

TEXTE

34/2010

# Untersuchung des Einsatzes von Nanomaterialien im Umweltschutz



UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES  
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,  
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Förderkennzeichen 3707 61 301/05  
UBA-FB 001337

## **Untersuchung des Einsatzes von Nanomaterialien im Umweltschutz**

von

**Dr. Sonja Martens**

**Dr. Bernd Eggers**

**Thorsten Evertz**

Golder Associates GmbH, Celle

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

**UMWELTBUNDESAMT**

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter  
[http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-  
medien/mysql\\_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3778](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3778)  
verfügbar. Hier finden Sie auch eine deutsche und eine englische  
Kurzfassung.

Die in der Studie geäußerten Ansichten  
und Meinungen müssen nicht mit denen des  
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Herausgeber: Umweltbundesamt  
Postfach 14 06  
06813 Dessau-Roßlau  
Tel.: 0340/2103-0  
Telefax: 0340/2103 2285  
E-Mail: [info@umweltbundesamt.de](mailto:info@umweltbundesamt.de)  
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet III 2.3K Chemische Industrie, Energieerzeugung  
Dr. Wolfgang Dubbert

Dessau-Roßlau, Juni 2010

### Berichts-Kennblatt

<b>1. Berichtsnummer</b> UBA-FB 001337	<b>2.</b> -	<b>3.</b> -
<b>4. Titel des Berichts</b> Untersuchung des Einsatzes von Nanomaterialien im Umweltschutz		
<b>5. Autoren</b> Dr.-Ing. Martens, Sonja Dr. Eggers, Bernd Evertz, Thorsten		<b>8. Abschlussdatum</b> Februar 2009
<b>6. Durchführende Institution</b> Golder Associates GmbH Vorbruch 3 29227 Celle		<b>9. Veröffentlichungsdatum</b> Juni 2010
<b>7. Fördernde Institution</b> Umweltbundesamt Postfach 1406 06813 Dessau-Roßlau		<b>10. UFOPLAN-Nr.</b> 3707 61 301/05
		<b>11. Seitenzahl</b> 99
		<b>12. Literaturangaben</b> 104
		<b>13. Tabellen und Diagramme</b> 8
		<b>14. Abbildungen</b> 26
<b>15. Zusätzliche Angaben</b> -		
<b>16. Zusammenfassung</b> <p>Im Ergebnis einer umfassenden Recherche wurden im Forschungs-/Entwicklungsstadium befindliche nanotechnische Lösungen sowie bereits am Markt etablierte Produkte für die Sektoren Wasser und Luft aufgezeigt.</p> <p>Im Rahmen einer ökobilanziellen Betrachtung wurde anhand von zwei Fallstudien überprüft, welche Umweltentlastungs- und Umweltbelastungspotenziale sich durch den Einsatz nanotechnischer Produkte oder Verfahren im Vergleich zu konventionellen Alternativen ergeben. Die erste Fallstudie behandelt die solare Behandlung von mit Tetrachlorethen belastetem Wasser unter Einsatz von nanoskaligem Titandioxid (Halbleiter-Photokatalyse) im Vergleich zum Photo-Fenton-Verfahren. Im Rahmen der zweiten Fallstudie wurde ein PKW-Kombinationsfilter mit Nanofaserbeschichtung mit einem herkömmlichen Kombinationsfilter verglichen.</p>		
<b>17. Schlagwörter</b> Nanotechnologie, Wasseraufbereitung, Abwasserreinigung, Grundwassersanierung, Luftreinhaltung, ökobilanzieller Vergleich, solare Wasserbehandlung, Kabinenluftfilter		
<b>18. Preis</b> -	<b>19.</b> -	<b>20.</b> -

### Report Cover Sheet

<b>1. Report No.</b> UBA-FB 001337	<b>2.</b> -	<b>3.</b> -
<b>4. Report Title</b> Applications of nanomaterials in environmental protection		
<b>5. Authors</b> Dr.-Ing. Martens, Sonja Dr. Eggers, Bernd Evertz, Thorsten		<b>8. Report Date</b> February 2009
<b>6. Performing Organisation</b> Golder Associates GmbH Vorbruch 3 29227 Celle Germany		<b>9. Publication Date</b> June 2010
<b>7. Funding Agency</b> Umweltbundesamt (Federal Environmental Agency) Postfach 1406 06813 Dessau-Roßlau Germany		<b>10. UFOPLAN-Ref. No.</b>
		<b>11. No. of Pages</b> 99
		<b>12. No. of Reference</b> 104
		<b>13. No. of Tables, Diagrams</b> 8
		<b>14. No. of Figures</b> 26
<b>15. Supplementary Notes</b> -		
<b>16. Abstract</b> <p>Following comprehensive research nanomaterials or products which were either still in a research/development status or are already available in the marketplace were identified for the water and air sectors.</p> <p>Based on life cycle assessments for two case studies, it was checked how the potential benefits and impacts on the environment for nanotechnology products or processes compare with those for conventional solutions. The first case study deals with the solar treatment of water contaminated with tetrachloroethylene, comparing nanoscale titanium dioxide (photo-catalysis) and a photo-Fenton process. The second case study on air filtration compares a passenger car cabin-air filter with nanofibres and a conventional filter</p>		
<b>17. Keywords</b> nanotechnology, drinking water treatment, waste water treatment, groundwater remediation, air purification, life cycle assessment, solar water treatment, cabin-air filters for passenger cars		
<b>18. Price</b> -	<b>19.</b> -	<b>20.</b> -

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	8
1.1	Hintergrund .....	8
1.2	Ziel und Ablauf des Vorhabens.....	10
2	Nanotechnische Produkte und Anwendungen .....	11
2.1	Methodik und Informationsquellen .....	11
2.2	Sektor Wasser .....	14
2.2.1	Filtration/Separation.....	14
2.2.2	Funktionalisierung von Oberflächen .....	19
2.2.3	Sorption.....	21
2.2.4	Nanokatalysatoren .....	22
2.2.5	Nanoreagenzien.....	28
2.3	Sektor Luft .....	33
2.3.1	Autoabgaskatalysatoren .....	33
2.3.2	Filtration/Separation.....	36
2.3.3	Nanokatalysatoren .....	38
3	Chancen und Risiken von Nanomaterialien .....	39
4	Ökobilanzielle Betrachtungen .....	43
4.1	Methodik .....	43
4.2	Fallstudie 1: Solare Wasserbehandlung .....	47
4.2.1	Basisinformationen .....	47
4.2.2	Ziel und Untersuchungsrahmen.....	49
4.2.3	Sachbilanz .....	52
4.2.4	Wirkungsabschätzung und Auswertung.....	56
4.3	Fallstudie 2: Filtermedien in Kabinenluftfiltern .....	61
4.3.1	Basisinformationen .....	61
4.3.2	Ziel und Untersuchungsrahmen.....	66
4.3.3	Sachbilanz .....	68
4.3.4	Wirkungsabschätzung und Auswertung.....	71
4.4	Abschließende Anmerkungen.....	76
5	Zusammenfassung .....	78
6	Quellenverzeichnis.....	83
7	Anhang.....	93

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiele für Anwendungen und Reifegrad nanotechnischer Entwicklungen in verschiedenen Wirtschaftsbranchen (VDI TZ GmbH /1/)	8
Abbildung 2: Trennbereiche von Membranen - Teilchengrößen und Molekulargewicht für die Mikro-, Ultra-, Nanofiltration und Umkehrosmose (EnTec /8/)	15
Abbildung 3: Erweiterung der Membrananlage zur Reinigung von Textilabwasser bei der Riedel Textil GmbH; Anlagenbauer: Junghans, Frankenberg /13/	16
Abbildung 4: Elektronenmikroskopische Aufnahme einer Nanopartikelschicht auf der Oberfläche einer porösen Unterschicht (gr. Bild) und Polymernanopartikel (kl. Bild) (Universität Linz /19/)	18
Abbildung 5: Prinzip der Photokatalyse, Oberschicht mit TiO <sub>2</sub> -Nanopartikeln (Nano-X GmbH /27/)	23
Abbildung 6: Solare Wasserreinigungsanlage (32 m <sup>2</sup> ), DLR Lampoldshausen	25
Abbildung 7: Magnetseparation zur Entfernung des Nanokatalysators /34/	27
Abbildung 8: Injektion von Nanoeisen zur Grundwassersanierung /42/	29
Abbildung 9: Carbo-Iron als an Luft stabiles Sorbens und Reagenz (links) und TEM-Aufnahme eines einzelnen Partikels (rechts): Nanoskalige Eisencluster (schwarz) im Aktivkohlekorn (UFZ /37/)	32
Abbildung 10: Prinzipskizze eines Abgaskatalysators (Umicore /55/)	34
Abbildung 11: Kabinenluftfilter für die Automobilindustrie (Mann + Hummel GmbH /56/)	36
Abbildung 12: Phasen einer Ökobilanz (DIN EN ISO 14044)	44
Abbildung 13: Solare Wasserreinigungsanlage (Prototyp 7,4 m <sup>2</sup> ), DLR Köln	49
Abbildung 14: Schema der solaren Wasserbehandlung	51
Abbildung 15: Halbleiter-Photokatalyse: PCE-Dechlorierung als Funktion der Zeit, Darstellung der Reaktionskinetik anhand der Produktbildung /90/	54



Abbildung 16: Photo-Fenton-Verfahren: PCE-Dechlorierung als Funktion der Zeit, Darstellung der Reaktionskinetik anhand der Produktbildung /90/.....	55
Abbildung 17: Bewertung der zwei Ansätze zur solaren Wasserbehandlung nach EI99 .....	57
Abbildung 18: Plissiertes Filtermedium eines Partikelfilters (links) und Innenraum- filter CU 2882 (rechts) (Mann + Hummel GmbH /93/) .....	61
Abbildung 19: Plissiertes Filtermedium eines Kombinationsfilters (links) und In- nenraumfilter CUK 2862 (rechts) (Mann + Hummel GmbH /93/).....	62
Abbildung 20: Prinzip des Elektrospleinverfahrens (nach /94/).....	63
Abbildung 21: Filtermedium mit Oberflächenbeschichtungen (links) und Nanofa- serdurchdringung (rechts) (helsa-automotive /92/).....	64
Abbildung 22: Filtermedium ohne (links) und mit Nanofasern (rechts) nach einem Tunneltest (Mann + Hummel GmbH /96/).....	64
Abbildung 23: Abscheideleistung durch Filter mit Nanofasern und konventionellen Filter bei gleichem Druckverlust (Mann + Hummel GmbH /96/) .....	65
Abbildung 24: Druckverlust durch Filter mit Nanofasern und konventionellen Filter bei gleicher Abscheideleistung (Mann + Hummel GmbH /96/).....	65
Abbildung 25: Module der Fallstudie „Filtermedien in Kabinenluftfiltern“ .....	67
Abbildung 26: Anteile der Schutzgüter an der EI99-Gesamtpunktzahl.....	74

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Bilanzparameter - Materialien Prototypanlage (7,4 m <sup>2</sup> ) .....	52
Tabelle 2:	Bilanzparameter - Versuchsdurchführung (Volumen 100 Liter) .....	53
Tabelle 3:	Ergebnisse der Fallstudie 1 - Bewertung nach Eco-indicator 99.....	57
Tabelle 4:	Ausblick - Solare Wasserreinigungsanlage (200 m <sup>2</sup> ) .....	59
Tabelle 5:	Bilanzparameter - Produktion .....	69
Tabelle 6:	Vergleichsmessung „Filtermedium ohne Nanofasern“ und „Filter- medium mit Nanofasern“ (Mann + Hummel GmbH /96/) .....	70
Tabelle 7:	Basisdaten zur Abschätzung des Kraftstoff-Einsparpotenzials .....	71
Tabelle 8:	Ergebnisse der Fallstudie 2 - Bewertung nach Eco-indicator 99.....	74

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

In den vergangenen Jahren ist die Nanotechnologie verstärkt ins Blickfeld der öffentlichen Diskussion gelangt und gilt im Allgemeinen als eine der Schlüsseltechnologien der Zukunft. Von gezielt hergestellten Nanomaterialien für technische Produkte und Anwendungen werden vielfältige Nutzungsmöglichkeiten und enorme Wachstumsraten erwartet. Diverse Produktverbesserungen und neuartige Einsatzbereiche bei gleichzeitiger Verwendung geringerer Materialressourcen werden prognostiziert.

Abbildung 1 vermittelt einen Überblick über Anwendungsfelder und den Reifegrad nanotechnischer Produkte in verschiedenen Wirtschaftsbranchen. Anwendungsmöglichkeiten liegen zum Beispiel in den Bereichen Elektrotechnik/Elektronik, Optik, Medizin/Pharmazie, Energie und Umwelt /1/.

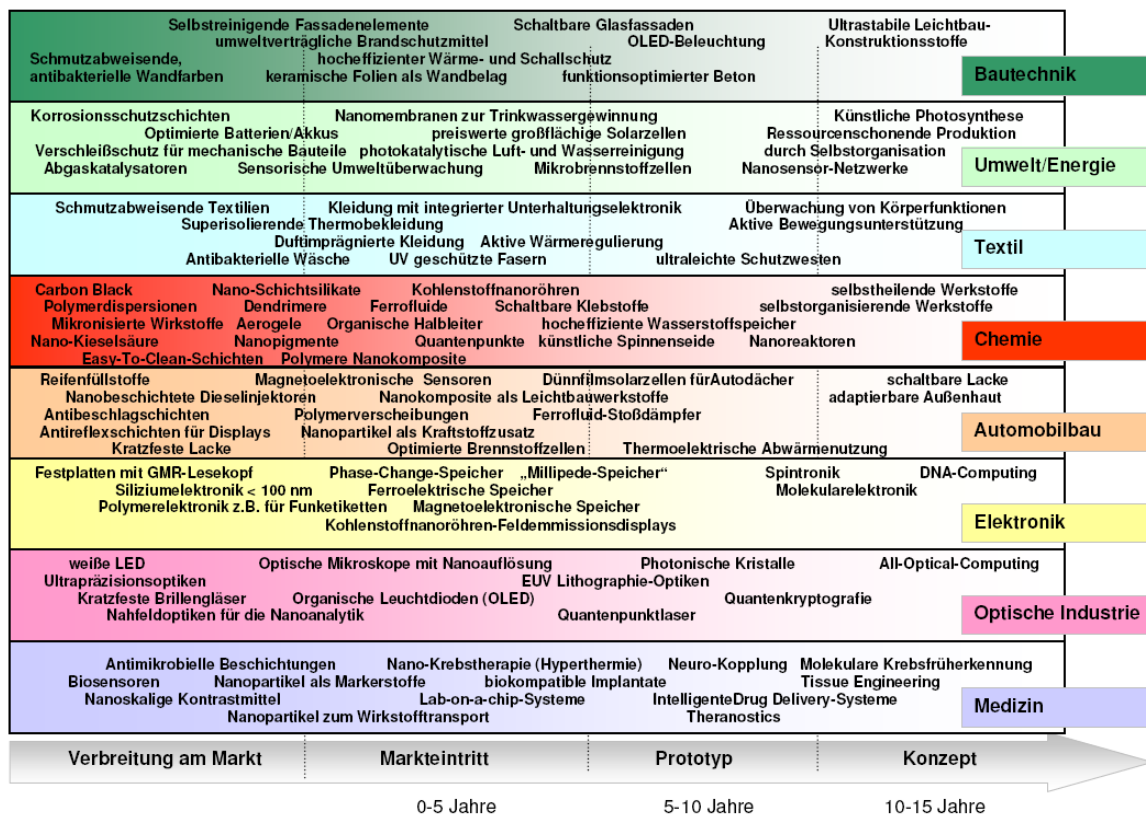


Abbildung 1: Beispiele für Anwendungen und Reifegrad nanotechnischer Entwicklungen in verschiedenen Wirtschaftsbranchen (VDI TZ GmbH in /1/)

Eine allgemein und international akzeptierte Definition zur Nanotechnologie gibt es bis dato nicht. Als praktikable Definition ist die seitens der Bundesregierung im Rahmen der „Nano-Initiative - Aktionsplan 2010“ vorgestellte Formulierung anzusehen /1/:

„Nanotechnologie beschreibt die Untersuchung, Anwendung und Herstellung von Strukturen, molekularen Materialien und Systemen mit einer Dimension oder Fertigungstoleranz typischerweise unterhalb von 100 Nanometern. Allein aus der Nanoskaligkeit der Systemkomponenten resultieren dabei neue Funktionalitäten und Eigenschaften zur Verbesserung bestehender oder Entwicklung neuer Produkte und Anwendungsoptionen.“

Weltweit werden derzeit große Anstrengungen in Wissenschaft und Wirtschaft zur Entwicklung und Markteinführung nanotechnischer Produkte und Anwendungen unternommen. Förderprogramme von Bund und Ländern sowie die Forschungsprogramme der Europäischen Union unterstützen die Entwicklungen im Bereich der Nanotechnologie. So wird beispielsweise im 7. Forschungsrahmenprogramm der EU die Nanotechnologie im Thema 4 „Nanowissenschaft, Nanotechnologie, Werkstoffe und neue Produktionstechnologien“ gefördert. Das Förderbudget beläuft sich auf ca. 3,5 Mrd. Euro für eine Laufzeit von 2007 bis 2013. Seitens der Bundesregierung wurde der oben angeführte „Nano-Initiative - Aktionsplan 2010“ im Rahmen der High-Tech-Strategie für Deutschland vorgestellt und verschiedene Fördermaßnahmen (z.B. Projektförderungen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, BMBF) initiiert, um die Voraussetzungen für die erfolgreiche Weiterentwicklung der Nanotechnologie und die breite gesellschaftliche Nutzung ihrer Potenziale zu verbessern. Der „Nano-Initiative - Aktionsplan 2010“ schafft erstmals einen einheitlichen und ressortübergreifenden Aktionsrahmen in Deutschland. In Abstimmung des BMBF mit verschiedenen Bundesministerien wurden die Voraussetzungen geschaffen, um die Umsetzung von Forschungsergebnissen in vielfältige Innovationen zu beschleunigen und weitere Branchen und Unternehmen an die Nanotechnologie heranzuführen. Weiterhin sollen durch eine frühzeitige Abstimmung der verschiedenen Politikfelder Innovationshemmnisse beseitigt, Rahmenbedingungen verbessert sowie ein intensiver Dialog mit der Öffentlichkeit über Chancen der Nanotechnologie geführt werden.

In der Vergangenheit sind bei neuen Technologien wie der Bio- und Gentechnologie in Deutschland erhebliche Akzeptanzprobleme aufgetreten. Als eine Ursache hierfür wird ein mangelnder Informationsaustausch zwischen Wissenschaft, Wirtschaft, Behörden

und gesellschaftlichen Gruppen angesehen /2/. Aufgrund dieser Erfahrungen wurden bei der Nanotechnologie bereits frühzeitig das Gespräch und der Informationsaustausch aller Beteiligten gesucht. Dieser Prozess begann u.a. mit der vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) sowie dem Umweltbundesamt (UBA) initiierten Tagung „Dialog Nanopartikel“ im Oktober 2005.

## **1.2 Ziel und Ablauf des Vorhabens**

Ziel der vorliegenden Studie ist die qualitative und - wo möglich - quantitative Darstellung von Chancen und Risiken von nanotechnischen Produkten und Verfahren im Umweltschutz. Schwerpunkt dieses Projektes sind nanotechnische Anwendungen in den Sektoren Wasser und Luft.

Die vorliegende Studie enthält im ersten Teil eine Übersicht bereits am Markt etablierter Produkte sowie im Forschungs-/Entwicklungsstadium befindlicher nanotechnischer Lösungen für die Wasseraufbereitung, Abwasserreinigung, Grundwassersanierung und Luftreinhaltung. Schwerpunktmäßig erfasst die Studie Produkte und Techniken mit End-of-pipe-Charakter. Weiterhin zeigt sie, sofern die Praxisreife einzelner Produkte schon erreicht war, Anwendungsbeispiele mit Fokus auf Deutschland und führt aktuelle Forschungsprojekte zur Nanotechnologie im Umweltbereich an.

Im zweiten Teil erfolgt anhand von zwei Fallstudien die Untersuchung von Life-Cycle-Aspekten nanotechnischer Verfahren im Vergleich zu herkömmlichen Materialien. Die erste Fallstudie enthält eine ökobilanzielle Betrachtung von zwei Ansätzen zur solaren Behandlung von mit Tetrachlorethen belastetem Wasser, u.a. unter Einsatz von nanoskaligem Titandioxid (Halbleiter-Photokatalyse) in Kombination mit Luft. Im Rahmen der zweiten Fallstudie wurde ein PKW-Kombinationsfilter mit Nanofaserbeschichtung mit einem herkömmlichen Kombinationsfilter verglichen.

Die Ergebnisse der Studie wurden am 23. September 2008 im Rahmen eines Fachgespräches im Umweltbundesamt in Dessau-Roßlau vorgestellt und diskutiert. Das Programm des Fachgespräches ist in Anhang 5 angefügt. Als Diskussionsgrundlage stand den Teilnehmern der Entwurf des Abschlussberichtes zur Verfügung. Zudem wurde die Studie am 13. Oktober 2008 im Rahmen der 16. Sitzung der DECHEMA/VCI-Arbeitsgruppe „Responsible Production and Use of Nanomaterials“ präsentiert.

Die Diskussionspunkte sowie die in der Folge des Fachgespräches und der Präsentation eingegangenen Hinweise sind in die endgültige Fassung des Abschlussberichtes eingeflossen.

## **2 Nanotechnische Produkte und Anwendungen**

### **2.1 Methodik und Informationsquellen**

Zur Erstellung der folgenden Übersicht nanotechnischer Produkte und Anwendungen im Umweltbereich wurde zunächst eine umfangreiche Literatur- und Internetrecherche durchgeführt. Für weitergehende Informationen erfolgte der Kontakt mit Fachleuten aus Unternehmen, Hochschulen und Forschungseinrichtungen.

Ziel war es, sowohl bereits am Markt verfügbare nanotechnische Produkte und Verfahren als auch im Forschungs-/Entwicklungsstadium befindliche Produkte zu erfassen, um einen Querschnitt gegenwärtiger und zukünftig möglicher Lösungen im Umweltschutz darzustellen.

Die Recherche bezog u.a. die Datenbank des Deutschen Patent- und Markenamtes (DPMA), die Umweltforschungsdatenbank UFORDAT (<http://doku.uba.de>) sowie die Datenbank DOMA an der TU Braunschweig für Stichwortrecherchen ein. Letztere liefert bibliographische Hinweise auf die deutsche und internationale Fachliteratur des Maschinen- und Anlagenbaus, der Herstellung und Verarbeitung von Werkstoffen und der Fertigungstechnik.

Zudem geben die folgenden Internetplattformen einen guten Überblick:

- Der im Auftrag des BMBF von der VDI Technologiezentrum GmbH realisierte Internetkompetenzatlas Nano-Map (<http://www.nano-map.de>) ermöglicht einen guten Überblick über die Akteure und regionale Aktivitäten im Bereich Nanotechnologie in Deutschland. Kompetenzträger der Nanotechnologie aus Forschung und Wirtschaft (u.a. Großunternehmen, Netzwerke, Forschungszentren und Universitätsinstitute) lassen sich nach Regionen, Anwendungs- und Technologiefeldern recherchieren.
- Das Kompetenznetz für Materialien der Nanotechnologie (NanoMat) ist ein seit 1997 bestehender, bundesweiter Arbeitsverbund von Unternehmen und For-

schungseinrichtungen (<http://www.nanomat.de>). Innerhalb von NanoMat bündeln sich u.a. die Fachkompetenzen von drei Forschungszentren der Helmholtz-Gemeinschaft, diversen Universitäten und Instituten mit natur- und ingenieurwissenschaftlichen Fachgebieten sowie große und mittelständische Unternehmen.

- Innerhalb des Portals „Nano in Germany“ präsentieren sich deutsche Unternehmen aus dem Bereich der Nanotechnologie insbesondere dem asiatischen Sprachraum (<http://www.nanoingermany.com>).
- Profile von Akteuren der Nanotechnologie (Unternehmen, Netzwerke, Forschungseinrichtungen, Hochschulen) in Hessen sind im „Kompetenz- und Infrastrukturatlas - Nanotechnologien in Hessen“ (<http://www.nanoportal-hessen.de>) enthalten.
- „Nanoforum.org“ ist ein europäisches Portal zur Nanotechnologie und wird mit Unterstützung der Europäischen Union sowie Partnern aus acht Ländern betrieben. Das Portal dient der Verwaltung und Präsentation von Nachrichten, Veranstaltungen und Publikationen rund um das Thema Nanotechnologie (<http://www.nanoforum.org>).
- Das Woodrow Wilson International Center for Scholars in Washington betreibt seit 2006 das „Nanotechnology Consumer Products Inventory“. Diese Datenbank vermittelt mit einer Unterteilung in acht Kategorien einen guten Überblick über Produkte mit nanoskaligen Bestandteilen oder Effekten auf der Basis von Herstellerangaben (<http://www.nanotechproject.org>).
- Das International Council on Nanotechnology (ICON) bietet eine Datenbank mit einer aktuellen Sammlung von Veröffentlichungen (<http://icon.rice.edu>).

Als aktuelle Studien mit Fokus auf nanotechnische Produkte und Anwendungen im Umweltbereich sind zu nennen:

- „Zukunftsmarkt - Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie“ /3/: Diese Fallstudie zum Handlungsfeld „Nanotechnologie“ mit dem Schwerpunkt „Nachhaltige Wasserwirtschaft“ wurde 2007 im Rahmen des Forschungsprojektes des Umweltbundesamtes „Zukunftsmärkte - Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern“ veröffentlicht.

- „Nanotechnologien für den Umweltschutz“ /4/: Die im Auftrag des BMBF vom VDI Technologiezentrum durchgeführte Studie vermittelt einen guten Überblick über die ökologischen und wirtschaftlichen Potenziale der Nanotechnologie in den Bereichen Wasser, Boden, Luft, Energie/Klima, Lärm und Produktion/Konstruktion.
- „Nanotechnology, Water, & Development“ /5/: Das amerikanische Meridian Institute hat im Rahmen des „Global Dialogue on Nanotechnologies and The Poor: Opportunities and Risks“ diese Studie veröffentlicht, die insbesondere die Chancen und Risiken verschiedener Ansätze zur Trinkwasseraufbereitung auf Nanotechnologiebasis darstellt.
- „Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte“ /6/: Die Universität Bremen führte diese Studie in Zusammenarbeit mit dem Institut für ökologische Wirtschaftsforschung gGmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes durch. Das Forschungsvorhaben hat vorrangig zum Ziel, umwelt- und nachhaltigkeitsbezogenen Chancen und Risiken der sich entwickelnden Technologie zu spezifizieren und soweit wie möglich zu quantifizieren.

Grundsätzlich ist im Ergebnis der durchgeführten Recherche und der Diskussion mit den Beteiligten anzumerken, dass die vorliegende Studie generell auf großes Interesse gestoßen ist. Insbesondere bei Akteuren aus der Wirtschaft war die Kooperationsbereitschaft zur aktiven Unterstützung des Projektes jedoch teils zurückhaltend. Häufig wurde von den Unternehmen auf Betriebsgeheimnisse und/oder wettbewerbs-/markt-relevante Daten verwiesen. Aus diesem Grund erfolgte oftmals keine Bereitstellung weiterführender (über Produktbroschüren hinausgehender) Informationen.

Als ein weiteres Fazit der Recherche ist festzuhalten, dass sich neben einigen bereits etablierten Produkten wie Nanofiltern oder Anwendungen im Automobilsektor viele nanotechnische Ansätze im Umweltbereich noch im Entwicklungsstadium befinden. Dieses ist oftmals mit einer limitierten Datengrundlage und fehlenden fundierten Aussagen zum Langzeitverhalten von Materialien verbunden. Anhang 1 zeigt ohne Anspruch auf Vollständigkeit eine Auswahl von Unternehmen, die mit der Entwicklung, Anwendung und dem Vertrieb nanotechnischer Produkte befasst sind oder spezielle Dienstleistungen im Umweltschutz anbieten.



## 2.2 Sektor Wasser

Nanotechnische Produkte kommen im Wassersektor heutzutage in der Trinkwasseraufbereitung, der Abwasserreinigung und der Grundwassersanierung zum Einsatz. Neben bereits am Markt verfügbaren Produkten und Anwendungen, z.B. nanoskaligen Membranen, die bereits den Stand der Technik widerspiegeln, befinden sich viele der im Folgenden vorgestellten Techniken noch im Entwicklungs- oder Teststadium.

Gemäß der VDI-Studie „Nanotechnologien für den Umweltschutz“ aus dem Jahr 2007 /4/ könnte mittel- bis langfristig der Wassersektor neben dem Energiesektor mit am stärksten von innovativen Nanotechniken profitieren. Auf diese Entwicklung deutet auch die große Anzahl an Publikationen sowie die globale Tragweite dieses Themenfeldes hin. Der tendenziell steigende Einsatz von Nanotechniken im Wassersektor spiegelt sich auch in einer im Rahmen der VDI-Studie durchgeführten Patentanalyse zur Nanotechnologie in den Bereichen Abwasserbehandlung, Wasserentsalzung und Grundwassersanierung wider. Demnach wurden in den Jahren 1986 bis 2004 173 Patente in diesen Bereichen angemeldet, wobei über die Zeit eine näherungsweise exponentielle Zunahme zu verzeichnen war. Gemäß dieser Analyse sind die Länder mit den stärksten Aktivitäten bezüglich der Patente in den o.g. Bereichen die USA, China und an dritter Stelle Deutschland, gefolgt von Südkorea, Frankreich und Japan.

### 2.2.1 Filtration/Separation

Seit Anfang der 1970er Jahre finden Membranverfahren zunehmend Eingang in die Technik /7/. Unter Membranen versteht man Filter, die Stoffgemische trennen können, wobei die Trennwirkung darauf beruht, dass eine Komponente des Gemisches die Membran nahezu ungehindert passieren kann, während andere Komponenten mehr oder weniger stark zurückgehalten werden. In der Wasseraufbereitung werden hauptsächlich druckgetriebene Prozesse eingesetzt. Als Membranmaterialien werden sowohl organische Polymere (z.B. Celluloseacetat, Polyether, Polyamide) als auch anorganische Keramiken wie Aluminiumoxid verwendet. Durch die Größe bzw. Molmasse des abzutrennenden Stoffes ist das Membranverfahren (Mikro-, Ultra-, Nanofiltration, Umkehrosmose) definiert. Abbildung 2 zeigt die Trennbereiche der jeweiligen Verfahren.



Abbildung 2: Trennbereiche von Membranen - Teilchengrößen und Molekulargewicht für die Mikro-, Ultra-, Nanofiltration und Umkehrosmose (EnTec /8/)

**Anwendungsbereiche:** Die Nanofiltration dient z.B. in der Trinkwasseraufbereitung als Alternative zu konventionellen Verfahren wie Flockung und Sandfiltration zur Enthärtung oder der Entfernung von natürlichen organischen Substanzen. Membranen für die Nanofiltration und teils auch für die Ultrafiltration mit kleinen Trenngrenzen haben dabei gegenüber Umkehrosmosemembranen den Vorteil, dass sie bei geringen Drücken (< 10 bar) betrieben werden können und speziell im Trinkwasserbereich problematische Substanzen wie mehrwertige Ionen und natürliche organische Substanzen zurückhalten können /9/.

Die Nanofiltration wird darüber hinaus im zunehmenden Maße in der Lebensmittelindustrie, z.B. in der Milchverarbeitung zur Entsalzung von Molke, eingesetzt. Auch die Fruchtsaft-, Bier- und Weinbehandlung sowie die Stärke- und Zuckerindustrie sind stark wachsende Anwendungsgebiete /10/. Anwendungen finden sich zudem in der Textil- und Farbstoffindustrie (Rückgewinnung von Prozesswasser, Behandlung von farbstoffhaltigem Abwasser) sowie im Recycling von Säuren aus Bädern. Membranverfahren sind insbesondere bei wasserintensiven Produktionsprozessen vorteilhaft, da die Abwassermengen durch das Aufkonzentrieren minimiert werden, während das gereinigte Wasser in den Prozess zurückgeführt werden kann /11/.

Als **Praxisbeispiele** für die Nanofiltration sind die folgenden Anwendungen zu nennen:

- Nanofiltrationsanlage zur Wasserenthärtung in Neckarbischofsheim, Zweckverband Wasserversorgungsgruppe Mühlbach (Baden-Württemberg) /12/
- Reinigung von Textilabwasser mittels Nanofiltration bei der Riedel Textil GmbH in Limbach/Oberfrohna (Sachsen) /13/, vgl. Abbildung 3
- Abwasseraufbereitung mittels Nanofiltration bei der Grundfos Pumpenfabrik GmbH, Wahlstedt (Schleswig-Holstein) /14/
- Modellanlage einer Membranbiokläranlage auf Basis nanotechnischer Keramikmembranen auf dem Golfplatz St. Wedel (Saarland) /15/
- Altpapieraufbereitender Zeitungsdruckpapierhersteller (Papierfabrik Palm GmbH & Co. KG): Erweiterung einer mechanisch-biologischen Abwasserreinigung für einen Abwasserteilstrom durch eine weitergehende Reinigung mittels Nanofiltration am Produktionsstandort Eltmann (Bayern) im Rahmen eines BMU-Projektes /16/



Abbildung 3: Erweiterung der Membrananlage zur Reinigung von Textilabwasser bei der Riedel Textil GmbH; Anlagenbauer: Junghans, Frankenberg /13/

Zudem werden große Potenziale der Nanotechnologie für die Meerwasserentsalzung gesehen. Die Nanofiltration kann dabei sowohl für die Vorbehandlung des Meerwassers für weitere Verarbeitungsstufen, z.B. zur Sulfatabtrennung, als auch für die partielle Meerwasserentsalzung eingesetzt werden /17/.

**Forschungsprojekte:** Viele nanotechnische Ansätze im Wassersektor befinden sich gegenwärtig noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium.

Aktuelle Arbeiten am GKSS Forschungszentrum Geesthacht beschäftigen sich im Rahmen des EU-Projektes „NanoMemPro“ mit der Entwicklung und Optimierung von Trennmembranen auf der Basis von Kohlenstoff-Nanoröhrchen (Carbon-Nanotubes, CNT). Forschungsgegenstand ist, die Nanoröhrchen äußerst eng in mehreren Lagen in dem Membranmaterial einzulagern, um Wasser- und Salz-moleküle voneinander zu trennen. Die Entwicklung stützt sich auf Grundlagenforschung, wie die des Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien. Die Technologie könnte alternativ zur traditionellen Methode der Destillation zu einer erheblichen Energieeinsparung in der Membrantechnik führen. So gehen die Wissenschaftler davon aus, dass die Entsalzung mittels Kohlenstoff-Nanoröhrchen - verglichen mit dem herkömmlichen Verfahren der Umkehrosmose - um bis zu 75% günstiger erfolgen kann /18/.

Am Institut für Verfahrenstechnik an der Universität Linz sind mit speziell hergestellten Nanopartikeln extrem feine molekularporöse Strukturen entwickelt worden, die als Trennfilter eingesetzt werden können /19/. Um derartige Nanopartikelschichten zu erhalten, werden kugelförmige Polystyrol-Partikel < 100 nm an der Oberfläche einer Polymermembran aufgebracht. Die neu entwickelten Filter weisen eine große spezifische Oberfläche, geringe Porengröße und enge Porengrößenverteilung auf und es können reproduzierbare homogene und dünne Schichtstrukturen (Abbildung 4) hergestellt werden. Denkbar sind Einsätze der Trennschichten zur selektiven Trennung von Ionen, z.B. für die Wasserenthärtung, und in der Medizintechnik.

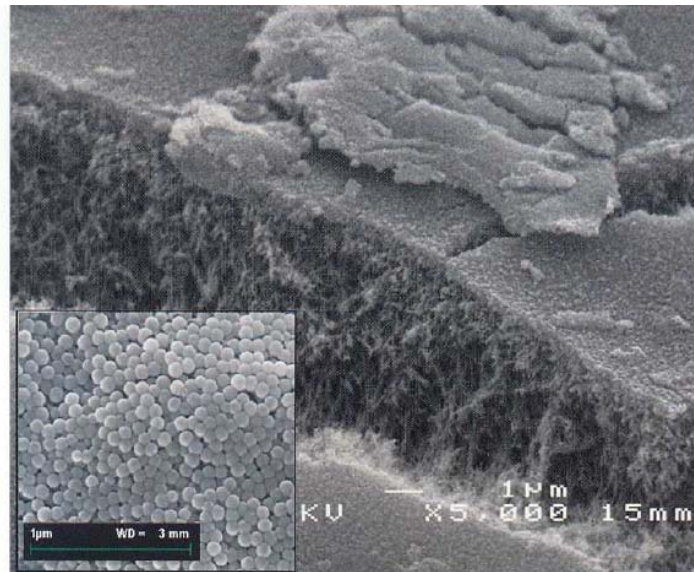


Abbildung 4: Elektronenmikroskopische Aufnahme einer Nanopartikelschicht auf der Oberfläche einer porösen Unterschicht (gr. Bild) und Polymernanopartikel (kl. Bild) (Universität Linz /19/)

Im Rahmen des Forschungsprogramms PIUS und des regionalen Wachstumskerns fanimat (Innovationsbündnis von KMUs und Forschungs- und Bildungseinrichtungen im Bereich Hermsdorf und Jena) wurde die Arbeit des Hermsdorfer Instituts für Technische Keramik e.V. zu keramischen Membranen im Nanoporenbereich für molekulare Stofftrennungen gefördert. Dabei wurde u. a. eine keramische Nanofiltrationsmembran (NF-Membran) bestehend aus amorphem  $\text{TiO}_2$  entwickelt, die die Abtrennung von gelösten Molekülen aus wässrigen Lösungen, beispielsweise für das Recycling von Prozess- und Reinigungswässern in der Textilindustrie, ermöglicht. NF-Membranen eröffnen aufgrund ihrer Beständigkeit in heißen Säuren und Laugen, gegenüber Oxidationsmitteln und ihrer Unempfindlichkeit gegenüber Temperaturen bis  $300^\circ\text{C}$  die Möglichkeit einer prozessintegrierten Reinigung.

Seitens des BMBF werden verschiedene Projekte zur Entwicklung von Membranen seit den 1990er Jahren gefördert. In einem Teilprojekt des Verbundprojektes „IntegTa“ - Integratives Management mehrfach genutzter Trinkwassertalsperren (Koordination TU Dresden, Laufzeit 2006 - 2009) wird derzeit die Nanofiltration als Alternative zu konventionellen Verfahren zur Aufbereitung organisch stark belasteter Rohwässer untersucht.

Im Verbundprojekt „Organophile Nanofiltration für die nachhaltige Produktion in der Industrie“ (Koordination GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, 2005 - 2008) werden Polymermembranen für den industriellen Einsatz entwickelt, die geeignete Lösemittelstabilitäten und Trennleistungen unter Prozessbedingungen aufweisen. Ziel des Projektes ist es, die organophile Nanofiltration für den industriellen Einsatz nutzbar zu machen. Das große Potenzial dieses Trennverfahrens, das unter milden Bedingungen niedermolekulare, gelöste Substanzen aus organischen Lösungen separieren kann, besteht in der Rückgewinnung von homogenen Katalysatoren.

In dem Projekt „PHOXNAN“ - Optimierte Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm durch ein Hybridverfahren aus Niederdruck-Nassoxidation und Nanofiltration (2006 - 2008) wird u.a. an der RWTH Aachen ein neues Verfahrenskonzept zur Rückgewinnung von Phosphor in Form eines als Düngemittel geeigneten Produkts untersucht. Dabei handelt es sich um einen Hybridprozess, der aus einer Vorbehandlung des Schlammes sowie der Separation des Phosphors von Schlammpartikeln und Schadstoffen mittels Nanofiltration besteht. Die Nanofiltration trennt Schwermetalle aus dem Ablauf ab, so dass der Phosphor, der bei niedrigen pH-Werten als Phosphorsäure durch die NF-Membranen permeiert, in reiner Form zurückgewonnen werden kann. Hintergrund ist, dass die Rückgewinnung von Phosphor aufgrund der knapper werdenden mineralischen Phosphorressourcen zunehmend an Bedeutung gewinnt und Klärschlamm als Hauptphosphorsenke in der Abwasserbehandlung einen wichtigen Ansatzpunkt für ein Phosphorrecycling bietet.

### **2.2.2 Funktionalisierung von Oberflächen**

Weitere Anwendungen der Nanotechnologie im Umweltsektor, zumeist noch im Entwicklungs- oder Teststadium, basieren auf der Bereitstellung funktionalisierter Oberflächen oder Strukturen. Dabei wird sich zunutze gemacht, dass sich Nanomaterialien - ob als Partikel, Schicht oder Struktur - durch ihre großen Ober- und Grenzflächen auszeichnen. Ziel vieler Entwicklungen ist es, nanoskalige Strukturen gezielt mit definierten Funktionalitäten, wie speziellen chemischen oder mechanischen Eigenschaften, auszustatten. Beispielhaft hierfür sind Beschichtungen auf der Basis von Nanotechniken zu nennen, die Ablagerungen auf Membranen, aber auch in Wärmetauschern und Reaktoren entgegenwirken.

Häufiges Problem bei der Filtration stellt das Auftreten von Fouling auf den Membranen dar. Darunter versteht man eine Deckschichtbildung auf der Membranoberfläche, welche die Durchlässigkeit (Permeabilität) der Membran verringert und dadurch ihre Trenncharakteristik verändert und Lebensdauer verkürzt. Verschiedene nanotechnische Lösungsansätze zielen darauf ab, diesen Fouling-Prozessen entgegenzuwirken:

**Forschungsprojekte:** Das laufende Forschungsprojekt „Einsatz von elektrisch leitfähigen Polymeren in der Umweltanalytik und Umwelttechnik“ an der TU Hamburg-Harburg beschäftigt sich mit Möglichkeiten, speziell das Partikelfouling (Anlagerung ungelöster suspendierter Partikel auf der Membranoberfläche) und das Biofouling (Anlagerung von Mikroorganismen) mittels Nanobeschichtungen zu minimieren. Vor dem Hintergrund, dass Kolloide wie auch Mikroorganismen eine elektrostatische Ladung tragen, welche eine gleich geladene Oberfläche abstößt, wird angestrebt, durch das Anlegen eines elektrostatischen Feldes das Fouling zu mindern. Beispielhaft wurde für den Einsatz leitfähiger Polymere in der Umwelttechnik die Membrantechnologie herangezogen. Verwendet werden u.a. mit Kohlenstoff-Nanoröhrchen (Durchmesser 30 nm, Länge 150 nm) beschichtete Kunststoffmembranen zur Umkehrosmose. Die Leitfähigkeit des Kohlenstoffs kann ein elektrisches Feld erzeugen, das abweisend auf die entsprechenden, den Biofilm bildenden Partikel wirkt und damit die Anlagerung an der Membran nachhaltig verhindert. Bisherige Untersuchungen zeigen diesbezüglich positive Resultate /20/.

Auch eine europäische Patentanmeldung der DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. und des IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser, Beratungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH aus dem Jahr 2006 beschreibt einen ähnlichen Ansatz zur Vermeidung oder Verminderung von Biofilmen auf Oberflächen /21/. Der Methode liegt wie dem zuvor genannten Forschungsprojekt die Erkenntnis zugrunde, dass die Beschichtung von Membranoberflächen mit leitfähigen Materialien eine dünne elektrisch leitfähige Schicht erzeugen kann, die polarisierbar ist und somit als wirksames Mittel zur Bekämpfung von Biofilmen dienen kann. Als leitfähiges Polymer kommen z.B. Polypyrrol, Polythiophen oder Polyanilin sowie deren Derivate in Frage, die in Form von dünnen Schichten auf der zu schützenden Oberfläche oder in Form von nanoskaligen Partikeln auf eine Membran aufgetragen werden können. In Experimenten wurden u.a. Polyanilin-Nanopartikel-Suspensionen erfolgreich getestet.

Weitere Beispiele für den Einsatz von Nanotechniken zur Verhinderung von Belagsbildung durch Organismen finden sich im laufenden EU-Projekt AMBIO (Advanced nanostructured surfaces for the control of biofouling, 2005 - 2010). Ziel ist es, durch die Nanostrukturierung die Haftung von Organismen unter marinen Bedingungen, beispielsweise an Schiffsrümpfen, signifikant zu vermindern, um so ohne den Einsatz von Bioziden den Foulingprozess zu kontrollieren. An diesem Projekt sind 31 Partnern u.a. aus Deutschland die Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, das Institut für Polymerforschung Dresden e.V. und die BASF SE beteiligt.

Bereits kommerziell erhältlich ist das Beschichtungssystem Nanocomp AF (Anti-Fouling) der ItN Nanovation AG, Saarbrücken, für den Einsatz in flüssigkeitsführenden Rohrsystemen. In 2007 war ein zweijähriger Test der keramischen Beschichtung, die auf Metall aufgebracht wird, in den Kühlkreisläufsystemen von Anlagen der BASF vorgesehen. Das Anti-Fouling-Produkt soll dort das Kristallisations-Fouling, also die Ablagerung gelöster Stoffe an Rohroberflächen, unterbinden.

### **2.2.3 Sorption**

Weitere Möglichkeiten für nanotechnische Anwendungen ergeben sich in der Wasserbehandlung durch den Einsatz von Sorptionsmitteln. Beispielhaft seien hierfür die folgenden Produkte bzw. Entwicklungen angeführt:

Die Lanxess Deutschland GmbH hat ein Eisenoxid (Bayoxide® E33) speziell zur Abtrennung von Arsen aus Trink- und Abwasser entwickelt. Das Adsorbermedium besteht aus nanopartikulärem  $\alpha$ -FeOOH mit einer sehr hohen Oberfläche; gleichzeitig sind die Granulate gegenüber einem Abrieb im Wasserstrom stabil. Sowohl Arsen(V) und Arsen(III) werden auf dem Medium über einen Oberflächenkomplex gebunden. In Kooperation mit dem Wassertechnologieunternehmen Severn Trent Services wird das Produkt in einem kontinuierlichen Festbettprozess (Sorb33™-Verfahren) eingesetzt. Seit 2003 ist eine beträchtliche Anzahl von Anlagen weltweit im Einsatz /22/.

Weitere Anwendungsbereiche für das Adsorptionsverfahren sind neben der Trinkwasseraufbereitung u.a. die Reinigung von Grubenwässern und Abwässern aus Baugruben, in der Metall- und Halbleiterindustrie sowie in bestimmten chemischen Industriezweigen. Vorteilhaft ist hierbei die hohe Affinität des Granulates u.a. zu Antimon-, Blei-,



Cadmium- oder Chrom-Ionen, so dass deren Gehalt im Abwasser deutlich verringert werden kann /23/.

Als ein **Forschungsprojekt**, das ebenfalls auf die Sorption von Arsen bei der Trinkwasseraufbereitung abzielt, ist eine Arbeit am Alfred-Wegener-Institut, Bremerhaven in Kooperation mit der Universität Bremen zu nennen /24/. Ziel des Projektes ist der Einsatz von paramagnetischen Nanokompositpartikeln, deren Oberfläche gezielt funktionalisiert wird, um eine effiziente und umweltschonende Methode zur selektiven Arsenit- und Arsenatentfernung bei der Trinkwasseraufbereitung zu schaffen. Die Kompositpartikel werden dem zu reinigenden Wasser zugegeben, um Arsenite und Arsenate spezifisch und selektiv aus dem Wasser auf der Partikeloberfläche zu adsorbieren und durch anschließendes Anlegen eines statischen Magnetfeldes gemeinsam mit den superparamagnetischen Partikeln abzutrennen. Die Adsorberpartikel werden regeneriert und das sorbierte Material fällt in einer Lösung aufkonzentriert an und kann anderen Verwendungen oder einer gezielten Entsorgung zugeführt werden.

Wissenschaftler am Massachusetts Institute of Technology (MIT) haben gemeinsam mit internationalen Kollegen ein papierähnliches Material aus Nanodrähten entwickelt, das das 20-fache des eigenen Gewichts an hydrophoben Flüssigkeiten wie Mineralöl aus Wasser aufnehmen kann, ohne dabei das Wasser selbst aufzusaugen /25/. Einsatzmöglichkeiten bieten sich daher im Falle einer Ölpest und evtl. auch in der Wasseraufbereitung. Zur Herstellung des Materials wird eine Suspension von Nanodrähten aus Manganoxid auf einer nicht haftenden Platte getrocknet. Dabei entsteht eine papierartige Struktur, die mit Silikon beschichtet wird, um eine wasserabweisende Oberfläche zu schaffen. Die Nanodrähte sind den vorliegenden Untersuchungen zufolge bei sehr hohen Temperaturen stabil, so dass das Öl durch Verdampfen aus dem Material zurückgewonnen werden könnte. Eine Wiederverwendung des Materials und auch des Öls wäre daher möglich.

#### **2.2.4 Nanokatalysatoren**

Gegenwärtig gewinnen Nanokatalysatoren im Umweltbereich zunehmend an Bedeutung. Nanoskaliges Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) wird u.a. als Katalysator in der Abwasserreinigung eingesetzt.

## Photokatalyse

Das zu den Modernen Oxidationsverfahren (Advanced Oxidation Processes) zählende Verfahren der Photokatalyse gewinnt zunehmend an Bedeutung, um toxische oder biologisch schwer abbaubare organische Wasser- und Luftinhaltsstoffe (vgl. Kap. 2.3.3) mit Hilfe von Hydroxylradikalen zu mineralisieren. Hierbei werden organische Schadstoffmoleküle in Gegenwart von Luftsauerstoff vollständig oxidiert, d.h. es findet eine Reaktion unter Bildung von Kohlendioxid, Wasser und ggf. weiteren mineralischen, ungiftigen Produkten statt. Im Fall der Photokatalyse werden durch Bestrahlung des Katalysators Titandioxid sowohl Wasser als auch Luftsauerstoff zu den erwähnten reaktiven Hydroxylradikalen umgesetzt. Im Fall von Titandioxid als Halbleiter kann Licht im Wellenlängenbereich zwischen 200 nm und ca. 400 nm diese photochemische Reaktion initiieren. D.h., dass neben künstlichen Lichtquellen auch die UV-A-Strahlung der Sonne (300 - 400 nm) wirkungsvoll genutzt werden kann (Abbildung 5). Diese spezielle Form der Photokatalyse wird auch als solarkatalytische Wasser- bzw. Luftreinigung bezeichnet /26/.

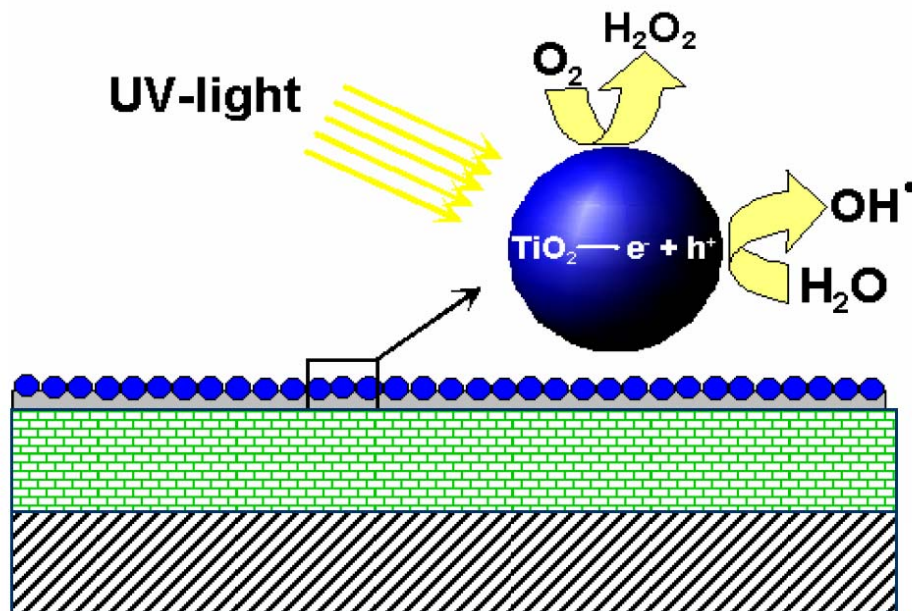


Abbildung 5: Prinzip der Photokatalyse, Oberschicht mit TiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln (Nano-X GmbH /27/)

Insbesondere in Ländern mit starker Sonneneinstrahlung bietet sich die Anwendung von photokatalytischen Verfahren zur Wasserreinigung an; praktische Umsetzungen dieser Technologie erfolgten bislang jedoch eher selten. Der Hauptnachteil der photokatalytischen Wasserreinigung liegt in der Tatsache, dass die UV-Strahlung im Sonnenlicht weniger als 5% der gesamten Lichtintensität beträgt und zumeist nur eine Quantenausbeute, d.h. ein Verhältnis zwischen der Anzahl der abgebauten Moleküle und der Anzahl absorbierter Lichtquanten, von wenigen Prozent erzielt wird /28/. Dieses führt zu einem großen Platzbedarf des Verfahrens.

Nach Einschätzung von Wissenschaftlern der TU Berlin könnte sich die Photokatalyse allerdings bei der Behandlung kleiner, schwach belasteter Wassermengen, bei denen kurze Reaktionszeiten zu erwarten sind, durchsetzen /29/. Demnach könnten photokatalytische Verfahren beispielsweise in tropischen Entwicklungsländern bei kleinen Betrieben, die in den Bereichen Textilfärbung oder Lederherstellung tätig sind, einen Beitrag zur Qualitätsverbesserung von Produktionsabwässern leisten.

**Forschungsarbeiten** zu Anwendungen der Photokatalyse zur Abwasserbehandlung laufen teils unter Verwendung von nanoskaligem Titandioxid u.a. an der Universität Hannover (Institut für Technische Chemie). So wurde im Auftrag der Volkswagen AG eine Pilotanlage zur solaren Wasseraufbereitung biologisch vorbehandelten Produktionsabwassers betrieben /30/. Eine weitere im Rahmen eines EU-Projektes installierte Pilotanlage dient zur Behandlung des Abwassers einer Textilfabrik in Tunesien mit dem Ziel, die zur Einleitung in den kommunalen Vorfluter erforderliche Wasserqualität zu erreichen /26/.

Weitere Pilotversuche erfolgen im Rahmen des Projektes SOWARLA (Solare Wasserreinigungsanlage Lampoldshausen) in Zusammenarbeit des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) mit den mittelständischen Firmen Hirschmann Laborgeräte GmbH & Co. KG und der KACO Gerätetechnik GmbH. Im Rahmen von SOWARLA wurde ein neuer, effizienter Strahlungsempfänger (Solarreceiver) entwickelt, der einfach zu installieren und sehr flexibel ist. Dieser ermöglicht den Aufbau beliebig großer Anlagen unter unterschiedlichen Randbedingungen. Für diese Arbeiten wurden das DLR und die beteiligten Industriepartner am 26. Mai 2008 in Brüssel als nationales Siegerprojekt mit dem Energy Globe Award 2007 ausgezeichnet /31/.

Der Solarreceiver als Kernstück der SOWARLA-Anlage besteht aus transparenten Glasröhren, die von dem zu reinigenden Wasser durchflossen und dem Sonnenlicht ausgesetzt werden. Die aktuelle Anlage hat eine Länge von 20 m und eine Breite von 1,6 m (Abbildung 6). Die 32 m<sup>2</sup> große Pilotanlage wird derzeit unter Einsatz von Fentons Reagenz am DLR Zentrum Lampoldshausen zur Reinigung von Abwässern aus Raketenantriebtests betrieben. Bei mittlerer Einstrahlung und Belastung wird eine Reinigungsleistung von 500 bis 600 Liter Abwasser pro Stunde erzielt.



Abbildung 6: Solare Wasserreinigungsanlage (32 m<sup>2</sup>), DLR Lampoldshausen

In Österreich finden Forschungsaktivitäten zu neuen Beschichtungen auf Basis photokatalytischer Nanopartikel im Rahmen des Verbundprojektes PHONAS (Photokatalytische Nano Schichten) der österreichischen NANO Initiative mit vier Forschungsinstitutionen und acht Industriepartnern statt. Details zur photokatalytischen Wasserreinigung werden im Rahmen der Fallstudie „Solare Wasserbehandlung“ (Kapitel 4.2) erläutert.

Hinsichtlich einer toxikologischen Bewertung von nanoskaligem Titandioxid ist auf das EU-finanzierte Projekt „NanoDerm“ - Quality of Skin as a Barrier to ultra-fine Particles (2003 - 2006) hinzuweisen. Unter der Beteiligung von zwölf Institutionen wurde im Rahmen des Projektes u.a. untersucht, ob TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel, welche auch in Sonnenschutzmitteln, Zahncremes und Kosmetika Verwendung finden, durch die gesunde Haut eindringen können. Im Ergebnis der Experimente war festzuhalten, dass Nanopartikel, z.B. TiO<sub>2</sub> bei kosmetischen Anwendungen, nicht in tiefere Hautschichten eindringen /32/.

Des Weiteren sind Forschungsarbeiten zu Auswirkungen von Nanomaterialien auf Gesundheit und Umwelt auch integraler Bestandteil der BMBF-Förderung. U.a. werden im laufenden Projekt NanoCare (2006 - 2009, Koordination: Forschungszentrum Karlsruhe) mit 13 Partnern aus Industrie, Universitäten und unabhängigen Forschungseinrichtungen die Auswirkungen industriell hergestellter Nanopartikel, darunter auch Titandioxid, auf Gesundheit und Umwelt untersucht. Die Projektpartner stellen neuartige Nanopartikel her, untersuchen diese in Modellsystemen auf ihre biologische Wirkung und entwickeln Methoden zur Messung von Nanomaterialien am Arbeitsplatz.

Forschungsgegenstand am UFZ Leipzig, Department Umwelttechnologie, ist gegenwärtig die Entwicklung von Nanokatalysatoren für die Behandlung spezieller Industrieabwässer. Im Fokus steht die Behandlung von mit halogenorganischen Kohlenwasserstoffen (HKW) belasteten Abwässern, die nicht in kommunale Kläranlagen eingeleitet werden können. Als Alternative zu kosten- und energieintensiven Entsorgungsmöglichkeiten (Verbrennung) derartiger Wässer wird der Einsatz von extrem reaktiven Palladium-Katalysatoren (0,1 Massen-%) auf dem ferrimagnetischen Trägermaterial Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) untersucht /33/. Zum Einsatz kommen Magnetitpartikel mit Durchmessern von 20 bis 30 nm. Das seitens der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderte Projekt zielt darauf ab, die Abwässer durch eine selektive Entfernung der HKW durch reduktive Hydrodehalogenierung an den Palladium-Nanokatalysatoren zu detoxifizieren. Unter Detoxifizierung wird hierbei der gezielte selektive Abbau halogenorganischer Verbindungen in ungiftige, leicht abbaubare organische Moleküle (z.B. Abbau von Trichlorethen zu Ethan) verstanden, die dann wiederum durch eine biologische Behandlungsstufe in Kläranlagen entfernt werden können. Das katalytische Material wurde bereits erfolgreich in verschiedenen Versuchsanordnungen (Rührreaktor, kontinuierlich betriebenes Strömungsrohr) getestet. Ersten Abschätzungen des UFZ zufolge ist dabei mit Entsorgungskosten von etwa 10% gegenüber der herkömmlichen Verbrennung zu rechnen. Des Weiteren erlaubt der Ferrimagnetismus des Trägermaterials die vollständige Entfernung des Katalysators aus dem behandelten Abwasser mittels Magnetseparation (Abbildung 7), wodurch der Nanokatalysator erneut verwendet werden kann.

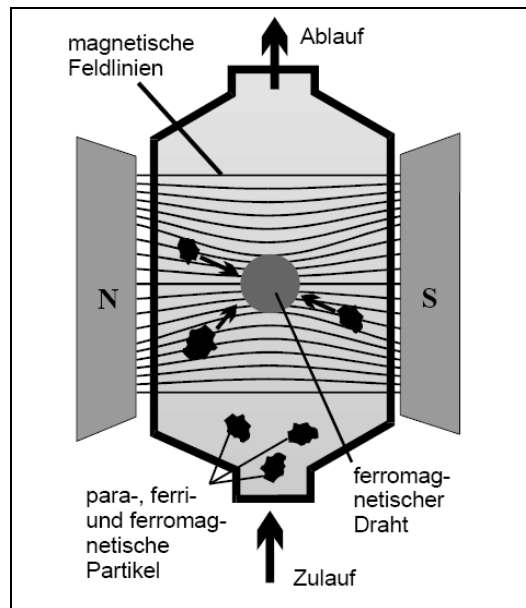


Abbildung 7: Magnetseparation zur Entfernung des Nanokatalysators /34/

Neben den Untersuchungen zur katalytischen Wirksamkeit werden in Zusammenarbeit mit dem Department für Zelltoxikologie des UFZ auch die Wirkung der reaktiven Nanopartikel auf lebende Zellen, ihre Zelltoxizitäten in Abhängigkeit von der Art und Größe der Partikel und damit mögliche Auswirkungen auf Mensch und Tier untersucht.

Als ein weiteres Forschungsprojekt ist „NANOKAT“ - Nanoskalige Biokompositmaterialien als Biokatalysatoren für die Behandlung von mit Methyl-tertiär-butylether (MTBE) und Ethyl-tertiär-butylether (ETBE) belastetem Wasser (BMBF-Förderung, 2006 - 2009) zu nennen. MTBE bzw. ETBE sind Oxygenate und werden Vergaserkraftstoffen zur Erhöhung der Oktanzahl zugesetzt. Während der Einsatz von Oxygenaten in Vergaserkraftstoffen zu einer Verbesserung der Luftqualität führt, wird durch die Verwendung der Substanzen das Gefährdungspotenzial für das Grundwasser, insbesondere bei unterirdischen Tankleckagen mit oxygenathaltigen Kraftstoffen, deutlich erhöht /35/.

Das Verbundprojekt beschäftigt sich mit der Entwicklung eines nanoskaligen Bioverbundwerkstoffes, eines sogenannten Biocers, für den verstärkten natürlichen Abbau von MTBE/ETBE im Wasser. Dabei sollen die drei Funktionen kontrollierte Adsorption und Desorption von MTBE/ETBE in einer porösen Matrix, katalytische abiotische Transformation von MTBE/ETBE sowie seine biologische Transformation in einem nanostrukturierten keramischen Material mit zusätzlicher Biofunktionalisierung vereint werden. Hierzu werden Mikroorganismen, die MTBE/ETBE abbauen, in poröse Kera-

mik-Matrices mittels eines Sol-Gel-Prozesses eingebaut /36/. Der Fokus eines Teilprojektes an der TU Dresden liegt u.a. auf der Erfassung des Abbauvorganges des Biocers und der Prognose der in das Grundwasser eingetragenen MTBE-Konzentration nach Beendigung der Abbauwirkung.

### **2.2.5 Nanoreagenzien**

Die Anwendung von Nanopartikeln zur in situ-Grundwassersanierung erfolgt seit einigen Jahren. Verschiedene Materialien sind bereits am Markt erhältlich, darüber hinaus gibt es zahlreiche Forschungsaktivitäten im In- und Ausland. Das anhaltende Interesse an der Entwicklung effizienter Methoden zur Grundwassersanierung leitet sich aus dem großen Bedarf ab, die Qualität der wichtigsten Ressource für Trinkwasser zu sichern bzw. im Bereich von kontaminierten Flächen wiederherzustellen.

Wegen seiner chemischen Eigenschaften, seiner Verfügbarkeit und seiner Umweltkompatibilität wird elementares Eisen als häufigstes Reagenz verwendet /37/. Die Schadstoffreduktion durch nullwertiges Eisen wird seit Anfang der 1990er Jahre intensiv in Labor- sowie Feldstudien untersucht und in der Fachliteratur diskutiert (z.B. /38/ und /39/). Die Bedeutung von elementarem Eisen als Reduktionsmittel begründet sich u.a. in seiner Anwendbarkeit bei chlorierten Kohlenwasserstoffen (CKW), die häufig auftretende Grundwasserkontaminanten darstellen. Die hohe Persistenz und nicht weniger oft die hohe Toxizität und teils sogar karzinogene Wirkung, die von chlorierten organischen Schadstoffen ausgeht, verlangt nach gezielten Maßnahmen zum kontrollierten Schadstoffabbau, vor allem wenn Schutzgüter oder Trinkwassereinzugsgebiete gefährdet sind. Darüber hinaus kann elementares Eisen auch bei Grundwasserbelastungen durch andere organische oder anorganische Stoffe, wie diversen Schwer- und Halbmetallen (z.B. Quecksilber, Cadmium, Nickel, Chromat, Arsenat), eingesetzt werden.

### **Nanoeisen zur Grundwassersanierung**

Nanopartikel, die nullwertiges Eisen als Elektronendonator und somit als „Motor“ für einen Dekontaminationsprozess im Grundwasser verwenden, werden übergeordnet als „Nanoeisen“ (Nano Zero Valent Iron, NZVI) bezeichnet /37/. Der Einsatz von Eisen-Nanopartikeln stellt eine flexible Sanierungstechnik dar und ist als Unterstützung bzw. Ersatz herkömmlicher Grundwassersanierungsverfahren geeignet.

Am häufigsten kommt bisher bei Grundwassersanierungen das Pump & Treat-Verfahren, bei dem das Grundwasser entnommen und anschließend on-site gereinigt wird, zum Einsatz. Aufgrund oftmals hoher Betriebskosten und langer Sanierungszeiten werden zunehmend auch alternative Techniken, wie z.B. permeable reaktive Barrieren, eingesetzt. Dabei hat sich als umweltverträgliches, kostengünstiges Reduktionsmittel in den durchströmten Reinigungswänden metallisches Eisen etabliert /40/.

Für tiefer liegende oder überbaute Grundwasserleiter ist das Konzept der Errichtung reaktiver Zonen durch die direkte Injektion kolloidaler Suspensionen in den kontaminierten Aquifer eine aussichtsreiche und kostengünstige Alternative /41/. Daher erfuhren Eisen-Nanopartikel, die gezielt in den kontaminierten Untergrund eingebracht werden und eine reaktive Zone zur Kontrolle von Schadstoffahnen bilden (Abbildung 8), in den letzten Jahren ein weltweit wachsendes Interesse in der Umweltforschung und Sanierungspraxis. Ein großer Vorteil ist, dass das Nanoeisen als wässrige Suspension in den kontaminierten Untergrund gepumpt wird, wobei ggf. bestehende Grundwassermessstellen genutzt werden können. Daraus ergibt sich z.B. gegenüber den fest im Untergrund installierten Reinigungswänden, die aufwändige Tiefbauarbeiten bei der Errichtung erfordern, ein großes Potenzial zur Kosteneinsparung.

Tratnyek and Johnson (2006)  
NanoToday 1(2): 44-48

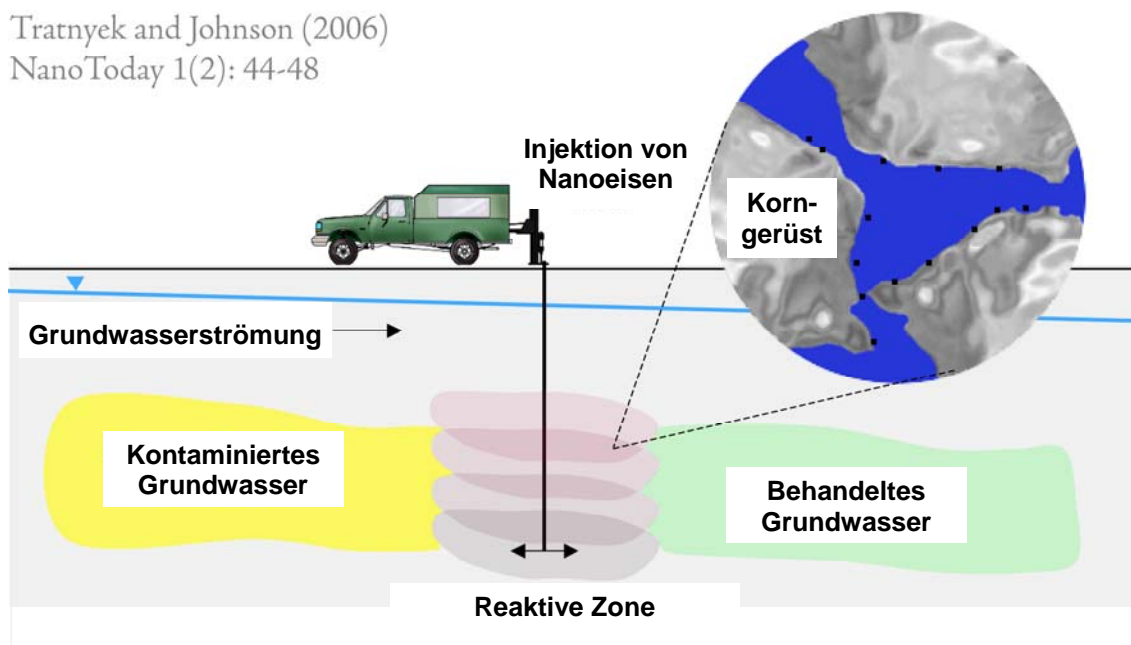


Abbildung 8: Injektion von Nanoeisen zur Grundwassersanierung (nach /42/)



Ein weiterer Vorteil ist, dass die Eisen-Nanopartikel mit Größen von 10 bis 100 nm eine sehr große spezifische Oberfläche ( $> 10 \text{ m}^2/\text{g}$ ) aufweisen, wodurch eine erhöhte chemische Reaktivität im Vergleich zu Eisengranulat oder Mikroisen in reaktiven Wänden gegeben ist /37/.

Die treibende Kraft für die Schadstoffentfernung aus dem Grundwasser ist die Korrosion des elementaren Eisens. Hierbei führt ein Teil der übertragenen Elektronen zur Reduktion von gelösten Grundwasserinhaltsstoffen (z.B. Sauerstoff, Nitrat) oder von Protonen des Wassers /37/. Des Weiteren erfolgt die Reduktion der oben angeführten organischen und anorganischen Kontaminanten, wobei die chlorierten Kohlenwasserstoffe abgebaut und die anorganischen Kontaminanten wie Arsen- und Chromverbindungen durch reduktive Fällung oder Sorption an neu gebildete Eisen(hydr)oxide aus dem Grundwasser entfernt werden /37/.

Grundvoraussetzung für den Aufbau einer reaktiven Zone im Grundwasserleiter sind Transportwege der Eisen-Nanopartikel von einigen Metern. In Bezug auf die Mobilität und Verbreitung von Nanoeisen im porösen, wassergesättigten Medium zeigen sich jedoch Einschränkungen /43/. Gründe dafür sind die Tendenz von Eisenkolloiden zur Agglomeration und die Abscheidung am Sedimentmaterial. Daher zielen kolloidstabilisierende Zusätze darauf ab, die Oberflächeneigenschaften des Eisens dahingehend zu verändern, dass eine höhere Mobilität erreicht wird /44/.

Im Rahmen von Pilotversuchen wurde Nanoeisen bereits an verschiedenen kontaminierten Standorten in Deutschland eingesetzt. Darüber hinaus liegen umfangreiche Erfahrungen aus Pilotversuchen und Sanierungen in Nordamerika vor /45/. Im Hinblick auf nordamerikanische Standorte, an denen Nanoeisen bereits eingesetzt wurde, sei auf den Bericht der US Environmental Protection Agency aus dem Jahr 2008 /43/ hingewiesen, der zahlreiche Fallbeispiele enthält. Als Praxisbeispiele in Deutschland sind folgende Anwendungen von Eisen-Nanopartikeln zur Grundwassersanierung zu nennen:

- Geländeversuch zur Sanierung eines Grundwasserschadens in Hannover-Südstadt im Bereich einer LCKW-führenden Schadstofffahne, 2006 (Universität Hannover, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) /46/
- Pilotversuch zum Einsatz von Eisen-Nanopartikeln auf dem Standort eines ehemals metallverarbeitenden Betriebes in Thüringen (parallel zur laufenden Pump &

Treat-Maßnahme zur Sanierung eines LHKW-, Chromat- und Nickelschadens), 2006 /47/

- Seit Mitte 2007 laufende Sanierung eines CKW-Grundwasserschadens mit Eisen-Nanopartikeln in Nordrhein-Westfalen /48/

Nationale Forschungsaktivitäten, zumeist im Labor- und Technikumsmaßstab, konzentrieren sich derzeit an der Universität Hannover, der Versuchseinrichtung für Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)/Universität Stuttgart sowie dem Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft u.a. auf die Optimierung von Injektionstechniken sowie die Mobilität bzw. Ausbreitung von Nanoeisen im porösen Medium.

Neben dem reinen Nanoeisen kommen weitere Materialien auf Eisenbasis in der Grundwassersanierung zum Einsatz /37/: Durch die Dotierung von Nanoeisen mit einem weiteren Metall, bevorzugt Palladium oder Nickel, können sogenannte bimetallische Nanopartikel (BNP) mit wesentlich höherer chemischer Reaktivität als das reine Nanoeisen hergestellt werden. Als Anwendung ist beispielhaft die Injektion von Palladium-Eisen-Kolloiden in einen mit Trichlorethen belasteten Aquifer zu nennen /49/.

Eine weitere spezielle Form des Nanoeisens, das sogenannte EZVI (Emulsified Zero Valent Iron), wird durch das Emulgieren mit einem Öl-Tensid-Gemisch erzeugt /50/. EZVI wurde speziell zur Sanierung von Schadstoffquellen, bei denen NAPL-Phase (non aqueous phase liquid) auftritt, entwickelt, da sich die hydrophoben Tröpfchen besser als herkömmliches Nanoeisen mit einer NAPL-Phase vermischen.

Auch sogenanntes Carbo-Iron, eine Entwicklung des UFZ Leipzig, Department Umwelttechnologie, mischt sich gut mit NAPL-Phasen (/37/, /51/). Bei Carbo-Iron handelt es sich um eine mit Eisen-Nanopartikeln belegte Aktivkohle, die die Adsorptionseigenschaften von Aktivkohle und die reduzierende Wirkung von nullwertigem Eisen verbindet (Abbildung 9). Aktivkohle ist das meist verwendete Sorbens des technischen Umweltschutzes und zeigt hervorragende Sorptionseigenschaften gegenüber einem breiten Spektrum an organischen Verbindungen. Nullvalentes Eisen ist wie bereits angeführt ein wirksames Reduktionsmittel für ein breites Spektrum an organischen und anorganischen Kontaminanten.

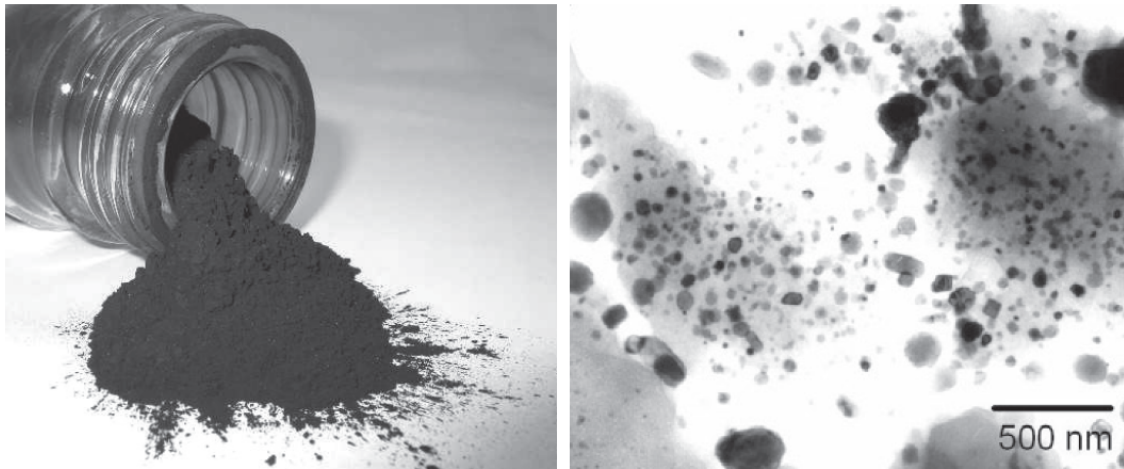


Abbildung 9: Carbo-Iron als an Luft stabiles Sorbens und Reagenz (links) und TEM-Aufnahme eines einzelnen Partikels (rechts): Nanoskalige Eisencluster (schwarz) im Aktivkohlekorn (UFZ /37/)

Bei der Verwendung von Carbo-Iron zur Grundwassersanierung kommen ausschließlich umweltkonforme Materialien zum Einsatz. Bei der Injektion von Carbo-Iron in einen kontaminierten Grundwasserleiter ist hinsichtlich des Verbleibes des Materials zu berücksichtigen, dass Eisenoxide entstehen, welche ohnehin geogen im Untergrund vorhanden sind, und die Aktivkohle, bestehend aus Kohlenstoff, stationär im Untergrund verbleibt.

Die Eigenschaften und die optimierte Gesamt-Partikelgröße des Carbo-Irons lassen eine verbesserte Mobilität des Materials im Untergrund im Vergleich zum oben angeführten Nanoeisen erwarten. Durch die hydrophoben Eigenschaften des Trägermaterials Aktivkohle besteht außerdem eine bessere Mischbarkeit des Reagenz mit organischen Schadstoffphasen. Carbo-Iron soll aus diesem Grund zukünftig neben der Sanierung von Kontaminationsfahnen auch zur Quellensanierung eingesetzt werden. Ergebnisse aus Geländeversuchen liegen bislang noch nicht vor. Ein Konzept für eine Pilotanwendung von Carbo-Iron an einem Standort in Bayern wurde seitens der Golder Associates GmbH erstellt; die behördliche Genehmigung für die Durchführung steht allerdings noch aus.

Im Rahmen eines laufenden Forschungsprojektes am North Dakota Water Resources Research Institute erfolgt die Entwicklung eines weiteren Produktes (Granular Activated Carbon/Nano Zero Valent Iron, „GAC-NZVI“) speziell zur Arsenentfernung aus dem Wasser /52/.

Ein weiterer Ansatz zur Wasserreinigung auf nanotechnischer Basis wird von Wissenschaftlern an der University of South Australia in Adelaide verfolgt /53/. Bei dieser Technik werden Silika-Partikel (Quarzsand) im  $\mu\text{m}$ -Bereich mit einer nanoskaligen Beschichtung (Dicke ca. 1 nm) aus Kohlenwasserstoffen mit funktionalen Gruppen eingesetzt. In Laborversuchen konnte gezeigt werden, dass die sogenannten Surface Engineered Silica (SES) Partikel in der Lage sind, Krankheitserreger wie beispielsweise das Polio-Virus oder das Bakterium *Escherichia coli* aus dem Wasser zu entfernen, da diese aufgrund elektromagnetischer Anziehung an den Partikeln haften. Die Komplexe aus Partikeln und Erregern können anschließend durch Filtration aus dem Wasser entfernt werden. Denkbar ist eine anschließende Reinigung des Materials z.B. unter Verwendung von Säure, um eine Wiederverwendung zu gewährleisten. Aktuell werden Möglichkeiten des Produkteinsatzes im Bereich der Trinkwasser- und Prozesswasseraufbereitung, in der Bewässerung und in Filteranlagen für Schwimmbäder geprüft.

## **2.3 Sektor Luft**

In der Luftreinhaltung spielt die Nanotechnik seit langem eine entscheidende Rolle im Rahmen von Autoabgaskatalysatoren. Darüber hinaus finden sich weitere nanotechnische Produkte - teils bereits am Markt verfügbar, teils noch im Entwicklungsstadium - beispielsweise in Luftfiltern und bei photokatalytischen Anwendungen zur Entfernung von Luftschadstoffen.

### **2.3.1 Autoabgaskatalysatoren**

Das Spektrum nanotechnischer Ansätze im Automobilbau reicht von bereits eingesetzten Komponenten über konkrete Entwicklungsaktivitäten bis hin zu Ideen mit allenfalls langfristiger Realisierbarkeit. Nanotechnische Entwicklungen spielen in allen Subsystemen bzw. Komponenten des Automobils eine Rolle. Beispiele sind nach einem Bericht des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) /54/ u.a. Nanopartikel als Füllstoff in Autoreifen, Antireflexbeschichtungen, nanopartikelverstärkte Polymere und Metalle sowie hydrophile Oberflächenschichten als Antibeschlagbeschichtungen.

Zur Luftreinhaltung kam der Autokatalysator erstmals 1975 in den USA zur Anwendung. Kurze Zeit später wurden aufgrund der positiven Erfahrungen hinsichtlich der

Schadstoffminimierung Katalysatoren zunächst in Japan und seit 1986 auch in Europa verwendet. Während zunächst in der Anfangsphase der Katalysatorentechnik auch unregelte Autoabgaskatalysatoren in PKW eingebaut wurden, traten ab 1993 neue Abgasgrenzwerte in Kraft, die nur mit geregelterm Dreiwegekatalysator einzuhalten waren. Grundsätzlich schafft ein Katalysator ökologische Entlastungseffekte durch die Verringerung der Schadstoffemissionen der Autoabgase. Hierbei werden Emissionen von nicht verbrannten Kohlenwasserstoffen (HC), vom unvollständigen Verbrennungsprodukt Kohlenmonoxid (CO) und von Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ), die sich während der Verbrennung aus dem Stickstoff der Luft bilden, sowie die Emission von Rußpartikeln, insbesondere in Dieselmotoren, reduziert. Abgaskatalysatoren wandeln die Schadstoffe in Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ) und Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) um (Abbildung 10).

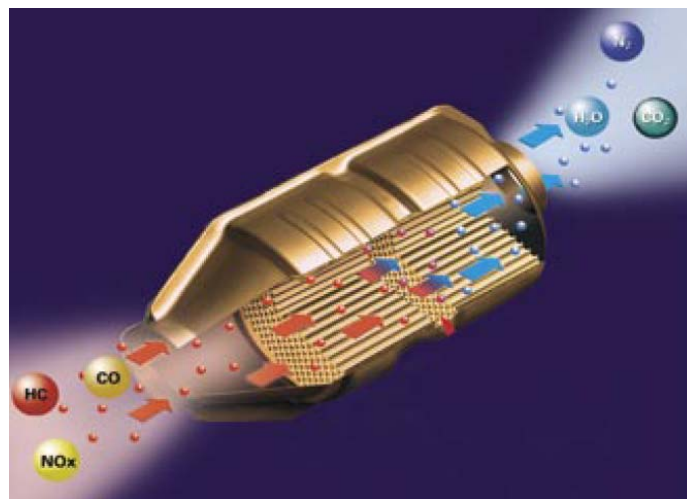


Abbildung 10: Prinzipskizze eines Abgaskatalysators (Umicore /55/)

Die heute gängigen Dreiwegekatalysatoren vereinen eine effiziente Verarbeitung der Abgase mit einer komplexen Regulierungselektronik für die Gaszufuhr zur Optimierung der chemischen Reaktionen, wobei der Dreiwegekatalysator nur in Fahrzeugen mit Ottomotor und Lambdaregelung eingesetzt werden kann. Bei einem Dieselmotor verhindert der Sauerstoffüberschuss im Abgas die Reduktion des  $\text{NO}_x$  und macht spezielle Katalysatoren erforderlich (Dieseloxidationskatalysatoren, SCR-Katalysatoren,  $\text{NO}_x$ -Speicherkatalysatoren).

**Nanotechnik:** Ein Dreiwegekatalysator besteht aus einem Edelstahl-Gehäuse, das im Innern katalytisch aktives Material enthält. Dieses befindet sich als Schicht auf einem Trägermaterial, einem Monolith aus Keramik oder Metall, und wird als Washcoat bezeichnet. Unter Washcoat werden hochporöse Schichten aus Oxiden verstanden, die hochdispersiv verteilte Partikel aus Edelmetallen enthalten. Der Washcoat vergrößert durch seine Struktur die katalytisch wirksame Oberfläche. Bei den im Washcoat katalytisch aktiven Edelmetallen handelt es sich um Kombinationen aus Platin, Rhodium und Palladium, deren Partikelgröße im nanoskaligen Bereich liegt. Seit etwa 35 Jahren werden Nanopartikel in der katalytisch aktiven Schicht eingebaut.

Das andauernde Bestreben, immer kleinere und homogenere nanoskalige Edelmetallpartikel im Autoabgaskatalysator einzusetzen, führt zu einer erhöhten Wirkung des Oberflächen/Volumen-Effektes und somit zu einer erhöhten katalytischen Wirkung der Platingruppenmetalle (PGM), woraus eine Verminderung der notwendigen PGM-Einsatzmenge resultiert.

**Forschungsprojekte:** Als ein aktuelles BMBF-Projekt im Bereich Katalysatorentechnik mit Bezug zur Nanotechnologie ist „KREM“ - Katalysator für die Abgasnachbehandlung mit reduziertem Edelmetallgehalt (2006 - 2009) zu nennen. Ziel des Projektes, an dem u.a. die Universität Erlangen-Nürnberg, die Universität Stuttgart und die Daimler AG beteiligt sind, ist die Entwicklung eines Leichtbaukatalysators für Otto- und Dieselmotoren auf der Basis einer Siliziumcarbidkeramik, wobei eine deutliche Reduzierung des Edelmetallgehaltes bei vergleichbarer katalytischer Wirkung erreicht werden soll. Diese Reduzierung des Edelmetallgehaltes soll simultan auch zu einer Einsparung von Kraftstoff führen. Ein Teilprojekt beschäftigt sich mit der nanoskaligen Siliziumkarbid (SiC)-Faserbildung in biomorphen Katalysatorträgern zur Steigerung der Strukturfestigkeit.

Ziel des BMWi-Verbundprojektes „NanoKat“ - Katalytisch aktive Nano-Werkstoffe für Oberflächen in Verbrennungsmotoren und im Abgasstrang (2005 - 2008) ist die Entwicklung, Herstellung und Erprobung nanostrukturierter, katalytisch aktiver Werkstoffe zur Reduzierung von Dieselpartikel-Emissionen aus Verbrennungsmotoren. Diese Werkstoffe sollen durch Anwendung in der Abgasnachbehandlung und ggf. auch im Verbrennungsmotor eine deutlich verbesserte Effizienz der Rußminderung in einem weiten Temperaturbereich ermöglichen und damit einen wesentlichen Beitrag zu einem umweltgerechten Verkehr leisten. Partner im Verbundprojekt sind u.a. die Volkswagen

AG, die J. Eberspächer GmbH & Co. KG und die Fraunhofer Gesellschaft (Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, Institut für Schicht- und Oberflächentechnik). In einem Teilvorhaben der Evonik Degussa GmbH werden nanoskalierte Cerioxide als Trägermaterialien für die Dieselpartikelfilter hergestellt. Ziel ist es, möglichst große katalytisch aktive Oberflächen zu schaffen.

### 2.3.2 Filtration/Separation

Als eine weitere nanotechnische Lösung zur Luftreinigung sind im Automobilbereich Nanofaserbeschichtungen in Kabinenluftfiltern (Abbildung 11) zu nennen. Kabinenluftfilter gehören als wesentlicher Bestandteil der Lüftung bzw. Klimaanlage seit etwa 15 Jahren zur Standardausrüstung in den meisten Fahrzeugen.

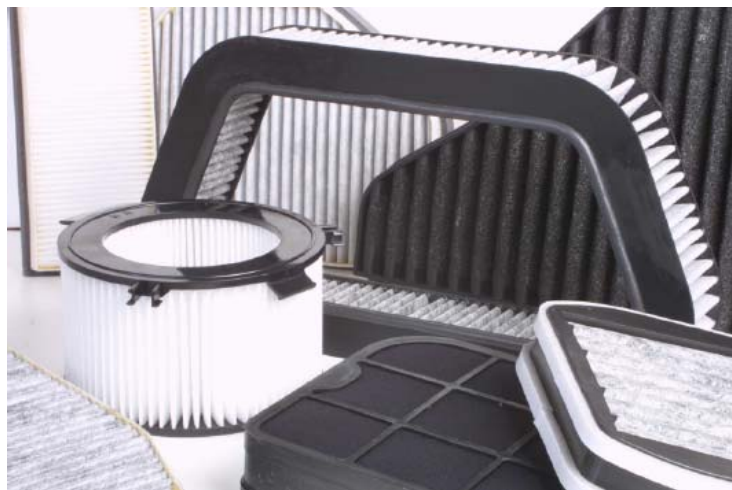


Abbildung 11: Kabinenluftfilter für die Automobilindustrie (Mann + Hummel GmbH /56/)

Hochwertige Kombifilter müssen sowohl Partikel, z.B. Pollen und Staub, als auch Gerüche aus der Zuluft entfernen. Filter, die zur Verbesserung der Filtereigenschaften zusätzlich mit Nanofasern beschichtet sind, werden beispielsweise von der Mann + Hummel GmbH (vormals helsa-automotive GmbH & Co. KG) sowie von der Hollingworth & Vose GmbH hergestellt.

Bei der Mann + Hummel GmbH kommt seit einigen Jahren zur Herstellung von nanofaserbeschichteten Filtermedien das sogenannte Elektrosponnen zum Einsatz /56/. Mit dieser Technik können Trägermaterialien mit unterschiedlichen Mengen an Nanofasern

beschichtet werden. Dabei wird eine Lösung oder Schmelze von Polymeren bipolar elektrostatisch versponnen und auf ein Trägermaterial abgelegt. Details zu diesem Verfahren werden im Rahmen der Fallstudie „Nanofaserbeschichtete Filtermedien in Kabinenluftfiltern“ (Kapitel 4.3) erläutert.

Beim Unternehmen Hollingworth & Vose wird ebenfalls die Herstellung von Filtermedien mit der Produktion von Kunststoff-Nanofasern verbunden /57/. Dabei kann ein erfolgreicher Technologietransfer aus der öffentlichen Förderung des Bundes mit der Herstellung der Filtermembran „Nanoweb“ verzeichnet werden. Dieser resultiert aus einer vom BMBF geförderten Kooperation von Wissenschaftlern der Philipps-Universität Marburg und dem Filterhersteller. Anwendungsbereiche der Filtermedien liegen u.a. in der Luftfiltration (Entstaubung) in Industrieanlagen, in der industriellen und (auto-)mobilen Abluftfiltration sowie in der Zuluftfiltration für Gasturbinen /58/.

**Forschungsprojekte:** Ein weiteres Beispiel einer nanotechnischen Anwendung im Luftsektor stellen nanoporöse Metallmembranen dar, die am Institut für Werkstoffe der Technischen Universität Braunschweig entwickelt werden /59/. Das Material weist eine feinporige Struktur auf, deren Homogenität die heute eingesetzter metallischer Materialien übertrifft und daher vielfältige Einsatzmöglichkeiten im Mikro- und Nanobereich verspricht. Der Werkstoff eignet sich für Anwendungen als Filter gegen Viren und Bakterien, Abgase und möglicherweise lungengängige Partikel. Vorteil des metallischen Werkstoffes gegenüber vergleichbaren nanoporösen Materialien (z.B. aus Keramik) ist seine mechanische Belastbarkeit sowie seine thermische und elektrische Leitfähigkeit. Um das industrielle Anwendungspotenzial zu spezifizieren, liegt der Forschungsschwerpunkt in der Entwicklung und Optimierung des Herstellungsprozesses der nanoporösen Membranen sowie in der Charakterisierung der Materialeigenschaften.

Auch in dem Projekt „NANOGLOWA“ - Nano-structured Membranes against Global Warming arbeiten 26 Einrichtungen und Unternehmen aus 14 verschiedenen europäischen Ländern an der Entwicklung optimaler nanostrukturierter Membranen /60/. Unter Beteiligung von Universitäten, Kraftwerksbetreibern, der Industrie sowie kleinen und mittelständischen Unternehmen wird NANOGLOWA als integriertes Projekt von der Europäischen Kommission mit Mitteln aus dem 6. Forschungsrahmenprogramm gefördert. Ziel ist es, als Alternative zur konventionellen Rauchgaswäsche nanostrukturierte Membranen zur Abtrennung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) aus Kraftwerksabgasen zu entwi-



ckeln. Hintergrund ist, dass gegenwärtig CO<sub>2</sub>-Emissionen eine Bedrohung für das weltweite Klima darstellen und eine unterirdische Speicherung des Treibhausgases, u.a. in leeren Gasfeldern und Aquiferen, im Rahmen unterschiedlicher Machbarkeitsstudien und Demonstrationsprojekte untersucht wird. Mehr als ein Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Europa stammen aus fossil befeuerten Kraftwerken. Die Speicherung von aus Kraftwerken stammenden CO<sub>2</sub> erfordert die Abtrennung und das Auffangen des Gases. Derzeit erfolgt die Trennung des CO<sub>2</sub>-Gases von den anderen Bestandteilen des Rauchgases zumeist mittels Absorption des Gases. Das Rauchgas strömt durch mehrere Bäder, in denen CO<sub>2</sub> an Amine gebunden wird. Diese „Waschtechnik“ benötigt viel Energie und erfordert zudem sehr große Rauchgaswäscher. Die Nutzung von nanostrukturierten Membranen zum Auffangen und Abtrennen von CO<sub>2</sub> kann den Energieeintrag und die Anlagenanforderungen wesentlich verringern /60/.

### **2.3.3 Nanokatalysatoren**

In der Luftreinigung ermöglichen Nanokatalysatoren wie bei den Anwendungen im Wassersektor die nachhaltige Entfernung von Schadstoffen. Mit dem Abbau von Luftschadstoffen und der Selbstreinigung durch dünne Schichten aus Nano-Titandioxid beschäftigt sich u.a. eine Arbeitsgruppe an der Universität Kassel /61/.

Als ein Praxisbeispiel ist ein Zement (TioCem premium) der Heidelberg cement AG anzuführen /62/. Der Portlandhüttenzement hat durch die Verwendung von nanokristallinem Titandioxid photokatalytische Eigenschaften und erzielt eine Reduktion von Stickoxiden, die in der das Betonbauteil umgebenden Luft enthalten sind. Durch die Verwendung des Zements in Beton werden photokatalytisch aktive Betonoberflächen geschaffen, die einen Beitrag zur Luftreinhaltung in Städten leisten können. Da die Photokatalyse als eine durch Licht angeregte Reaktion an der Bauteiloberfläche abläuft, kommen Beschichtungen mit dem Produkt u.a. bei Pflastersteinen, Fassadenverkleidungselementen, Außenputzen und Fahrbahndecken zum Einsatz. Darüber hinaus ist der Zement für die Herstellung von Transportbeton und Betonfertigteilen geeignet.

Das Umweltentlastungspotenzial selbstreinigender Fassaden aus mit Titandioxid modifiziertem Zement ist in geringeren Aufwendungen für Gebäudereinigung und Renovierung zu sehen. Während sich der Einsatz von Photokatalysatoren in anderen Materialien wie selbstreinigendem Glas in der Praxis bereits bewährt hat, steht der Einsatz von photokatalytischem Zement allerdings noch am Beginn der Praxisreife /63/. Als An-

wendungsbeispiel ist ein Bürogebäude der Firma Decomo in Mouscron, Belgien zu nennen, wo photokatalytische Betonfassadenelemente in Verbindung mit selbstreinigendem Glas und selbstreinigenden Aluprofilen zum Einsatz kommen /64/.

### **3 Chancen und Risiken von Nanomaterialien**

Im August 2006 veröffentlichte das Umweltbundesamt das Hintergrundpapier „Nanotechnik: Chancen und Risiken für Mensch und Umwelt“, das den Stand des Wissens über Chancen und Risiken der Nanotechnik zusammenfasst /65/. Dargestellt werden Umweltentlastungs- und Umweltbelastungspotenziale sowie mögliche gesundheitliche Risiken und ökotoxikologische Aspekte durch den Einsatz von Nanotechniken. Zu den angeführten Umweltentlastungspotenzialen zählen:

- Einsparung von Rohstoffen durch Miniaturisierung (z.B. Sensoren in der Biomedizin - geringes Gewicht/energieeffizienter Betrieb -, Verringerung von Schichtdichten bei nanoskaligen Beschichtungs- und Katalysatormaterialien, optimierte Materialien im Leichtbau, hochspezifische Membranen in der Biotechnik)
- Einsparung von Energie durch Gewichtsreduktion oder durch Funktionsoptimierung (z.B. nanotechnikbasierte Meerwasserentsalzung, Leuchtdioden, organische Solarzellen/Farbstoffsolarzellen)
- Verbesserung der Reinigungsleistung von Filtersystemen (z.B. nanoporöse Membranen in der Abwasserbehandlung, Abgasreinigung)
- Verminderung des Einsatzes oder Ersatz der Verwendung gefährlicher Stoffe (z.B. Infektionsschutz durch Beschichtungen in der Medizintechnik, biozide Beschichtungen auf Textilien, Korrosionsschutz für Metalle, Nanokatalysatoren)
- Gesundheitsschutz durch Verwendung als Therapeutika (z.B. bei Gehirnhautentzündung).

In Hinblick auf den Einsatz der Nanotechnik im Umweltbereich haben diese Umweltentlastungspotenziale (mit Ausnahme des letzten Aspektes) auch für die vorgenannten Anwendungen in den Bereichen Wasser- und Luftreinhaltung Gültigkeit.

Während zunächst das Innovationspotenzial der Nanotechnologie im Vordergrund stand, wurde in den letzten Jahren zunehmend auch auf mögliche Gesundheits- und

Umweltrisiken von Nanomaterialien hingewiesen. Um mögliche Risiken zu identifizieren und dann zu vermeiden, haben das BMBF und die EU-Kommission in den vergangenen Jahren eine Reihe von Forschungsprojekten gefördert. Zu nennen sind u.a. die seitens des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekte „NanoCare“, „INOS“ und „Tracer“ sowie auf europäischer Ebene die Vorhaben „NanoSafe1“, „NanoSafe2“, „Particle\_Risk“, „NanoDerm“ und „Impart/Nanotox“.

Des Weiteren hat das Bundesumweltministerium Ende 2006 den NanoDialog gestartet. Ziel ist es, mit Hilfe der Nanokommission eine nachhaltige und zukunftsfähige Entwicklung und Nutzung der Nanotechnologie mit dem Schwerpunkt Nanomaterialien zu unterstützen. Die Nanokommission ist als Stakeholder-Dialog mit Vertretern aus Wirtschaft, Wissenschaft, Nichtregierungsorganisationen und staatlichen Instanzen strukturiert. Die Arbeit der Nanokommission erfolgt in drei Arbeitsgruppen (AG), die sich mit Chancen für Umwelt und Gesundheit (AG 1) sowie Risiken und Sicherheitsforschung (AG 2) befassen und einen Leitfaden für einen verantwortungsvollen Umgang mit Nanomaterialien (AG 3) erarbeiten. Die Ergebnisse sollen eine Grundlage für die Information der Öffentlichkeit bieten und bei Bedarf Handlungsempfehlungen an die Behörden ermöglichen. Der Abschlussbericht der Nanokommission mit einer Bestandsaufnahme der bisherigen Arbeit wurde im November 2008 veröffentlicht /66/.

In Deutschland beschäftigt sich zudem der Arbeitskreis „Responsible Production and Use of Nanomaterials“ der Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA) und des Verbandes der Chemischen Industrie e.V. (VCI) mit Maßnahmen zum verantwortungsvollen Umgang mit Nanotechnologien. Zur Schließung von Wissenslücken in den Bereichen Gesundheit, Sicherheit und Umweltschutz bei der Herstellung und Verwendung von Nanomaterialien veröffentlichte der VCI gemeinsam mit der DECHEMA 2007 die folgenden zwei Beiträge, die jeweils mit einer Prioritätenliste für das 7. Europäische Forschungsrahmenprogramm und nationale Forschungsprogramme verbunden sind:

- Roadmap for Safety Research on Nanomaterials /67/
- Environmental Aspects of Nanoparticles /68/

Darüber hinaus sind in den letzten Jahren mehrere Publikationen erschienen, in denen sich die Versicherungswirtschaft mit den Risiken der Nanotechnologie auseinandersetzt. Hierzu zählen u.a. „Nanotechnologie. Kleine Teile - große Zukunft?“ der Swiss

Reinsurance Company (2004), „Opportunities and risks of Nanotechnologies“ (2005), eine Studie, die im Wege der Kooperation zwischen der Allianz und der OECD entstanden ist, sowie „Nanotechnology recent developments, risks and opportunities“ aus dem Jahr 2007 (/69/ - /71/).

Kernpunkte einer Risikoabschätzung von Nanomaterialien im Umweltschutz sind u.a. die Bewertung der Exposition von Mensch und Umwelt sowie toxikologische und ökotoxikologische Aspekte. Erste Forschungsarbeiten zu Gefährdungspotenzialen von Nanomaterialien erfolgten in den letzten Jahren u.a. in den oben angeführten nationalen und internationalen Programmen. Dennoch wird allgemein die Notwendigkeit gesehen, durch weitere Forschungs- und Bewertungsaktivitäten die vorhandenen Wissenslücken zu schließen und geeignete Instrumente für eine umfassende Risikoanalyse abzuleiten. Deshalb haben die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, das Bundesinstitut für Risikobewertung und das Umweltbundesamt eine gemeinsame Forschungsstrategie „Nanotechnologie: Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanopartikeln“ erarbeitet /72/. Darin wird zum Beispiel in Bezug auf den Umweltschutz ein dringender **Forschungsbedarf** in den folgenden Bereichen formuliert:

- Identifikation der relevanten Parameter zu Verhalten und Verbleib in der Umwelt
- Exposition, Persistenz und Akkumulation von Nanomaterialien in den Kompartimenten Wasser, Boden und Sediment
- Entwicklung von einheitlichen Standards für das Testen von Nanomaterialien.

In Bezug auf die regulatorische Situation zu synthetischen Nanomaterialien ist anzumerken, dass diese derzeit diskutiert wird. Während z.B. für eine Umweltrisikoprüfung von Chemikalien Standardverfahren zur Verfügung stehen, besteht noch keine Einigung darüber, ob vorhandene Richtlinien auch für die ökotoxikologische Untersuchung von Nanomaterialien einsetzbar oder inwieweit Modifikationen erforderlich sind /73/. Für eine umfangreiche Betrachtung des Themas sei auf das im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellte „Rechtsgutachten Nano-Technologien - ReNaTe“ aus dem Jahr 2007 hingewiesen, das den bestehenden Rechtsrahmen und den Regulierungsbedarf zusammenfasst, Regulierungsmöglichkeiten auf europäischer und nationaler Ebene aufzeigt und Empfehlungen zum weiteren regulatorischen Vorgehen formuliert /74/.

Die BMBF-Bekanntmachung „NanoNature: Nanotechnologien für den Umweltschutz - Auswirkungen synthetischer Nanomaterialien auf die Umwelt“ vom Mai 2008 trägt dem

Forschungsbedarf zu Eintrag, Verteilung, Verbleib und Wirkung von synthetischen Nanopartikeln und -materialien in der Umwelt Rechnung /75/. Neben einem Themenschwerpunkt 1, der sich auf die Chancen der Nanotechnologie für den Umweltschutz konzentriert, stehen im Schwerpunkt 2 „Auswirkungen synthetischer Nanopartikel und -materialien auf die Umwelt“ folgende Punkte im Fokus der Förderung:

- Aufstellung von Struktur-Wirkungs-Beziehungen (Leitstrukturbestimmung), Erforschung von Wirkmechanismen und relevanten Wirkschwellen zur ökotoxikologischen Bewertung
- Parameterbestimmung (z.B. Größe/Oberfläche, Kristallstruktur, Agglomerationsverhalten, Suspendierbarkeit) auch unter Berücksichtigung der natürlichen Hintergrundbelastung
- Erarbeitung von Basistechniken und Standardtestverfahren, Etablierung von Referenzmaterialien, Reproduzierbarkeit und Modelling
- Untersuchungen zur Stabilität der Funktionalität und zum Eintrag der Partikel in die Umwelt (z.B. Analyse von Aufnahmemechanismen, Eintragsmengen, Eintragsformen, Abbauprodukte und Bioakkumulation)
- Mobilität und Transformation der Partikel (z.B. Bioverfügbarkeit, Persistenz, Metamorphose, Multigenerationseffekte, Mischungstoxizität, Transporteffekte, Langzeiteffekte)
- Risikoabschätzung an realen Matrices (z.B. Bestätigung der Ergebnisse durch umweltrelevante Untersuchungen, Ableitung und Übertragbarkeit von Gesetzmäßigkeiten)

Des Weiteren sollen in zukünftigen Projekten im Rahmen von NanoNature im Zusammenhang mit den Schwerpunkten 1 und/oder 2 Entwicklungen von Messmethoden zur Charakterisierung von Nanopartikeln in Luft, Wasser und Boden gefördert werden, da eine durchgängige Messtechnik zur qualitativen und quantitativen Bestimmung von Partikeln im Nanometerbereich auch unter dem Einfluss natürlicher Hintergrundbelastungen bislang nicht etabliert ist /75/.

## 4 Ökobilanzielle Betrachtungen

### 4.1 Methodik

Das gestiegene Bewusstsein über die Bedeutung des Umweltschutzes und möglicher Umweltauswirkungen, die mit der Herstellung und Anwendung von Produkten im Zusammenhang stehen, haben das Interesse an Methoden, die dem besseren Verständnis und der Verringerung möglicher schädlicher Wirkungen dienen, erhöht. Eine der dafür entwickelten Methoden ist die Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA).

Ökobilanzen untersuchen die Umweltauswirkungen im Verlauf des Lebensweges eines Produktes und können generell helfen:

- Möglichkeiten zur Verbesserung der Umwelteigenschaften aufzuzeigen
- Entscheidungsträger zu informieren (z.B. bei der strategischen Planung, Prioritätensetzung, Produkt- oder Prozessentwicklung)
- relevante Indikatoren der Umwelteigenschaften neuer Produkte auszuwählen
- beim Marketing (z.B. beim Erstellen einer Umweltdeklaration eines Produktes).

Das methodische Vorgehen für eine ISO-konforme Ökobilanzierung ist in den folgenden zwei Normen festgelegt. Letztere fasst die bisherigen Einzelnormen ISO 14041 bis 14043 zusammen:

- DIN EN ISO 14040:2006-10 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen
- DIN EN ISO 14044:2006-10 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen

Eine Ökobilanz-Studie umfasst vier Phasen (Abbildung 12). Im ersten Schritt werden der Untersuchungsrahmen und das Ziel der Ökobilanz in Abhängigkeit des Untersuchungsgegenstandes und der vorgesehenen Anwendung der Studie definiert.

In der Sachbilanz erfolgen die Bestandsaufnahme und die Quantifizierung produktspezifischer Input- und Outputdaten (Stoff- und Energieströme), die im Verlauf des Lebensweges eines Produktes anfallen.

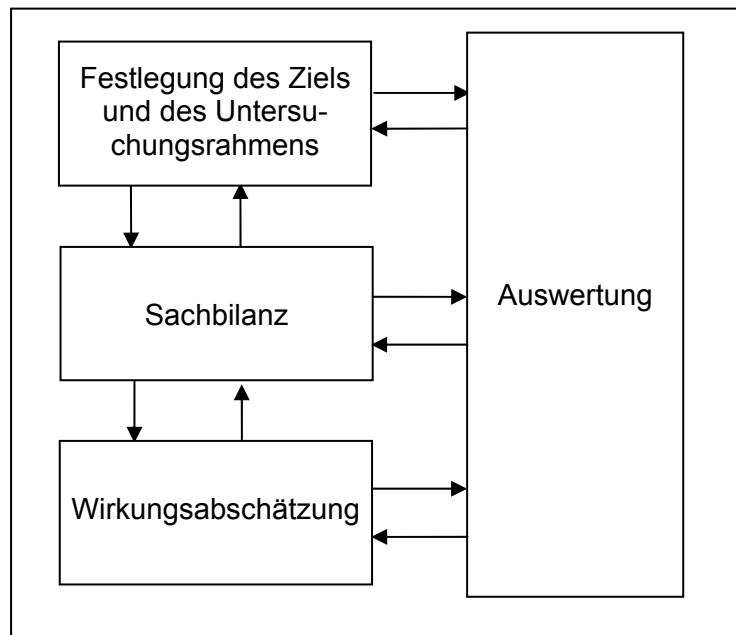


Abbildung 12: Phasen einer Ökobilanz (DIN EN ISO 14044)

In der Wirkungsabschätzung werden potenzielle Umweltwirkungen des Produktsystems beurteilt, indem die Sachbilanzergebnisse so weit wie möglich bestimmten Wirkungskategorien (z.B. Treibhauseffekt, Versauerung, Eutrophierung) zugeordnet und innerhalb dieser Kategorien aggregierte Werte berechnet werden.

Die Auswertung ist die abschließende Phase der Ökobilanz, in der die Ergebnisse aus der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung diskutiert und zu einer Endaussage zusammengefasst werden. Das Erstellen einer Ökobilanz ist durch eine iterative Vorgehensweise gekennzeichnet. So kann z.B. der Untersuchungsrahmen an Informationen angepasst werden, die während der Erstellung der Sachbilanz gewonnen werden.

Zur Bewertung der mit dem Lebensweg nanotechnischer Produkte verbundenen Umweltaspekte wurden ökobilanzielle Methoden bislang nur selten angewandt; hier besteht noch Forschungsbedarf. Entsprechend wenige Untersuchungen zu Life-Cycle-Aspekten finden sich zu nanotechnischen Lösungen für die Wasser- und Luftreinhaltung. So wurden beispielsweise in zwei Studien Life-Cycle-Aspekte für Autoabgaskatalysatoren unter dem Aspekt des nanoskaligen Einsatzes von Platingruppen-Metallen untersucht (/76/, /77/). Des Weiteren beinhaltet eine vom Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung ISI durchgeführte Untersuchung aus dem Jahr

2004 eine ökologische Bewertung von Verfahren (u.a. Nanofiltration) für die Trinkwasserenthärtung /78/.

In den Studien können häufig nicht alle in den Normen vorgeschriebenen Aspekte in vollem Umfang umgesetzt werden. Daher wird im Folgenden, auch in Bezug auf die zwei im Rahmen der vorliegenden Studie betrachteten Fallbeispiele, nicht von Ökobilanzen gesprochen, sondern von ökobilanziellen Betrachtungen in Anlehnung an DIN EN ISO 14040 und 14044.

## **Software**

Die Modellierungen der folgenden zwei Fallstudien wurden mit der Software Umberto<sup>®</sup>, Version 5.5 seitens der ifu (Institut für Umweltinformatik) Hamburg GmbH durchgeführt.

Umberto<sup>®</sup> wurde in Kooperation der ifu Hamburg GmbH und der Institut für Energie und Umweltforschung (ifeu) Heidelberg GmbH entwickelt. Die Software unterstützt den Anwender bei der Erstellung, Berechnung und Visualisierung der Stoff- und Energieströme eines Systems. Die Software beinhaltet eine umfangreiche eigene Datenbank mit Bilanzen verschiedener Prozesse, die beispielsweise für die Berücksichtigung von Vorketten eines Produktes hinzugezogen werden können, und unterstützt den Import von Daten aus der ecoinvent-Datenbank, die vom Schweizer Zentrum für Ökoinventare (ecoinvent Centre) entwickelte wurde.

Die Datenbank ecoinvent umfasst ein qualitativ hochwertiges Portfolio an Sachbilanzdaten. Diese wurden systematisch von Ökobilanz-Fachleuten erarbeitet und in einem mehrstufigen Verfahren auf ihre Konsistenz überprüft. In der seit November 2007 eingesetzten Version 2.0 sind rund 4.000 Datensätze aus den Bereichen Bauwesen, Chemikalien, Elektronik, Energie, Landwirtschaft und Transport enthalten. Zudem sind in ecoinvent auch verschiedene Bewertungsmethoden (z.B. Eco-indicator 99, CML 2001) zur Erstellung von Wirkungsabschätzungen implementiert.



## Bewertungsmethoden

Für den Schritt der Wirkungsabschätzung existieren eine Reihe unterschiedlicher Bewertungsmethoden. Nachfolgend werden beide Fallstudien mit Hilfe der Bewertungsmethoden Eco-indicator 99 bzw. CML 2001 analysiert.

Die in den Niederlanden entwickelte Methode **Eco-indicator 99** /79/ beruht auf dem Konzept der Schadensmodellierung. In Anhang 2 sind die verschiedenen Modellierungsschritte und Resultate der Bewertungsmethode Eco-indicator 99 dargestellt. Die Schutzgüter, deren Beeinträchtigungen mit Hilfe einer Ökobilanz quantifiziert werden, sind:

- Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit (Unterkategorien: radioaktive Strahlung, Klimawandel, krebserregende Stoffe, Atemwegserkrankungen, Ozonabbau)
- Qualität des Ökosystems (Landnutzung, Versauerung und Eutrophierung, Ökotoxizität)
- Ressourcen (Mineralien und fossile Brennstoffe).

Die letztliche Aggregierung der Schadenskategorien erfolgt auf Grund der Ergebnisse eines Experten-Panels, bei dem „Gesundheit“ und „Ökosystemqualität“ eine in etwa gleiche Gewichtung erhielten, während die Kategorie „Ressourcen“ etwa als halb so bedeutend eingeschätzt wurde. Kenngröße zur Bewertung sind die sogenannten Eco-indicator 99-Punkte (EIP99). Eine hohe Punktzahl bedeutet dabei eine starke Beeinträchtigung der Umwelt.

Zusätzlich wird die **CML-2001-Methode** /80/ verwendet, um auf einzelne Wirkungskategorien einzugehen. Bei der am Centre of Environmental Science an der Universität Leiden, Niederlande, entwickelten Methode werden die in der Sachbilanz ermittelten Daten ebenfalls Wirkungskategorien zugeordnet. U.a. sind die Kategorien abiotischer Ressourcenverbrauch, Treibhaus-, Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial enthalten.

Die Wirkungsanalyse nach CML ist keine aggregierende Methode, d.h. es erfolgt keine Gewichtung der einzelnen Wirkungskategorien, die Ergebnisse bleiben auf dem Niveau eines Wirkungsprofils.

## 4.2 Fallstudie 1: Solare Wasserbehandlung

Im Rahmen dieser Fallstudie erfolgt eine ökobilanzielle Betrachtung von zwei Ansätzen zur solaren Behandlung von mit Tetrachlorethen (Perchloräthylen, PCE) belastetem Wasser. Untersucht wird der Einsatz von nanoskaligem Titandioxid (Halbleiter-Photokatalyse) in Kombination mit Sauerstoff im Vergleich zur Anwendung von Eisen(II)-Verbindungen mit Wasserstoffperoxid (Photo-Fenton-Verfahren).

Die Datenerhebung erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln, das Reaktoren zur Photokatalyseforschung betreibt.

### 4.2.1 Basisinformationen

Als Alternative oder Ergänzung zu konventionellen Verfahren zur Wasserreinigung ermöglicht die Photokatalyse u.a. den Abbau von organischen Schadstoffen, die mit anderen Verfahren nicht oder nur schwer abbaubar sind. Wie in Kapitel 2.2.4 erläutert, erfolgt bei der photokatalytischen Wasserreinigung die chemische Umsetzung organischer Schadstoffe auf der Oberfläche eines belichteten Halbleiters (z.B. Titandioxid). Je nach Intensität der Anwendung können die im Wasser enthaltenen Stoffe dabei partiell oder vollständig oxidiert werden.

Die erforderliche Strahlungsenergie kann entweder durch das natürliche Sonnenlicht (UV-Anteil) oder künstliche Lichtquellen bereitgestellt werden. Dieses ermöglicht, falls erforderlich, einen 24-Stunden-Betrieb und trägt vor allem bei der Nutzung von Sonnenlicht zur Nachhaltigkeit der Technologie bei. Insbesondere in Ländern mit starker Sonneneinstrahlung eröffnen sich aus diesem Grund besondere Perspektiven für die solare Wasserreinigung. So stellen z.B. in Almeria (Spanien) vorhandene Pilotanlagen auf der Plataforma Solar de Almeria (PSA) umfassende Einrichtungen zur Untersuchung von photokatalytischen Prozessen mit Sonnenlicht dar /81/.

### Titandioxid als Photokatalysator

Nach einer Periode intensiver Laborstudien hat die solare Wasserbehandlung mit Titandioxid als Photokatalysator seit etwa Mitte der 1990er Jahre das Stadium von Pilotanlagen erreicht /82/. So wurde die Anwendbarkeit der solaren Detoxifizierung auf reale, biologisch nicht zu reinigende Ab- und Grundwässer u.a. von verschiedenen Forschergruppen in Europa und in den USA demonstriert. Neben Experimenten mit Mo-

dellschadstoffen (z.B. Dichloressigsäure /28/) im kleinen Maßstab erfolgten Untersuchungen an real anfallenden Prozessabwässern oder Grundwässern. Beispielhaft sind Anwendungen der Photokatalyse an Titandioxid bei der Reinigung biologisch vorbehandelten Deponiesickerwassers /82/, bei Belastungen durch verschiedene Pestizide und Herbizide /83/, Trinitrotoluol (TNT) oder andere nitroaromatische Verbindungen /84/ zu nennen. Untersuchungen zur solaren Behandlung mit chlorierten Lösungsmittelrückständen belasteten Grundwassers (Hauptkomponente Trichlorethen, TCE) einer sogenannten „Superfund Site“ wurden auf dem Gelände des Lawrence Livermore National Laboratories in Kalifornien durchgeführt /85/. Weitere Versuche zur solaren Detoxifizierung TCE-belasteten Wassers erfolgten u.a. in Korea /86/.

In vielen der in der Literatur beschriebenen Versuche kommt als Photokatalysator Titandioxid P 25 zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ein durch Flammenhydrolyse von Titan-tetrachlorid (AEROSIL®-Verfahren) hergestelltes Titandioxid aus dem Hause der Evonik Degussa GmbH. Nach Herstellerangaben /87/ hat das P 25 Primärteilchen mit einem mittleren Durchmesser von etwa 21 nm. Die kleinen Primärteilchen und die relativ hohe Dichte von ca.  $4 \text{ g/cm}^3$  bedingen eine spezifische Oberfläche von etwa  $50 \text{ m}^2/\text{g}$ . Als weiterer deutscher Anbieter von Titandioxid (Hombikat UV 100) ist die Sachtleben Chemie GmbH zu nennen.

### **Photokatalyseforschung am DLR**

Die Datenerhebung im Rahmen der vorliegenden Fallstudie erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Köln.

Im Rahmen des Projektes SOWARLA (vgl. Kapitel 2.2.4) wurden neben der Entwicklung der  $32 \text{ m}^2$  großen Anlage erste Versuche zur Behandlung PCE-belasteten Wassers im semitechnischen Maßstab (Prototypanlage  $7,4 \text{ m}^2$ , Abbildung 13) durchgeführt. Mit der installierten Receiverfläche von  $7,4 \text{ m}^2$  können mit der Anlage 100 Liter belasteten Wassers batchweise behandelt werden. Das Wasser wird dabei aus einem Vorlagebehälter zur Wasserreinigungsanlage gepumpt. Nach Zugabe von Reagenzien fließt das Wasser über einen Wasserverteiler gleichmäßig durch alle Glasrohre des Receivers. Abschließend erfolgt die Sammlung des behandelten Wassers. Die Behandlungsdauer ist von der Einstrahlung sowie der Belastung des Wassers abhängig.

Neben Fentons Reagenz erfolgte im Rahmen der Untersuchungen auch der Einsatz nanoskaligen Titandioxids zur Halbleiter-Photokatalyse. Die Ergebnisse dieser in der 7,4 m<sup>2</sup> großen Anlage in Köln durchgeführten (Vor-)Versuche sind Grundlage der vorliegenden Fallstudie.



Abbildung 13: Solare Wasserreinigungsanlage (Prototyp 7,4 m<sup>2</sup>), DLR Köln

#### 4.2.2 Ziel und Untersuchungsrahmen

##### Ziel der Studie

Ziel dieser Fallstudie ist die ökobilanzielle Betrachtung von zwei Ansätzen zur solaren Behandlung PCE belasteten Wassers. Die Untersuchung analysiert die Umweltentlastungs- und Umweltbelastungspotenziale, die sich bei den folgenden zwei Varianten ergeben:

- Ansatz 1: Halbleiter-Photokatalyse unter Einsatz von nanoskaligem Titandioxid P 25 in Gegenwart von Sauerstoff und einem initialen pH-Wert von 7
- Ansatz 2: Photo-Fenton-Verfahren unter Einsatz von Eisen(II)-sulfat-Heptahydrat als Katalysator und Zusatz von Wasserstoffperoxid bei einem konstanten pH-Wert von 3 (Einstellung mit Schwefelsäure, Neutralisation nach Versuchsende mit Natronlauge)

## **Zielgruppen und Anwendung der Ergebnisse**

Die Ergebnisse können von Planern und Betreibern von Abwasserreinigungs- und Grundwassersanierungsanlagen genutzt werden. Hintergrund ist, dass der Einsatz von Tetrachlorethen bzw. generell von leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffen (LCKW) in Industrie und Gewerbe (z.B. Metallindustrie, chemische Reinigungen) weit verbreitet war. Oftmals gelangten in der Vergangenheit LCKW z.B. durch unsachgemäßen Umgang oder Unfälle in den Untergrund. Daher treten die zu den LCKW zählenden Stoffe Tetrachlorethen und Trichlorethen als häufige Kontaminanten des Grundwassers auf. Dieses ist u.a. dadurch belegt, dass sich die Mehrzahl der von Behörden angeordneten Grundwassersanierungen auf die chlorierten Kohlenwasserstoffe bezieht /88/. Die Zielgruppe umfasst daher auch Beratungsinstitutionen und Umweltbehörden.

## **Funktion und funktionelle Einheit**

Die zu untersuchende Funktion ist die solare Behandlung von schadstoffbelastetem Wasser. Es wird von künstlich mit PCE angereichertem Wasser (Konzentration 10 mg/l) ausgegangen, welches in einem Reaktor unter Einsatz von Titandioxid bzw. Fentons Reagenz unter Einwirkung von Sonnenlicht behandelt wird.

Als funktionelle Einheit wird die solare Reinigung von 100 Liter PCE belasteten Wassers (Ausgangskonzentration 10 mg/l) betrachtet. Die gewählte Ausgangskonzentration stellt eine typische Grundwasserbelastung an kontaminierten Standorten dar. Behandlungsziel ist eine PCE-Restbelastung  $< 10 \mu\text{g/l}$ . Die Restbelastung ist z.B. vor dem Hintergrund der Vorgaben des Merkblattes ALEX 02 /89/ zu sehen, das dem einheitlichen Vollzug der Bodenschutz- und Altlastenbearbeitung in Rheinland-Pfalz dient. Darin ist eine LHKW-Konzentration von  $10 \mu\text{g/l}$  angegeben, die dekontaminiertes Wasser in der Regel unterschreiten muss, um im Rahmen einer Sanierung wieder ins Grundwasser oder in ein Gewässer eingeleitet zu werden.

Da im Rahmen der Vorversuche des DLR noch keine hinreichend zuverlässige Analytik für Perchlorethylen etabliert werden konnte, wurde die PCE-Dechlorierung anhand der Entstehung des Reaktionsproduktes Chlorid dokumentiert und das Erreichen einer stationären Chloridkonzentration als Ersatzkriterium betrachtet.

## Systemgrenze

Ein Fließbild der solaren Wasserbehandlung ist in Abbildung 14 dargestellt. Im Folgenden werden die erforderlichen Materialien zum Aufbau des Reaktors inklusive ihrer Produktion (Vorketten) sowie der Energiebedarf für die Versuchsdurchführung berücksichtigt. Des Weiteren werden für die zwei Ansätze die jeweils eingesetzten Chemikalien inklusive ihrer Herstellung (Vorketten) in die Bilanzierung einbezogen.

Im Modul „Nachbehandlung/Entsorgung“ sind in Abhängigkeit der Reinigungsleistung der Anlage sowie der geplanten Verwendung des Wassers und der Betriebsmittel ggf. weitere Schritte notwendig (z.B. Neutralisation des behandelten Wassers in Variante 2; Einleitung in eine biologische Klärstufe). Des Weiteren ist eine Separation und Rückführung einzelner Chemikalien (z.B. Abtrennung des Titandioxids vom gereinigten Wasser mittels Sedimentation) denkbar. Im Rahmen dieser Studie bleibt aufgrund fehlender Versuchsdaten dieses Modul jedoch im Folgenden unberücksichtigt.

Eine weitergehende Betrachtung unter Einbeziehung von Nachbehandlung und Entsorgung sollte nach entsprechender Erweiterung der Anlagentechnik und im Rahmen zukünftiger Untersuchungen erfolgen. Um einen Ausblick auf eine Anlage größeren Maßstabs zu geben, wurde seitens des DLR eine Hochrechnung auf einen Reaktor mit einer Receiverfläche von 200 m<sup>2</sup> durchgeführt (s. Ausblick in Kapitel 4.2.4).

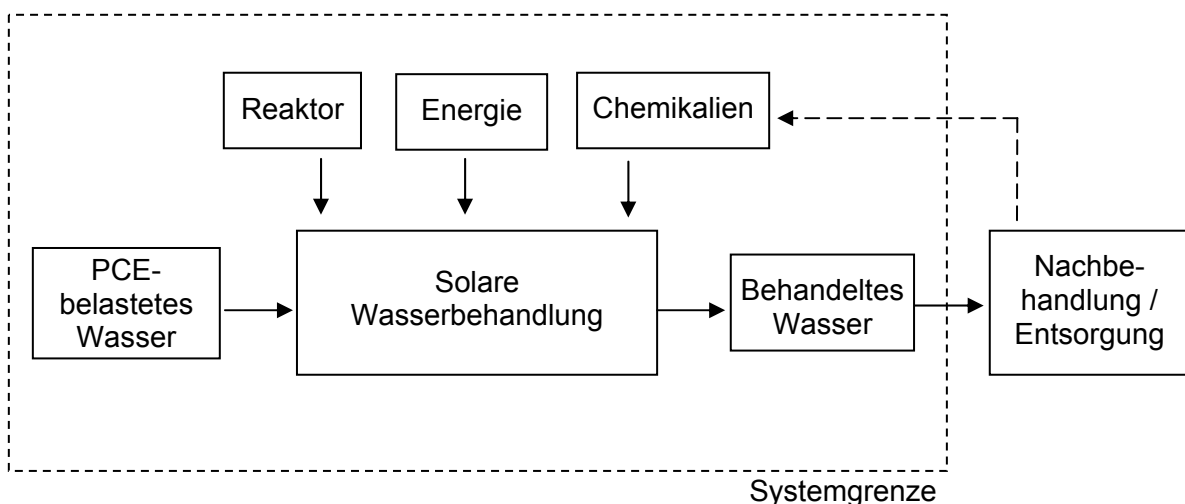


Abbildung 14: Schema der solaren Wasserbehandlung

## Datengrundlage

Für die vorliegende Fallstudie wurden im Wesentlichen Daten aus den Untersuchungen des DLR im Rahmen des Projektes SOWARLA aus dem Jahr 2008 herangezogen. Zu betonen ist, dass es sich dabei um erste Versuche zur solaren Reinigung PCE-belasteten Wassers in der 7,4 m<sup>2</sup> großen Prototypanlage (Abbildung 13) handelt. Informationen und Daten liegen daher für den Großteil der Prozesse innerhalb der in Abbildung 14 skizzierten Systemgrenze vor. Für die Sachbilanzdaten der Vorketten der beim Bau und Betrieb des Reaktors eingesetzten Materialien und Betriebsmittel wurden Standardmodule aus der Datenbank ecoinvent, Version 2.0 verwendet.

### 4.2.3 Sachbilanz

Im Folgenden werden die Materialien für den Aufbau der Prototypanlage angeführt sowie die seitens des DLR durchgeführten Versuchsserien erläutert.

### Wasserbehandlungsanlage

Betrachtet wird die Prototypanlage des DLR mit einer Receiverfläche von 7,4 m<sup>2</sup>. Für beide Verfahren wird derselbe Reaktor eingesetzt. Tabelle 1 zeigt die notwendigen Materialien für den Receiver, die Aufständering und die Fluidverteilung. Anzumerken ist, dass der Materialbedarf aufgrund des Versuchsstadiums als überproportional hoch einzustufen ist. Vor diesem Hintergrund ist die folgende Bilanzierung des Reaktors als eine orientierende Untersuchung zu verstehen.

Tabelle 1: Bilanzparameter - Materialien Prototypanlage (7,4 m<sup>2</sup>)

Material	Wert
Glas [kg]	53,0
Kunststoffe	
- Polypropylen [kg]	67,1
- Dichtungsmaterial [kg]	4,9
- Polyamid [kg]	4,7
Aluminium [kg]	17,8
Edelstahl [kg]	72,2
Beton [t]	1,6

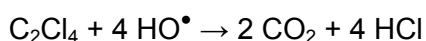
## Solarversuche des DLR

Im Rahmen der im Juli 2008 durchgeführten Batchversuche wurden jeweils 100 Liter PCE-belasteten Wassers behandelt. Dabei kamen bei den zwei Ansätzen die in Tabelle 2 angeführten Stoffe zum Einsatz.

Tabelle 2: Bilanzparameter - Versuchsdurchführung (Volumen 100 Liter)

Betriebsmittel / Parameter	Ansatz 1: Halbleiter-Photokatalyse	Ansatz 2: Photo-Fenton-Verfahren
Titandioxid (200 mg/l)	20 g	-
Eisen(II)-sulfat-Heptahydrat (100 mg/l)	-	10 g
Wasserstoffperoxid 30%ig (0,106 ml/l)	-	10,6 ml
Schwefelsäure 98%ig (0,1 ml/l)	-	10 ml
Natronlauge 50%ig (0,2 ml/l)	-	20 ml
Strom	0,1 - 0,13 Wh	0,1 - 0,13 Wh

Für die folgende Modellierung und Wirkungsabschätzung wurden bei beiden Ansätzen die gleichen Versuchsbedingungen sowie die gleiche Reinigungsleistung bzw. PCE-Dechlorierung zugrunde gelegt. Letztere wurde im Rahmen der Versuche anhand der Entstehung des Reaktionsproduktes Chlorid dokumentiert.



Gleichung 1: Mineralisierung von PCE durch Einwirkung von Hydroxylradikalen

PCE hat einen Chloranteil von ca. 85 Masse-%. Daher ist bei einer Dosierung von 10 mg/l PCE wie in den durchgeführten Vorversuchen im Fall einer vollständigen Mineralisierung durch Hydroxylradikale die Entstehung von 8,5 mg/l Chlorid zu erwarten.

Bei den bislang durchgeführten Solarversuchen wurde das entstehende Chlorid mittels Ionenchromatographie durch Leitfähigkeitsdetektion bestimmt. Sowohl mit dem Leitfähigkeitsdetektor als auch mit dem UV-Detektor bei 210 nm ergaben sich keine Hinweise auf entstehende Nebenprodukte.

Es wurden im Juli 2008 die im Folgenden dargestellten zwei Versuchsserien bei gutem Wetter unter vergleichbaren Einstrahlungsbedingungen durchgeführt. Um die Zunahme von Chlorid gut verfolgen zu können, wurde vollentsalztes Wasser verwendet, welches vor Ort aus Trinkwasser mit einer Ionenaustauscherkartusche hergestellt wurde.



### Versuchsserien zur Halbleiter-Photokatalyse (Ansatz 1)

Im Rahmen von zwei Teilversuchen zur Halbleiter-Photokatalyse wurden 100 Liter Trinkwasser über ein Ionenaustauschersystem in den Reaktorkreislauf gefüllt, im laufenden Pumpbetrieb mit 20 g Titandioxid (P 25) versetzt und mit 10 bis 30 Norm-Liter/h Sauerstoff während des Versuches belüftet. Nach der Ausmischung wurden 1,02 g PCE zugegeben und nach kurzem Umpumpen eine Startprobe entnommen. Weitere Beprobungen erfolgten in regelmäßigen Abständen. Für die Ionenchromatographie wurden die Proben über ein Celluloseacetatfilter (0,2 µm) vom Titandioxid befreit.

Wie in Abbildung 15 dargestellt, stieg die Chloridkonzentration innerhalb von 30 bis 40 Minuten auf ein stationäres Niveau von 5,7 mg/l an. Nach Dosierung eines weiteren Gramms PCE verdoppelte sich innerhalb sehr kurzer Zeit (15 bis 30 Minuten) die Chloridkonzentration nahezu auf einen Wert von 11,0 mg/l. Die in den beiden PCE-Abbauexperimenten mit Titandioxid nachgewiesenen Chloridzunahmen entsprechen in etwa 65 bis 70% des bei vollständiger Mineralisierung zu erwartenden Wertes. Da sich weder aus der Ionenchromatographie noch aus der Gaschromatographie (GCMS) Hinweise auf Chlor enthaltende oder andere Nebenprodukte ergaben, werden die Minderbefunde derzeit auf Verlustmechanismen wie Verdampfung aus der atmosphärisch offenen Apparatur (insbesondere über den eingeleiteten Sauerstoffstrom) und in geringem Umfang durch die Messunsicherheit bei der Anlagenfüllung zurückgeführt.

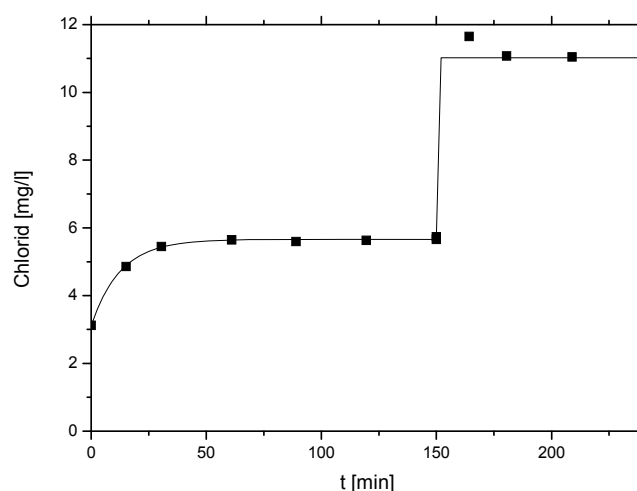


Abbildung 15: Halbleiter-Photokatalyse: PCE-Dechlorierung als Funktion der Zeit - Darstellung der Reaktionskinetik anhand der Produktbildung (DLR /90/)

### Versuchsserien zum Photo-Fenton-Verfahren (Ansatz 2)

In drei aufeinander folgenden Teilversuchen wurde der PCE-Abbau mittels solar unterstützter Fenton-Reaktion untersucht. Es wurden 100 Liter Trinkwasser über eine Ionenaustauscherkartusche in die Prototypanlage gefüllt, 10 g Eisen(II)-sulfat-Heptahydrat aufgelöst und mit konzentrierter Schwefelsäure auf einen pH-Wert von 3 eingestellt. Nach Zugabe von 1,0 g PCE und 10,6 ml Wasserstoffperoxid (30%ig) wurde eine Startprobe entnommen.

Regelmäßig wurden weitere Proben entnommen, mit Natronlauge neutralisiert und vor der ionenchromatographischen Analyse das ausgefällte Eisen mittels Celluloseacetatfilter (0,2  $\mu\text{m}$ ) abgetrennt. Nach 60 und 120 Minuten wurden jeweils 1,0 g PCE und 10,6 ml Wasserstoffperoxid nachdosiert, um zwei weitere Experimente zu starten.

Vermutlich bedingt durch die Eisenfällung und die von verschiedenen Faktoren abhängige Adsorption von Chlorid an die Eisenoxid/-hydroxid-Schlämme streuten die Chloridkonzentrationen beträchtlich (Abbildung 16). In etwa wurden bei jeder PCE-Dosierung nach 30 bis 40 Minuten Chloridgehalte von 7,5( $\pm$ 3) mg/l, 12,3( $\pm$ 2) mg/l und 15,5( $\pm$ 1) mg/l ermittelt, was 60 bis 70% der erwarteten Chloridmenge entspricht. Die zunehmenden Minderbefunde in den aufeinander folgenden Versuchen können durch die durch die von 30°C auf 33°C zunehmende Temperatur und die damit zunehmende Flüchtigkeit des PCE erklärt werden.

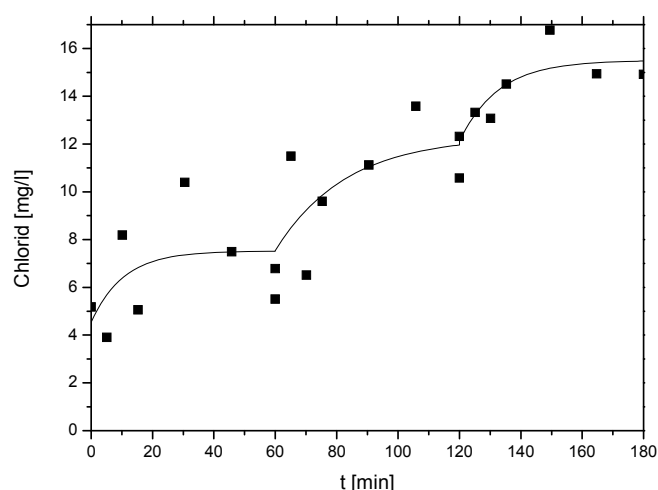


Abbildung 16: Photo-Fenton-Verfahren: PCE-Dechlorierung als Funktion der Zeit - Darstellung der Reaktionskinetik anhand der Produktbildung (DLR /90/)

#### 4.2.4 Wirkungsabschätzung und Auswertung

Das für die Bilanzierung und Wirkungsabschätzung erstellte Umberto-Modell ist schematisch in Anhang 3 dargestellt. Beide Varianten zur solaren Wasserbehandlung wurden auf Basis der Bewertungsmethode Eco-indicator 99 verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 und Abbildung 17 dargestellt. Die bewerteten Schutzgüter umfassen die menschliche Gesundheit, den Ressourcenverbrauch und die Ökosystemqualität (vgl. Bewertungsmethoden, Kapitel 4.1).

Um neben dem Bau und dem kurzzeitigen Betrieb der Prototypanlage im Rahmen der dargestellten Batchversuche (Behandlung von je 100 Litern) auch einen längerfristigen Betrieb der Anlage zu analysieren, wurden zusätzlich zwei Zukunftsszenarien mit Laufzeiten des Reaktors von 1 Jahr bzw. 10 Jahren betrachtet. Für diese Szenarien wurde ein Durchsatz von 0,2 m<sup>3</sup>/h sowie 1.500 Sonnenstunden pro Jahr, an denen der Reaktor betrieben wird, zugrunde gelegt. D.h., es wurde ein Durchsatz von 300 m<sup>3</sup>/a angenommen. Der Chemikalien- und Energiebedarf wurde in den Zukunftsszenarien analog zu den Vorversuchen definiert. Eine Abtrennung und Wiederverwendung einzelner Chemikalien wurden aufgrund fehlender Versuchsdaten nicht berücksichtigt.

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der Resultate nach Eco-indicator 99. Zu berücksichtigen ist, dass die Punktzahlen für die betrachteten Schutzgüter bei den Szenarien (Batchversuch, 1 Jahr, 10 Jahre) jeweils das Umweltbelastungspotenzial durch den Bau des Reaktors (Materialien nach Tabelle 1) beinhalten.

Dabei gelten in Bezug auf die 7,4 m<sup>2</sup> große Anlage die folgenden Sachverhalte: Aus dem Materialienbedarf für den Prototypen resultieren insgesamt 122 Punkte. Dabei trägt die erforderliche Menge an Edelstahl (82 Punkte) entscheidend zur Gesamtpunktzahl bei; aus dem Bedarf an Polypropylen (17 Punkte), Aluminium (10 Punkte) und Glas (9 Punkte) resultieren insgesamt weitere 36 Punkte. Dagegen haben die weiteren Kunststoffe sowie der Beton mit insgesamt 4 Punkten nur einen geringen Anteil (ca. 3%) am Gesamtergebnis.

Abbildung 17 stellt die EI99-Punkte für den Reaktor sowie die Szenarien der Halbleiter-Photokatalyse und des Photo-Fenton-Verfahrens gegenüber. Im Ergebnis der Wirkungsabschätzung ist festzustellen, dass bei beiden Ansätzen zur solaren Wasserbehandlung das Endergebnis (Gesamtpunktzahl) hauptsächlich durch den Ressourcenverbrauch bestimmt wird.

Tabelle 3: Ergebnisse der Fallstudie 1 - Bewertung nach Eco-indicator 99 (EI99-Punkte für die Ansätze 1 und 2 beinhalten das Umweltbelastungspotenzial durch den Reaktor)

	Reak- tor	Ansatz 1: Halbleiter-Photokatalyse			Ansatz 2: Photo-Fenton-Verfahren		
Schutzgüter		0,1 m³ (Batch)	300 m³ (1 a)	3.000 m³ (10 a)	0,1 m³ (Batch)	300 m³ (1 a)	3.000 m³ (10 a)
Menschliche Gesundheit							
EI99-Punkte	36,7	36,7	42,2	91,8	36,7	36,9	38,5
Anteil an EI99 ges. [%]	30,0	30,0	30,0	30,2	30,0	30,1	30,5
Ressourcen							
EI99-Punkte	57,3	57,3	69,1	175,5	57,3	57,4	58,7
Anteil an EIP99 ges. [%]	46,8	46,8	49,2	57,7	46,8	46,8	46,6
Ökosystemqualität							
EI99-Punkte	28,3	28,3	29,2	37,0	28,3	28,3	28,8
Anteil an EIP99 ges. [%]	23,1	23,1	20,8	12,1	23,1	23,1	22,9
Summe							
EIP99 gesamt	122,3	122,3	140,5	304,3	122,3	122,6	126,0

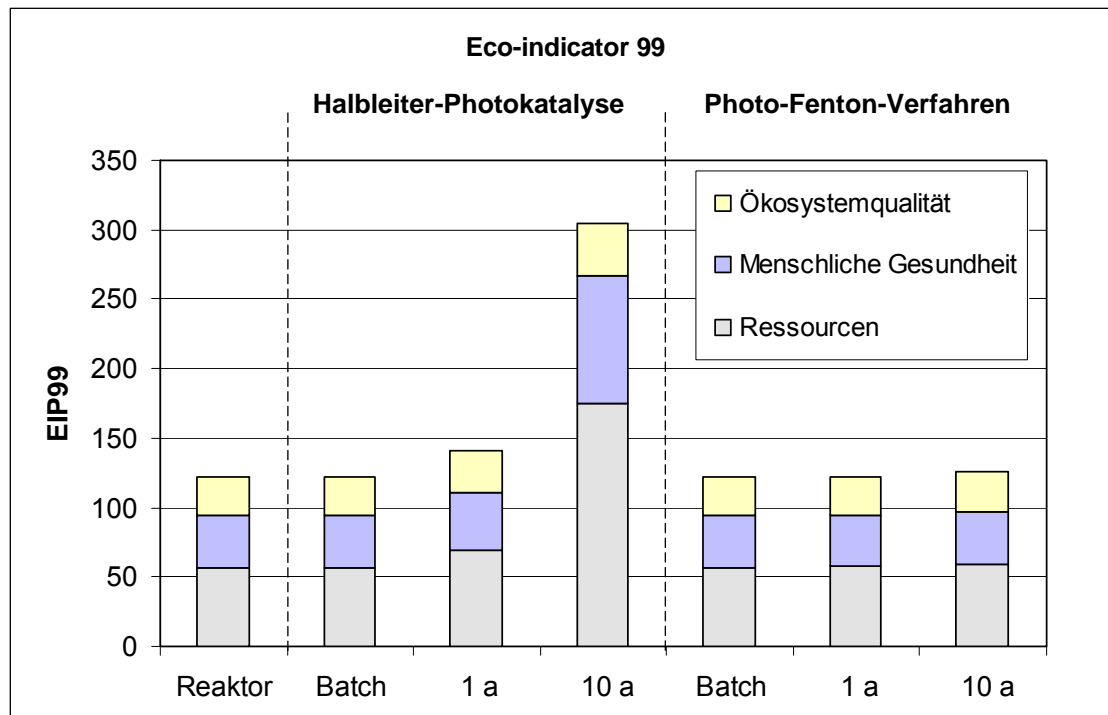


Abbildung 17: Bewertung der zwei Ansätze zur solaren Wasserbehandlung nach EI99

Die Schutzgüter „Menschliche Gesundheit“ (Hauptkomponente Atemwegserkrankungen) und „Ökosystemqualität“ (Hauptkomponente Ökotoxizität) tragen beim Batchversuch und dem einjährigen Betrieb mit Anteilen von jeweils etwa 30% bzw. 20% zum Gesamtergebnis bei. Während diese Anteile der drei betrachteten Schutzgüter an der Gesamtpunktzahl bei der Photo-Fenton-Reaktion auch für den 10-jährigen Betrieb gelten, verliert im Fall der Halbleiter-Photokatalyse die Kategorie „Ökosystemqualität“ mit zunehmender Laufzeit des Reaktors an relativer Bedeutung. Stattdessen steigt beim 10-jährigen Betrieb des Reaktors bei der Photokatalyse der Anteil durch den Ressourcenverbrauch infolge des Bedarfs an Titandioxid deutlich an.

Weiterhin wird anhand von Abbildung 17 deutlich, dass mit zunehmender Laufzeit des Reaktors die Eco-indicator-Punkte bei Ansatz 1 (Photokatalyse, max. 304 Punkte) wesentlich stärker als bei Ansatz 2 (Photo-Fenton-Verfahren, max. 126 Punkte) steigen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass beim Batchbetrieb der Reaktor selbst (122 Punkte) maßgebend für die Beeinträchtigung der Schutzgüter ist. Erst bei längerer Laufzeit fällt verstärkt der jeweilige Chemikalienbedarf ins Gewicht. Folglich geht in Ansatz 1, bei dem Titandioxid als einziges Betriebsmittel in die Modellierung eingeflossen ist, das steigende Umweltbelastungspotenzial mit zunehmender Laufzeit allein auf das Titandioxid zurück.

Am Beispiel des Zukunftsszenarios „10-jähriger Betrieb“ bedeutet das: Mit Berücksichtigung der Materialien für den Reaktor liegt bei der Photokatalyse mit Einsatz von Titandioxid eine etwa um den Faktor 2,5 höhere Beeinträchtigung der Schutzgüter als beim Photo-Fenton-Verfahren vor (Abbildung 17). Wird der Reaktor in diese Betrachtung nicht einbezogen, weist die Photokatalyse nach 10 Jahren ein etwa 50-fach höheres Umweltbelastungspotenzial als das Photo-Fenton-Verfahren auf.

Zusammenfassend lässt sich also für einen längerfristigen Betrieb einer solaren Wasserbehandlungsanlage festhalten, dass - unter den vorgenannten Randbedingungen (d.h. ohne Berücksichtigung einer Nachbehandlung/Entsorgung und ohne eine Wiederverwendung der Chemikalien) - beim Einsatz von nanoskaligem Titandioxid für die Photokatalyse im Vergleich zum Photo-Fenton-Verfahren mit einem deutlich höheren Umweltbelastungspotenzial zu rechnen ist. Über Auswirkungen, Vor- und Nachteile beider Verfahren infolge der etwaigen Nachbehandlung und Entsorgung können aufgrund fehlender Daten an dieser Stelle keine Aussagen getroffen werden.

## Ausblick

Einen Ausblick auf eine zukünftige größere Wasserreinigungsanlage liefert Tabelle 4. Für einen Durchsatz von ca. 10 m<sup>3</sup>/h ist - je nach Belastung und Einstrahlung - gemäß der ersten Solarversuche in der 7,4 m<sup>2</sup> großen Prototypanlage eine Receiverfläche von ca. 200 m<sup>2</sup> zu kalkulieren. Nachfolgend sind in Tabelle 4 die notwendigen Materialien für zwei Kollektoren mit Infrastruktur angeführt.

In Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Stellfläche einer derartigen Anlage ergeben sich u.a. verschiedene Optionen in Bezug auf den notwendigen Beton. Die voraussichtlich erforderliche Pumpenleistung für den reinen Kollektorbetrieb ist eher am unteren Ende der angegebenen Spanne zu sehen. Die obere Grenze ist der Planung der Demonstrationsanlage im Rahmen des Projektes SOWARLA3 entnommen. Da die Anlage auch für Testanwendungen des DLR vorgesehen ist, wurde die Pumpenleistung etwas überdimensioniert ausgelegt. Die erforderliche Glasmenge kann durch den Einsatz dünnerer Wandstärken ggf. reduziert werden. Die obere Grenze entspricht einer Hochrechnung vom bisherigen Stand der Entwicklung.

Tabelle 4: Ausblick - Solare Wasserreinigungsanlage (200 m<sup>2</sup>)

Material / Prozess	Wert
Glas [kg]	1.000 - 1.400
Kunststoffe	
- Polypropylen [kg]	173
- Dichtungsmaterial [kg]	41
- Polyamid [kg]	48
Aluminium [kg]	303
Edelstahl [kg]	733
Beton - Optionen (a bis c)	
a) Verankerung in Dach oder Boden [kg]	-
b) Betonplatten [kg]	2.500
c) Betonierte Auffangwanne [t]	40 - 45
Pumpenleistung [kW]	1,5 - 2,2

Im Hinblick auf die Umweltbelastungs- bzw. Umweltentlastungspotenziale einer derartigen Anlage ist anzumerken, dass der im Vergleich zum Prototypen verhältnismäßig kleine Anteil an Edelstahl im Verhältnis zur Receiverfläche sich in einer ökobilanziellen Betrachtung insgesamt positiv auswirken wird, da der Edelstahl, wie in Kapitel 4.2.3 erläutert, entscheidend zur Gesamtpunktzahl des Reaktors beiträgt.

In Bezug auf die mögliche Wiederverwendung einzelner Chemikalien liegen bislang die folgenden Erkenntnisse vor:

Bei Ansatz 1 (Halbleiter-Photokatalyse) ist nach Angaben des DLR davon auszugehen, dass die Abtrennung des Titandioxids aus der wässrigen Suspension mittels Sedimentation bis auf einen Restgehalt von etwa 5 mg/l erfolgen kann. In Untersuchungen an der TU Berlin /29/ wurde das Recycling von Titandioxid bereits bei der Oxidation der Modellsubstanz 1,5-Naphthalindisulfonsäure (1,5-NDSA) geprüft und festgestellt, dass sich der Katalysator fast ohne Aktivitätsverminderung wiederverwenden lässt. Auch nach weiteren Studien in Spanien /91/ kann das Titandioxid 10-mal wiederverwendet werden. Dieses würde einen signifikanten Beitrag zur Umweltentlastung leisten; die Unterschiede beider Verfahren in Bezug auf die Beeinträchtigung der Schutzgüter würden in diesem Fall geringer als in der oben dargestellten Bilanzierung und Wirkungsabschätzung ohne Berücksichtigung einer Wiederverwendung ausfallen. Allerdings wären bei einer zukünftigen ökobilanziellen Betrachtung auch der Energieaufwand für die Abtrennung des Titandioxids und ggf. eine weitere Nachbehandlung des Wassers zu berücksichtigen; Daten für diesen Schritt liegen bislang noch nicht vor.

In Hinblick auf Ansatz 2 (Photo-Fenton-Verfahren) wurde seitens des DLR bereits für andere Applikationen wie der Mineralisierung von  $\epsilon$ -Caprolactam (aus Waschlaugen von Abluftwäschern bei der Verarbeitung von Nylon) nachgewiesen, dass eine effektive Abtrennung des Eisens durch Filtration (nach Ausfällung bei Neutralisation) möglich ist. Demnach ist davon auszugehen, dass eine annähernde Kreislaufführung des Eisens (Rückführung > 99,5%) erfolgen kann. Damit würde ebenfalls ein Beitrag zur Umweltentlastung einhergehen. Jedoch wären in einer zukünftigen Bilanzierung auch hier die für die Abtrennung notwendigen Materialien, der Strombedarf und die ggf. erforderliche Nachbehandlung des Wassers einzubeziehen.

### 4.3 Fallstudie 2: Filtermedien in Kabinenluftfiltern

Zur Verbesserung der Luftqualität im Fahrzeuginnenraum setzt die Automobilindustrie Kabinenluftfilter ein. Der Ausstattungsanteil bei Neufahrzeugen liegt mittlerweile bei > 90% /92/. In Deutschland werden pro Tag etwa 10.000 Fahrzeuge serienmäßig mit Innenraumfilter ausgestattet.

Als Alternative zu konventionellen Kabinenluftfiltern kommen seit einigen Jahren Filter zum Einsatz, die zur Verbesserung der Filtereigenschaften zusätzlich mit Nanofasern beschichtet sind. Durch den Einsatz der Nanofasern werden Filtermedien zur Verfügung gestellt, die neben einem niedrigen Luftwiderstand auch eine hohe Partikelabscheidung aufweisen.

Im Rahmen dieser Fallstudie wird ein PKW-Kombinationsfilter mit Nanofaserbeschichtung der Mann + Hummel GmbH (ehemals helsa-automotive GmbH & Co. KG) betrachtet und mit einem herkömmlichen Kombinationsfilter verglichen.

#### 4.3.1 Basisinformationen

Ein Kabinenluftfilter setzt sich generell aus einem Filtermedium und einem Rahmen zusammen. Das Filtermedium besteht zumeist aus mehreren Lagen Vlies (z.B. Polypropylen), wobei die Polypropylen-Fasern als Grundstoff des Filtermediums nach dem Schmelzspinnverfahren hergestellt werden. Um die Filtrationsfläche zu maximieren und somit die größtmögliche Filtrationsleistung zu erzielen, wird bei der Herstellung die sogenannte Plissierung, eine spezielle Faltechnik, angewandt. Abbildung 18 zeigt ein plissiertes Filtermedium sowie einen im Handel erhältlichen Innenraumfilter.



Abbildung 18: Plissiertes Filtermedium eines Partikelfilters (links) und Innenraumfilter CU 2882 (rechts) (Mann + Hummel GmbH /93/)



Neben reinen Partikelfiltern, die Staub und Partikel, wie Pollen, Dieselruß oder Reifenabrieb vom Fahrzeuginnenraum fernhalten, kommen vielfach auch Kombinationsfilter (Abbildung 19) mit einer integrierten Schicht Aktivkohle zum Einsatz. Kombinationsfilter ermöglichen neben dem Rückhalt von Stäuben und Partikeln durch ihre Adsorptionskapazität auch eine effektive und schnelle Eliminierung von Geruchsspitzen. Die Aktivkohleschicht adsorbiert gasförmige Verunreinigungen wie Stickoxide, Treibstoffdämpfe, Ozon und andere Geruchsstoffe aus der Umgebungsluft.



Abbildung 19: Plissiertes Filtermedium eines Kombinationsfilters (links) und Innenraumfilter CUK 2862 (rechts) (Mann + Hummel GmbH /93/)

Alternativ zu herkömmlichen Filtermaterialien werden seit einigen Jahren auch Kabinenluftfilter mit nanofaserbeschichteten Filtermedien eingesetzt. Derartige Materialien zeigen durch die Nanofasern eine hohe Staubabscheidung, wobei der Luftwiderstand gering gehalten werden kann. Je nach Anforderung können durch die Nanofasern im Vergleich zu unbeschichteten Filtermedien daher höhere Abscheideleistungen bei gleichem Druckverlust oder niedrigere Druckverluste bei gleicher Abscheideleistung erzielt werden (vgl. Abbildung 23 und Abbildung 24). Dabei ist unter Druckverlust der Druckunterschied zwischen Roh- und Reinluftseite des Filters zu verstehen.

### **Elektrospinnverfahren**

Grundlage für die Herstellung der Nanofasern bildet das Elektrospinnverfahren (/94/, /95/): Die Nanofaserbildung erfolgt mittels einer hohen elektrischen Spannung, die zwischen einer Düse und einer Gegenelektrode angelegt wird (Abbildung 20). Das zu ver-spinnende Material liegt als Schmelze oder Lösung vor und wird durch die Düse transportiert. Durch die Oberflächenladung des Tropfens bildet sich ein Jet in Richtung der

Gegenelektrode aus. Der Materialstrom wird schließlich auf einem Substrat über der Gegenelektrode in Form feinsten Fasern abgeschieden. Mittels Elektrosponnen können eine Vielzahl an Polymeren, wie z.B. Polyamide, Polylactid oder Cellulosederivate versponnen und Nanofasern mit Durchmessern  $< 10 \text{ nm}$  hergestellt werden /95/.

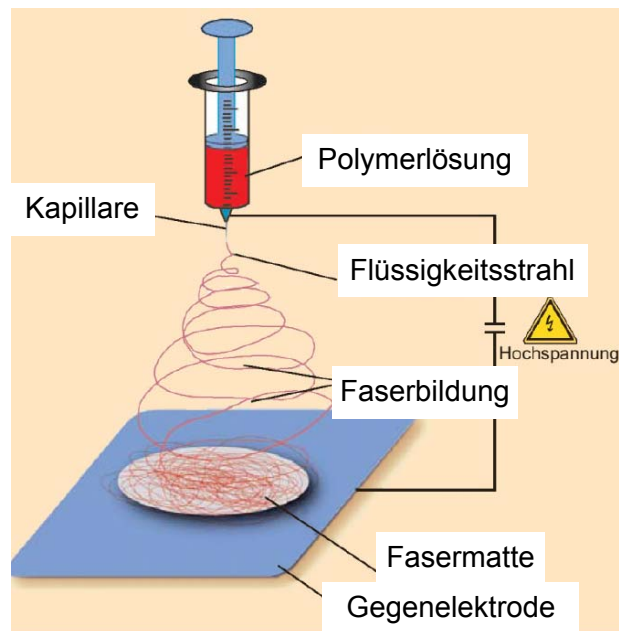


Abbildung 20: Prinzip des Elektrosponnverfahrens (nach /94/)

### **Mann + Hummel GmbH: Nanofaserbeschichtete Filtermedien**

Bei der Mann + Hummel GmbH werden seit 2001 mittels Elektrosponnen in einem kontinuierlichen Verfahren Trägermaterialien mit Nanofasern beschichtet, wobei der Durchmesser der Fasern im Bereich weniger hundert Nanometer liegt. In Abhängigkeit der Prozessparameter sowie der eingesetzten Trägermaterialien können u.a. die folgenden Arten von Filtermedien erzeugt werden /92/:

- Filtermedien mit Oberflächenbeschichtungen (Abbildung 21, links): Bei dichten Trägermaterialien oder Medien mit weitgehend geschlossenen Oberflächen werden die Nanofasern als dichtes Netz auf der Oberfläche aufgebracht. Hierdurch werden Partikel zurückgehalten und die elektrostatischen Aufladungen der Nanofaserbeschichtung tragen zudem zur Abscheidung bei.
- Filtermedien mit Nanofaserdurchdringung (Abbildung 21, rechts): Bei der Verwendung offenporiger Trägerstrukturen werden die Nanofasern in die Tiefe der Struk-

tur eingebracht. Die Fasern werden zwischen den Trägerstrukturen spinnennetzartig versponnen. Solche Filtermedien wirken als Tiefenfilter und zeigen ein sehr gutes Staubspeichervermögen.

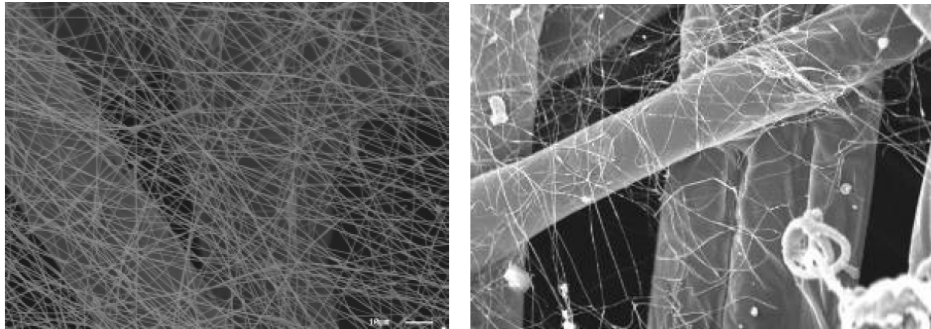


Abbildung 21: Filtermedium mit Oberflächenbeschichtungen (links) und Nanofaserdurchdringung (rechts) (helsa-automotive /92/)

### Testreihen der Mann + Hummel GmbH

Die folgenden Abbildungen veranschaulichen die Ergebnisse aus verschiedenen Versuchen, die mit Nanofasermaterialien und konventionellen Filtermedien bei der Mann + Hummel GmbH durchgeführt wurden. Abbildung 22 zeigt vergleichend Filtermedien ohne (links) und mit Nanofasern (rechts) nach einem sogenannten Tunneltest. Da die Tunnelluft im Vergleich zur Luft außerhalb des Tunnels höher mit Partikeln belastet ist, wird dieses Testverfahren zur Überprüfung einer effizienten Partikelabscheidung von Filtermedien genutzt. Im Ergebnis des Tests konnte gezeigt werden, dass das Filtermedium mit Nanofasern im Vergleich zum herkömmlichen Filtermedium mehr Partikel zurückhalten konnte.

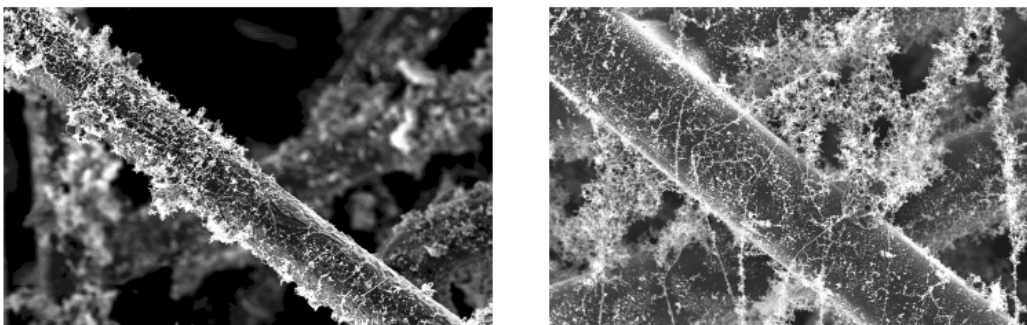


Abbildung 22: Filtermedium ohne (links) und mit Nanofasern (rechts) nach einem Tunneltest (Mann + Hummel GmbH /96/)

Im Ergebnis weiterer Versuche konnte gefolgert werden, dass durch die Nanofasern höhere Abscheideleistungen bei gleichem Druckverlust (Abbildung 23) oder niedrigere Druckverluste bei gleicher Abscheideleistung (Abbildung 24) erzielt werden können.

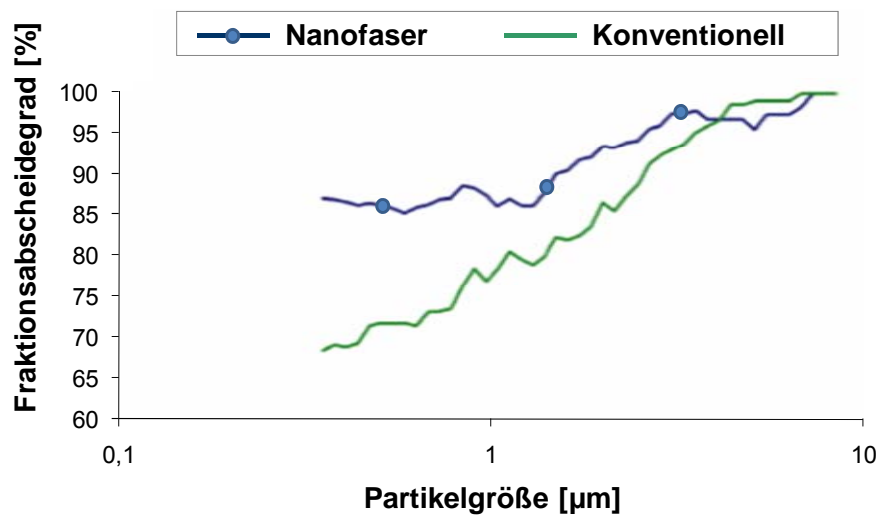


Abbildung 23: Abscheideleistung durch Filter mit Nanofasern und konventionellen Filter bei gleichem Druckverlust (Mann + Hummel GmbH /96/)

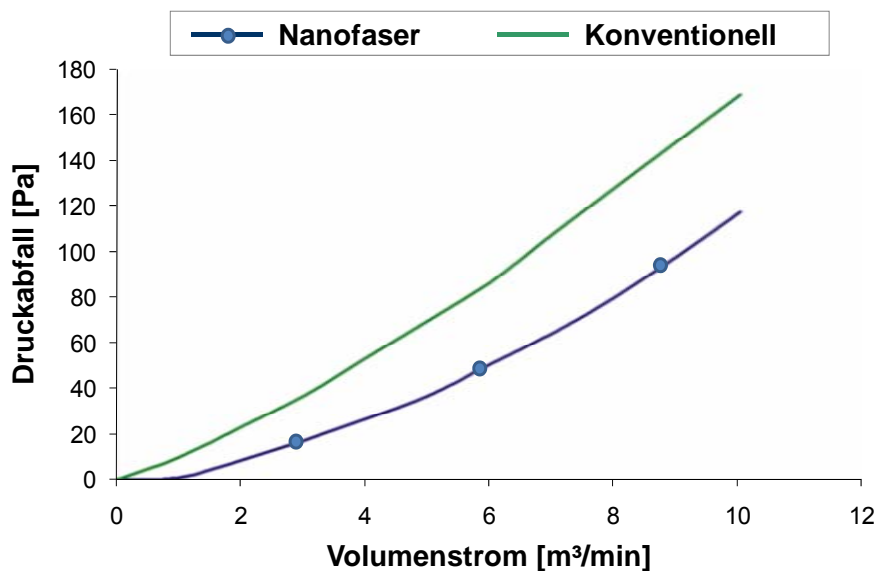


Abbildung 24: Druckverlust durch Filter mit Nanofasern und konventionellen Filter bei gleicher Abscheideleistung (Mann + Hummel GmbH /96/)

### **4.3.2 Ziel und Untersuchungsrahmen**

#### **Ziel der Studie**

Ziel dieser Untersuchung ist die ökobilanzielle Betrachtung des Einsatzes von Nanotechnologie im Bereich von Kabinenluftfiltern für PKW. Verglichen wird ein Kombinationsfiltermedium mit Nanofaserbeschichtung mit einem konventionellen Kombinationsfiltermedium ohne Nanofasern.

#### **Zielgruppen und Anwendung der Ergebnisse**

Die Ergebnisse der Studie dienen Herstellern von Kabinenluftfiltern sowie der Automobilindustrie Umweltentlastungs- und Umweltbelastungspotenziale des relativ neuen Kombinationsfiltermediums mit Nanofasern zu prüfen. Weitere Adressaten der ökobilanziellen Betrachtung sind das Umweltbundesamt als Auftraggeber dieser Studie, die Öffentlichkeit sowie politische Akteure im Allgemeinen.

#### **Funktion und funktionelle Einheit**

Die zu untersuchende Funktion ist die Filterung der Außenluft durch einen Kombinationsfilter, wobei zwischen Filtermedien mit und ohne Nanofaserbeschichtung unterschieden wird. Als funktionelle Einheit wurde jeweils ein Kabinenluftfilter betrachtet, wobei eine durchschnittliche Lebensdauer eines Filters von 15.000 km PKW-Fahrleistung zugrunde gelegt wurde.

#### **Systemgrenze**

Der Lebensweg eines Kabinenluftfilters gliedert sich in verschiedene Module. Eine schematische Darstellung des Lebensweges zeigt Abbildung 25.

Zu beachten ist, dass für die Produktion des Filtermediums mit Nanofaserbeschichtung zusätzlicher Energie- und Materialbedarf für die Faserproduktion auf Basis des Elektrospleinverfahrens erforderlich ist. Unterschiede beider Filtermedien ergeben sich zudem während des Gebrauchs im PKW aufgrund der unterschiedlichen Luftwiderstände und der damit verbundenen Gebläseleistung bzw. der Kraftstoffeffizienz. Während der Nutzenphase des PKW werden nur die direkten Emissionen, die aus der Diesel- oder Benzinverbrennung entstehen und der Ressourcenverbrauch berücksichtigt. Die weiteren Module sind für beide Filtermedien im Wesentlichen gleich.

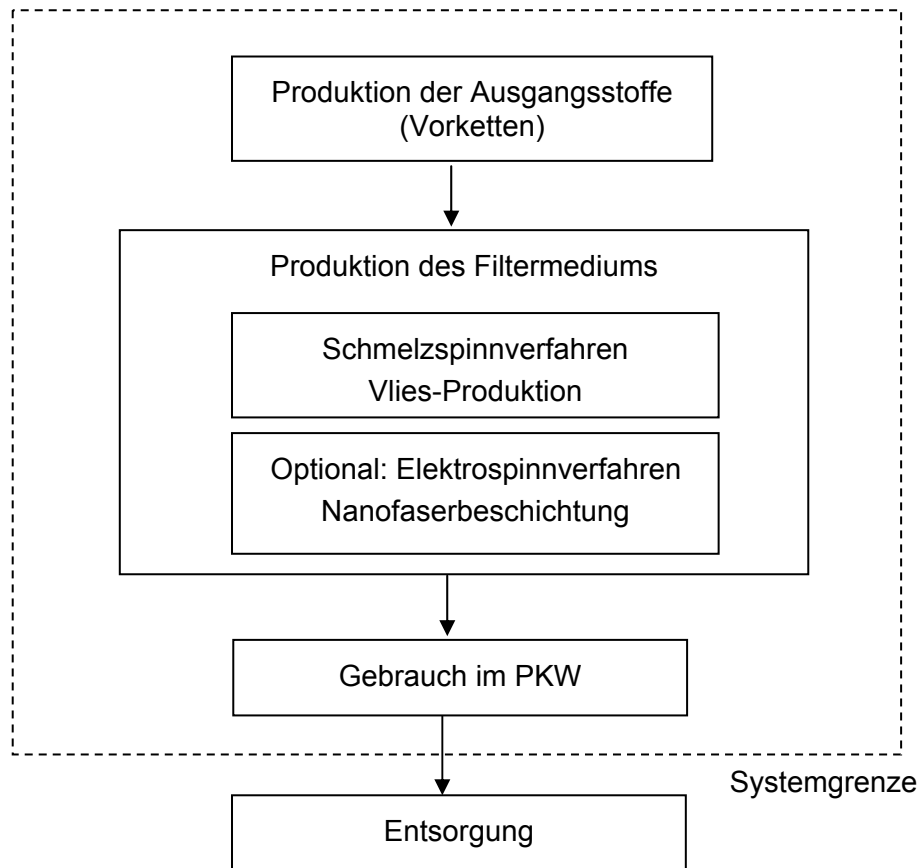


Abbildung 25: Module der Fallstudie „Filtermedien in Kabinenluftfilter“

### Datengrundlage

Für die vorliegende Fallstudie wurden, soweit dieses aus Wettbewerbsgründen möglich war, produktspezifische Daten der Mann + Hummel GmbH verwendet. Die der Untersuchung zugrunde liegenden Informationen sollen folgenden Kriterien genügen:

- Der geografische Rahmen der Untersuchung ist der deutsche Markt der Mann + Hummel GmbH für PKW-Kabinenluftfilter.
- Der zeitliche Rahmen wird auf das Jahr 2007 festgelegt. Alle Daten waren in Bezug auf diesen Zeitraum oder möglichst nahe zu diesem Zeitraum zu ermitteln.

Des Weiteren wurden Sachbilanzdaten aus der Datenbank ecoinvent, Version 2.0 für die Vorketten der bei der Produktion der Filtermedien eingesetzten Stoffe und Energien sowie für die Nutzenphase im PKW verwendet.

### 4.3.3 Sachbilanz

Im Folgenden werden die einzelnen Teilsysteme nach Abbildung 25 erläutert. Der Schwerpunkt liegt im Folgenden auf den Modulen „Produktion“ und „Gebrauch im PKW“, in denen die wesentlichen Unterschiede bei beiden Filtermedien vorliegen.

#### Vorketten

Wesentlicher Grundstoff für die Filtermedien ist das Vorprodukt Polypropylen, ein thermoplastischer Kunststoff, welcher als Granulat zugeliefert wird. Eine Beschreibung der Verfahrensschritte zur Herstellung des Polypropylens ist in der Bilanzbroschüre der Plastics Europe (ehemals: Association of Plastics Manufacturers in Europe, APME) dokumentiert /97/. In dieser Veröffentlichung sind für Polypropylen die gewichteten Mittelwerte der In- und Outputs führender Kunststoffhersteller zusammengefasst, die wiederum in der ecoinvent-Datenbank enthalten sind.

Weitere Vorprodukte sind der Rahmen, Aktivkohle sowie Hilfs- und Klebstoffe, die dem Filterhersteller ebenfalls zugeliefert werden. Die Filterrahmen sind je nach Kundenanforderung anzupassen, wobei beispielsweise seitens der Kunden steife oder flexible Filter gefordert werden. Die Art des gewählten Rahmenmaterials hängt daher stark von den Einbauerfordernissen ab. In die weitere Betrachtung werden der Rahmen und die Aktivkohle nicht einbezogen, da diese in beiden Kombinationsfiltern identisch sind. Zudem wurden weitere Produktspezifikationen seitens der Mann + Hummel GmbH aus Wettbewerbsgründen nicht benannt.

Zu beachten ist, dass bei der Bilanzierung der Gebrauchsphase die Herstellung eines Autos und die Bereitstellung der Infrastruktur nicht als separate Vorketten in Hinblick auf die spätere Nutzung des Filtermediums im PKW berücksichtigt wurden. Außerdem wurden die Herstellung der Produktionsstätten sowie Transporte (z.B. Transport von Roh- und Hilfsstoffen zur Fabrik, interne Transporte) nicht in die Bilanzierung einbezogen.

## Produktion

In diesem Modul werden die vom Hersteller selbst durchgeführten Prozesse berücksichtigt. Des Weiteren fließen externe Prozesse, die Andere zur Herstellung der eingekauften Stoffe, Teile und Energien sowie zur Weiterverarbeitung und/oder Entsorgung von Erzeugnissen und Abfällen betreiben, in die Betrachtung ein.

In Tabelle 5 sind die erforderlichen Inputs bzw. anfallenden Outputs bei der Produktion der Filtermedien, soweit aus Wettbewerbsgründen publizierbar, zusammengefasst. Die Angaben sind auf die Produktion jeweils eines Filtermediums bezogen.

Tabelle 5: Bilanzparameter - Produktion

	Filtermedium ohne Nanofasern	Filtermedium mit Nanofasern
<b>Energie</b>		
Strom - allgemein [kWh]	0,25 - 0,38	
Strom - Elektrosinnen [kWh]	-	0,0075
<b>Stoffe</b>		
Polypropylen-Granulat [g]	40,0	
Polypropylen-Granulat für Nanofaserbeschichtung [g]	-	0,25
Klebstoff [g]	5,0	
Kunststoffreste (Verschnitt, Klebstoff)	max. 8 g	

Für die Herstellung eines Filters sind jeweils 0,5 m<sup>2</sup> Polypropylen-Vlies erforderlich, wofür 40 g Polypropylen-Granulat benötigt werden. Der Energiebedarf für die Vliesherstellung beträgt 0,25 bis 0,38 kWh, wobei ein Großteil dieser Energie für das Aufschmelzen des Polypropylen-Granulats notwendig ist. Im Fall des nanofaserbeschichteten Filtermediums beträgt der zusätzliche Energieaufwand für das Elektrosinnen 0,0075 kWh. Die dabei aufgebrauchte Polymermenge für die Nanofasern beträgt maximal 0,25 g.

Anschließend werden beide Vliesarten - mit und ohne Nanofaserbeschichtung - einseitig mit Klebstoff beschichtet. Der Klebstoff wird dabei netzartig aufgetragen; die Klebstoffmenge beträgt ca. 5 g. In einem anschließenden Schritt wird Aktivkohle aufgebracht. Dann wird das aktivkohlebeschichtete Vlies mit einem zweiten Vlies belegt und



die Flächenware plissiert. Diese so hergestellten Faltenpacks werden zugeschnitten und mit entsprechenden Stirnseiten versehen. Die Filter werden dann in Kartons verpackt an verschiedene Automobilhersteller und Werkstätten ausgeliefert. Bei der Produktion anfallende Vlies-Reste, aber auch reklamierte Vlies-Rollen werden dem Vliesherstellungsprozess wieder zugeführt. Bei der eigentlichen Filterherstellung anfallende Verschnittreste treten bei nanofaserbeschichteten und unbeschichteten Vliesen in gleichen Mengen auf.

### **Gebrauch der Kabinenluftfilter im PKW**

Entscheidend für den Verbrauch elektrischer Energie ist die Gebläseleistung, die bedingt durch den Luftwiderstand eines Filters notwendig ist, um Außenluft anzusaugen und in die Innenkabine abzugeben. Vergleicht man Filter mit gleicher Abscheideleistung und unterschiedlichen Druckabfällen, so ergibt sich eine unterschiedliche Leistungsabnahme durch das Gebläse. Ein Filtermedium mit Nanofasern erzeugt aufgrund des niedrigeren Druckabfalls am Gebläse eine niedrigere Leistungsabnahme, welches einen geringeren Energieverbrauch im Vergleich zum konventionellen Filtermedium zur Folge hat; für das Filtermedium ohne Nanofasern gilt das Umgekehrte.

Im Ergebnis eines Laborversuches der Mann + Hummel GmbH konnte gezeigt werden, dass die Differenz der Gebläseleistung zwischen einem Filter mit und ohne Nanofasern 6,4 Watt bei einem Volumenstrom von 300 m³/h beträgt (Tabelle 6).

Tabelle 6: Vergleichsmessung „Filtermedium ohne Nanofasern“ und „Filtermedium mit Nanofasern“ (Testdaten der Mann + Hummel GmbH /96/)

<b>Filtertyp</b>	<b>Gebläseleistung [Watt]</b>	<b>Mittelwert aus I+II [Watt]</b>
ohne Nanofasern I	79,6	79,9
ohne Nanofasern II	80,3	
mit Nanofasern I	74,2	73,5
mit Nanofasern II	72,8	

## Entsorgung

Nach Auskunft verschiedener Autowerkstätten und Entsorger im Raum Braunschweig werden gebrauchte Filter in den Werkstätten gesammelt und anschließend von lokalen Entsorgungsunternehmen zur nächsten Müllverbrennungsanlage transportiert und dort der Verbrennung zugeführt. Dieser Entsorgungsweg gilt für beide Arten von Filtern bzw. Filtermedien. Somit sind keine Unterschiede in Bezug auf Umweltbelastungs- bzw. Umweltentlastungspotenziale zu erwarten und daher wurde die Entsorgung in der vorliegenden Betrachtung nicht weiter berücksichtigt.

### 4.3.4 Wirkungsabschätzung und Auswertung

#### Abschätzung des Kraftstoff-Einsparpotenzials

Auf Basis der in Tabelle 6 und nachfolgend in Tabelle 7 angeführten Daten wurde zunächst die folgende Abschätzung zum möglichen Kraftstoff-Einsparpotenzial beim Gebrauch nanofaserbeschichteter Filtermedien getroffen. Die Produktion der Filtermedien einschließlich ihrer Vorketten bleibt an dieser Stelle unberücksichtigt und wird nachfolgend im Ergebnis der Modellierung mit Umberto betrachtet.

Tabelle 7: Basisdaten zur Abschätzung des Kraftstoff-Einsparpotenzials

Parameter	Einheit	Wert	Quelle
Durchschnittliche Lebensdauer Kabinenluftfilter (Fahrleistung PKW)	km	15.000	/96/
Durchschnittliche Geschwindigkeit (PKW)	km/h	60	/98/
Energiedichte Benzin	kWh/l	8,6	/99/
Energiedichte Diesel	kWh/l	9,8	/99/
CO <sub>2</sub> -Emission - Verbrennung Benzin	kg/l	2,37	/100/
CO <sub>2</sub> -Emission - Verbrennung Diesel	kg/l	2,65	/100/
Benzinverbrauch	l/100 km	7,1	/101/
Dieselvebrauch	l/100 km	6,5	/101/

Für den Fall einer durchschnittlichen Lebensdauer eines Filters von 15.000 km PKW-Fahrleistung ergibt sich bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 60 km/h eine Betriebszeit von 250 Stunden. Unter der Annahme, dass beim Einsatz nanofaserbeschichteter Filtermedien die im Laborversuch (Tabelle 6) ermittelte Leistungsersparnis

von 6,4 W gegenüber konventionellen Filtermedien über die gesamte Betriebszeit eines Filters gilt, ergibt sich eine Energieersparnis von insgesamt 1,6 kWh. Legt man die in Tabelle 7 angegebenen Energiedichten zugrunde, entspricht das bei Anwendung der Nanotechnologie einer Kraftstoffeinsparung von 0,19 l Benzin oder 0,16 l Diesel bzw. einer Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emission um 0,45 kg bzw. 0,42 kg bezogen auf die gesamte Betriebszeit eines Filters. Unter Berücksichtigung des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauches eines Benzin- und Dieselfahrzeuges liegt somit eine mögliche Kraftstoffersparnis von etwa 0,02% vor.

Ist diese Kraftstoffersparnis bzw. die CO<sub>2</sub>-Reduzierung bei der Betrachtung eines nanofaserbeschichteten Filters gegenüber einem konventionellen Filter auch äußerst gering, verdeutlichen die folgenden Beispiele, welche Umweltentlastungspotenziale sich durch Summationseffekte ergeben:

- Auf Basis von Mann + Hummel GmbH zur Verfügung gestellten Verkaufszahlen (im Zeitraum von 2006 bis 2008 wurden etwa 4,1 Mio. Filter mit Nanofasern ausgeliefert) ergibt sich für diesen Zeitraum eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von ca. 1.800 t durch den Einsatz der Nanotechnologie. Unter dem Aspekt, dass auch Mitbewerber (u.a. Donaldson, micronAir) Filter mit Nanofasern anbieten, dürfte die tatsächliche CO<sub>2</sub>-Reduzierung noch deutlich höher anzusetzen sein.
- Die Anzahl der Fahrzeuge in Deutschland belief sich am 01. Januar 2008 gemäß Angabe des Kraftfahrt-Bundesamtes /102/ auf etwa 49 Mio. und setzte sich aus 41 Mio. PKW sowie 8 Mio. Kleintransportern, LKW, Bussen und anderen Kraftfahrzeugen zusammen. Von den zugelassenen PKW sind etwa 31 Mio. mit Benzinmotoren und etwa 10 Mio. mit Dieselmotoren ausgerüstet. Angenommen, dass diese PKW alle mit Kabinenluftfiltern mit Nanofasern ausgestattet wären, ergibt sich theoretisch eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emission von 18.150 t pro Lebensdauer der Filter (je 15.000 km) verglichen mit dem Fall, dass alle PKW noch mit konventionellen Filtern ausgerüstet wären. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass insgesamt von einem noch höheren CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial auszugehen ist, wenn weiterhin Kleintransporter, LKW und Busse in diese Betrachtung einbezogen würden.

## Modellierung

Das für die Bilanzierung erstellte Umberto-Modell ist schematisch in Anhang 4 dargestellt. Nachfolgend werden Produktion und Gebrauch beider Kabinenluftfiltermedien mit Hilfe der Bewertungsmethode Eco-indicator 99 und CML 2001 analysiert und verglichen.

Tabelle 8 zeigt eine Übersicht der Resultate nach der Bewertungsmethode Eco-indicator 99. Im Ergebnis der Bilanzierung ist festzuhalten, dass sich beim Vergleich der zwei Filtermedien nur marginale Differenzen innerhalb der drei betrachteten Schutzgüter sowie im Endergebnis (gesamte EI99-Punkte) ergeben. Diese sind zum Einen auf die geringen Unterschiede in Bezug auf den Material- und Energiebedarf bei der Produktion der Filtermedien zurückzuführen (vgl. Tabelle 5). Zum Anderen resultieren diese Differenzen aus den unterschiedlichen Kraftstoffanforderungen in der Gebrauchsphase. Festzuhalten ist, dass die Ergebnisse wesentlich (99,99%) durch die Nutzenphase (PKW-Fahrleistung von 15.000 km) bestimmt werden; die Produktion des Filters selbst hat nur einen minimalen Anteil an der EI99-Gesamtpunktzahl.

Abbildung 26 verdeutlicht entsprechend der Ergebnisse nach Tabelle 8 die Anteile der jeweiligen Schutzgüter an der EI99-Gesamtpunktzahl. Die Abbildung hat aufgrund der geringen Unterschiede für beide Filtermedien Gültigkeit. In beiden Fällen werden etwa 68% des Endergebnisses durch den Verbrauch an Ressourcen verursacht. Etwa 27% gehen auf den Bereich menschliche Gesundheit (davon wiederum ca. 2/3 Atemwegserkrankungen und ca. 1/3 Klimawandel) und etwa 5% auf das Schutzgut Ökosystemqualität zurück.

Tabelle 8: Ergebnisse der Fallstudie 2 - Bewertung nach Eco-indicator 99, Funktionelle Einheit: je 1 Filter, 15.000 km PKW-Fahrleistung

	<b>Filtermedium ohne Nanofaser</b>		<b>Filtermedium mit Nanofaser</b>	
<b>Schutzgüter</b>	El99-Punkte	Anteil an EIP99 ges. [%]	El99-Punkte	Anteil an EIP99 ges. [%]
<b>Menschliche Gesundheit</b>				
Produktion	3,76E-03	1,60E-03	3,82E-03	1,63E-03
Gebrauchsphase	63,38	26,96	63,36	26,96
<b>Ressourcen</b>				
Produktion	1,17E-02	4,98E-03	1,18E-02	5,02E-03
Gebrauchsphase	160,27	68,18	160,23	68,18
<b>Ökosystemqualität</b>				
Produktion	2,97E-04	1,26E-04	3,02E-04	1,29E-04
Gebrauchsphase	11,41	4,85	11,41	4,85
<b>Summe</b>				
Produktion	1,58E-02	6,70E-03	1,59E-02	6,77E-03
Gebrauchsphase	235,05	99,99	235,01	99,99
EIP99 gesamt	235,07	100	235,02	100

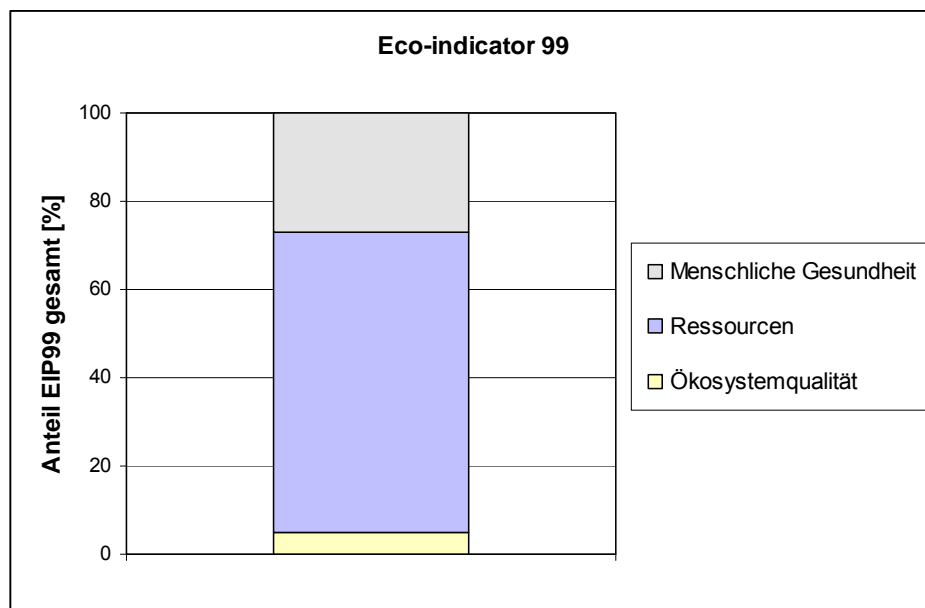


Abbildung 26: Anteile der Schutzgüter an der EIP99-Gesamtpunktzahl

Des Weiteren wurde nach CML 2001 das Treibhauspotenzial auf Basis von GWP 20a (Global warming potential, Zeithorizont 20 Jahre) quantifiziert. Aufgrund der Referenzsubstanz CO<sub>2</sub> hat GWP die Einheit [kg CO<sub>2</sub>-Äquiv.].

Für das Filtermedium mit Nanofasern wurde ein Treibhauspotenzial von insgesamt 3.613,2 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. bezogen auf die Gesamtlebensdauer (15.000 km PKW-Fahrleistung) ermittelt. Im Vergleich dazu weist das Filtermedium ohne Nanofasern ein Treibhauspotenzial von 3.613,9 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. auf. Somit besteht nach CML 2001 bei Produktion und Gebrauch eines Filtermediums mit Nanofasern ein Einsparpotenzial von 0,7 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. Dabei überwiegt der Vorteil durch die Kraftstoffeinsparung in der Gebrauchsphase den Mehraufwand an Material und Energie bei der Produktion des nanofaserbeschichteten Filtermediums.

Bezogen auf die Gesamtfahrleistung in Deutschland (ca. 550 Mrd. km pro Jahr /103/) besteht rechnerisch ein Einsparpotenzial von ca. 25.500 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. für den Fall, dass alle PKW mit nanofaserbeschichteten Filtermedien ausgerüstet wären. Das entspricht bei einem durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoß eines Bundesbürgers von ca. 13 t CO<sub>2</sub>-Äquiv./a dem jährlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoß einer Ortschaft mit knapp 2.000 Einwohnern.

Anzumerken ist, dass die mögliche Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emission aufgrund des Einsatzes von nanofaserbeschichteten Filtern im Kontext der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verlauf der Betriebszeit eines Filters bzw. eines PKW zu sehen ist. Wie bereits vorstehend erläutert, verdeutlichen im Fall eines derart geringen Einsparpotenzials eines einzelnen Filters erst die Betrachtungen größerer Filtermengen bzw. Gesamtfahrleistungen die Umweltentlastungspotenziale infolge des Einsatzes von Nanotechnologie im Filterbau.

#### 4.4 Abschließende Anmerkungen

Nach zahlreichen Gesprächen, die mit möglichen Kooperationspartnern für die ökobilanziellen Betrachtungen im Rahmen des vorliegenden Projektes geführt wurden, und im Ergebnis der zwei Fallstudien sind abschließend folgende Punkte anzumerken:

- Der Großteil der Ansprechpartner, die im Hinblick auf eine potenzielle ökobilanzielle Betrachtung ihrer nanotechnischen Produkte oder Verfahren im Umweltschutz kontaktiert wurden, reagierte - wie bei der anfänglichen Recherche - generell interessiert an einer derartigen Studie. Jedoch war in Bezug auf eine aktive Teilnahme und Informationsweitergabe die Haltung oftmals äußerst zögerlich. Dieses galt sowohl für mögliche Partner aus dem Bereich Forschung/Entwicklung, die zumeist auf ein (zu) frühes Stadium ihrer Arbeiten verwiesen, als auch für potenzielle Partner aus der Wirtschaft, die sich vor allem aufgrund wettbewerbsrelevanter Informationen zurückhaltend zeigten. Vor diesem Hintergrund möchten wir die Mitwirkung des DLR Köln sowie der Mann + Hummel GmbH an der vorliegenden Studie ausdrücklich hervorheben und uns für die Kooperation nochmals bedanken.
- Wie in den Kapiteln 4.2 und 4.3 dargestellt wurde, liegt den zwei Fallbeispielen aufgrund des Forschungscharakters (Fallstudie 1) bzw. aus Wettbewerbsgründen (Fallstudie 2) in Teilbereichen eine limitierte Datenbasis für die ökobilanziellen Vergleiche zugrunde und einzelne Module blieben in den Fallstudien unberücksichtigt. In diesem Zusammenhang ist daher auf die modellspezifischen Systemgrenzen hinzuweisen, die die Grenzen der jeweiligen Sachbilanz und Wirkungsabschätzung kennzeichnen. Zudem ist anzumerken, dass auftragsgemäß ausschließlich umweltrelevante Aspekte ausgewertet wurden. Ökonomische und soziale Kriterien flossen nicht in die vorliegenden Betrachtungen ein.
- Im Ergebnis der Fallstudie „Solare Wasserbehandlung“ ist festzuhalten, dass bei einem längerfristigen Betrieb der solaren Anlage unter den angeführten Randbedingungen beim Einsatz von nanoskaligem Titandioxid für die Photokatalyse im Vergleich zum Photo-Fenton-Verfahren mit einem deutlich höheren Umweltbelastungspotenzial zu rechnen ist. Das mit zunehmender Reaktor-Laufzeit steigende Umweltbelastungspotenzial bei der Photokatalyse ist auf das Titandioxid zurückzuführen, das durch einen hohen Verbrauch an Ressourcen in der Vorkette gekennzeichnet ist.

- Im Ergebnis der Fallstudie „Filtermedien in Kabinenluftfiltern“ fällt die ökobilanzielle Betrachtung dagegen leicht zugunsten des nanotechnischen Produktes aus. Wie am Beispiel der CO<sub>2</sub>-Emissionen erläutert, ist das Einsparpotenzial bei Bilanzierung eines einzelnen nanofaserbeschichteten Filtermediums jedoch sehr gering. Erst die Betrachtungen der im Markt eingesetzten großen Filtermengen bzw. hoher PKW-Gesamtfahrleistungen verdeutlichen die Umweltentlastungspotenziale infolge des Einsatzes der Nanotechnologie im Filterbau.
- Angesichts der gegenwärtigen Datenlage wurde in den entsprechenden Abschnitten des Berichtes auf Möglichkeiten für weitergehende Betrachtungen hingewiesen. So könnte z.B. eine Fortführung der Fallstudie „Solare Wasserbehandlung“ nach entsprechender Erweiterung der Anlagentechnik und Analytik sowie unter Berücksichtigung einer konkreten Rückgewinnung und Wiederverwendung der Betriebsmittel erfolgen.



## 5 Zusammenfassung

Die Nanotechnologie ist in den vergangenen Jahren verstärkt ins Blickfeld der öffentlichen Diskussion gelangt und gilt im Allgemeinen als eine der Schlüsseltechnologien der Zukunft. Schwerpunkt der vorliegenden Studie waren nanotechnische Anwendungen im Umweltschutz, speziell in den Bereichen Wasser und Luft.

Zunächst wurden sowohl im Forschungs- und Entwicklungsstadium befindliche nanotechnische Lösungen als auch am Markt verfügbare Produkte recherchiert. Ziel war es, einen Querschnitt gegenwärtiger und zukünftig möglicher Lösungen im Umweltschutz aufzuzeigen. Anschließend wurden mit Hilfe ökobilanzieller Betrachtungen anhand von zwei Fallstudien überprüft, welche Umweltentlastungs- und Umweltbelastungspotenziale sich durch den Einsatz nanotechnischer Produkte oder Verfahren im Vergleich zu konventionellen Lösungen ergeben. Die erste Fallstudie beschäftigt sich mit der solaren Behandlung von mit Tetrachlorethen belastetem Wasser unter Einsatz von nanoskaligem Titandioxid (Halbleiter-Photokatalyse) im Vergleich zum Photo-Fenton-Verfahren. In der zweiten Fallstudie wurde ein PKW-Kombinationsfilter mit Nanofaserbeschichtung mit einem herkömmlichen Kombinationsfilter verglichen.

Im Ergebnis der durchgeführten Recherche waren die folgenden nanotechnischen Lösungen für die Wasser- und Luftreinhaltung festzuhalten:

### **Sektor Wasser**

Nanotechnische Produkte kommen in der Trinkwasseraufbereitung, der Abwasserreinigung und der Grundwassersanierung zum Einsatz. Neben bereits kommerziell verfügbaren Produkten und Anwendungen befinden sich zahlreiche Techniken in den folgenden Bereichen noch im Entwicklungs- oder Teststadium:

- **Filtration/Separation:** Nanoskalige Membranen stellen den Stand der Technik dar. Als Membranmaterialien werden sowohl organische Polymere als auch anorganische Keramiken verwendet. Anwendungen der Nanofiltration finden sich z.B. in der Trinkwasseraufbereitung, Lebensmittelindustrie sowie in der Textil- und Farbstoffindustrie. Große Potenziale der Nanotechnologie werden im Bereich der Meerwasserentsalzung gesehen.

- Funktionalisierung von Oberflächen: Viele Entwicklungen zielen derzeit darauf ab, Nanomaterialien mit definierten Funktionalitäten, wie speziellen chemischen oder mechanischen Eigenschaften, auszustatten. Beschichtungen auf Nanotechnologie-Basis sollen z.B. Fouling-Prozessen bzw. Ablagerungen auf Membranen, in Wärmetauschern, Reaktoren oder an Schiffsrümpfen entgegenwirken.
- Sorption: Durch den Einsatz von Sorptionsmitteln ergeben sich in verschiedenen Bereichen der Wasserbehandlung Möglichkeiten für nanotechnische Anwendungen. Beispielhaft sind ein Adsorbermedium zur Abtrennung von Arsen aus Trink- und Abwasser sowie ein papierähnliches Material aus Nanodrähten zur Aufnahme hydrophober Flüssigkeiten wie Mineralöl aus Wasser zu nennen.
- Nanokatalysatoren: In der Abwasserreinigung kommt nanoskaliges Titandioxid als Katalysator zum Einsatz. Bei der Photokatalyse werden durch Bestrahlung des Titandioxids sowohl Wasser als auch Luftsauerstoff zu reaktiven Hydroxylradikalen umgesetzt, die toxische oder biologisch schwer abbaubare organische Wasserinhaltsstoffe umwandeln. Im Fokus derzeitiger Entwicklungen steht die Anwendung der Photokatalyse in Ländern mit starker Sonneneinstrahlung und/oder für die Behandlung kleiner, schwach belasteter Wassermengen. Weitere Forschungsarbeiten betreffen die Entwicklung eines Nanokatalysators (Palladium auf Magnetit-Nanopartikeln) für die Behandlung von mit halogenorganischen Kohlenwasserstoffen belasteten Abwässern.
- Nanoreagenzien: Verschiedene Nanopartikel auf der Basis von nullwertigem Eisen finden in der In-situ-Grundwassersanierung Anwendung. Neben dem reinen Nanoeisen werden u.a. bimetallische Nanopartikel und eine mit Eisen-Nanopartikeln belegte Aktivkohle im Rahmen von Labor- und Pilotversuchen untersucht bzw. teilweise bereits für Sanierungen eingesetzt. Die Entwicklungen und Anwendungen konzentrieren sich auf den Abbau chlorierter organischer Schadstoffe im Grundwasser.

## **Sektor Luft**

Im Bereich der Luftreinhaltung findet die Nanotechnik seit 35 Jahren in Autoabgaskatalysatoren Anwendung. Darüber hinaus finden sich nanotechnische Produkte z.B. in

Luftfiltern und bei photokatalytischen Anwendungen zur Entfernung von Luftschadstoffen.

- **Autoabgaskatalysatoren:** Katalysatoren zählen im Automobilbereich zum Stand der Technik. Ein Dreiwegekatalysator besteht aus einem Edelstahl-Gehäuse, das im Inneren katalytisch aktives Material enthält. Dieses befindet sich als Schicht auf einem Trägermaterial (Washcoat). Die Partikelgröße der im Washcoat katalytisch aktiven Edelmetalle liegt im nanoskaligen Bereich. Forschungsgegenstand ist gegenwärtig u.a. die Reduzierung des Edelmetallgehaltes bei vergleichbarer katalytischer Wirkung.
- **Filtration/Separation:** Im Automobilbereich kommen nanofaserbeschichtete Filtermedien in Kabinenluftfiltern zum Einsatz. Weitere Anwendungsbereiche nanofaserbeschichteter Filterwerkstoffe liegen u.a. in der Luftfiltration (Entstaubung) in Industrieanlagen und in der Zuluftfiltration für Gasturbinen. Forschungsvorhaben beschäftigen sich u.a. mit der Entwicklung und Optimierung nanostrukturierter Membranen zur Abtrennung von Kohlendioxid aus Kraftwerksabgasen.
- **Nanokatalysatoren:** Nanokatalysatoren zur nachhaltigen Entfernung von Schadstoffen aus der Luft befinden sich zumeist noch im Entwicklungsstadium oder am Beginn der Praxisreife. Zum Beispiel werden durch die Verwendung von nanokristallinem Titandioxid in Zement photokatalytisch aktive Betonoberflächen geschaffen, die einen Beitrag zur Luftreinhaltung in Städten leisten können.

### **Fallstudie 1: Solare Wasserbehandlung**

Im Rahmen dieser Fallstudie erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 14040 und 14044 eine ökobilanzielle Betrachtung von zwei Ansätzen zur solaren Behandlung von mit Tetrachlorethen belastetem Wasser. Untersucht wurde der Einsatz von nanoskaligem Titandioxid (Halbleiter-Photokatalyse) im Vergleich zur Anwendung von Eisen(II)-Verbindungen mit Wasserstoffperoxid (Photo-Fenton-Verfahren).

Die Datenerhebung erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln, das Reaktoren zur Photokatalyseforschung betreibt.

Im Rahmen der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung wurden für beide Varianten zur solaren Wasserbehandlung die Materialien zum Aufbau des Reaktors inklusive ihrer Produktion (Vorketten) sowie der Energiebedarf für die Versuchsdurchführung

berücksichtigt. Des Weiteren wurden die jeweils eingesetzten Chemikalien inklusive ihrer Herstellung einbezogen. Eine mögliche Abtrennung und Wiederverwendung einzelner Chemikalien konnte aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt werden.

Beide Ansätze wurden auf Basis der Bewertungsmethode Eco-indicator 99 verglichen. Die bewerteten Schutzgüter umfassten die Kategorien „Menschliche Gesundheit“, „Ressourcenverbrauch“ und „Ökosystemqualität“. Betrachtet wurde sowohl die Beeinträchtigung der Schutzgüter infolge des Reaktorbaus als auch drei Szenarien (Batch-versuch, 1 Jahr, 10 Jahre) hinsichtlich des Anlagenbetriebes. Die Wirkungsabschätzung ergab, dass bei beiden Ansätzen die Umweltbeeinträchtigung hauptsächlich durch den Ressourcenverbrauch bestimmt wurde.

Im Ergebnis der Fallstudie „Solare Wasserbehandlung“ war festzuhalten, dass bei einem längerfristigen Betrieb der solaren Anlage unter den genannten Randbedingungen beim Einsatz von nanoskaligem Titandioxid für die Photokatalyse im Vergleich zum Photo-Fenton-Verfahren mit einem deutlich höheren Umweltbelastungspotenzial zu rechnen ist. Das mit zunehmender Reaktor-Laufzeit steigende Umweltbelastungspotenzial bei der Photokatalyse ist auf das Titandioxid zurückzuführen, das durch einen hohen Verbrauch an Ressourcen in der Vorkette gekennzeichnet ist.

## **Fallstudie 2: Filtermedien in Kabinenluftfiltern**

Im Rahmen dieser Fallstudie wurde ein PKW-Kombinationsfilter mit Nanofaserbeschichtung mit einem herkömmlichen Kombinationsfilter verglichen. Die Datenerhebung erfolgte in Zusammenarbeit mit der Mann + Hummel GmbH. Dabei wurden, soweit dieses aus Wettbewerbsgründen möglich war, produktspezifische Informationen und Versuchsdaten des Kooperationspartners berücksichtigt.

Im Rahmen der ökobilanziellen Betrachtung lag der Schwerpunkt der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung auf den Modulen „Produktion“ und „Gebrauch im PKW“. Eine Abschätzung des Kraftstoff-Einsparpotenzials bzw. der möglichen CO<sub>2</sub>-Reduzierung ergab bei Betrachtung eines einzelnen nanofaserbeschichteten Filters äußerst geringe Vorteile gegenüber dem konventionellen Filter. Zwei Beispiele verdeutlichten jedoch, welche Umweltentlastungspotenziale sich durch den Einsatz nanofaserbeschichteter Filter durch Summationseffekte ergeben können:

- Auf Basis der von Mann + Hummel GmbH zur Verfügung gestellten Verkaufszahlen (2006 bis 2008: Auslieferung von etwa 4,1 Mio. Filter mit Nanofasern) ergibt sich für diesen Zeitraum eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von ca. 1.800 t durch den Einsatz der Nanotechnologie. Da auch Mitbewerber Filter mit Nanofasern anbieten, dürfte die tatsächliche CO<sub>2</sub>-Reduzierung noch deutlich höher anzusetzen sein.
- Die Anzahl der Fahrzeuge in Deutschland belief sich am 01. Januar 2008 auf etwa 49 Mio. (41 Mio. PKW, 8 Mio. Kleintransporter, LKW, Busse und andere). Angenommen, dass alle PKW mit Kabinenluftfiltern mit Nanofasern ausgestattet wären, ergibt sich theoretisch eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emission von 18.150 t pro Lebensdauer der Filter (je 15.000 km) verglichen mit dem Fall, dass alle PKW noch mit konventionellen Filtern ausgerüstet wären.

Nachfolgend wurden Produktion und Gebrauch beider Kabinenluftfiltermedien mit Hilfe der Bewertungsmethoden Eco-indicator 99 bzw. CML 2001 analysiert. Der Vergleich der zwei Filtermedien nach Eco-indicator 99 zeigte nur marginale Differenzen innerhalb der drei Schutzgüter „Menschliche Gesundheit“, „Ressourcenverbrauch“ und „Ökosystemqualität“. Festzuhalten war, dass die Resultate wesentlich durch die Nutzenphase (PKW-Fahrleistung von 15.000 km) bestimmt waren; die Produktion inklusive Vorketten der Filtermedien selbst hatte nur einen minimalen Anteil an der EI99-Gesamtpunktzahl und damit an der Beeinträchtigung der Schutzgüter.

Im Ergebnis der Fallstudie „Filtermedien in Kabinenluftfiltern“ fiel damit die ökobilanzielle Betrachtung leicht zugunsten des nanotechnischen Produktes aus. Wie am Beispiel der CO<sub>2</sub>-Emissionen erläutert wurde, ist das Einsparpotenzial bei Bilanzierung eines einzelnen nanofaserbeschichteten Filtermediums jedoch sehr gering. Erst die Betrachtungen der im Markt eingesetzten großen Filtermengen bzw. hoher PKW-Gesamtfahrleistungen verdeutlichen die Umweltentlastungspotenziale infolge des Einsatzes der Nanotechnologie im Filterbau.

## 6 Quellenverzeichnis

- /1/ BMBF: Nano-Initiative - Aktionsplan 2010. Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2006.
- /2/ Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Anwendung von Nanopartikeln, 2007.
- /3/ Luther, W., Bachmann, G., Grimm, V., Marscheider-Weidemann, F., Schug, H., Zweck, A.: Zukunftsmarkt Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie, Dessau-Roßlau, Berlin, 2007.
- /4/ Bachmann, G., Grimm, V., Hoffknecht, A., Luther, W., Ploetz, C., Reuscher, G., Teichert, O., Zweck, A.: Nanotechnologien für den Umweltschutz. Band Nr. 71, Zukünftige Technologien Consulting (ZTC) der VDI Technologiezentrum GmbH, 2007.
- /5/ Meridian Institute: Nanotechnology, Water, & Development, Commissioned as Part of the Global Dialogue on Nanotechnologies and The Poor: Opportunities and Risks, Washington, D.C., 2006.
- /6/ Steinfeldt, M., von Gleich, A., Petschow, U., Pade, C.: Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2008 (in Druck).
- /7/ Melin, T., Rautenbach, R.: Membranverfahren - Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- /8/ EnTec: Abwasseraufbereitung mittels Nanofiltration – theoretische Grundlagen und Anwendungsbeispiele aus der Praxis. Innovationsforum Nanobasierte Umwelttechnik, Abruf 16.01.2008.  
[http://www.nano-umwelt.de/uploads/media/MARKUS\\_GRAFF\\_Hamburg.pdf](http://www.nano-umwelt.de/uploads/media/MARKUS_GRAFF_Hamburg.pdf)
- /9/ Gorenflo, A.: Rückhalt und Fouling von natürlichen organischen Substanzen bei der Nano- und Ultrafiltration. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Wasserchemie und der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe (TH), Band 38, 2003.

- /10/ Samhaber, W.M.: Anwendungen und Aufgabenstellungen der Nanofiltration in der Lebensmittelindustrie. Chemie Ingenieur Technik, 77 (5), S. 583 - 588, 2005.
- /11/ Packhäuser, U.: Spitzenleistung auf geringstem Raum – Membranverfahren für die Behandlung von Industrieabwässern. Verfahrenstechnik, 36 (11), S. 10 - 11, 2002.
- /12/ Zweckverband Wasserversorgungsgruppe Mühlbach: Das Verfahren der Nanofiltration. [http://www.wvg-muehlbach.de/aktuelles\\_turm.php?id=2](http://www.wvg-muehlbach.de/aktuelles_turm.php?id=2), Abruf 21.04.2008.
- /13/ Voigt, I.: Nanoporöse anorganische Membranen - Stand der Fertigung und Entwicklung. Innovationsforum Nanobasierte Umwelttechnik, 09./10.11.2006. [http://www.nano-umwelt.de/uploads/media/INGOLF\\_VOIGT\\_Hermsdorf.pdf](http://www.nano-umwelt.de/uploads/media/INGOLF_VOIGT_Hermsdorf.pdf), Abruf 21.04.2008.
- /14/ EnTec: Abwasseraufbereitung mittels Nanofiltration bei der Grundfos Pumpenfabrik GmbH. [http://www.marketing-channel.de/dgmt/dateien/Grundfos\\_NF-Artikel.pdf](http://www.marketing-channel.de/dgmt/dateien/Grundfos_NF-Artikel.pdf), Abruf 21.04.2008.
- /15/ ItN Nanovation GmbH: Wir machen aus kleinen Teilchen große Lösungen. <http://www.entsorgungsverband.de/uploads/media/Vortrag-Belieres.pdf>, Abruf 21.04.2008.
- /16/ BMU: Nanofiltration mit Konzentratbehandlung. <http://www.bmu.de/foerderprogramme/doc/2373.php>, Abruf 21.04.2008.
- /17/ Mishina, O.: Verfahren zur Abtrennung von einwertigen Anionen aus alkalischen Prozesslösungen. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, 127 S., 2005.
- /18/ Der Tagesspiegel: Nano macht das Meer süß, 28.08.2006. <http://www.tagesspiegel.de/magazin/wissen/gesundheit/art300,2251145>, Abruf 07.12.2007.
- /19/ Samhaber, W.: Neue Trennmethode mit Nanopartikeln. Univationen 1/06, Johannes Kepler Universität Linz, 2006.

- /20/ Calmano, W., Nolte, M.: Einsatz von elektrisch leitfähigen Polymeren in der Umweltanalytik und Umwelttechnik. Technische Universität Hamburg-Harburg. <http://www.tu-harburg.de/iue/doc/dt/forschung/projekte/052-polymere.html>, Abruf 18.01.2008.
- /21/ Europäisches Patentamt: Verfahren zur Vermeidung oder Verminderung von Biofilmen auf einer Oberfläche. Anmelder: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser, Beratungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH, Erfinder: Weidlich, C., Mangold, K.-M., Jüttner, K., Schaule, G., Flemming, H.C., Europäische Patentanmeldung vom 20.09.2006, Veröffentlichung 25.04.2007.
- /22/ Lanxess Deutschland GmbH (2006): Bayoxide® E 33 - Granulate zur Arsen-Adsorption aus Wasser. Produktbroschüre, Ausgabe: 05/2006.
- /23/ Schlegel, A., Dennis, R., Simms, J.: Altes Eisen schluckt Arsen. Tagungsband 56. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Behandlungstechnologien für bergbau-beeinflusste Wässer, S. 69 - 73, 2005.
- /24/ Bartsch, S., Kölling, M., Hartmann, D., Rübiger, N., Mennig, M., Schmidt, H.: Sorption von Arsen an paramagnetischen Kompositpartikeln. Arsen 2005, Leipzig, Tagungsband, S. 35, 2005.
- /25/ Yuan, J., Liu, X., Akbulut, O., Hu, J., Suib, S.L., Kong, J., Stellacci, F.: Superwetting nanowire membranes for selective absorption. Nature Nanotechnology, Vol. 3(6), S. 332 - 336, 2008.
- /26/ Bahnemann, D.W.: Photochemie und Nanotechnologie. <http://www.tci.uni-hannover.de/photochemie.html>, Abruf 03.03.2008.
- /27/ Groß, F.: Anwendungsmöglichkeiten photokatalytischer Beschichtungen im Bereich von Gebäudefassaden. Nanotexture 2004, Abruf 22.04.2008. [http://www.zukuenftigetechnologien.de/nanotecture/gross\\_presentation.pdf](http://www.zukuenftigetechnologien.de/nanotecture/gross_presentation.pdf)
- /28/ Lindner, M., Bahnemann, D., Hirthe, B., Griebler, W.-D.: Neue Katalysatoren zur photokatalytischen Abwasserreinigung. Wasser, Luft, Boden, 11-12, S. 38 - 44, 1994.



- /29/ Ayala, R.P.: Photokatalytische Behandlung von biologisch schwer abbaubaren Wasserverunreinigungen mit Titandioxid und simuliertem Sonnenlicht. Dissertation, Technische Universität Berlin, Fakultät III - Prozesswissenschaften, 123 S., 2002.
- /30/ Bahnemann, D.: Photocatalytic water treatment: solar energy applications. Solar Energy, 77, 5, S. 445 - 459, 2004.
- /31/ DLR: Energy Globe Award für ein DLR-Projekt zur solaren Wasserreinigung. [http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-3432/7418\\_read-12569/7418\\_page-2/](http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-3432/7418_read-12569/7418_page-2/), Abruf 19.06.2008.
- /32/ NanoDerm - Quality of Skin as a Barrier to ultra-fine Particles: Final Report (2007) <http://www.uni-leipzig.de/%7Enanoderm/>, Abruf 23.04.2008.
- /33/ Hildebrand, H., Mackenzie, K., Kopinke, F.-D.: Novel nano-catalysts for wastewater treatment. Global NEST Journal, 10 (1), S. 47 - 53, 2008.
- /34/ Franzreb, M.: Magnettechnologie in der Verfahrenstechnik wässriger Medien. Wissenschaftliche Berichte FZKA 6916, Karlsruhe, 2003.
- /35/ Koenen, R., Püttmann, W.: Ersatz von MTBE durch ETBE: Ein Vorteil für den Grundwasserschutz?, Grundwasser, 10 (4), 2005.
- /36/ TU Dresden: Projektdetails zu "Nanoskalige Biokompositmaterialien als Biokatalysatoren für die Behandlung von mit MTBE/ETBE belastetem Wasser: Rekombinante Expression MTBE/ETBE abbauender Enzyme in Mikroorganismen/Charakterisierung der Biocere (NANOKAT)", Abruf 05.02.2009 [http://forschungsinfo.tu-dresden.de/recherche/s\\_projektdetails.html?forschungsprojekt\\_id=6959&professur\\_id=331](http://forschungsinfo.tu-dresden.de/recherche/s_projektdetails.html?forschungsprojekt_id=6959&professur_id=331)
- /37/ Köber, R., Kopinke, F.-D.: Sanieren mit Nanoeisen - Nullwertiges Eisen in Form kolloidaler Partikel zur Quellen- und Fahnensanierung im Grundwasser. TerraTech, 6, 2007.
- /38/ Orth, W.S., Gillham, R.W.: Dechlorination of trichlorethene in aqueous solution using Fe<sup>0</sup>. Environ. Sci. Technol., 30 (1), S. 66 - 71, 1996.
- /39/ Arnold, W.A., Roberts, A.L.: Pathways and kinetics of chlorinated ethylene and chlorinated acetylene reaction with Fe(0) particles. Environ. Sci. Technol., 34 (9), S. 1794 - 1805, 2000.

- /40/ Gillham, R.W., O'Hannesin, S.F.: Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zero-valent Iron. *Ground Water*, 32 (6), S. 958-967, 1994.
- /41/ Zhang, W.-X.: Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview. *Journal of Nanoparticle Research*, 5, S. 323-332, 2003.
- /42/ Tratnyek, P.G., Johnson, R.L.: Nanotechnologies for environmental cleanup. *nanotoday*, 1 (2), S. 44 - 48, 2006.
- /43/ United States Environmental Protection Agency: Nanotechnology for Site Remediation: Fact Sheet. EPA 542-F-08-009, 2008.
- /44/ Schrick, B., Hydutsky, B.W., Blough, J.L., Mallouk, T.E.: Delivery vehicles for zerovalent metal nanoparticles in soil and groundwater. *Chem. Mater.*, 16, S. 2187- 2193, 2004.
- /45/ Macé, C., Desrocher, S., Gheorghiu, F., Kane, A., Pupeza, Cernik, M., Kvapil, M.P., Venkatakrishnan, R., Zhang, W.X.: Nanotechnology and Groundwater Remediation: A Step Forward in Technology Understanding, *Remediation Journal*, 16 (2), S. 23 - 33, Wiley Editor, 2006.
- /46/ Lenné, S.: Labor- und Geländeversuche zur Sanierung eines Grundwasserschadensfalles in Hannover-Südstadt mit reaktiven Nanopartikeln. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Universität Hannover, 176 S., 2006.
- /47/ Golder Associates GmbH (2007): Pilotversuch zum Einsatz von Eisen-Nanopartikeln zur Sanierung von Grundwasser- und Bodenkontaminationen auf dem ehemaligen Betriebsgelände der (vertraulich) in (vertraulich). Bericht vom 30.07.2007.
- /48/ Altlastensanierungs- und Aufbereitungsverband Nordrhein-Westfalen (AAV): In situ-Sanierung eines Grundwasserschadens mit Nano-Eisenpartikeln. Jahresbericht, S. 42 - 47, 2007.
- /49/ Elliot, D.W., Zhang, W.X.: Field assessment of nanoscale bimetallic particles for groundwater treatment. *Environ. Sci. Technol.* 35 (24), S. 4922 - 4926, 2001.
- /50/ Quinn, J., Geiger, C., Clausen, C., Brooks, K., Coon, C., O'Hara, S., Krug, T., Major, D., Yoon, W.-S., Gavaskar, A., Holdsworth, T.: Field demonstration of DNAPL dehalogenation using emulsified zero-valent iron. *Environ. Sci. Technol.*, 39 (5), S. 1309 - 1318, 2005.

- /51/ Mackenzie, K., Schierz, A., Georgi, A., Kopinke, F.-D.: Colloidal activated carbon and carbo-iron – novel materials for in-situ groundwater treatment. Global NEST Journal, 10 (1), S. 54 - 61, 2008.
- /52/ Chang, Q.: Development of GAC-NZVI Adsorbent for Arsenic Removal. <http://www.ndsu.edu/ndsu/wrri/fellowship/QigangChang.htm>, Abruf 14.04.2008.
- /53/ Majewski, P.J., Chan, C.P.: Water purification by functionalised self-assembled monolayers on silica particles. International Journal of Nanotechnology. 5 (2/3), S. 291-298, 2008.
- /54/ TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag): Nanotechnologie. Autoren: Paschen, H., Coenen, Chr., Grünwald, R., Oertel, D., Revermann, C., TAB-Arbeitsbericht Nr. 92, Berlin, 2003.
- /55/ Umicore AG & Co. KG: Produktinformation, 2008.
- /56/ Behrendt, N. (Mann + Hummel Innenraumfilter Deutschland): Nanofaserbeschichtungen und deren Anwendungen in der Luftfiltration. Vortrag im Rahmen der IHK-Tagung „Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie in der Luftreinhaltung und im Umweltschutz“, Schweinfurt 04.03.2008.
- /57/ Hessen Agentur GmbH (Hrsg.): Nanotechnologien im Automobil - Innovationspotenziale in Hessen für die Automobil- und Zuliefer-Industrie. Band 3 der Schriftenreihe der Aktionslinie hessen-nanotech des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, 2006.
- /58/ Placke, M.: Nanofaserbeschichtung von Filterwerkstoffen, Innovationsforum Nanobasierte Umwelttechnik, Jena, 10.11.2006, Abruf 25.04.2008  
[http://www.nano-umwelt.de/uploads/media/DANIEL\\_PLACKE\\_Marburg.pdf](http://www.nano-umwelt.de/uploads/media/DANIEL_PLACKE_Marburg.pdf)
- /59/ Jäger, S., Näth, O.: Nanoporöse Metallmembranen. Institut für Werkstoffe, TU Braunschweig. Abruf 12.12.2007.  
[http://www.ifw.tubs.de/ifw/deutsch/forschung/neue\\_werk/nanoporoess/](http://www.ifw.tubs.de/ifw/deutsch/forschung/neue_werk/nanoporoess/)
- /60/ NANOLOWA - Nano-structured Membranes against Global Warming, <http://www.nanoglowa.com/German%20Index.html>, Abruf 26.08.2008.
- /61/ Stephan, D.: Abbau von Luftschadstoffen und Selbstreinigung durch dünne Schichten aus Nano-TiO<sub>2</sub>. Proceedings 52. BetonTage, Neu-Ulm, 12.-14. Februar 2008.

- /62/ HeidelbergCement AG: Technisches Merkblatt TioCem premium.  
[http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/FD19792C-0DFF-42D2-9B0A-DF6CE99F338B/0/TMB\\_TioCem\\_CEMIIAS425R.pdf](http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/FD19792C-0DFF-42D2-9B0A-DF6CE99F338B/0/TMB_TioCem_CEMIIAS425R.pdf), Abruf 25.04.2008.
- /63/ Mötzl, H., Novelo, E.: Fotoaktive Fassadenoberflächen Schadstoffabbau durch Zement, Nanopartikel und Licht. Expertenforum Beton 2006, Fassaden – Elemente aus Beton, S. 30 - 34, 2006.
- /64/ Dienemann, W.: Selbstreinigende Fassadenplatten aus Beton - Technische Grundlagen. 50. Betontage, Neu-Ulm, 2006.
- /65/ Umweltbundesamt: Nanotechnik: Chancen und Risiken für Mensch und Umwelt. Hintergrundpapier, 22 S., August 2006.
- /66/ NanoKommission der deutschen Bundesregierung: Verantwortlicher Umgang mit Nanotechnologien - Bericht und Empfehlungen der NanoKommission der deutschen Bundesregierung 2008, November 2008.  
[http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nanokomm\\_abschlussbericht\\_2008.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nanokomm_abschlussbericht_2008.pdf)
- /67/ DECHEMA, VCI: Roadmap for Safety Research on Nanomaterials – with a priority list for the European 7th R&D Framework Programme and national research programmes. July 5, 2007.
- /68/ DECHEMA, VCI: Environmental Aspects of Nanoparticles – with a priority list for the European 7th R&D Framework Programme and national research programmes. September 21, 2007.
- /69/ Swiss Re (Hrsg.): Nanotechnologie. Kleine Teile – große Zukunft?, 2004.
- /70/ Allianz, OECD: Small sizes that matter: Opportunities and risks of Nanotechnologies. Lauterwasser, C. (ed.), München, Paris, 2005.
- /71/ Lloyds: Nanotechnology recent developments, risks and opportunities. London, 2007.
- /72/ BAuA, BfR, UBA: Nanotechnologie: Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanomaterialien - Forschungsstrategie, Dezember 2007.  
<http://www.umweltbundesamt.de/technik-verfahren-sicherheit/dokumente/forschungsstrategie.pdf>

- /73/ OECD: Final report on ISO, IEC, NIST and OECD International workshop on documentary standards for measurement and characterization for nanotechnologies NIST, Gaithersburg, Maryland, USA, 26. - 28. Februar 2008.
- /74/ Führ, M., Hermann, A., Merenyi, S., Moch, K., Möller, M., Kleihauer, S., Steffensen, B.: Rechtsgutachten Nano-Technologien - ReNaTe. Legal appraisal of nano Technologies, Forschungsbericht 363 01 108, Umweltbundesamt Texte 10/2007.
- /75/ BMBF: Bekanntmachung „NanoNature: Nanotechnologien für den Umweltschutz - Auswirkungen synthetischer Nanomaterialien auf die Umwelt". <http://www.bmbf.de/foerderungen/12531.php>, Abruf 07.08.2008
- /76/ Steinfeldt, M., Petschow, U., Hirschl, B.: Anwendungspotenziale nanotechnologiebasierter Materialien - Analyse ökologischer, sozialer und rechtlicher Aspekte. Schriftenreihe des IÖW 169/03, S. 20 - 57, 2003.
- /77/ Lloyd, S. M., Lave, L. B., Matthews, H. S.: Life cycle benefits of using nanotechnology to stabilize platinum-group metal particles in automotive catalysts. Environ. Sci. Technol., 39, S. 1384 - 1392, 2005.
- /78/ Hillenbrand, T., Böhm, T., Kotz, C., Schikorra, V., Schleich, J., Heese, S., Baldauf, G.: Zentrale Enthärtung von Trinkwasser - Eine ökologische und ökonomische Betrachtung. Fraunhofer IRB Verlag, 2004.
- /79/ Goedkoop, M., Spriensma, R.: The Eco-indicator 99: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. PRé Consultants, Amersfoort, 2000.
- /80/ Guinée, J. B. et al.: CML 2001 - An operational guide to the ISO-standards, Final report, Centre of Environmental Science (CML) Leiden, 2001.
- /81/ Plataforma Solar de Almeria:  
<http://www.psa.es/webeng/instalaciones/quimica.html/>, Abruf 11.08.2008.
- /82/ Bahnemann, D.: Solare Abwasserentgiftung. Nachr. Chem. Tech. Lab, 42, 4, S. 378 - 388, 1994.
- /83/ Zertal, A., Molnár-Gábor, D., Malouki, M. A., Sehili, T., Boule, P.: Photocatalytic transformation of 4-chloro-2-methylphenoxyacetic acid (MCPA) on several kinds of TiO<sub>2</sub>. Applied Catalysis B: Environmental, 49, 2, S. 83 - 89, 2004.

- /84/ Dillert, R., Brandt, M., Fornefett, I. Siebers, U., Bahnemann, D.: Photocatalytic degradation of trinitrotoluene and other nitroaromatic compounds. *Chemosphere* 30, S. 2333 - 2341, 1995.
- /85/ Pacheco, J. E., Mehos M., Turchi C., Link, H.: Operation of a solar photocatalytic water: Treatment system at a superfund site. *Photocatalytic Purification and Treatment of Water and Air*, D. F. Otlis, D. F., Al-Ekabi, H. (Hrsg.), S. 547 - 556, 1993.
- /86/ Cho, I.H., Kim, H.Y., Zoh, K.D.: Detoxification of trichlorethylene (TCE) using solar light/TiO<sub>2</sub> in a UV concentrating radiation system. *Journal of Water and Environment Technology*, 1, 1, S. 37 - 42, 2003.
- /87/ Degussa AG: Titandioxid P 25, Herstellung - Eigenschaften - Anwendungen, Schriftenreihe Fine Particles, Nummer 80.
- /88/ Stupp, H.-D., Bakenhus, A., Stauffer, R., Lorenz, D.: Sanierungsoptimierung von CKW-Grundwasserschäden - Möglichkeiten zur Reduzierung der Sanierungskosten. <http://www.ckw-sanierung.de/>, Abruf 19.06.2008.
- /89/ Rheinland-Pfalz, Landesamt für Umweltschutz und Gewerbeaufsicht, Landesamt für Wasserwirtschaft: Altablagerungen, Altstandorte und Grundwasserschäden - Merkblatt ALEX 02: Orientierungswerte für die abfall- und wasserwirtschaftliche Beurteilung, 1997.
- /90/ Jung, C.: Persönliche Mitteilungen. DLR Köln, September 2008.
- /91/ Ortiz, I.M.: Life Cycle Assessment as a tool for green chemistry: Application to different oxidation processes for wastewater treatment. *Tesi Doctoral*, Universitat Autònoma de Barcelona, 258 S., 2006.
- /92/ helsa-automotive GmbH: Nanofaserfiltermedien für den Fahrzeuginnenraum. [http://www.helsa-automotive.net/de/images/artikel\\_de.pdf](http://www.helsa-automotive.net/de/images/artikel_de.pdf), Abruf 13.03.2008.
- /93/ Mann + Hummel GmbH: MANN Innenraumfilter: Modernste Technik für ein besseres Klima im Fahrzeuginnenraum. 4 S.  
[www.mannhummel.com/company/index.html](http://www.mannhummel.com/company/index.html), Abruf 06.06.2008
- /94/ Dersch, R., Greiner, A., Steinhart, M., Wendorff, J. H.: Bausteine aus Polymeren. Nanofasern und Nanoröhrchen. *Chem. Unserer Zeit*, 39: S. 26 - 35, 2005.

- /95/ Universität Marburg: Elektrospinnen von Nanofasern. Abruf 20.08.2008.  
<http://www.uni-marburg.de/fb15/ag-wendorff/forschung/elektrospinnen/>
- /96/ Behrendt, N.: Persönliche Mitteilungen. Mann + Hummel GmbH, Juni 2008.
- /97/ PlasticsEurope - Association of Plastics Manufacturers: Eco-profiles of the European Plastics Industry: Polypropylene (PP), 19 S., Brüssel, 2005.
- /98/ Verband der Automobilindustrie (VDA): Mitteilung per e-mail vom 25.06.2008.
- /99/ Schrimpf, E.: Die Stellung von Pflanzenöl im Vergleich mit anderen biogenen Kraftstoffen, energie pflanzen VI/2006, S. 50 - 53, 2006.
- /100/ DEKRA Automobil GmbH (2007): Informationen zum Thema CO<sub>2</sub>.  
<http://www.dekra-online.de/co2/>, Abruf 24.06.2008.
- /101/ Kraftfahrt-Bundesamt: Fahrzeugzulassungen: Neuzulassungen, Emissionen, Kraftstoffe, Jahr 2007. Statistische Mitteilungen, April 2008.
- /102/ Kraftfahrt-Bundesamt: Der Fahrzeugbestand am 01. Januar 2008,  
<http://www.kba.de/>, Abruf 01.07.2008.
- /103/ Umweltbundesamt: Daten- und Rechenmodell Energieverbrauch und Luftschadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland (TREMODO), Version 4.17, 2007, Abruf 02.09.2008.  
[www.umweltbundesamt-umwelt-deutschland.de/umweltdaten/public/document/downloadImage.do?ident=9066](http://www.umweltbundesamt-umwelt-deutschland.de/umweltdaten/public/document/downloadImage.do?ident=9066)
- /104/ ifu (Institut für Umweltinformatik) Hamburg GmbH: Umberto Handbuch 3.5,  
<http://www.umberto.de/de/knowledge/mfn/>, Abruf 12.06.2008.

## 7 Anhang

Anhang 1: Auswahl deutscher Unternehmen mit Produkten/Verfahren im Bereich Nanotechnologie und Umwelt

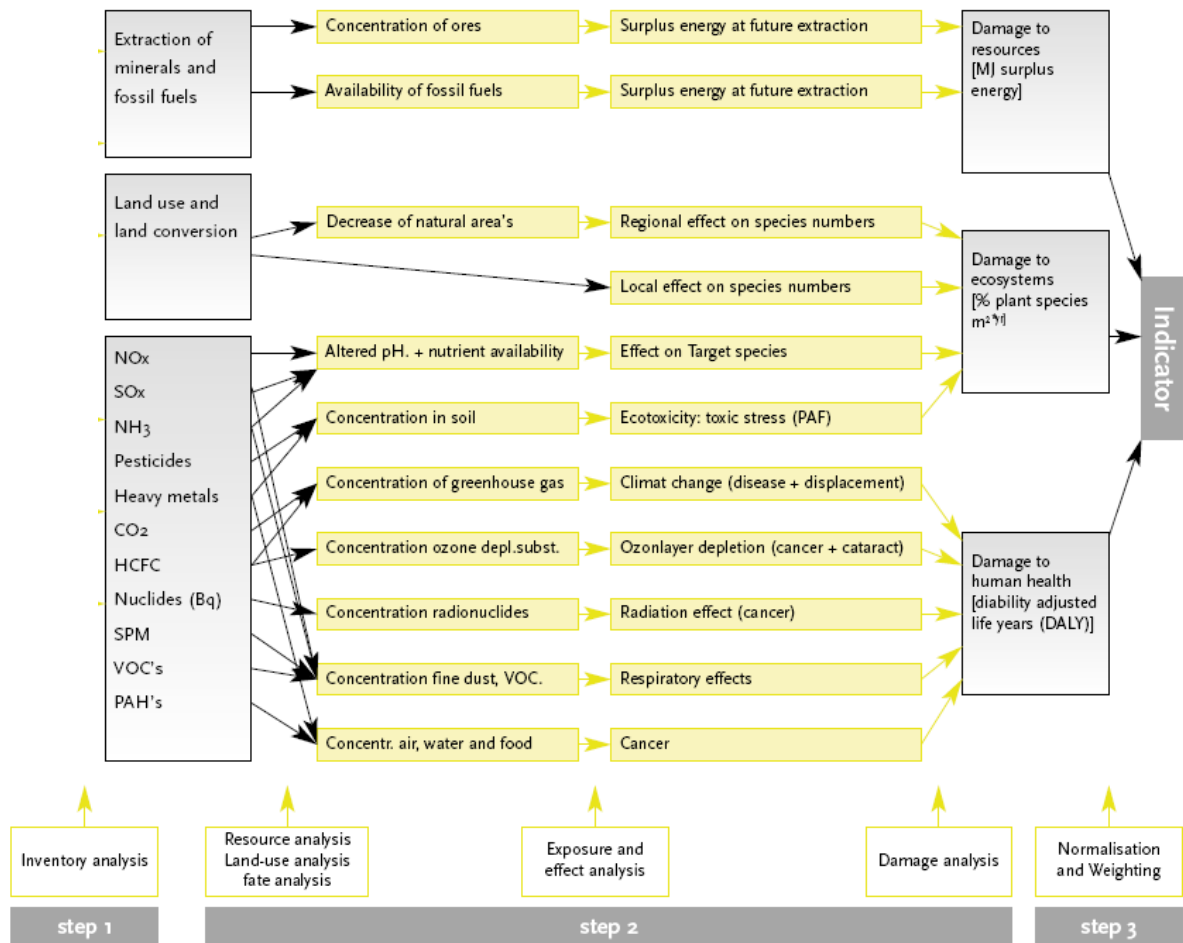
Unternehmen	Nanotechnische Produkte/ Anwendungsfelder	Internetadresse
Arry International Group Limited	Nanoskaliges Titanoxid	<a href="http://www.arry-nano.com">www.arry-nano.com</a>
Atech innovation GmbH	Keramikmembranen	<a href="http://www.atech.de">www.atech.de</a>
auwa-chemie GmbH & Co. KG	Wasseraufbereitung	<a href="http://www.auwa.de">www.auwa.de</a>
BASF SE	u.a. Dreiwegekatalysatoren, Beschichtungen	<a href="http://www.basf.com">www.basf.com</a>
EarthTech Umwelttechnik GmbH	Membrantechnik u.a. für die Abwasserbehandlung	<a href="http://www.earthtech.de">www.earthtech.de</a>
EnTec Ingenieurgesellschaft	Planung und Anlagbau/ Membranverfahren	<a href="http://www.entec-abwassertechnik.de">www.entec-abwassertechnik.de</a>
EnviroChemie	u.a. Nanofiltration in der Abwasserbehandlung	<a href="http://www.envirochemie.de">www.envirochemie.de</a>
EPG Engineered nanoProducts Germany AG	Spezialwerkstoffe, Komponenten und Bauteile mit chemischer Nanotechnologie	<a href="http://www.e-p-g.de">www.e-p-g.de</a>
Eurowater	Wasseraufbereitung	<a href="http://www.eurowater.com">www.eurowater.com</a>
Evonik Degussa GmbH	u.a. Nano-Beschichtungen, Membrane, Partikel, Dieselskatalysatoren	<a href="http://www.evonik.de">www.evonik.de</a>
Ford-Werke GmbH	Abgaskatalysatoren	<a href="http://www.ford.de">www.ford.de</a>
Frangart Wassertechnik GmbH & Co. KG	Wasseraufbereitung	<a href="http://www.frangart.de">www.frangart.de</a>
Freudenberg Vliesstoffe KG GB Filter	u.a. Vliesstoffe für PKW-Innenraumluftfilter	<a href="http://www.freudenberg.de">www.freudenberg.de</a>
Golder Associates GmbH	Grundwassersanierung mit nanoskaligem nullwertigem Eisen	<a href="http://www.golder.com">www.golder.com</a>
Grünbeck Wasseraufbereitung GmbH	Membranen für die Nanofiltration	<a href="http://www.gruenbeck.de">www.gruenbeck.de</a>
Hager + Elsässer GmbH	Industrielle Wasseraufbereitung	<a href="http://www.hager-elsaesser.com">www.hager-elsaesser.com</a>
Heidelberg Cement AG	Portlandhüttenzement mit nanokristallinem Titandioxid/Photokatalyse	<a href="http://www.heidelbergcement.com">www.heidelbergcement.com</a>
Hollingsworth & Vose GmbH	u.a. nanofaserbeschichtete Filtermedien	<a href="http://www.hovo.com">www.hovo.com</a>
inocermic GmbH	Keramikmembranen	<a href="http://www.inocermic.de">www.inocermic.de</a>
Inopor GmbH	Keramische Membranen/Nanofiltration	<a href="http://www.inopr.com">www.inopr.com</a>
ItN Nanovation AG	Nanobeschichtungen, -verbundstoffe, nanoporöse Keramikmembranen	<a href="http://www.itn-nanovation.com">www.itn-nanovation.com</a>
Lanxess Deutschland GmbH	Adsorptionsverfahren	<a href="http://www.lanxess.de">www.lanxess.de</a>



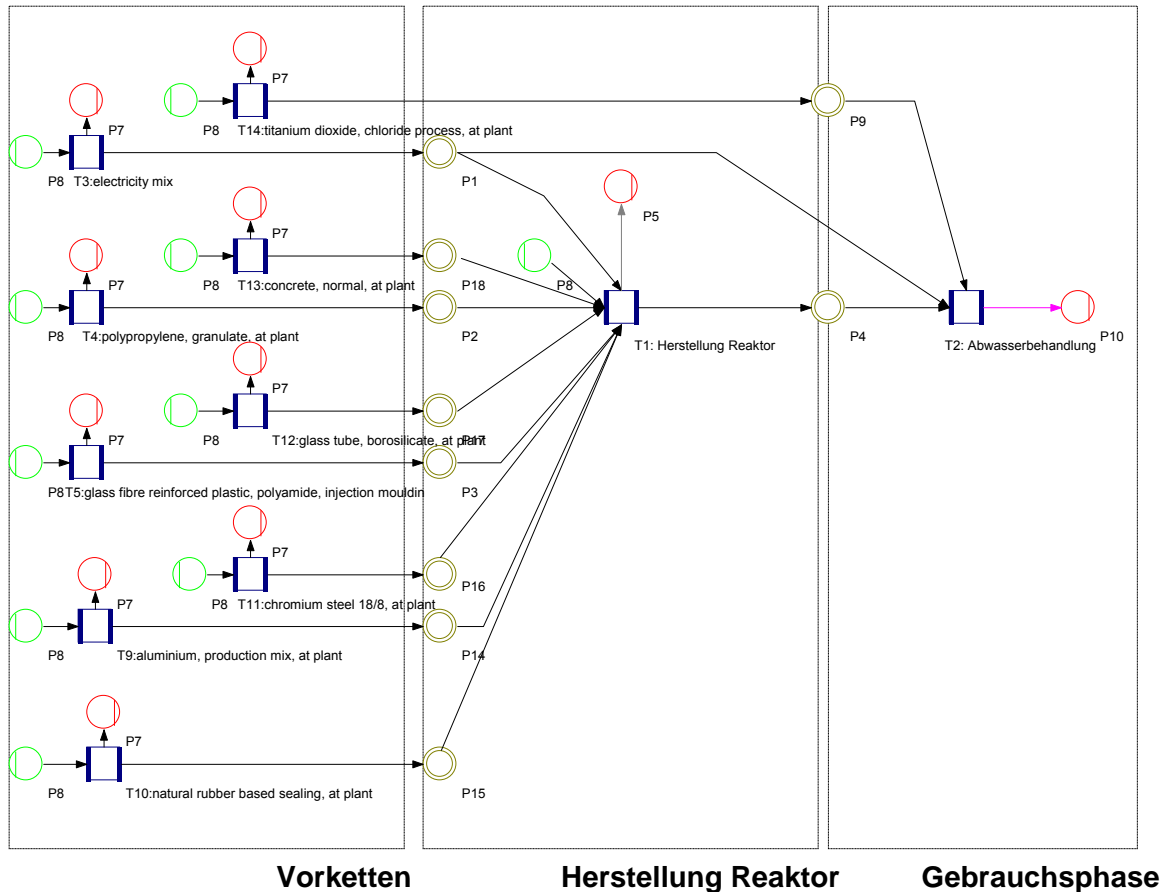
Anhang 1 (Fortsetzung): Auswahl deutscher Unternehmen mit Produkten/Verfahren im Bereich Nanotechnologie und Umwelt

<b>Unternehmen</b>	<b>Nanotechnische Produkte/ Anwendungsfelder</b>	<b>Internetadresse</b>
Mann + Hummel GmbH	u.a. Innenraumluftfilter	<a href="http://www.mann-hummel.com">www.mann-hummel.com</a>
Mazda Motors (Deutschland) GmbH	Abgaskatalysatoren	<a href="http://www.mazda.de">www.mazda.de</a>
Membran-Filtrations-Technik GmbH	Filtrationsanlagen	<a href="http://www.membranfiltration-mft.de">www.membranfiltration-mft.de</a>
Membrane-engineering GmbH	Keramische Membranen für die Wasseraufbereitung	<a href="http://www.membrane-engineering.de">www.membrane-engineering.de</a>
Namos GmbH	Biomimetisch erzeugte funktionelle Nanopartikel	<a href="http://www.namos.de">www.namos.de</a>
NanoScape AG	Nanostrukturierte Materialien z.B. für Wasseradsorption in Lufttrocknern	<a href="http://www.nanoscape.de">www.nanoscape.de</a>
NANO-X GmbH	Dieselpartikelfilter, Katalysatoren	<a href="http://www.nano-x.de">www.nano-x.de</a>
PALL GmbH	u.a. Filtrationstechnologien	<a href="http://www.pall.com">www.pall.com</a>
Rauschert GmbH	Keramische Membranen, Filter	<a href="http://www.rauschert.de">www.rauschert.de</a>
Rochem UF-Systeme GmbH	Nanofilter u.a. für die Abwasserbehandlung	<a href="http://www.rochem.de">www.rochem.de</a>
Sachtleben Chemie GmbH	Nanopartikel auf Basis von Titandioxid oder Bariumsulfat	<a href="http://www.sachtleben.com">www.sachtleben.com</a>
Süd Chemie AG	Abgaskatalysatoren	<a href="http://www.sud-chemie.com">www.sud-chemie.com</a>
SusTech GmbH & Co. KG	Synthese von Nanopartikeln, Partikelmodifizierung	<a href="http://www.sustech.de">www.sustech.de</a>
TIA GmbH	Membranfiltration	<a href="http://www.tia-abwasser.de">www.tia-abwasser.de</a>
ultra.air GmbH	Filterelemente	<a href="http://www.ultraair-group.com">www.ultraair-group.com</a>
Umicore AG & Co. KG	Abgaskatalysatoren	<a href="http://www.umicore.de">www.umicore.de</a>
Volkswagen AG	Abgaskatalysatoren	<a href="http://www.volkswagen.de">www.volkswagen.de</a>

## Anhang 2: Schematische Darstellung der Bewertungsmethode Eco-indicator 99 /79/



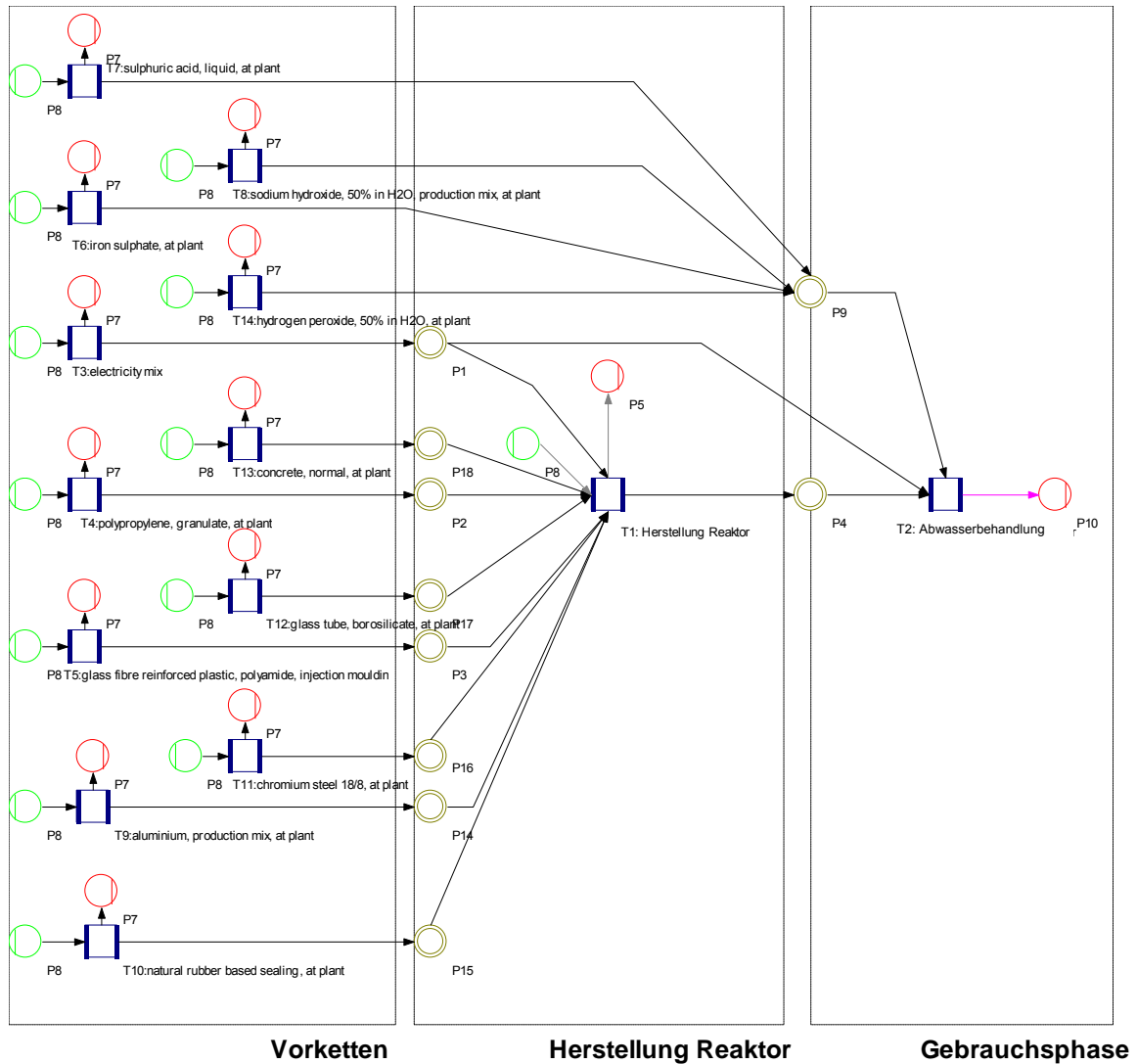
### Anhang 3a: Umberto-Modell (Fallstudie 1: Solare Wasserbehandlung, Halbleiter-Photokatalyse)



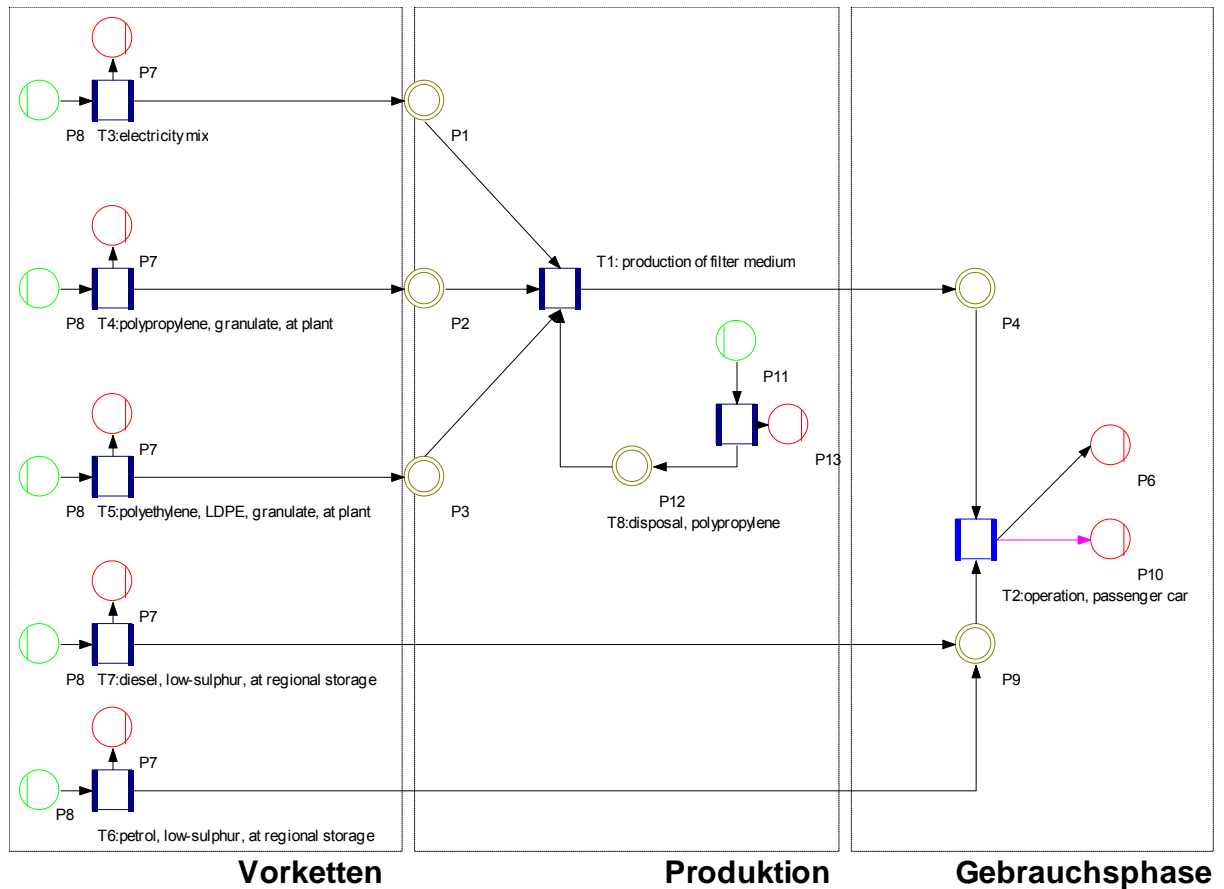
Legende (nach /104/):

Element	Beschreibung
	<b>Transition</b> - Ort im Stoffstromnetz, an dem Materialien umgewandelt wird. Transitionen dienen somit zur Abbildung jeder Art von Prozessen, die auf dem Weg der Materialien durch ein Stoffstromnetz auftreten.
	Stellentyp „ <b>Input</b> “ - An dieser Stelle fließen Materialien von außerhalb der Systemgrenzen in das System.
	Stellentyp „ <b>Output</b> “ - An dieser Stelle werden Materialien über die Systemgrenzen nach außen abgegeben.
	Stellentyp „ <b>Connection</b> “ - bildet Orte im Stoffstromnetz ab, an denen Material nur durchfließt und keine tatsächliche Lagerung erfolgt. Dieser Stellentyp dient dazu, zwei aufeinanderfolgende direkt gekoppelte Prozesse ohne dazwischen liegende Lagerung zu modellieren. Die Stelle markiert den Übergang vom Output des einen Prozesses zum Input des folgenden Prozesses.
	<b>Verbindung</b> - Verbindungen verknüpfen Stellen und Transitionen, so dass sich eine Netzstruktur ergibt. Verbindungen führen entweder von einer Transition zu einer Stelle oder von einer Stelle zu einer Transition. Entlang der Verbindungen fließen die Stoff- und Energieströme. Die Pfeilspitze gibt die Richtung der Ströme an.

### Anhang 3b: Umberto-Modell (Fallstudie 1: Solare Wasserbehandlung, Photo-Fenton-Verfahren)



## Anhang 4: Umberto-Modell (Fallstudie 2: Filtermedien in Kabinenluftfiltern)



Legende (nach /104/):

Element	Beschreibung
	<b>Transition</b> - Ort im Stoffstromnetz, an dem Materialien umgewandelt wird. Transitionen dienen somit zur Abbildung jeder Art von Prozessen, die auf dem Weg der Materialien durch ein Stoffstromnetz auftreten.
	Stellentyp „ <b>Input</b> “ - An dieser Stelle fließen Materialien von außerhalb der Systemgrenzen in das System.
	Stellentyp „ <b>Output</b> “ - An dieser Stelle werden Materialien über die Systemgrenzen nach außen abgegeben.
	Stellentyp „ <b>Connection</b> “ - bildet Orte im Stoffstromnetz ab, an denen Material nur durchfließt und keine tatsächliche Lagerung erfolgt. Dieser Stellentyp dient dazu, zwei aufeinanderfolgende direkt gekoppelte Prozesse ohne dazwischen liegende Lagerung zu modellieren. Die Stelle markiert den Übergang vom Output des einen Prozesses zum Input des folgenden Prozesses.
	<b>Verbindung</b> - Verbindungen verknüpfen Stellen und Transitionen, so dass sich eine Netzstruktur ergibt. Verbindungen führen entweder von einer Transition zu einer Stelle oder von einer Stelle zu einer Transition. Entlang der Verbindungen fließen die Stoff- und Energieströme. Die Pfeilspitze gibt die Richtung der Ströme an.

Anhang 5: Programm des Fachgespräches „Nanomaterialien im Umweltschutz“  
am 23.09.2008 im Umweltbundesamt in Dessau-Roßlau

10:30 Uhr **Begrüßung** - B. Krause, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau  
**Einleitung** - Dr. W. Dubbert, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

10:45 Uhr **Kurzvorstellung des Projektes**  
Dr. S. Martens, Golder Associates GmbH, Celle

#### **Sektor Wasser**

11:00 Uhr **Poröse nanoskalige Membranen in der Flüssigfiltration**  
Dr. I. Voigt, Hermsdorfer Institut für Technische Keramik e.V.

11:25 Uhr **Carbo-Iron und Nanokatalysatoren - Neue Ansätze zur Wasserreinigung**  
Dr. K. Mackenzie, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, UFZ  
Fachbereich Umwelttechnologie, Leipzig-Halle

11:50 Uhr **Eisen-Nanopartikel zur Grundwassersanierung - Praxisbeispiele**  
Dr. J. Bruns, Golder Associates GmbH, Celle

#### **Sektor Luft**

12:15 Uhr **Katalysatoren zur Autoabgasreinigung - Anwendungen und Aufbau**  
Dr. R. Domesle, Umicore AG & Co. KG, Hanau

12:40 Uhr **Mittagessen**

13:30 Uhr **Katalytisch aktive Nanowerkstoffe für Oberflächen in Verbrennungsmotoren und im Abgasstrang - „NanoKat“**  
M. Bachmann, Volkswagen AG, Wolfsburg

#### **Fallstudien**

14:00 Uhr **Solare Wasserbehandlung unter Einsatz von nanoskaligem Titandioxid**  
Dr. C. Jung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Köln  
Dr. S. Martens, Golder Associates GmbH

15:00 Uhr **Nanofaserbeschichtete Filtermedien in Kabinenluftfiltern**  
Dr. N. Behrendt, Mann + Hummel GmbH, Ludwigsburg  
Dr. B. Eggers, Golder Associates GmbH, Celle

16:00 Uhr **Diskussion und Schlusswort**  
Dr. S. Martens, Golder Associates GmbH, Celle  
Dr. W. Dubbert, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

16:30 Uhr **Ende der Veranstaltung**