch ein Produktionsverfahren hergestellte chemische Elemente und deren Verbindungen. Ihnen gleichgestellt sind Zubereitungen (Gemenge, Gemische, Lösungen) und Gegenstände, die solche Stoffe enthalten" (Art. 7 Abs. 5 USG).

Der Stoff wird in diesen Regelungen teilweise abweichend sowie mehr oder weniger detailliert definiert. Gesamthaft gesehen, wird der Begriff des Stoffes in der Schweiz sehr weit definiert. Dieser weite Stoffbegriff gelangt in Gesetzen analog zur Anwendung, die sich zu Stoffen äussern, aber selber keine Definition dazu enthalten, wie in dem hier interessierenden GSchG.¹¹⁹

Aus diesem weiten Stoffbegriff folgt, dass von Menschen geschaffenes und funktionalisiertes Nano-TiO₂, das so in natürlicher Weise nicht vorkommt, auch im gewässerschutzrechtlichen Sinne als Stoff zu bezeichnen ist.

4.8.3 Die Sorgfaltspflicht im Gewässerschutz

Um den Schutz der Gewässer umzusetzen verpflichtet das GSchG jedermann, "alle nach den Umständen gebotene Sorgfalt anzuwenden, um nachteilige Einwirkungen auf die Gewässer zu vermeiden" (Art. 3 GSchG). Diese aus dem Vorsorgeprinzip fliessende allgemeine Sorgfaltspflicht¹²⁰ soll dafür sorgen, dass "Verunreinigungen oder andere nachteilige Einwirkungen auf die Gewässer gar nicht erst entstehen".¹²¹

Als unmittelbar anwendbare Pflicht¹²² richtet sich die Sorgfaltspflicht an "jedermann", also an alle privaten Personen (natürliche oder juristische Personen) sowie an die Behörden und an die Verwaltung, vor allem an diejenige, die für den Gewässerschutz verantwortlich ist¹²³, und "alle notwendigen gesetzlichen Massnahmen zum Schutz der Gewässer zu ergreifen".¹²⁴ hat.

Die nach den Umständen gebotene Sorgfalt, die eine nachteilige Einwirkung auf die Gewässer verhindern soll, ist nicht generell bestimmbar, sondern sie muss in jedem einzelnen Fall neu beurteilt werden.¹²⁵ Als nachteilige Einwirkungen auf das Wasser gelten dessen Verunreinigung sowie andere Eingriffe, welche die Gestalt oder die Funktion eines Gewässers beeinträchtigen (Art. 4 Bst. c GSchG). Eine Verunreinigung

¹¹⁹ HETTICH, TSCHUMI, Kommentar GSchG, Art. 6 N 15 mit weiteren Nachweisen; ANDEREGG, Kommentar GSchG, Art. 70 N 17 ff.

¹²⁰ TURNHERR, Kommentar GSchG, Art. 3 N 4.

¹²¹ STUTZ, Abwasserrecht, S. 109.

¹²² TURNHERR, Kommentar GSchG, Art. 3 N 10 m.w.N.

¹²³ STUTZ, Abwasserrecht, S. 112 f.

¹²⁴ Entscheid des Bundesgerichts vom 12. Oktober 1990, ZBL 92 [1991] 213.

¹²⁵ TURNHERR, Kommentar GSchG, Art. 3 N 22 ff.

wiederum kann sowohl eine physikalische, chemische als auch biologische durch Menschen verursachte Veränderung des Wassers sein (Art. 4 Bst. d GSchG).¹²⁶ Dazu gehören – was für die vorliegende Arbeit von Relevanz ist – auch Mikroverunreinigungen,¹²⁷ zu denen Nano-TiO₂ auch gehören kann.

Eine Verletzung dieser Sorgfaltspflicht kann zu strafrechtlichen¹²⁸ und haftpflichtrechtlichen Konsequenzen¹²⁹ führen. So droht bei einer Sorgfaltspflichtverletzung eine Busse bis zu CHF 20'000 und unter Strafe steht sowohl Fahrlässigkeit als auch Gehilfenschaft (Art. 71 Abs. 1 lit. a, Abs. 2 und Abs. 3 GSchG).

4.8.4 Das Verbot, Gewässer zu verunreinigen

Eine Verstärkung des Gewässerschutzes erfolgt zusätzlich zu der in Art. 3 GSchG festgehaltenen allgemeinen Sorgfaltspflicht mit einem Verbot nach Art. 6 GSchG. Demzufolge ist es u.a. verboten, "Stoffe, die Wasser verunreinigen können, mittelbar oder unmittelbar in ein Gewässer einzubringen".

Eine Verunreinigung liegt dann vor, wenn das Wasser physikalisch, chemisch oder biologisch nachteilig verändert wird (Art. 4 Bst. d GSchG). Von Menschen geschaffenes und funktionalisiertes Nano-TiO₂ kommt "per se" weder in den Gewässern noch sonst in der Natur auf natürliche Weise vor. Wie die Ergebnisse zur toxikologischen Wirkung im ersten Teil dieser Arbeit zudem gezeigt haben, produziert Nano-TiO₂ unter Lichteinfluss vor allem im wässrigen Umfeld besonders viele hoch reaktive Hydroxyl-Radikale. Nano-TiO₂ ist somit ein Stoff, der Gewässer über seine physikalischen Eigenschaften chemisch und biologisch im Sinne von Art. 6 i.V.mit Art. 4 Bst. c und d GSchG nachteilig verändert bzw. verändern kann.

Von einer unmittelbaren Einbringung spricht das Bundesgericht, wenn der schädliche Stoff "direkt ins Wasser geschüttet oder geleitet"¹³⁰ wird. Die mittelbare Einbringung bezieht sich auf "die Art des Einbringens der gefährlichen Stoffe"¹³¹ und liegt vor, wenn sie nicht unmittelbar direkt, sondern über Umwege, also indirekt ins Gewässer gelangt. So liegt eine mittelbare Einbringung u.a. vor, wenn der wassergefährdende Stoff aus einer Kläranlage ins Gewässer gelangt, weil er dort nicht abgebaut wurde.¹³² In der Schweiz gelangt Nano-TiO₂ über Haushalte, Industrie und Gewerbe mehrheitlich mittelbar in die Gewässer, da es über die gut ausgebauten Abwasserkanalisierungen gefasst und über die Abwasserreinigungsanlagen in die Gewässer fliesst. Für den Rückbehalt von Mikroverunreinigungen und somit auch von Nano-TiO₂ sind die Anlagen in der Schweiz nämlich bis heute – mit Ausnahme der Kläranlage von Herisau¹³³ – nicht gebaut worden. Ein Ausbau der grössten Kläranlagen in der Schweiz mit einer zusätzlichen Klärstufe zum Rückbehalt von Mikroverunreinigungen ist geplant und teilweise – wie bei der ARA-Thunersee in Uetendorf – schon sehr weit fortgeschritten.¹³⁴

Das Verbot richtet sich an den gleichen Kreis wie die Sorgfaltspflicht in Art. 3 GSchG, also an Private und an Behörden. Eine Widerhandlung gegen dieses Verbot wird mit einer Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren bestraft und ist auch bei Fahrlässigkeit strafbar (Art. 70 Abs. 1 Bst. a und Abs. 2 GSchG). Bei der Beurteilung dieses

¹²⁶ STUTZ, Abwasserrecht, S. 113.

¹²⁷ HETTICH, TSCHUMI, Kommentar GSchG, Art. 4 N 26; VALLENDER, Kommentar GSchG, Art. 1 N 29.

¹²⁸ STUTZ, Abwasserrecht, S. 111; TURNHERR, GSchG Art. 3 N 36 ff.; ANDEREGG, GSchG, Art. 71 N 22 ff.

¹²⁹ STUTZ, Abwasserrecht, S. 112; TURNHERR, GSchG Art. 3 N 39 f.

¹³⁰ BGE 101 IV 419 E. 5; ANDEREGG, Kommentar GSchG, Art. 70 N 23.

¹³¹ ANDEREGG, Kommentar GSchG, Art. 70 N 24 ff.

¹³² BGE 107 IV 63 E. 3.

¹³³ VALLENDER, Kommentar GSchG, Art. 1 N 29.

¹³⁴ <http://www.arathunersee.ch/anlage/pak/> (letztmals aufgerufen am 11. Juni 2017).

Verbot nicht relevant ist, ob das Einbringen eines Stoffes "tatsächlich zu nachteiligen Einwirkungen auf das Gewässer"¹³⁵ führt. Tatbestandsmässig ist nicht die Einleitungswirkung, sondern das widerrechtliche Einbringen.¹³⁶ Es reicht, wenn der Stoff in das Gewässer gelangt.

Mit Art. 9 Abs. 2 Bst. c GSchG hat der Bundesrat die Pflicht, Vorschriften über Stoffe zu erlassen, "die nach Art ihrer Verwendung ins Wasser gelangen können und die aufgrund ihrer Eigenschaften" die Gewässer verunreinigen.

Damit steht die Frage im Raum, wie es sich mit der Verantwortung der Behörden und insbesondere derjenigen Verwaltung verhält, die für den Gewässerschutz verantwortlich ist, hat sie doch "alle notwendigen gesetzlichen Massnahmen zum Schutz der Gewässer zu ergreifen"¹³⁷. Die Antwort wird hier offengelassen, würde doch eine solche Abklärung an einem konkreten Beispiel den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

¹³⁵ STUTZ, Abwasserrecht, S. 115.

¹³⁶ BGE 120 IV 300 E. 3 b) aa).

¹³⁷ Entscheid des Bundesgerichts vom 12. Oktober 1990, ZBL 92 [1991] 213.

5 Fazit

Nehmen wir die Ergebnisse des zweiten und dritten Teils dieser Arbeit wieder auf, so ergibt sich, dass während der Geltungsdauer der StoV, der aChemV, der ChemV und des GSchG folgende Fakten betreffend Nano-TiO₂ öffentlich zugänglich waren:

- die photokatalytische Wirkung und damit die Bildung von Hydroxyl-Radikalen in wässriger Umgebung und unter Einwirkung von UV-Licht, das Teil des Spektrums von Sonnenlicht ist;
- die Reaktivität von Hydroxyl-Radikalen und damit seine Reaktionsfähigkeit mit anderen Stoffen, so dass diese mineralisiert, ungiftig, giftig oder noch giftiger werden können;
- Studien zu den sich aus den vorgenannten Fakten ergebenden ökotoxikologischen und genotoxischen Wirkungen;
- die Ausbreitung in den Gewässern der Schweiz.

Für Hersteller und Importeure von Nano-TiO₂ gab es somit während und seit der Geltungsdauer der StoV, der aChemV, der ChemV und des GSchG genügend öffentlich zugängliches Wissen, welches sie hätte veranlassen müssen, auf Grund der photokatalytischen Eigenschaften dieses Stoffes im Rahmen der Selbstkontrolle nach Art. 26 USG tätig zu werden. Insbesondere hätten sie sich mit den im zweiten Abschnitt erwähnten öffentlich zugänglichen Studien auseinandersetzen sowie weitere Abklärungen vornehmen müssen. Mindestens bis zur Änderung der StoV Ende der 90er Jahre hätte dies in einem Umweltverträglichkeitsbericht sowie in einem Sicherheitsdatenblatt Eingang finden müssen.

Offen ist, ob die Hersteller und Importeure von Nano-TiO₂ das gemacht haben. Recherchen des Schreibende ergaben jedenfalls keine veröffentlichten Umweltverträglichkeitsberichte und Sicherheitsdatenblätter von Herstellern oder Importeuren von Nano-TiO₂ in der Schweiz, die sich mit der photokatalytischen und der ökotoxischen Wirkung dieses Stoffes sowie den diesbezüglichen Publikationen auseinandersetzten. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass sie das gemacht haben, verfügen sie doch – im Gegensatz zu den Aufsichtsbehörden – über das notwendige Wissen und die entsprechenden Ressourcen für solche Abklärungen, was schliesslich mit ein Grund für die Einführung der Selbstkontrolle war. Eine aussagekräftige Umfrage bei Herstellern und Importeuren hätte den Rahmen dieser Arbeit gesprengt.

Aber auch den Behörden konnten diese Erkenntnisse zu den Eigenschaften und den Wirkungen von Nano-TiO₂ nicht völlig entgangen sein. Trotzdem liessen sie es zu, dass die Ausführungsvorschriften zur Selbstkontrolle nach Art. 26 USG auf Verordnungsebene stetig weiter eingeschränkt worden sind.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen am Beispiel von Nano-TiO₂ die folgenden Schwachpunkte in der Entwicklung des Schweizerischen Chemikalienrechts und des Systems der Selbstkontrolle nach Art. 26 USG auf:

- Hersteller und Importeure sind nicht genügend in der Lage, mit der der Selbstkontrolle systemimmanenten Interessenkollision positiv umgehen zu können. Dies wohl, weil sie in einer Doppelrolle agieren. Einerseits übernehmen sie staatliche Aufgaben, die sie bei sich anzuwenden haben, und andererseits sind sie als Privatunternehmer daran interessiert, die Kosten für ihre Produkte tief und den Umsatz möglichst hoch zu halten.

- Staat und Verwaltung sind nicht zufriedenstellend in der Lage, in kompetenter Weise Art, Umfang und Überprüfung der Selbstkontrolle festzulegen und die Gewährleistungsverantwortung wahrzunehmen. Dazu fehlten und fehlen vermutlich die notwendigen Mittel.

Zudem stellen sich die folgenden Fragen, deren Beantwortung nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit wurde:

- Sind Hersteller und Importeur verpflichtet, sich im Rahmen der Ausübung der Selbstkontrolle an die Grundrechte zu halten (Art. 35 Abs. 2 BV)? In diesem Falle stehen ihren eigenen Grundrechten wie die Eigentumsgarantie (Art. 26 BV) und die Wirtschaftsfreiheit (Art. 27 BV) möglicherweise die Grundrechte Dritter und deren Schutzansprüchen gegenüber, wie der Anspruch auf Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen vor den Gefahren neuer Stoffe.¹³⁸
- Sind Hersteller und Importeur auf Grund der Übernahme von hoheitlichen Aufgaben im Rahmen der Selbstkontrolle verpflichtet, die natürlichen Lebensgrundlagen zu erhalten, bzw. sich für deren dauerhaften Erhalt einzusetzen (Art. 2 Abs. 4 BV)?

¹³⁸ SCHWEIZER, St. Galler Kommentar, zu Art. 10 N 51 und zu Art. 35 N 36, 42 ff.

Abkürzungsverzeichnis

AMZV	Verordnung des Schweizerischen Heilmittelinstituts vom 9. November 2001 über die Anforderungen an die Zulassung von Arzneimitteln (Arzneimittelzulassungsverordnung) SR812.212.22.
Art.	Artikel
Abs.	Absatz
BBl	Bundesblatt
BV	Bundesverfassung der Schweizerischen Eidgenossenschaft vom 18. April 1999 (Stand am 12. Februar 2017) SR 101
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
Bst.	Buchstabe
ChemG	Bundesgesetz über den Schutz vor gefährlichen Stoffen und Zubereitungen (Chemikaliengesetz) vom 15. Dezember 2017 (Stand 1. Januar 2017) SR 813.1
ChemV	Verordnung über den Schutz vor gefährlichen Stoffen und Zubereitungen (Chemikalienverordnung) vom 5. Juni 2015 (Stand 1. Mai 2017) SR 813.11
aChemV	Verordnung über den Schutz vor gefährlichen Stoffen und Zubereitungen (Chemikalienverordnung) vom 18. Mai 2005 (Stand 12. Juli 2005) SR 813.11
E-ChemV	Entwurf Vernehmlassung zur Änderung der Chemikalienverordnung vom 3. Februar 2017 (EChemV)
CLP	Classification, Labelling and Packaging (Verordnung (EG) Nr. 1272/2008) in Kraft per 20 Januar 2009
EG	Europäische Gemeinschaft
EINECS	European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances (Altstoffverzeichnis der EU)
EU	Europäische Union
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
GG	Bundesgesetz über den Verkehr mit Giften (Giftgesetz) vom 21. März 1969, SR 813.0
GHS	Global Harmonized System

GSchG	Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz) vom 24. Januar 1991 (Stand 1. Januar 2017) SR 814.20
GSchV	Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (Stand 1. Mai 2017) SR 814.201
HMG	Bundesgesetz über Arzneimittel und Medizinprodukte (Heilmittelgesetz) vom 15. Dezember 2000 (Stand 1. Januar 2014) SR 812.21
GV	Giftverordnung vom 19. September 1983 (Stand 6. März 2001) SR 813.01
LGV	Lebensmittel- und Gebrauchsgegenständeverordnung vom 16. Dezember 2016 (Stand 2. Mai 2017) SR 817.02
lit.	litera
LMG	Bundesgesetz über Lebensmittel und Gebrauchsgegenstände (Lebensmittelgesetz) vom 20. Juni 2014 (Stand 1. Mai 2017) SR 817
aLMG	Bundesgesetz über Lebensmittel und Gebrauchsgegenstände (Lebensmittelgesetz, LMG) vom 9. Oktober 1992 (Stand 15. Februar 2005 sowie 1. Oktober 2013) SR 817.0
m.E.	meines Erachtens
m.w.N.	mit weiteren Nachweisen
N	Note
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (Verordnung (EG) Nr. 1907/2006) in Kraft per 1. Juni 2007
aStov	Verordnung über umweltgefährliche Stoffe (Stoffverordnung, StoV) vom 9. Juni 1986, SR 814.013
StoV	Verordnung über umweltgefährdende Stoffe (Stoffverordnung) vom 9. Juni 1986 (Stand 7. September 2004) SR 814.013
USG	Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz) vom 7. Oktober 1983 (Stand 1. Januar 2017) SR 814.01
u.a.	unter anderem
VKos	Verordnung des EDI über kosmetische Mittel (Kosmetikverordnung) vom 16. Dezember 2016 (Stand 1. Mai 2017) SR 817.023.31
z.B.	zum Beispiel
ZuV	Verordnung des EDI über die zulässigen Zusatzstoffe in Lebensmitteln (Zusatzstoffverordnung) vom 25. November 2013 (Stand 1. Mai 2017) SR 817.022.31

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: **Katsuhiro Nomura**, nomura-k@aist.go.jp; <http://staff.aist.go.jp/nomura-k/english/itscgallery-e.htm>), Copyright (2002).

Abbildung 2: **PELAEZ MIGUEL, NOLAN NICHOLAS T., PILLAI SURESH C., SEERY MICHAEL K., FALARAS POLYCARPOS, KONTOS ATHANASSIOS G., DUNLOP PATRICK S.M., HAMILTON JEREMY W.J., BYRNE J. ANTHONY, O'SHEA KEVIN, ENTEZARI MOHAMMAD H., DIONYSIOU DIONYSIOS D.**: A Review on the visible light aktive titanium dioxide photocatalysts for environmental applications, in: Applied Catalysis B: Environmental 125 (2012), S. 333 A review oh the visible light aktive titanium dioxide photocatalysts for environmental applications, in: Applied Catalysis B: Environmental 125 (2012), S. 333

Abbildung 3: **GOTTSCHALK F., ORT C., SCHOLZ R.W., NOWACK B.**: Engineered nanomaterials in rivers – Exposure scenarios for Switzerland at high spatial and temporal resolution, Elsevier, Environmental Pollution 159 (2011) S. 3441

Literaturverzeichnis

AEBERLI CAROLINE: Regulierung von persistenten organischen Verbindungen unter besonderer Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips, Diss. Zürich 2014 (zit. AEBERLI, Vorsorgeprinzip)

AMIANO IRENE, OLABARRIETA JOSUNE, VITORICA JOANA, ZORITA SAIOA: Acute Toxicity of Nanosized TiO₂ to Daphnia Magna under UVA Irradiation, SETAC 2012, Environmental Toxicology and Chemistry, Vol. 31, No. 11, S. 2564 – 2566 (zit. AMIANO, acute toxicity)

ASHCROFT NEIL W., MERMIN DAVID N.: Festkörperphysik, 4. Auflage; Übersetzung: Gress Jochen; Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH, München 2013 (zit. ASHCROFT, Festkörperphysik)

BAHNEMANN DETLEF W., KANDIEL TAREK A., DILLERT RALF: Titandioxid, neue Anwendungen für ein Massenprodukt, in: Unimagazin 1 / 2, Leibniz Universität Hannover, Nano- und Quantenengineering, 2011 (zit. BAHNEMANN, Titandioxid)

BENNABOU A.K., DERRICHE Z., FELIX C., LEJEUNE P., GUILLARD C., BENNABOU KHALIL, FELIX CAROLINE, GUILLARD CHANTAL: Photocatalytic inactivation of Escheria coli Effect of concentration of TiO₂ and microorganism, nature, and intensity of UV irradiation, Elsevier, Applied Catalysis B: Environmental 76 (2007) 257 – 263 (zit. BENNABOU, Inactivation)

BERTAU MARTIN, MÜLLER ARMIN, FRÖHLICH PETER, KATZBERG MICHAEL: Industrielle Anorganische Chemie, 4. vollständig überarbeitete Auflage, Wiley-VCH Verlag Co. KGaA, Weinheim 2013 (zit. BERTAU, anorg. Chemie)

BLOCH FELIX: Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern. In: Zeitschrift für Physik. Band 52, Nr. 7–8, 1. Juli 1929, S. 555–600 (zit. BLOCH, Quantenmechanik)

CARP O., HISMAN C.L., RELLER A.: Photoinduced reactivity of titanium dioxide. In: Progress in Solid State Chemistry 32 (2004), S. 33 - 177 (zit. CARP, titanium dioxide)

CHO MIN, CHUNG HYENMI, CHOI WONYONG, YOON JEYONG: Linear correlation between inactivation of E. coli and OH radical concentration in TiO₂ photocatalytic disinfection, Elsevier, Water Research 38 (2004) 1069 – 1077 (zit. CHO, Correlation)

CLAASSEN CURTIS D., WATKINS HOHN B.: Casarett & Doull's Essentials of Toxicology, 3ed., 2015 (zit. CLAASSEN, Toxicology)

DOMINGOS RUTE F., TUFENKJI NATHALIE, WILKINSON KEVIN J.: Aggregation of Titanium Dioxide Nanoparticles: Role of a Fulvic Acid, Environmental Science & Technologie, Vol. 43, No. 5, 2009, S. 1282 – 1286 (zit. DOMINGOS, Aggregation)

DONALDSON KEN, POLAND CRAIG A.: Nanotoxicity: challenging the myth of nano-specific toxicity, Elsevier, Current Opinion in Biotechnology 2013, 24: S. 724 – 734 (zit. DONALDSON, myth)

EHRENZELLER BERNHARD, SCHINDLER BENJAMIN, SCHWEIZER RAINER J., VALLENDER KLAUS (Hrsg.), St. Galler Kommentar Schweizerische Bundesverfassung, 3. Auflage, Zürich, St. Gallen, 2014 (zit. BEARBEITER, St. Galler Kommentar)

ERRASS CHRISTOPH: Technikregulierungen zur Gewährleistung von Sicherheit, in: Sicherheit und Recht 2/2016 (zit. ERRASS, Technikregulierung)

ERRASS CHRISTOPH: Innovationsfördernde Regulierung als Aufgabe des öffentlichen Rechts? in: ZBl 111/2010 (zit. ERRASS, Innovationsförderung)

ERRASS CHRISTOPH: Die neuen Stoffvorschriften im Umweltrecht, in: URP 2000 (zit. ERRASS, Stoffvorschriften)

FALBE JÜRGEN, REGITZ MANFRED (Hrsg): Römpp-Lexikon Chemie, Bearb. Von Eckard Amelingmeier ...- Stuttgart; New York: Thieme. 9. Aufl. u.d.T.: Römpp-Chemie-Lexikon Bd. 6 T-Z / (Red.: Martina Bach, Übers.: Karina Gobbatto). – 10., völlig überarbeitete Aufl. – 1999 (zit. FALBE, Lexikon Chemie)

FARKAS JULIA, PETER HANNES, CIESIELSKI TOMASZ, THOMAS KEVIN V., SOMMARUGA RUBEN, SALVENMOSER WILLI, WEYHENMEYER GESA A., TRAVNIK LARS J., JENSSEN BJORN M.: Impact of TiO₂ nanoparticles on freshwater bacteria from tree Swedish lakes, Sci Total Environ (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.043> (letztmals besucht am 20. März 2017), (zit. FARKAS, Impact)

FEYNMANN RICHARD P.: Plenty of Room at the Bottom, in: Engineering & Science 23.5 (1960), S. 22 - 36

FORCE ERIC R.: Geology of titanium-mineral deposits, Special Paper, The Geological Society of America, Inc., 1991 (zit. FORCE, Geology)

GOTTSCHALK FADRI, SONDERER TOBIAS, SCHOLZ ROLAND W., NOWACK BERND: Modeled Environmental Concentrations of Engineered Nanomaterials (TiO₂, ZnO, CNT, Fullerenes) for Different Regions, American Chemical Society, Environmental Science & Technology, Vol. 43, No. 24, 2009, S. 9216 – 9222 (zit. GOTTSCHALK, Modeled Concentrations)

GOTTSCHALK FADRI, SONDERER TOBIAS, SCHOLZ ROLAND W., NOWACK BERND: Possibilities and Limitations of Modeling Environmental Exposure to Engineered Nanomaterials by probabilistic Material Flow Analysis, SETAC 2010, Environmental Toxicology and Chemistry, Vol. 29, No. 5, S. 1036 – 1048 (zit. GOTTSCHALK, Modeling Exposure)

GOTTSCHALK F., ORT C., SCHOLZ R.W., NOWACK B.: Engineered nanomaterials in rivers – Exposure scenarios for Switzerland at high spatial and temporal resolution, Elsevier, Environmental Pollution 159 (2011) S. 3439 – 3445 (zit. GOTTSCHALK, rivers)

GRABERT-CARLSON BRUNHILDE: Überwachung und Kontrolle der durch die Ableitung aus der Titantioxid-Produktion betroffenen Umweltmedien, Bericht der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1985, Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg, 1988 (zit. GRABERT-CARLSON, Bericht)

GREENWOOD NORMAN NEIL, EARNSHAW ALAN: Chemistry of the Elements, Pergamon Press Ltd., Exeter 1984 (zit. GREENWOOD, Chemistry)

HALLIWELL BARRY, GUTTERIDGE JOHN M.C.: Free Radicals in Biology & Medicine, 5th Edition, Oxford, 2015 (zit. HALLIWELL, Radicals)

HASHIMOTO KAZUHITO, IRIE HIROSHI, FUJISHIMA AKIRA: TiO₂ Photocatalysis: A Historical Overview and Future Prospects, in: Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 44, No. 12 (2005) S. 8269 – 8285 (zit. HASHIMOTO, TiO₂)

HAYNES VENA, WARD J. EVAN, RUSSEL BRANDON, AGRIOS ALEXANDER G.: Photocatalytic effects of titanium dioxide nanoparticles on aquatic organisms – Current knowledge and suggestions for future research, Elsevier, Aquatic Toxicology 185 (2017), S. 138 – 148 (zit. HAYNES, effects)

HENDRIX YURI, LAZARO ALBERTO, YU QUINGLIANG, BROUWERS JOS: Titania-Silica Composites: A Review on the Photocatalytic Activity and Synthesis Methods, in: World Journal of Nano Science and Engineering, 2015, 5, S. 161 – 177 (zit. HENDRIX, Titania-Silica)

HERRMANN PETRA, SCHMITT MICHAEL: Wörterbuch Nanotechnologie, 1. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich 2012 (zit. HERMANN, Wörterbuch)

HETTICH PETER: Kooperative Risikovorsorge. Regulierte Selbstregulierung im Recht der operationellen und technischen Risiken, Zürich, 2014 (zit. HETTICH, Risikovorsorge)

HETTICH PETER, JANSEN LUC, NORER ROLAND (Hrsg.), Kommentar GSchG, WBG – Kommentar zum Gewässerschutzgesetz und zum Wasserbaugesetz, Zürich, Basel, Genf 2016 (zit. BEARBEITER, Kommentar GSchG)

HOLLEMAN A.F., WIBERG EGON und WIBERG NILS: Lehrbuch der Anorganischen Chemie, 102. Auflage, Walter de Gruyter & Co., Berlin 2007 (zit. HOLLEMAN, Lehrbuch)

HOUSECROFT CATHERINE E., SHAPE ALAN G. (Hrsg.): Anorganische Chemie, 2. aktualisierte Auflage, Red. Rompel Annette, Übers.: Lutz Matthias. Pearson Studium, München 2006 (zit. HOUSECROFT, anorg. Chemie)

HOUSECROFT CATHERINE E., SHAPE ALAN G.: Inorganic Chemistry, 4th edition, Pearson Education Ltd., Harlow, 2012 (zit. HOUSECROFT, Inorganic)

HUND-RINKE KERSTIN, SIMON MARKUS: Ecotoxic Effect of Photocatalytic Active Nanoparticles (TiO₂) on Algae and Daphnids, ESPR – Environ Sc & Pollut Res 2006, S. 1 – 8, (zit. HUND-RINKE, Ecotoxic)

HUPFELD JÜRGEN: Über die Fehlordnung und Dotierung des Titandioxids und deren Auswirkung auf die elektrochemischen Oberflächeneigenschaften, Diss. Göttingen 1975 (zit. HUPFELD, Titandioxid)

JAEGER CALVIN D, BARD ALLEN J.: Spin Trapping and Electron Spin Detection of Radical Intermediates in the Photodecomposition of Water and TiO₂ Particulate Systems, in: The Journal of Physical Chemistry, Vol. 83, No. 24, 1979 (zit.: JAEGER, Spin Trapping)

KAEGI R., ULRICH A., SINNET B., VONBANK R., WICHSER A., ZULEEG S., SIMMLER H., BRUNNER S., VONMONT H., BURKHARDT M, BOLLER M.: Synthetic TiO₂ nanoparticle emission from exterior facades into the aquatic environment, Elsevier, Environmental Pollution 156 (2008), S. 233 – 239 (zit. KAEGI, facades)

KAPPES DAG, DEPALLENS OLIVIER: Die zukünftige Entwicklung des Schweizer Chemikalienrechts, in: Sicherheit & Recht, 2/2016 (zit. KAPPES, DEPALLENS, Chemikalienrecht)

KEIDEL EBERHARD: Die Beeinflussung der Lichtechtheit von Teerfarblacken durch Titanweiss, in: Farben-Zeitung der Lack-, Farben und Leimindustrie, 34, 1929 (zit. KEIDEL, Lichtechtheit)

KELLER, USG siehe Vereinigung für Umweltrecht

KIRSCH HORST: Visible light photocatalysis by metal halide coplexes containing titania as semiconductor ligand, in: Advances in Inorganic Chemistry, Volume 63, Inorganic Photochemistry, Elsevier Inc., London 2011 (zit. KIRSCH, visible light)

KRUG HARALD F., WICK PETER: Nanotoxicology: An Interdisciplinary Challenge, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, Angewandte Chemie, International Edition 2011, 50, S. 1260 – 1278 (zit. KRUG, interdisciplinary)

KRUG HARALD F.: Nanosicherheitsforschung – sind wir auf dem richtigen Weg?, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, Angewandte Chemie, International Edition 2014, 126, S. 12502 – 12518 (zit. KRUG, Weg)

LAUTH GÜNTER JAKOB, KOWALCZYK JÜRGEN: Einführung in die Physik und Chemie der Grenzflächen und Kolloide, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016 (zit. LAUTH, Kolloide)

LOHS KARLHEINT, ELSTNER PETER, STEPHAN URSULA: Fachlexikon Toxikologie, 4., überarbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009 (zit. LOHS, Toxikologie)

MANESS PIN-CHING, SMOLINSKI SHARON, BLAKE DANIEL M., HUANG ZHENG, WOLFRUM EDWARD J., JACOBY WILLIAM A.: Bacterial Activity of Photocatalytic TiO₂ Reaction: toward an Understanding of Its Killing Mechanism, in: Applied and Environmental Microbiology, Sept. 1999, S. 4094 – 4098 (zit. MANESS, bacterial activity)

MANSFIELD C.M., ALLOY M.M., HAMILTON J., VERBECK G.F., NEWTON K., KLAINE S.J., ROBERTS A.P.: Photo-induced toxicity of titanium dioxide nanoparticles to *Daphnia magna* under natural sunlight, Elsevier, Chemosphere 120 (2015), S. 206 – 210 (zit. MANSFIELD, toxicity normal sunlight)

MARTI URSULA: Das Vorsorgeprinzip im Umweltrecht; Am Beispiel der internationalen, europäischen und schweizerischen Rechtsordnung, Diss., Zürich/Genf 2001 (zit. MARTI, Vorsorgeprinzip)

MARQUARDT HAND, SCHÄFER SIEGFRIET G., BARTH HOLGER: Toxikologie, 3. Auflage, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart 2013 (zit. MARQUARDT, Toxikologie)

MEIER CHRISTOPHE: Wie gesund ist autonom nachvollzogenes EU-Recht, in: Luzerner Beiträge zur Rechtswissenschaft, Band Nr. 70, Luzern 2013 (zit. MEIER, EU-Recht)

METZLER DAVID M., LI MINGHUA, ERDEM AYCA, HUANG C.P.: Responses of algae to photocatalytic nano-TiO₂ particles with an emphasis on the effect of particle size, Elsevier, Chemical Engineering Journal 170 (2011), S. 538 – 546 (zit. METZLER, Responses)

MOSER JACQUES E.: Dynamiques des réactions de transfert d'électrons induites par la lumière à la surface des semiconducteurs colloïdaux, Diss. ETH Lausanne, 1986 (zit. MOSER, Dynamiques)

MUELLER NICOLE C., NOWACK BERND: Exposure Modeling of Engineered Nanoparticles in the Environment, American Chemical Society, Environmental Science & Technology, Vol. 42, No. 12, 2008, S. 4447 – 4453 (zit. MUELLER, Modeling)

NIOSH: Occupational Exposure to Titanium Dioxide, Current Intelligence Bulletin 63, 2011 (zit. NIOSH, Exposure)

OGUNTKE JÖRG: Oberflächenstruktur und photochemische Reaktionen von reinem und mit Lithium(V) dotiertem Titandioxid in der Anatasmodifikation, Diss. Berlin 1969 (zit. OGUNTKE, Oberflächenstruktur)

OHTANI B.: Photocatalysis by Inorganic Solid Material, in: Advances in Inorganic Chemistry, Volume 63, Inorganic Photochemistry, Elsevier Inc., London 2011 (zit. OHTANI, Photocatalysis)

PELAEZ MIGUEL, NOLAN NICHOLAS T., PILLAI SURESH C., SEERY MICHAEL K., FALARAS POLYCARPOS, KONTOS ATHANASSIOS G., DUNLOP PATRICK S.M., HAMILTON JEREMY W.J., BYRNE J. ANTHONY, O'SHEA KEVIN, ENTEZARI MOHAMMAD H., DIONYSIOU DIONYSIOS D.: A review on the visible light aktive titanium dioxide photocatalysts for environmental applications, in: Applied Catalysis B: Environmental 125 (2012), S. 331 – 349 (zit. PELAEZ, titanium dioxide)

PFENNIG BRIAN WILLIAM: Principles of inorganic chemistry. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2015 (zit. PFENNIG, Principles)

POLEDNA TOMAS; EHRENZELLER, St. Galler Kommentar zu Art. 118 BV, 3. Auflage, Dike Verlag AG, Zürich/St. Gallen 2014 (zit. POLEDNA, St. Galler Kommentar zu Art. 118 BV)

REEVES JAMES F., DAVIES SIMON J., DODD NICHOLAS J.F., JHA AWADHESH N.: Hydroxyl radicals [OH•] are associated with titanium dioxide (TiO₂) nanoparticle-induced cytotoxicity and oxidative DNA damage in fish cells, Elsevier, Mutation Research 640 (2008) 113 – 122 (zit. REEVES, Hydroxyl Radicals)

RIEDEL ERWIN, JANIAK CHRISTOPH: Anorganische Chemie, 9. Aufl., Walter de Gruyter GmbH, Berlin und Boston 2015 (zit. RIEDEL, anorg. Chemie)

RINCÓN ANGELA G., PULGARIN CÉSAR: Photocatalytical inactivation of E. coli: effect of (continous-intermittent) light intensity and of (suspended-fixed) TiO₂ concentration, in: Applied Elsevier, Catalysis B: Environment 44 (2003) 263 – 284 (zit. RINCON, inactivation)

SERPONE NICK, EMELINE ALEXEI V., HORIKOSHI SATOSHI, KUZNETSOV VYACHESLAV N., RAYABCHUK VLADIMIR K.: On the genesis of heterogeneous photocatalysis: a brief historical perspective in the period 1910 to the mid - 1980s, in: Photochem. Photobiol. Sci., 2012, 11, 1121 ff. (zit. SERPONE, photocatalysis)

SERPONE NICK, DARREN LAWLESS: Subnanosecond Relaxation Dynamics in TiO₂ Colloidal Sols (Particle Sizes R_p = 1.0 – 13.4 nm). Relevance to Heterogeneous Photocatalysis, in: J. Phys. Chem. 1995, 99; 16655 – 16661 (zit. SERPONE, Dynamics)

SHI HONGBO, MAGAYE RUTH, CATRANOVA VINCENT, ZHAO JINSHUN: Titanium dioxide nanoparticles: a review of current toxicological data, Particle and Fibre Toxicology 2013, 10:15 (zit. SHI, review)

STEINLE JOHANN: Chemische und photochemische Reaktionen an der Titandioxidoberfläche, Diss. München, 1974 (zit. STEINLE, Reaktionen)

STOCKHAUS HEIDI: Regulierte Selbstregulierung im europäischen Chemikalienrecht, Diss. Tübingen, 2015 (zit. STOCKHAUS, Regulierte Selbstregulierung)

STREULI CHRISTOPH, KAPPES DAG: Leitfaden zum Chemikalienrecht, unter Berücksichtigung anderer Rechtsgebiete mit Bezug zum Chemikalienrecht. Bern, 2013 (zit. STREULI, KAPPES, Leitfaden)

STUTZ HANS W.: Schweizerisches Abwasserrecht, Diss. Zürich, 2008 (zit. STUTZ, Abwasserrecht)

THURNHERR DANIELA: Verfahrensgrundrechte und Verwaltungshandeln, Habil. Basel, Zürich / St. Gallen 2013 (zit. THURNHERR, Verfahrensgrundrechte)

TULHOFF ERNA: Untersuchungen zur Photochemie von vanadin- und aluminiumdotiertem Titandioxid und Fehlordnung von vanadin-aluminium-mischdotiertem Titandioxid, Diss., Berlin 1969 (zit. TULHOFF, Untersuchungen)

U.S. Geological Survey, 2016: Mineral commodity summaries 2016: U.S. Geological Survey, <http://dx.doi.org/10.3133/70140094>, (zit. United States Geological Survey, 2016) letztmals abgerufen am 21. Februar 2017

VEREINIGUNG FÜR UMWELTRECHT / KELLER HELEN (Hrsg.), Kommentar zum Umweltschutzgesetz, 2. Aufl. Zürich 2004 (zit. BEARBEITER, in: KELLER, USG)

VINU R., MADRAS GIRIDHAR: Environmental remediation by photocatalysis, in: Journal of the Indian Institute of Science, Vol. 90:2, Apr – Jun 2010, journal.library.iisc.ernet.in, S. 189 – 320 (zit. VINU, environmental)

VEVERS WILLIAM F., JHA AWADHESH N.: Springer, Ecotoxicology (2008) 17:410 – 420 (zit. VEVERS, Genotoxic and cytotoxic)

VOHR HANS-WERNER: Toxikologie Band I: Grundlagen der Toxikologie. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2010 (zit. VOHR, Toxikologie)

WAGNER PFEIFFER BEATRICE, Schutz der Umwelt im Lebensmittelrecht, in: Mélanges Pierre Moor, Bern 2005 (zit. WAGNER PFEIFFER, Mélanges)

WEIR ALEX, WESTERHOFF PAUL, FABRICIUS LARS, HRISTOVSKI KIRIL, VON GOETZ NATALIE: Titanium Dioxide Nanoparticles in Food and Personal Care Products, American Chemical Society, Environmental Science & Technology 2012, 46, S. 2242 – 2250 (zit. WEIR, food)

WILD FLORIAN: Entwicklungen und Erfahrungen mit der Gesetzesdelegation in der Umweltgesetzgebung, in: URP 8 / 2011 (zit. WILD, Entwicklungen)

WINKLER JOCHEN: Titandioxid, Produktion, Eigenschaften und effektiver Einsatz, 2. überarbeitete Auflage, Vincentz Network, Hannover 2013 (zit. WINKLER, Titandioxid)

XIAOBO CHEN, MAO SAMUEL S.: Titanium Dioxide Nanomaterials: Synthesis, Properties, Modifications, and Applications, Chem. Rev. 2007, 107 (7), 2891 – 2959 (zit. XIAOBO, Titanium Dioxide Nanomaterials)

Materialienverzeichnis

Erläuternder Bericht des Bundesamtes für Gesundheit (BAG) zur Änderung der Chemikalienverordnung (ChemV), SR 813.11, Version für die Vernehmlassung, Januar 2017 (zit. BAG, Bericht)

Botschaft zu einem Bundesgesetz über den Umweltschutz (USG) vom 31. Oktober 1979 (zit. BBl 1979 III)

Botschaft zu einer Änderung des Bundesgesetzes über den Umweltschutz (USG) vom 7. Juni 1993 (zit. BBl 1993 II)

Botschaft des Bundesrates an die Bundesversammlung zum Entwurf eines Bundesgesetzes über den Verkehr mit Giften (Giftgesetz) vom 22. Mai 1968 (zit. BBl 1968 I)

Botschaft zum Bundesgesetz über den Schutz vor gefährlichen Stoffen und Zubereitungen (Chemikaliengesetz, ChemG) vom 24. November 1999 (zit. BBl 2000)

Botschaft des Bundesrates an die Bundesversammlung über die Aufnahme eines Artikels 24^{quater} in die Bundesverfassung (Schutz der Gewässer gegen Verunreinigung) vom 28. April 1953 (zit. BBl 1953 II)

Botschaft des Bundesrates an die Bundesversammlung zum Entwurf eines Bundesgesetzes über den Schutz der Gewässer gegen Verunreinigungen vom 9. Februar 1954 (zit. BBl 1954 I)