

Michael Steinfeldt, Ulrich Petschow, Bernd Hirschl

Anwendungspotenziale nanotechnologiebasierter Materialien

Analyse ökologischer, sozialer und rechtlicher Aspekte

Schriftenreihe des IÖW 169/03



i | ö | w

INSTITUT FÜR
ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Michael Steinfeldt, Ulrich Petschow, Bernd Hirschl

Anwendungspotenziale nanotechnologiebasierter Materialien

Teilgebiet 2: Analyse ökologischer, sozialer und rechtlicher Aspekte

Gutachten im Rahmen des TA-Projektes „Nanotechnologie“ im Auftrag des
Deutschen Bundestages

Schriftenreihe des IÖW 169/03
Berlin, Dezember 2003, ISBN 3-932092-70-8

IÖW gGmbH Geschäftsstelle
Potsdamer Straße 105
D-10785 Berlin
www.ioew.de

Tel.: +49.(0)30.884 59 40
Fax: +49.(0)30.882 54 39
mailbox@ioew.de

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie des IÖW wurde neben anderen Studien im Rahmen des TA-Projektes „Nanotechnologie“ im Auftrag des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) erstellt und thematisiert hauptsächlich die Bereiche Umwelt und Vorsorge.

Hierzu werden einerseits mögliche Umwelt- und Gesundheitsgefahren von nanotechnologischen Verfahren und Produkten identifiziert und ggf. Ansätze zur Regulierung aufgezeigt. Andererseits liegt der Fokus der Studie bei der vertiefenden Betrachtung zweier konkreter Anwendungsfälle für nanoskalige Einsatzstoffe, um an diesen möglichst konkret exemplarische Substitutionswirkungen sowie ökologische Effekte zu untersuchen und zu beschreiben. Als Fallbeispiele für diese ökologischen Profilbetrachtungen nanotechnologischer Anwendungen dienen der Autoabgaskatalysator sowie die Photovoltaik.

Abstract

Apart from other studies in the context of the TA – project “Nanotechnology” this study has been developed by the Institute for Ecological Economy Research on behalf of the Office for Technology Assessment with the German Bundestag (TAB). The study discusses mainly the fields environment and precaution.

For this purpose on the one hand possible environmental and health dangers are identified by nano-technological procedures and products, if necessary also adjustment concepts are pointed out. On the other hand the study focusses on a detailed view of two concrete applications of nanometre – scale materials used in order to examine and describe as concretely as possible exemplary substitution effects as well as ecological effects. For this purpose the exhaust gas catalyst and the Photovoltaik exemplify these ecological profiles of nanotechnological applications.

Die Autoren

Dipl.-Ing. Michael Steinfeldt ist seit 1992 wissenschaftlicher Mitarbeiter im IÖW im Forschungsfeld „Ökologische Unternehmenspolitik“ und Leiter des Projekts.

Dipl.-Oec. Ulrich Petschow ist seit 1989 wissenschaftlicher Mitarbeiter im IÖW und seit 1992 Leiter des Forschungsfeldes „Umweltökonomie und –politik“.

Dipl.-Ing. Oec. Bernd Hirschl ist seit 1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter im IÖW und Koordinator des Bereichs „Nachhaltige Energiewirtschaft und Klimaschutz“.

Kontakt: Michael Steinfeldt, Tel. +49-(0)30-884594-18, E-mail: michael.steinfeldt@ioew.de

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung.....	2
3	Überblick zu Umweltwirkungen der Nanotechnologie.....	4
4	Umweltwirkungen nanotechnologischer Verfahren und Produkte.....	6
4.1	Zeithorizonte der Entwicklung der Nanotechnologien	7
4.2	Ansätze zur (Selbst-) Regulierung	8
4.2.1	Foresight Guidelines	8
4.2.2	etc group.....	9
4.2.3	Pacific Research Institut.....	9
4.3	Besondere Eigenschaften von Nanotechnologien im Hinblick Umwelt und Gesundheit?.....	10
4.4	Verhalten von Nanopartikeln und potenzielle Umwelt- und Gesundheitswirkungen.....	12
4.5	Forschungsbedarf aus Sicht von Industrie, Behörden und Forschung bzgl. der chemischen Industrie	15
4.6	Fazit	16
5	Ökologische Profilbetrachtungen – Methodische Grundlagen für die Fallstudien.....	17
6	Fallstudie Autoabgaskatalysator.....	20
6.1	Übersicht über Abgasreinigungskonzepte	20
6.2	Fokus: Drei-Wege-Katalysator	23
6.2.1	Grundlegende chemische Reaktionen und Aufbau des Drei-Wege-Katalysator	23
6.2.2	Ziel der Fallstudie	24
6.2.3	Untersuchungsgegenstand und Untersuchungsrahmen	24
6.2.4	Entwicklung des Autoabgaskatalysators	26
6.2.5	Auswahl der zu betrachtenden Varianten.....	27
6.2.6	Beschreibung der Lebenswegstufen und der verwendeten Datengrundlagen.....	30
6.3	Sachbilanz	39
6.3.1	Ergebnisse der Sachbilanz	39
6.3.2	Auswertungen der Sachbilanz	42
6.4	Wirkungsabschätzung	49
6.4.1	Quantitative Auswertung der Wirkungsabschätzung, Versauerung.....	49
6.4.2	Qualitative Aspekte der Wirkungsabschätzung	51

6.5	Zusammenfassung der Fallstudie Autoabgaskatalysator	53
6.6	Literaturverzeichnis.....	54
6.7	Anhang.....	57
7	Fallstudie Photovoltaik	61
7.1	Inhalt, Ziel und Methode der Fallstudie	61
7.2	Einführender Überblick: Nanotechnologien im Bereich Photovoltaik	61
7.3	Eingrenzung des Untersuchungsbereichs im Rahmen dieser Fallstudie	63
7.3.1	Nanotechnologiebasierte Photovoltaik	63
7.3.2	Klassische PV-Zelltypen: Status quo und Auswahl des Standardfalls.....	64
7.4	Vergleichende ökobilanzielle Analyse von PV-Modulen aus multikristallinen Silizium- und Farbstoffsolarzellen	65
7.5	Sachbilanzen	67
7.5.1	Multikristallines Modul	69
7.5.2	Farbstoffsolarzelle	75
7.5.3	Vergleich von multikristallinem und Farbstoffmodul	77
7.6	Diskussion weiterer Umweltwirkungen im Vergleich	81
7.6.1	Ressourcenverbrauch / Ressourcenknappheit.....	81
7.6.2	Toxizitätsaspekte.....	84
7.7	Ökologische Aspekte organischer Zellen.....	86
7.8	Zusammenfassung und Fazit	88
7.9	Literatur	91

1 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie des IÖW wurde neben anderen Studien im Rahmen des TA-Projektes „Nanotechnologie“ im Auftrag des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)¹ erstellt und hatte zwei grundsätzliche Ziele:

Zum einen sollten mögliche Umwelt- und Gesundheitsgefahren von nanotechnologischen Verfahren und Produkten identifiziert werden und ggf. Ansätze zur Regulierung aufgezeigt werden.

Zum anderen sollte anhand von zwei Fallbeispielen, Katalysator und Solarkollektoren, mit Hilfe eines ökobilanziellen Ansatzes – Ökoprofil – die Umweltrelevanz des Einsatzes von Nanotechnologien überprüft werden.

In der Summe lässt sich bzgl. der Umwelt- und Gesundheitsgefahren feststellen, dass das Wissen um die möglichen Risiken bislang noch gering ist und vielfach allein auf ersten Forschungsergebnissen einzelner Forschungsgruppen und teilweise auch nur auf begründeten Vermutungen beruht. Es werden eine Reihe von potenziellen Risiken benannt, die zugleich den weiteren Forschungsbedarf aufzeigen.

Spezifische Regulierungsansätze bzgl. der Nanotechnologien existieren nicht. Aufgrund der Bandbreite des Einsatzes der Nanotechnologien in unterschiedlichen Technologiebereichen und der unterschiedlichsten stofflichen Zusammensetzungen erweisen sich generelle Regulierungsansätze als problematisch. Zudem ist festzustellen, dass bspw. die Regulierungen des BImSchG den potenziellen Problemen der Nanotechnologien nicht gerecht werden können, u.a. deshalb weil die Emissionen massenmäßig erfasst werden und nicht die Zahl der Partikel in den Fokus geraten.

Die Vorschläge zur Selbstregulierung, wie sie von einigen Wissenschaftlern vorgeschlagen werden, fokussieren im wesentlichen auf die langfristigen Entwicklungsmöglichkeiten der Nanotechnologien und orientieren sich dabei an den Leitlinien, die für die Gentechnik entwickelt wurden.

Die ökobilanziellen Betrachtungen, wie sie an den Beispielen Katalysator und Solarkollektoren durchgeführt wurden, kommen zu dem Ergebnis, dass z.T. deutliche Umweltentlastungen durch den Einsatz nanostrukturierter Materialien möglich sind. Gleichwohl muss auf Datenlücken verwiesen werden, die auf der einen Seite den Produktionsprozess der Herstellung der nanostrukturierten Materialien betreffen und zum anderen mögliche Risiken, die sich durch die Freisetzung von Nanopartikeln ergeben könnten.

¹ Der Endbericht des TA-Projektes „Nanotechnologie“ wurde am 12. November 2003 in einer öffentlichen Sitzung des Bildungs- und Forschungsausschusses des Deutschen Bundestages (BFTA) in Berlin präsentiert.

2 Einleitung

Die Nanotechnologie wird vielfach als Basisinnovation² bezeichnet, d. h. es wird erwartet, dass von ihr zahlreiche innovative Entwicklungen in den verschiedensten technologischen Bereichen und in den verschiedensten gesellschaftlichen Anwendungsfeldern und ökonomischen Branchen ausgehen. Die technologische Dimension fokussiert somit auf die weitreichenden Veränderungen, die letztlich fast alle gesellschaftlichen Bereiche erfassen können und dementsprechend auch entsprechende Rückwirkungen auf die Gesellschaft haben werden.

Die enormen Innovationspotenziale und die damit verbundenen ökonomischen Chancen der Nanotechnologie führten spätestens zu Beginn der 90er Jahre zur verstärkten Berücksichtigung in der Forschungs- und Technologiepolitik. Spätestens ab der zweiten Hälfte der 90er Jahre wurden in allen wesentlichen Industrieländern entsprechende Förderprogramme aufgelegt, deren finanzielle Ausstattung weiter zunimmt. Nanotechnologie wird zum Feld des technologischen Wettbewerbs insbesondere zwischen den USA, Japan und Deutschland (EU). Die Förderungsstrategien konzentrieren sich sowohl auf die Förderung weiterer Grundlagenforschung als auch auf die anwendungsorientierte Forschung mit der Hoffnung auf schnelle Umsetzung in marktfähige Produkte und Prozesse.

Die unmittelbar einleuchtenden, enormen technischen Potenziale der Nanotechnologie setzen Erwartungen, Hoffnungen aber auch Befürchtungen frei, die um so größer und gewaltiger sind, je weiter in die Zukunft hinein gedacht wird.

Um sehr weitreichende Utopien von sich schon konkret abzeichnenden Entwicklungen und mit guten Gründen erwartbaren Innovationen zu unterscheiden, ist es sinnvoll, die zukünftige Entwicklung von Nanotechnologien in drei grobe Zeiträume zu unterteilen³:

- Kurzfristig, die nächsten 10 Jahre (Beispiele: passive Nanotechnologien, Anwendungsfälle),
- mittelfristig, die nächsten 20 Jahre (Beispiele: active nanodevices) und
- langfristig, mehr als 20 Jahre (Beispiele: self-assembled active nanosystems).

Zwar steckt die Marktdurchdringung von nanotechnologischen Verfahren und Produkten noch in den Anfängen, eine Reihe von Produkten und Verfahren fand allerdings bereits den Weg in den Markt⁴. Bei einer Reihe von Produkten und Verfahren ist die theoretische Machbarkeit nachgewiesen⁵. Schließlich werden als Visionen weitergehende Entwicklungen für

² In der neueren Literatur wird vorrangig der Begriff Systeminnovation genutzt. Literatur zur Nanotechnologie generell vgl. bspw. Bachmann, G. (1998): Innovationsschub aus dem Nanokosmos, hrsg. v. VDI-Technologiezentrum, Zukünftige Technologien Nr. 28, Düsseldorf sowie National Science and Technology Council: Nanotechnology (1999): Shaping the World Atom by Atom, Washington D. C. und Ders (2000): National Nanotechnology Initiative - The Initiative and its Implementation Plan, Washington D.C.

³ Diese Systematisierung wurde z. B. auch von den Consultern Coates & Jarret vorgenommen: Nanotechnology 2002 to 2020.

⁴ Die Marktpenetration dieser Technologien wird in der Literatur außerordentlich unterschiedlich beurteilt: so werden auf der einen Seite gegenwärtig die Umsätze von Nanokomponenten auf mindestens 30 Mio. \$ im Jahr geschätzt, gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass Produkte, in denen Nanotechnologien inkorporiert sind, schon Umsätze von ca. 26 Mrd. \$ generiert haben. Auch die Abschätzungen für die Zukunft schwanken erheblich. Die National Science Foundation erwartet bspw. 1 Billionen \$ bis zum Jahre 2015, andere Schätzungen gehen davon aus, dass der „take-off“ dieser Märkte erst mittelfristig zu erwarten ist.

⁵ Vgl. dazu bspw. die technologische ‚roadmap‘ der Semiconductor Association im Hinblick auf Miniaturisierung und Nanotechnologien, die auf folgende Probleme verweist: (i) es ist unklar, wie nanostrukturierte Elektronik ökonomisch produziert werden kann, (ii) selbst wenn sie produziert wird, sind die physikalischen und chemischen Eigenschaften dieser Materialien derzeit noch weitgehend unbekannt und damit sind (iii) die Bedingungen für die Produktionsplanung (noch) nicht gegeben. Vgl. M. Rocco: Visions for R&D in the next decade; Schriftliche Stellungnahme für eine Anhörung im US Parlament: www.house.gov/science/smalllev_062299.htm.

denkbar gehalten, deren theoretische Machbarkeit heute noch sehr kontrovers diskutiert wird⁶.

Vor dem Hintergrund dieser unterschiedlichen Zeithorizonte, der Unsicherheiten im Hinblick auf die technischen und ökonomischen Umsetzungsmöglichkeiten sowie der möglichen ökologischen und gesellschaftlichen Rückwirkungen eröffnen sich Fragen nach den Gestaltungs- und Entwicklungspotenzialen dieser Technologielinie.⁷

In der Folge dieser Arbeit werden hauptsächlich die Bereiche Umwelt und Vorsorge thematisiert. Im Rahmen der Studie werden hierzu einerseits potenzielle Regelungsbedarfe im Kontext der Nanotechnologie anhand möglicher Risiken ausgelotet. Andererseits liegt der Fokus der Studie bei der vertiefenden Betrachtung zweier konkreter Anwendungsfälle für nanoskalige Einsatzstoffe, um an diesen möglichst konkret exemplarische Substitutionswirkungen sowie ökologische Effekte zu untersuchen und zu beschreiben.

In Anlehnung an die Parallelstudie, die sich mit der Bandbreite der vorhandenen bzw. möglichen nanotechnologischen Anwendungen am Produkt Auto beschäftigt, wurde als ein Fallbeispiel der Autoabgaskatalysator ausgewählt, da in diesem Fall die Nanoskaligkeit von Einsatzstoffen in ihrer Entwicklung schon über einen längeren Zeitraum analysiert werden kann.

Als zweites Fallbeispiel wurde die Photovoltaik ausgewählt, da gerade in diesem Bereich in der Mittel- bzw. Langzeitperspektive erhebliche Hoffungen auf ökologische Entlastungspotenziale durch den Einsatz von Nanotechnologie bestehen.

⁶ Dies gilt insbes. für die selbstreplizierenden Nanoroboter, die in den vielfach diskutierten Visionen eine zentrale Rolle spielen, deren Machbarkeit allerdings kontrovers diskutiert wird. Vgl. bspw. Merkle R. C. (2001): That's impossible!; www.zyvex.com/nanotech/impossible.html.

⁷ Anzumerken ist allerdings, dass Nachhaltigkeitsbewertungen immer auch vor den Problemen des Wissens und der Bewertung stehen (vgl. dazu Ausführungen unten) und die Frage der Gestaltung nicht im Sinne eines Steuerungsoptimismus interpretiert werden sollte.

3 Überblick zu Umweltwirkungen der Nanotechnologie

In der öffentlichen Diskussion können typisierend zwei Diskussionsstränge hinsichtlich der Umweltwirkungen ausgemacht werden:

- Auf der einen Seite werden die umweltentlastenden Potenziale der Nanotechnologien betont, indem im Sinne der „Effizienzrevolution“ darauf verwiesen wird, dass in fast allen Umweltbereichen erhebliche Verbesserungen möglich sind (von den nanotechnologischen Möglichkeiten im Bereich der Solarzellenproduktion, der Katalysatorenherstellung bis hin zu Vorstellungen, den Kohlenstoff der Atmosphäre als Grundstoff für nanotechnologisch produzierte Stoffe zu nutzen). Mithin könne die Nanotechnologie Träger einer „radical green vision“ sein.
- Auf der anderen Seite werden in bezug auf diese Technologie Bedrohungsszenarien entwickelt, die im wesentlichen auf die mögliche Nichtbeherrschbarkeit von Nanotechnologien verweisen (bspw. die Reperkussion, die der Artikel von Bill Joy über die Bedrohung durch ein Zusammenwachsen von Gentechnik, Nanotechnologie und Robotik in hiesigen Feuilletons gefunden hat⁸) und die bspw. auch in technologiekritischen Kreisen ventiliert werden.⁹

Die beiden Diskussionsstränge können typisierend für die Diskurse über neue Technologien stehen, sei es historisch im Falle der Diskussion um die friedliche Nutzung der Kernenergie oder auch aktuell den Einsatz von gentechnisch veränderten Organismen.

Neben diesen umfassenden „green visions“ bzw. Gefährdungsszenarien werden in der gegenwärtigen Debatte unterschiedliche potenzielle Umweltgefährdungen in Anlehnung an bekannte Probleme mit ‚neuen‘ Stoffen (Werkstoffen und Chemikalien) benannt. Hierher gehören möglicherweise unzureichendes Wissen über das Verhalten der neuen Materialien in der Umwelt^{10 11}. Ausbreitungsprobleme werden an Stoffeigenschaften geknüpft: Sind die Nanomaterialien chemisch inert? Besteht die Möglichkeit der Ausbreitung (Langlebigkeit, Mobilität, Wasser- oder Fettlöslichkeit), der Bioakkumulation? Inwieweit besteht das Problem der (Öko-)Toxizität der verwendeten Stoffe/Chemikalien und/oder bspw. der Lungengängigkeit von Nanopartikeln. Wie soll mit ggf. festgestellten Gefährdungen umgegangen werden (Messbarkeit, umweltoffene Anwendungen, Rückholbarkeit usw.)? Welche Gestaltungsmöglichkeiten existieren in diesem Kontext?⁹

Ein entscheidender Aspekt in diesem Kontext ist dabei, dass es im wesentlichen um zwei möglicherweise entgegengerichtete Effekte geht: auf der einen Seite besteht die Möglichkeit, dass die Nanotechnologien im Sinne der Effizienz der Nutzung von Umweltinputs zumindest mittelfristig deutliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Verfahren erreichen können, auf der anderen Seite besteht zumindest gegenwärtig vor dem Hintergrund des begrenzten Wissens

⁸ Joy, Bill: *Why the future doesn't need us*, http://www.wired.com/wired/archive/8.04/joy_pr.html.

⁹ Vgl. Bailey R. (2001): *Rebels Against the Future; Witnessing the birth of the anti – technology movement*. Reasononline: <http://reason.com/rb/rb022801.shtml>.

¹⁰ Vgl. bspw. in Deutschland Untersuchungen des VDI (jüngeren Datums bspw. N. Malanowski: *Vorstudie für eine Innovations- und Technikanalyse (ITA) Nanotechnologie*, hrsg. vom VDI-Technologiezentrum, Abteilung Zukünftige Technologien, im Auftrag und mit Unterstützung des BMBF, (Zukünftige Technologien Bd. 35, Düsseldorf 2001), des TAB; in den USA bspw. durch die National Science Foundation (Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology, March 2001, Arlington) oder auch in England durch das Nanotech Institute.

¹¹ Zu den Forschungsnotwendigkeiten in diesem Bereich vgl. M. Rocco et al. (eds) (1999): *Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report – Vision for Nanotechnology Research and Development in the Next Decade*, Chapter 10 - Nanoscale Processes and the Environment <http://itri.loyola.edu/nano/IWGN.Research.Directions.chapter10.pdf>. Einen ersten Überblick über die Forschungsansätze im Hinblick auf Umweltfragen gibt bspw. Gorman, J.: *Taming high-tech particles: Cautious steps into the nanotech future* in: *Science News*, March 30, 2002.

über das Verhalten nanotechnologischer Produkte (vgl. oben) die Möglichkeit, dass die potenziellen Effizienzvorteile durch höhere Risiken ‚erkauft‘ werden. Dies erweist sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt insofern als problematisch, als über die Risiken bislang wenig Informationen zur Verfügung stehen, nicht zuletzt aufgrund fehlender Messtechniken aber auch Impactanalysen.

4 Umweltwirkungen nanotechnologischer Verfahren und Produkte

Die Bewertung der Umweltwirkungen von Nanotechnologien wurde bislang vorrangig unter dem Aspekt der Chancen betrachtet („radical green vision“), Risiken werden vorrangig in möglichen langfristigen Entwicklungstendenzen von „selbstreplizierenden Nanorobotern“ gesehen. Der Umgang mit diesen Risiken soll durch Richtlinien der Technikgestaltung gemindert werden, indem vor allem die Möglichkeiten der Verselbständigung dieser Techniken vermieden werden sollten (Foresight Guidelines).

In der Folge wird wie folgt vorgegangen:

1. zur Frage der Nanotechnologien,
2. zur Frage der Zeitfristen der Entwicklung von Nanotechnologien,
3. dann wird auf einige aktuelle Forschungsergebnisse bzgl. der möglichen Wirkungen insbes. der Nanopartikel verwiesen und
4. schließlich werden einige Anforderungen an den FuE Bedarf im Hinblick auf die Nanotechnologien gegeben, die sich u.a. aus den road maps der chemischen Industrie ergeben.

Zur Definition der Nanotechnologien

Der Begriff der Nanotechnologien erweist sich als wenig exakt eingegrenzt. In seiner weitesten Fassung werden all die Technologien / Verfahren darunter gefasst, die zumindest in einer Dimension im Nanometerbereich angesiedelt sind. Dies bedeutet zugleich, dass damit die unterschiedlichsten Technologiebereiche einbezogen werden und damit unter dem Begriff Nanotechnologie letztlich eine große Bandbreite von Technologien zu subsumieren sind. Der Begriff Nanotechnologie stellt damit eine Art Dachkonzept dar.

Desweiteren wird ein Zusammenwachsen unterschiedlicher Technologiebereiche erwartet, wobei insbesondere das Zusammenwachsen bspw. mit den Biotechnologien bereits mitbedacht wird, wie es am Begriff der „wet nanotechnologies“ zum Ausdruck kommt.

Nun ist der Umgang mit Nanomaterialien nicht grundsätzlich neu, bspw. werden Nanopartikel im Kontext der Reifenproduktion bereits seit langem eingesetzt. Neu ist allerdings der grundsätzliche Anspruch der Nanotechnologie, der auf die Kontrolle und Gestaltung der molekularen Architektur abzielt und damit quasi ein Übergang vom unbewussten Umgang mit nanoskaligen Materialien zum bewussten, gestaltenden Umgang mit diesen Materialien darstellt.

Mit der grundsätzlichen Idee der Beherrschbarkeit der molekularen Architektur ist implizit die Vorstellung von veränderten Produktionskonzepten verbunden, nämlich der Veränderung der herkömmlichen „top-down“ Ansätze zu „bottom-up“ Ansätzen. Mit dieser Veränderung des Produktionsparadigmas ist zugleich verbunden, dass im Grundsatz, von den zweifelsohne vorhandenen immensen technischen Schwierigkeiten an dieser Stelle abgesehen, die Ressourceneffizienz erheblich zunehmen kann, da bspw. insbesondere die Abfallstoffe deutlich abnehmen könnten. Konkret ist allerdings darauf zu verweisen, dass beide Produktionsparadigma längerfristig nebeneinander bestehen werden. Um es am oben angeführten Beispiel der Reifenproduktion, der in diesem Sinne als „top-down“ Ansatz verstanden wird, zu ver-

deutlichen, gelingt es durch die Gestaltung der Nanopartikel, die Eigenschaften der Reifen kontrollierbarer zu machen, ohne dass der Produktionsprozess selbst umfassend verändert wird.

„Bottom up“ Prozesse, auf dem Prinzip der Selbstorganisation beruhend, stellen eine veränderte Herangehensweise dar, die mit bisher unbekanntem Umwelt- und Gesundheitseffekten verbunden sein können. Einschränkend ist allerdings darauf zu verweisen, dass das Prinzip der Selbstorganisation im Bereich der chemischen Technologien bereits Eingang gefunden hat.

4.1 Zeithorizonte der Entwicklung der Nanotechnologien

Die Vorstellungen über die Entwicklung der Nanotechnologien werden durchaus kontrovers diskutiert, wobei allerdings auch hier festzustellen ist, dass insbesondere die Möglichkeiten langfristiger Entwicklungen (selbstreplizierender Nanoroboter) umstritten sind.

Bspw. werden von M. Rocco (2002: 5)¹² folgende Fristen bzw. Generationen für industrielle Prototypen und der Vermarktung benannt:

Vergangenheit und Gegenwart: Die „zufällige“ Nutzung von Nanotechnologie bspw. carbon black wird seit Jahrhunderten betrieben, isolierte Anwendungen (Katalysatoren, Komposite etc.) seit Anfang der 90er Jahre.

Erste Generation: Passive Nanostrukturen (ca. 2001) ⇒ Anwendungsbereiche: Coatings, Nanopartikel, bulk materials (nanostrukturierte Metalle, Polymere und Keramiken)

Zweite Generation: Aktive Nanostrukturen (ca. 2005) ⇒ Anwendungsbereiche: Transistoren, Verstärker, adaptive Strukturen etc.

Dritte Generation: 3D Nanosysteme (ca. 2010) mit heterogenen Nanokomponenten und unterschiedlichen assembling Techniken

Vierte Generation: molekulare Nanosysteme (ca. 2020) mit heterogenen Molekülen, basierend auf biomimetischen Verfahren und neuem Design

Für eine ökologische Nachhaltigkeitsbewertung ergeben sich mithin Fragestellungen mit unterschiedlichen Fristigkeiten: zum einen ist die Frage aufzuwerfen, wie mit den kurzfristigen potenziellen Problemen umgegangen werden kann, zum anderen, ob es gelingen kann langfristige Entwicklungsmöglichkeiten, die ggf. mit Gefährdungspotenzialen verbunden sind, durch Aktionen bereits heute intentional zu beeinflussen.

Zum einen ist eine Bewertung erforderlich, die auf die „erste Generation“ abzielt und deren ökobilanzielle und (öko-) toxikologische Bewertung vornimmt, zum anderen ist zu überprüfen, welche potenziellen Konsequenzen sich aus den jeweils folgenden und insbesondere der „vierten Generation“ ergeben. Dabei ist vor allem auf die ökologische Nachhaltigkeit dieser Entwicklungsvorstellungen und die nicht intendierten Nebeneffekte zu fokussieren. Weitere erwartete Fortentwicklungen der Nanotechnologie beinhalten allerdings Risikocharakteristika, wie sie bspw. in Bereich der Gentechnologie eine Rolle spielen.

¹² Rocco, M. C. (2002): The Future of the National Nanotechnology Initiative; Präsentation vom 5/11/02. Anstelle von Rocco hätten auch andere Autoren und Studien benannt werden können, die jeweils andere Zeitskalen zur Grundlage nehmen. Es ist für die Zwecke hier allerdings nicht entscheidend, da es vorrangig darum geht, die Zeit- und die Entwicklungsdynamiken in den Blick zu nehmen.

Typisierend kann dies auf den Bereich der sog. „wet nanotechnologies“ bezogen werden, die in starkem Maße auf Zellen (in der Sprache der Nanotechnologie: Nanomaschinen) bezogen werden. Dies gilt ebenfalls für sog. selbstreplizierende Nanoroboter – deren Machbarkeit in Frage steht – und die gleichwohl auf anorganischer Ebene dem Gentechnikproblem entsprechen. Aus diesen Phasenvorstellungen wird zugleich deutlich, dass die Chancen/Risikobewertung sowie das Risikomanagement auf unterschiedlichen Ebenen anzusetzen hat.

In der Folge werden allerdings vorrangig solche Umwelt- und Gesundheitsaspekte der Nanotechnologien angesprochen, die sich bereits heute stellen und nicht die langfristigen Entwicklungstendenzen der Nanotechnologien.

4.2 Ansätze zur (Selbst-) Regulierung

Gegenwärtig existieren nach unseren Untersuchungen noch keine Regulierungen im Kontext der Nanotechnologie. Nanotechnologien fallen damit im wesentlichen unter die Regulierungen anderer Stoffe und Verfahren und werden insofern nicht spezifisch angegangen. Allerdings erweisen sich die bestehenden Regulierungen den Problemen der Nanotechnologie als nicht angemessen. Bspw. wird im Kontext des BImSchG zwar auf Stäube Bezug genommen, allerdings keinerlei Regulierung der Nanopartikel vorgenommen. Dabei ist insbesondere darauf zu verweisen, dass die gesetzten Grenzwerte auf die Partikelmasse abheben und eben nicht auf die Partikelzahl, die vielfach als relevant für die möglichen Umwelt- und Gesundheitsgefährdungen angesehen wird.

Gleichwohl finden zumindest auf der internationalen Ebene erste Diskussionsprozesse bzgl. der Regulierungen von Nanotechnologien statt. Zu benennen sind hierbei:

- die Foresight Guidelines, die vorrangig darauf abzielen, die langfristige Entwicklungsmöglichkeiten dieser Technologie zu strukturieren¹³,
- die Umwelt NGO etc group, die auf die der Nanotechnologie inhärenten Gefahren verweisen und ein Moratorium für die Technologieentwicklung generell fordern¹⁴ und
- das Pacific Research Institut, das im Grundsatz drei Optionen diskutiert, zum einen ein Moratorium, die Möglichkeit die Nanotechnologie allein im militärischen Bereich zuzulassen und schließlich eine Form von Selbstregulierung.¹⁵

4.2.1 Foresight Guidelines

Im Hinblick auf die möglichen langfristigen Entwicklungsmöglichkeiten also vor allen Dingen den selbstreplizierenden Nanorobotern werden bereits jetzt bestimmte (Selbst-) Regulierungen gefordert, die wesentlich darauf abzielen, dass unkontrollierte Prozesse vermieden werden sollen. Bei diesen Vorschlägen der Selbstregulierung wird vor allem Bezug genommen auf die Selbstregulierung im Bereich der Biotechnologie. Diese 1971 entwickelten „NIH re-

¹³ Downloadbar unter www.foresight.org; Revised Draft Version 3.7: June 4, 2000.

¹⁴ etc group (2002): Communiqué: No Small Matter! Nanotech Particles Penetrate Living Cells and Accumulate in Animal Organs; Issue 76. May/June 2002; ebenso (2003): The Big Down - Atomtech: Technologies Converging at the Nano-scale.

¹⁵ Pacific Research Institut (2002): Forward to the future - Nanotechnology and Regulatory Policy; Bearbeiter: Glenn H. Reynolds.

combinant DNA Guidelines“ werden in diesem Kontext als Erfolg gewertet, denen die Foresight Guidelines zur Nanotechnologie entsprechen sollten.

Die Vorschläge zu den Guidelines (in unterschiedlichen Versionen) existieren mithin, diese sind allerdings auf Bereiche fokussiert, die, wenn überhaupt, vermutlich erst in den nächsten 25 Jahren von Bedeutung sein könnten. Der grundlegende Ansatz, nämlich bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt Entwicklungsleitlinien vorzugeben, um potenzielle Gefährdungen zu vermeiden, erscheint interessant. Einschränkend ist allerdings anzumerken, dass „Richtungssicherheit“ für die weitere Entwicklung allein die angenommenen Gefährdungen berücksichtigen kann. Nicht wahrgenommene Risiken werden damit nicht tangiert und dies erfordert eine kontinuierliche Beobachtung der Technologie.

Das Bild von Nanotechnologien, wie sie sich in den foresight guidelines widerspiegeln, ist geprägt von selbstreplizierenden Nanorobotern, ein Bild das von Drexler in die Welt gesetzt wurde.¹⁶ Diese Entwicklung ist eine Zukunftsvision, die in der gegenwärtigen Realität nicht wirklich wiederzufinden ist und die sich auch nicht in solchen Forschungsaktivitäten wiederfindet, die sich als relativ marktnah bezeichnen lassen. Diese Zukunftsvision wird zudem vielfach als nicht realisierbar angesehen, dementsprechend finden wissenschaftliche Kontroversen in diesem Feld statt.

4.2.2 etc group

Im Gegensatz zu den Foresight guidelines fokussiert die NGO etc group sowohl auf die potenziellen Gefährdungen der heutigen nanotechnologischen Anwendungen als auch auf die langfristigen Gefährdungspotenziale. Bzgl. der heutigen nanotechnologischen Anwendungen wird ein Alarmszenario entwickelt, das sich auf die Aussagen einzelner Forscher im Hinblick auf potenzielle Gefährdungsmöglichkeiten beruft. Dabei ist anzumerken, dass die Zitate aus den jeweiligen Kontext entnommen wurden und in der Folge von den jeweiligen Forschern deutlich relativiert worden sind. Die Hinweise die von den Forschern stammen, die sich mit möglichen Gesundheitswirkungen bspw. von Nanopartikeln befassen, verweisen in der Regel vorrangig auf Forschungsbedarfe und Nicht-Wissen, die sich im Gefolge der Entwicklung der Nanotechnologien ergeben können.

4.2.3 Pacific Research Institut

Das Pacific Research Institut und insbesondere der Autor Reynolds versuchen anhand unterschiedlicher Regulierungsszenarien die möglichen Vor- und Nachteile einzelner Optionen aufzuzeigen. Aufgrund der relativen Nähe des Autors zum Foresight Institute sind die inhaltlichen Differenzen nur begrenzt auszumachen.

Sowohl die Foresight guidelines als auch das Pacific Research Institute befassen sich vorrangig mit den langfristigen Entwicklungsmöglichkeiten und fokussieren dabei vor allen Dingen auf die Möglichkeit von selbstreplizierenden Nanorobotern und deren Verhalten in der Biosphäre. Die potenziellen Gefährdungen, die sich insbesondere durch die Nanopartikel und deren Ausbreitung über die unterschiedlichen Pfade ergeben können, werden hingegen nicht weiter ausgeführt.

Damit mögen zwar bestimmte potenziell mögliche Entwicklungen in der Zukunft, aufgrund der freiwilligen Codex der Wissenschaft, durch Entwicklungsleitlinien in den Griff zu bekommen sein, nicht vorhergesehene Risiken werden damit allerdings nicht erfasst.

¹⁶ Vgl. dazu auch M. Chrichton, der diese Ideen zum Ausgangspunkt seines Romans „Beute“ macht.

Im deutschen Sprachraum hat diese Diskussion (nach Kenntnis des Autors) bislang noch keinen Widerhall gefunden, jedenfalls konnten keine Publikationen identifiziert werden, die sich diesem Thema angenähert haben. Diskussionen mit Bezug zum Thema sind vor allem in der Diskussion um mögliche Gesundheitsgefährdungen durch ultrafeine Partikel festzustellen: Mehr oder weniger zeitgleich mit der Entwicklung der Nanotechnologien sind die möglichen Umwelt- und Gesundheitswirkungen von ultrafeinen Partikel in den Fokus geraten, dies aber nicht aufgrund des Aufkommens der Nanotechnologie. Vielmehr ist diese Diskussion u.a. im Kontext der PM und dabei der Emissionen der Dieselfahrzeuge aufgekommen. Mithin finden sich in diesem Kontext mögliche Anknüpfungspunkte für die Regulierung der Nanotechnologien.

4.3 Besondere Eigenschaften von Nanotechnologien im Hinblick Umwelt und Gesundheit?

Die Erschließung der Potenziale der Nanotechnologie steht erst am Anfang, mit vergleichsweise „einfachen“ Anwendungen bzw. Produkten insbesondere in solchen Bereichen, die bereits marktfähig sind oder sich an der Schwelle der Marktfähigkeit bewegen. Bei den marktfähigen Produkten handelt es sich insbesondere um Nanopartikel und solche Anwendungen, die bereits auf dem Markt sind. Als Beispiel können dabei die Katalysatormaterialien benannt werden, bei denen es zunehmend gelingt, in Nano-Dimensionen vorzustoßen und damit auf der einen Seite Materialersparnis von kostenträchtigen Edelmetallen zu erreichen und zugleich die katalytische Wirkung durch die Funktionalität der kleinen Partikel zu erhöhen. Insofern können diese Ansätze als eine Weiterverfolgung von Entwicklungslinien betrachtet werden, die bereits seit Jahrzehnten verfolgt werden. Das Neue ist in diesem Kontext allein die Nanoskaligkeit dieser Partikel.

Allerdings stellt sich die Frage, inwieweit mit dem Vorstoß in den nanoskaligen Bereich letztlich neuartige Wirkungen verbunden sind. Die Frage ist also aufzuwerfen, inwieweit die Nanomaterialien über andere Eigenschaften verfügen, die ggf. umwelt- bzw. gesundheitsrelevant sein können. Teilweise sind es gerade die veränderten Eigenschaften der Nanomaterialien, die sie für Produktionszwecke interessant machen. Mit diesen veränderten Eigenschaften der Materialien können, zumindest im Grundsatz, ebenfalls veränderte Wirkungen auf Umwelt und Gesundheit verbunden sein.

Diese Fragestellungen sind allerdings bislang wenig untersucht bzw. problematisiert. Die NGO etc (2002) verweist bspw. darauf, dass TiO Nanopartikel, wie sie in Sonnenmilch (in erheblichen Mengen) eingesetzt werden, in den USA keine Neuuntersuchungen erforderlich machten. Das herkömmliche TiO wurde bereits überprüft und zugelassen, die nunmehr einsetzbaren TiO Nanopartikel werden in den Umwelt- und Gesundheitseigenschaften gleichgesetzt mit denen, die in der Vornanotechnologiephase eingesetzt wurden (vgl. etc 2002: 4). Darüber, ob diese Gleichsetzung gerechtfertigt ist, kann an dieser Stelle keine Aussage getroffen werden. Vor dem Hintergrund der veränderten Eigenschaften auf der Nanoebene, die ja gerade auch genutzt werden sollen, wäre zumindest eine in Fragestellung angebracht.

Dies gilt insbesondere auch vor dem Hintergrund, dass hinsichtlich der Gesundheits- und Umweltrelevanz von Nanopartikeln bislang noch wenig gesichertes Wissen existiert und vor allem auch deshalb, weil Untersuchungen der ultrafeinen Partikel durchaus Anlass zur Besorgnis geben können.

Im Hinblick auf Nanotechnologien ist allerdings anzumerken, dass die gemeinsamen Charakteristika der Nanotechnologien vorrangig durch die Nanoskaligkeit der Materialien und Produkte gekennzeichnet sind. Konkret bedeutet dies, dass die Nanotechnologie als Querschnittstechnologie zu bezeichnen ist; die jeweiligen Anwendungskontexte divergieren massiv und damit auch die möglichen Gesundheits- und Umweltgefährdungen. Bspw. werden sich die nanotechnologischen Verfahren und damit auch die Wirkungen im Bereich der Biotechnologien von solchen Anwendungsbereichen wie Elektronik und Dünnschichttechnologien unterscheiden.

Zudem sind unterschiedliche Wirkungen auf die jeweiligen Umweltmedien zu erwarten.

Ein erster Ansatz der Strukturierung kann darin bestehen, dass die Spezifika der Nanotechnologie betrachtet werden und dabei zu überprüfen ist, inwieweit sich daraus potenzielle Gefährdungen ergeben können. Betrachtet man die Eigenschaften der Nanotechnologien, so ist als kleinster gemeinsamer Nenner festzuhalten, dass

- es sich um Materie im Nanobereich (in einer Dimension) handelt,
- in diesem Bereich sich die Eigenschaften der Materie verändern (die eben auch zu den positiven gewünschten Effekten führt),
- sich insbesondere das Verhältnis Oberfläche zu Volumen verändert und
- sich die Strukturen verändern.

Zudem ist insbesondere auf solche Stoffe zu verweisen, die in der natürlichen Umwelt nicht vorkommen, wie Fullerene oder Nanotubes, die als neuartige Materialien einzustufen sind.

Neben diesen Eigenschaften nanoskalierten Materials sind insbesondere solche Aspekte zu berücksichtigen, wie

- Mobilität und Reaktionsfreudigkeit,
- umweltoffene / umweltgeschlossene Anwendung,
- Möglichkeiten der Bioakkumulation,
- Persistenz,
- Lungengängigkeit,
- Wasserlöslichkeit
- sowie weitere Eigenschaften (vgl. dazu die Literaturzitate weiter unten).

Um es typisierend aufzuzeigen: Nanotechnologische Verfahren und Produkte erweisen sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt im wesentlichen als Weiterentwicklung bisheriger Verfahren. Zentraler Unterschied ist in diesem Kontext, dass zunehmend das Grundlagenwissen bzgl. des Umgangs mit der Materie zu erschließen ist: d.h. es gelingt zunehmend mit den kleinsten Teilchen gestaltend umzugehen und damit die Technologie nutzbar und einsetzbar zu machen.

Wesentliche Elemente der Gefährdung stellen dabei die Nanopartikel dar, ein Bereich, der zumindest in Ansätzen untersucht ist und wo erste, wenngleich nicht unumstrittene Kenntnisse vorliegen.

Das Wissen um die Wirkungen von Nanotechnologien erweist sich vor diesem Problemhintergrund als sehr begrenzt. Dies hängt auf der einen Seite damit zusammen, dass diese Technologien erst in jüngerer Zeit überhaupt im industriellen Maßstab eingesetzt werden und die FuE Aktivitäten bislang im Vordergrund standen.

Gleichwohl merkt bspw. Vicky Colvin (Rice Institut) an: „In a field with more than 12.000 citations a year, we were stunned to discover no prior research in developing nanomaterials risk assessment models and no toxicology studies devoted to synthetic nanomaterials” (Vicky Colvin 2002 in: AAAS).

Ganz generell lässt sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt sagen, dass die Untersuchungen zur Umwelt- und Gesundheitsrelevanz der Nanotechnologien außerordentlich wenig entwickelt sind und dass die Aussagen, die existieren, hinsichtlich ihrer Belastungsfähigkeit begrenzt sind und den Eindruck erster, wenig gesicherter Forschungen vermitteln.

In der Folge sollen einige dieser Aussagen dargestellt werden, die Hinweise auf die möglichen Auswirkungen geben können. Es handelt sich bei diesen Darstellungen um eine mehr oder weniger willkürliche Zusammenfassung von Aussagen, die zum einen das Ergebnis von Studien sind und zum anderen mehr oder weniger begründete Vermutungen von Forschern in diesem Feld sind. Diese Aussagen sollen an dieser Stelle allein typisierend dargestellt werden – sie könnten um weitere Beispiele ergänzt werden – allerdings können damit letztlich keine Aussagen über Nanotechnologien generell generiert werden. Vielmehr wird damit deutlich, dass es sich um ein Feld hochgradiger Unsicherheit und Unwissen handelt, dessen Bewertung bislang noch nicht systematisch angegangen worden ist.

4.4 Verhalten von Nanopartikeln und potenzielle Umwelt- und Gesundheitswirkungen

In Anlehnung an die Typisierung der Technologie (Nanospezifische Aspekte/Effekte vgl. oben) ergeben sich unterschiedliche potenzielle Effekte.

Verhalten von Nanopartikeln in der Umwelt

Das Verhalten von Nanopartikeln in der Umwelt wird bestimmt durch die Möglichkeit der Bioverfügbarkeit (bio uptake), die Möglichkeiten der Aggregation und des Transports, der Sorption und Desorption und schließlich der Ablagerung. Wesentlich ist es dabei, dass es sich um eine generelle Betrachtung handelt, die je nach vorliegenden Stoffen oder Stoffkombinationen differenziert betrachtet bzw. untersucht werden muss. Gemäß der oben eingeführten Differenzierung der nanospezifischen Aspekte / Effekte werden damit die Kleinheit und insbesondere das spezifische Verhältnis Oberfläche / Volumen erfasst, also die Probleme der Adhäsion, Kohäsion und Agglomeration sowie die veränderte chemische Reaktivität und Selektivität. Damit können allerdings noch keine Aussagen im Hinblick auf die möglichen Umwelt- und Gesundheitswirkungen getroffen werden. In der Folge sollen einige dieser Hinweise angeführt werden.

Nanopartikel, die bereits im großtechnischen Maßstab produziert und eingesetzt werden, stellen, wie beschrieben, allerdings nicht grundsätzlich ein neues Problem dar. Vielmehr sind Partikel im Nanobereich, nicht zuletzt aufgrund der sich entwickelnden messtechnischen

Möglichkeiten, in die Diskussion geraten, dies insbesondere anhand der Emissionen von Dieselfahrzeugen.

Luftreinhaltung

Hinsichtlich der technischen Maßnahmen zur Luftreinhaltung – und damit einer generellen Problemlage - kommt eine Studie zu folgendem Ergebnis: „Es zeigte sich jedoch, dass durch die technischen Verbesserungen lediglich die gröbereren Staubfraktionen (> PM 10) effizient reduziert wurden. Während solche Partikel, die nur in die oberen Bronchien gelangen, deutlich abnahmen, konnte bei lungengängigen Partikeln (PM 2,5 bis PM 0,1) ein viel geringerer Rückgang verzeichnet werden. Ultrafeine Partikel (< PM 0,1) haben in ihrer Konzentration in der Atemluft sogar eher zugenommen.“¹⁷

Diese Aussagen gelten allein für Nanopartikel, die aus den Emissionen des Verkehrs stammen und nicht für die Emissionen aus der Produktion von Nanopartikeln bzw. der Freisetzung durch den Gebrauch entsprechender Produkte. Gleichwohl werden diese Partikelemissionen im Hinblick auf die möglichen Gesundheitsgefährdungen zunehmend kritisch diskutiert.

Wasser

Mark Wiesner vom CBEN forscht an dem Verhalten von Nanomaterialien in Wasser und kommt zu folgenden Aussagen: „Nanomaterials can move with great speeds through aquifers and soil ... nanomaterials provide a large and active surface for sorbing smaller contaminants, such as cadmium and organics. Thus, like naturally occurring colloids they could provide an avenue for rapid and long-range transport of waste in underground water.“

Ein internationales Forschungsprojekt kommt zu dem Ergebnis, dass Abwässer aus Bergwerken sehr hohe Konzentrationen von gelösten Schwermetallen und Aluminium enthalten. Nanopartikel können diese Schwermetalle in Fließgewässer verschleppen.¹⁸

Verhalten im Organismus

“Based on studies of naturally occurring nanoscale particles such as ultrafine particle aerosols and surgical wear debris from implants, we can speculate that nanoscale inorganic matter is not generally biologically inert. However, without hard data that specifically addresses the issues of synthetic nanomaterials, it is impossible to know what physiological effects will occur, and more critically, what exposure levels to recommend”.¹⁹

Neue Stoffe

In einigen Veröffentlichungen wird ein Vergleich von Nanotubes und Asbest vorgenommen, allerdings liegen Untersuchungsergebnisse in diesem Kontext nicht vor. (Small Times 12/9/02). Obwohl absehbar ist, dass die industrielle Produktion der Nanotubes bevorsteht, sind toxikologische Experimente eine Seltenheit. Forscher haben bislang nicht untersucht, was passiert, wenn Menschen diese Nanotubes einatmen oder sie bei medizinischen Behandlungen erhalten.²⁰ Unklar ist zudem die Frage, inwieweit diese Stoffe biologisch abbau-

¹⁷ Eickmann, T.; Seitz, H. (2002): Klein, aber oho! - Von der zunehmenden Bedeutung der Feinstäube; Umweltmed Forsch Prax 7 (2) 63-65.

¹⁸ http://www.vistaverde.de/news/Wissenschaft/0209/27_bergbau.htm.

¹⁹ Krane, J. (2002): Some Worried of Nanotechnology Risk; AP. 8/11/02.

²⁰ Es wird allerdings auf wenige Studien verwiesen, die auf eine geringe Relevanz des Problems verweisen; Freitas, R. A. (2002): Could Medical Nanorobots Be Carcinogenic?; <http://www.imm.org/Reports/Rep033.html>; Huczko, A. et al. (2001): Physiological testing of carbon nanotubes: Are they asbestoslike? In Fullerene Science and Technology 9 (No. 2): 251 – 254.

bar sind. So wird für Fullerene vermutet, dass sie dies sind, für Nanotubes wird dies hingegen nicht angenommen.

Halbleiteranwendungen

Halbleiterpartikel und insbes. sog. quantum dots „serving as brightly glowing tags in mammalian cells.“²¹ Quantum dots enthalten Cadmiumbestandteile, die als gefährlich angesehen werden.

Eine Verlautbarung des Rice Instituts geht davon aus, dass die meisten Nanopartikel wahrscheinlich relativ inert sind, aber Toxizitätsstudien über eine ganze Bandbreite von Nanopartikeln sind bislang nicht durchgeführt worden. Damit können sich einige Nanopartikel als toxisch erweisen (SN 2002). In der Folge wird auf die Notwendigkeit verwiesen, dass mehr Material:

- im Hinblick auf die Toxizität und
- im Hinblick auf die Fähigkeit “to piggyback on different synthetic molecules and investigate their effects not just in cell culture but also in living animals”

überprüft werden muss.

Bewertung der Risiken im Rahmen eines Prozesses vor dem Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg

Im Rahmen einer ersten gerichtlichen Überprüfung der Genehmigung einer Anlage zur Produktion von Nanopartikeln wurden eine Reihe von kritischen Punkten durch Gutachteraussagen bewertet. Dabei wurde übereinstimmend festgestellt, dass die gesundheitlichen Auswirkungen von Nanopartikeln derzeit noch wenig erforscht sind. In der Summe allerdings wurde von den Gutachtern in diesem Verfahren festgestellt, dass der Diskussionsprozess im Hinblick auf einen Beurteilungsmaßstab noch nicht abgeschlossen ist.

Durch Analogiebildung zu den Beurteilungswerten von Dieselruß und der von der Anlage ausgehenden Immissionszusatzbelastung kamen die Gutachter zu der Einschätzung, dass die Genehmigungsaufgaben hinreichend waren.

In der Folge sollen allein zwei Aspekte des Verfahrens kurz dargestellt werden.

Zellwandgängigkeit von Nanopartikeln

Es existieren einzelne Untersuchungen, die zu dem Ergebnis kommen, dass „nach der tierexperimentellen Gabe von Partikeln in die Atemwege hinein diese in nicht zu kleiner Zahl auch in der Leber nachweisbar seien, also auf dem Blutwege dorthin gelangt sein müssten.“ Diese Ergebnisse seien nach seiner (Prof. Dr. Dr. Wichmann – beigeladener Sachverständiger) Einschätzung jedoch zurückhaltend zu bewerten.²²

Völlig neuartiges Gefährdungspotenzial

„Zwar macht der Kläger geltend, dass es sich bei den von der Anlage der Beigeladenen ausgehenden gezielt zur wirtschaftlichen Verwendung hergestellten Nanopartikeln um ein völlig neuartiges Gefährdungspotenzial handele, das mit ubiquitär vorhandenen Nanopartikeln

²¹ Zit. nach Science News 30/3/02; Verweis auf Paul Alivisatos Forschergruppe an der Universität Kalifornien in Science News 24/10/98.

²² Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg, Beschluss vom 19/3/02 –10 S 2184/99 7.

nicht vergleichbar sei; der Sachverständige konnte jedoch ein solch neuartiges Gefährdungspotenzial – wenn auch unter gewissen Vorbehalten – nicht bestätigen.“²³

4.5 Forschungsbedarf aus Sicht von Industrie, Behörden und Forschung bzgl. der chemischen Industrie

Im Rahmen eines Workshops „Nanomaterials and the Chemical Industry – R&D Roadmap Workshop“²⁴, in welchem vorrangig die technischen Ziele und Hindernisse für die Anwendung und Marktfähigkeit von Nanomaterialien in der Chemischen Industrie und daraus abgeleitet prioritäre FuE Notwendigkeiten identifiziert wurden, wurden zugleich auch Aspekte der Sicherheit, Umwelt und Gesundheit identifiziert. Es ist darauf zu verweisen, dass für den Bereich Sicherheit, Umwelt und Gesundheit ausschließlich Sicherheits-, Umwelt- und Gesundheitsprobleme benannt werden, die sich durch Nanopartikel und Nanomaterialien ergeben können. Längerfristige Problembereiche werden insofern kaum berücksichtigt.

Diese sollen in der Folge referiert werden, da diese grundsätzlichen Fragestellungen für die weiteren Forschungsbemühungen von Bedeutung sind und im Grundsatz eine Forschungsagenda für die Nanotechnologien darstellen.

Mögliche Hemmnisse der Marktentwicklung, die sich aus dem fehlenden Wissen über Sicherheits-, Umwelt- und Gesundheitsfolgen von Nanomaterialien/-partikeln ergeben:

- Fehlendes Wissen über das Ausbreitungsverhalten von Nanopartikeln in der Luft
- Fehlendes Wissen des Niveaus von Nanopartikeln in der Umwelt (Problem: Messung und Quantifizierung)
- Große Unbekannte bei dem upscalen der Produktion, da keine Umweltstandards existieren
- Unzureichendes Wissen bzgl. der Gesundheitsrisiken durch Nanomaterialien
- Fehlende Toxizitätsdaten
- Fehlende Erfahrungen im sicheren Umgang mit Nanopartikeln
- Fehlendes Wissen bzgl. Gesundheits-, Sicherheits-, und Umweltfolgen

Daraus werden folgende Forschungsprioritäten abgeleitet:

- Entwicklung von Modellen für das Verständnis der Inhalierung und Aufnahme von Nanopartikeln und dem Transfer in den Blutkreislauf oder in das Gewebe
- Untersuchung der kurz- und langfristigen Effekte von Gesundheitsrisiken von Nanopartikeln
- Untersuchung über das Zerlegen (break down) von Nanokompositen / die Freisetzung von Nanopartikeln in die Umwelt

²³ Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg, Beschluss vom 19/3/02 –10 S 2184/99 7.

²⁴ Vision 2020 (2002): Nanomaterials and the Chemical Industry – R&D Roadmap Workshop; Preliminary Results; Workshop held on September 30, October 1 and 2, 2002: Chemical Industry - Vision 2020 – Technology Partnership.

FuE Erfordernisse:

- Erforschung der toxikologischen Eigenschaften von Nanomaterialien, die von Mikropartikeln adsorbiert werden oder die Aggregationen von Nanomaterialien
- Zusammenstellung von Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltdaten für Nanopartikel in unterschiedlichen Zusammensetzungen
- Toxizitätstest und -studien
- Interaktion von Nanopartikeln mit der menschlichen Physiologie
- Life – cycle – Aspekte von Nanopartikeln
- Modellierungen um Nanomaterialien zu designen, die umweltfreundlich sind
- Entwicklung von schnellen screen Protokollen

4.6 Fazit

In der Summe kann festgehalten werden, dass das Wissen um die möglichen Gesundheits- und Umweltrelevanz von Nanopartikeln sich als sehr begrenzt erweist. Ein zentrales Problem besteht des weiteren darin, dass die Entwicklung nanotechnologischer Verfahren und Produkte schnell voranschreitet, ohne dass es, zumindest nach dem Wissensstand der Autoren, ein systematisches begleitendes Programm gäbe, dass die Umwelt- und Gesundheitswirkungen analysiert. Eine Anlehnung an die Vorgehensweise, wie sie im Chemieweißbuch der EU formuliert wird, wäre auch für die Nanotechnologien sinnhaft. Generell wäre zu prüfen, inwieweit die Vorgehensweise, die die Chemische Industrie in den USA mit ihrer Roadmap „Nanomaterials and the Chemical Industry“ vorgelegt hat, auch für weitere Bereiche zu entwickeln wäre. Die Kombination der Identifikation von Forschungsbedarfen, um die Chancen nanotechnologischer Verfahren erschließen zu können, in Verbindung mit einer parallelen Risikobewertung, unter Einschluss sowohl von Wissenschaftlern, Behördenvertretern und Unternehmen, erscheint als eine Möglichkeit die Unsicherheiten hinsichtlich der Umwelt- und Gesundheitswirkungen zu reduzieren. Zugleich bietet ein solcher Ansatz die Möglichkeit ein gemeinsames Verständnis über potenzielle Problemlagen zu generieren und damit zugleich ggf. den Möglichkeitsraum von weiteren technologischen Fortschritten in dem Sinne einzunengen, dass Risiken vermieden werden können.

5 Ökologische Profilbetrachtungen – Methodische Grundlagen für die Fallstudien

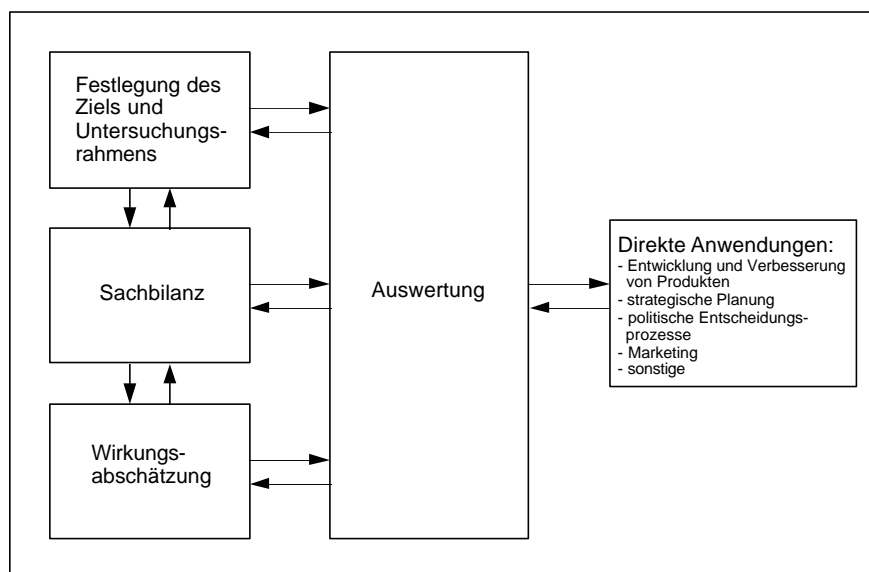
Die ökologischen Profilbetrachtungen für die beiden Fallbeispiele orientieren sich einerseits bei der Vorgehensweise an der Ökobilanzmethode nach DIN ISO 14040, können andererseits aber nicht alle Anforderungen der Norm erfüllen, da die notwendige Güte der Datenlage über die Produkte / Verfahren und über die Vergleichsprodukte /-verfahren vor dem Hintergrund des zur Verfügung gestandenen Zeitrahmens und des finanziellen Rahmens Lücken aufweisen wird.

Nach EN ISO 14040 besteht eine Ökobilanz aus folgenden Schritten:

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens,
- Sachbilanz,
- Wirkungsabschätzung und
- Auswertung.

Den Zusammenhang zwischen diesen Schritten verdeutlicht die nachfolgende Abbildung, im Anschluss daran werden die einzelnen Schritte ausführlicher beschrieben.

Abbildung 1: Schritte zur Erstellung einer Ökobilanz



Quelle: EN ISO 14040 1997

Die Pfeile zwischen den einzelnen Ökobilanzschritten sollen den iterativen Charakter verdeutlichen, d.h. dass die Ergebnisse weiterführender Schritte stets rückgekoppelt werden und ggf. Änderungen und einen erneuten Durchgang zur Folge haben.

Im ersten Schritt der **Zielfestlegung und des Untersuchungsrahmens** sollten folgende Punkte festgelegt und für den abschließenden Bericht (und ggf. die kritische Prüfung, siehe weiter unten) dokumentiert werden:

- Verwendungszweck
- Gründe für die Durchführung
- Zielgruppe
- Systemgrenzen
- Anforderungen an die Datenqualität (Erfassungsbereich, Datenquellen etc.)
- Funktionen des Produktsystems
- Funktionelle Einheit
- Wirkungskategorien und angewandte Methode der Auswertung
- Annahmen und Einschränkungen
- Art der kritischen Prüfung

Wenn bestimmte Prozesseinheiten oder Lebenszyklusstufen unberücksichtigt bleiben, so ist dies ausführlich zu beschreiben und zu begründen.

Im Rahmen der **Sachbilanz** erfolgt die Erhebung, Zusammenstellung und Berechnung der Daten. Eine Ökobilanz erstreckt sich in der Regel über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes oder einer Dienstleistung. Die Stoff- und Energiedaten müssen nun für jede dieser Lebenszyklusstufen in physikalischen Einheiten zusammengetragen werden. Dabei sind auf der Inputseite Daten über den Verbrauch an Roh- und Hilfsstoffen sowie Energie und auf der Outputseite Daten über die Produkte, die Luft- und Wasseremissionen sowie der Abfälle erforderlich.

In der **Wirkungsabschätzung** werden die Sachbilanzdaten im Hinblick auf ihre ökologische Relevanz strukturiert (Klassifizierung) und zusammengefasst (Charakterisierung). Auf diese Weise werden die Ressourcenentnahmen und Emissionen, die im Laufe des Produktlebenszyklus auftreten, mit Umweltauswirkungen in Zusammenhang gebracht, die in Fachkreisen und der Öffentlichkeit diskutiert werden.

In der folgenden Tabelle sind Wirkungskategorien und die dazu beitragenden Substanzen aufgelistet.

Tabelle 1: Wirkungskategorien und dazu beitragende Substanzen

Wirkungskategorie	Beitragende Substanzen und Faktoren
Ressourcenbeanspruchung	Verbrauch erneuerbarer und nicht erneuerbarer Ressourcen (Erdöl, Erdgas, Kohle, Mineralien, Holz u.a.)
Treibhauseffekt	Kohlendioxid (CO ₂), Methan (CH ₄), Lachgas (N ₂ O) u.a.
Stratosphärischer Ozonabbau	Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), bromierte und halogenierte Kohlenwasserstoffe u.a.
Humantoxizität	Flüchtige organische Kohlenwasserstoffe (VOC), organische Lösemittel, Schwebstaub, Benzol, Schwermetallverbindungen (Arsen, Cadmium, Quecksilber, Blei, Nickel, etc.) Schwefeldioxid (SO ₂), Stickoxide (NO _x), Fluoride, Fluorwasserstoff, Chlorwasserstoff, Kohlenmonoxid (CO), Ruß u.a.
Ökotoxizität	Schwefeldioxid (SO ₂), Stickoxide (NO _x), Fluoride, Fluorwasserstoff, Chlorwasserstoff, Blei (Pb), Cadmium (Cd), Kupfer (Cu), Quecksilber (Hg), Zink (Zn), Chrom (Cr), Nickel (Ni), adsorbierbare organische Halogene (AOX) u.a.
Sommersmog	Stickoxide (NO _x), Methan (CH ₄), flüchtige organische Kohlenwasserstoffe (VOC) u.a.
Versauerung	Schwefeldioxid (SO ₂), Stickoxide (NO _x), Ammoniak (NH ₃), Salzsäure (HCl), Fluorwasserstoff (HF) u.a.
Aquatische Eutrophierung	Nitrat (NO ₃ ⁻), Ammonium (NH ₄ ⁺), chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), Gesamt-Phosphor, Gesamt-Stickstoff u.a.
Terrestrische Eutrophierung	Stickoxide (NO _x), Ammoniak (NH ₃) u.a.
Naturraumbearbeitung	Rohstoffgewinnung (z.B. Kohle- und Erzabbau), Inanspruchnahme von Flächen einer bestimmten ökologischen Qualität (z.B. Landwirtschaft)

Der letzte Schritt einer Ökobilanz ist die **Auswertung**. Darin gilt es, die Schlussfolgerungen für die geplante(n) Anwendung(en) der Ökobilanz zu ziehen und konkrete Handlungen abzuleiten. Die Auswertung setzt sich zusammen aus:

- der Ermittlung der signifikanten Parameter,
- der Beurteilung der Güte der Ökobilanz und
- Schlussfolgerungen, Empfehlungen und dem Bericht.

6 Fallstudie Autoabgaskatalysator

6.1 Übersicht über Abgasreinigungskonzepte

Der motorisierte Straßenverkehr trägt stark zur Belastung der Umwelt bei, da bei der Verbrennung eines Kraftstoff-Luft Gemisches in einem herkömmlichen Verbrennungsmotor neben Kohlendioxid weitere wesentliche Schadstoffe wie Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide (NO_x) sowie Partikel (insbesondere beim Dieselmotor) entstehen.

Die Entwicklung von Technologien zur Verminderung des Schadstoffausstoßes von Automobilen wurde durch die Verabschiedung des Clean Air Acts in den USA 1970 sowie die Übernahme seiner Grenzwerte durch das japanische Pollution Control law 1973 ausgelöst. Als Sieger dieses Technologiewettbewerbs ging der Autoabgaskatalysator hervor (Nill 2002).

In den EU-Ländern sind Katalysatoren seit 1993 für Neufahrzeuge vorgeschrieben, da sonst die geltenden gesetzlichen Vorschriften nicht mehr eingehalten werden konnten.

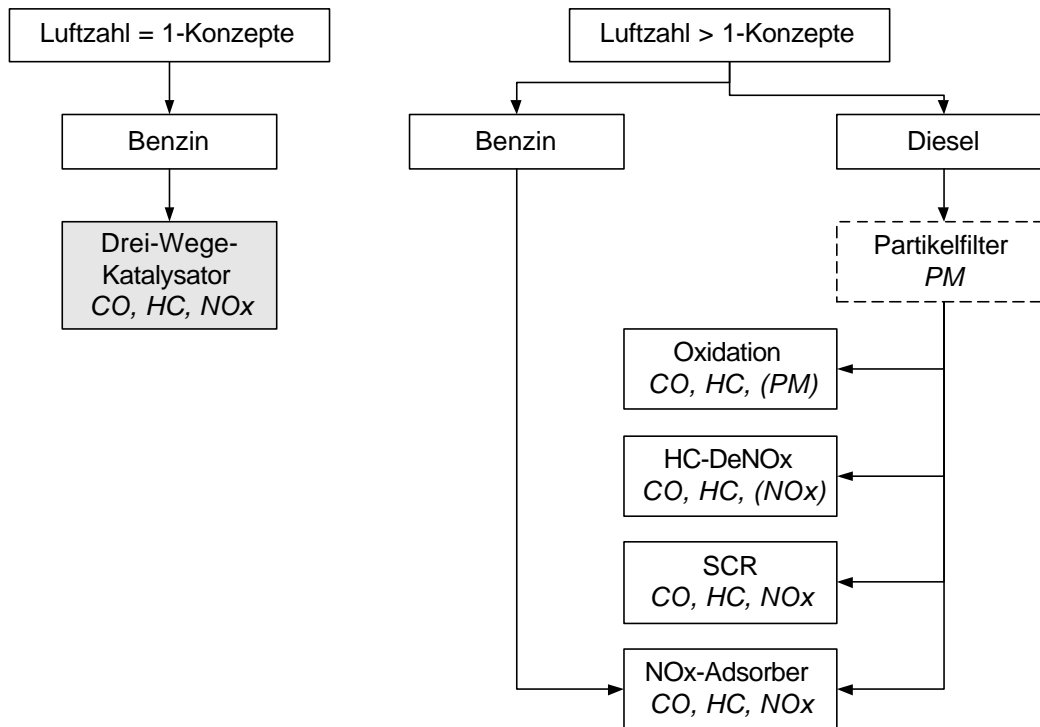
Triebfeder für die Verbesserung der Emissionsbilanz und damit auch der Abgasnachbehandlung war und ist nach wie vor die Gesetzgebung. Nahezu alle Länder haben inzwischen Abgasregelwerke in Kraft gesetzt, die sich weiter verschärfen werden. Z.B. gilt in Deutschland seit 2000 die Euro III – Norm; 2005 wird die Euro IV – Norm in Kraft treten.

Tabelle 2: Entwicklung der Europäischen Abgaswerte bezogen auf den Europäischen Fahrzyklus für PKW seit 1996

Emissionen [g/km]	1996 Euro II		2000 Euro III		2005 Euro IV	
	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel
Kohlenmonoxid	2,70	1,06	2,30	0,64	1,00	0,50
HC und NO _x		0,77		0,56		0,3
Kohlenwasserstoffe	0,34		0,20		0,10	
Stickoxide	0,25	0,566	0,15	0,50	0,08	0,25
Partikel		0,08		0,05		0,025

Die folgende Grafik zeigt die Abgasreinigungskonzepte, die derzeit für die unterschiedlichen Antriebssysteme diskutiert werden.

Abbildung 2: Übersicht über Abgasreinigungskonzepte für verschiedene Anwendungsfelder²⁵; kursiv sind die Schadstoffe angegeben, die durch das jeweilige Konzept abgebaut werden



Quelle: Gieshoff 2001a S. 10

Die derzeit vorherrschenden Ausführungen sind der Drei-Wege-Katalysator für Ottomotoren und der Dieseloxidationskatalysator für Dieselfahrzeuge.

Für die verschiedenen notwendigen chemischen Reaktionen im System Autoabgaskatalysator ist eine komplexe Substanz aus den Edelmetallen Platin, Palladium und Rhodium in Kombination mit verschiedenen anorganischen Oxiden verantwortlich.

Für die Partikelgröße der katalytisch aktiven Edelmetalle in diesem sogenannten Washcoat kann zudem festgestellt werden, dass sie von Anfang an im nanoskaligen Bereich lag. Außerdem lässt sich nachvollziehen, dass die Katalysatorentwicklung gekoppelt war mit dem Einsatz von immer kleineren und immer homogeneren PGM-Partikeln²⁶. Diese Entwicklung, die mit immer größeren spezifischen Oberflächen des katalytisch aktiven Materials verbunden ist, verbindet einerseits den Wunsch nach höheren Katalysatorenaktivitäten und besserer chemischer Fixierung und andererseits nach sparsamen Einsatz dieser sehr teuren Edelmetalle.²⁷

Aus diesem Grund wurde der Autoabgaskatalysator als ein vertieft zu untersuchendes Fallbeispiel ausgewählt. Die chemischen Parameter im Zusammenhang mit dem Edelmetallein-

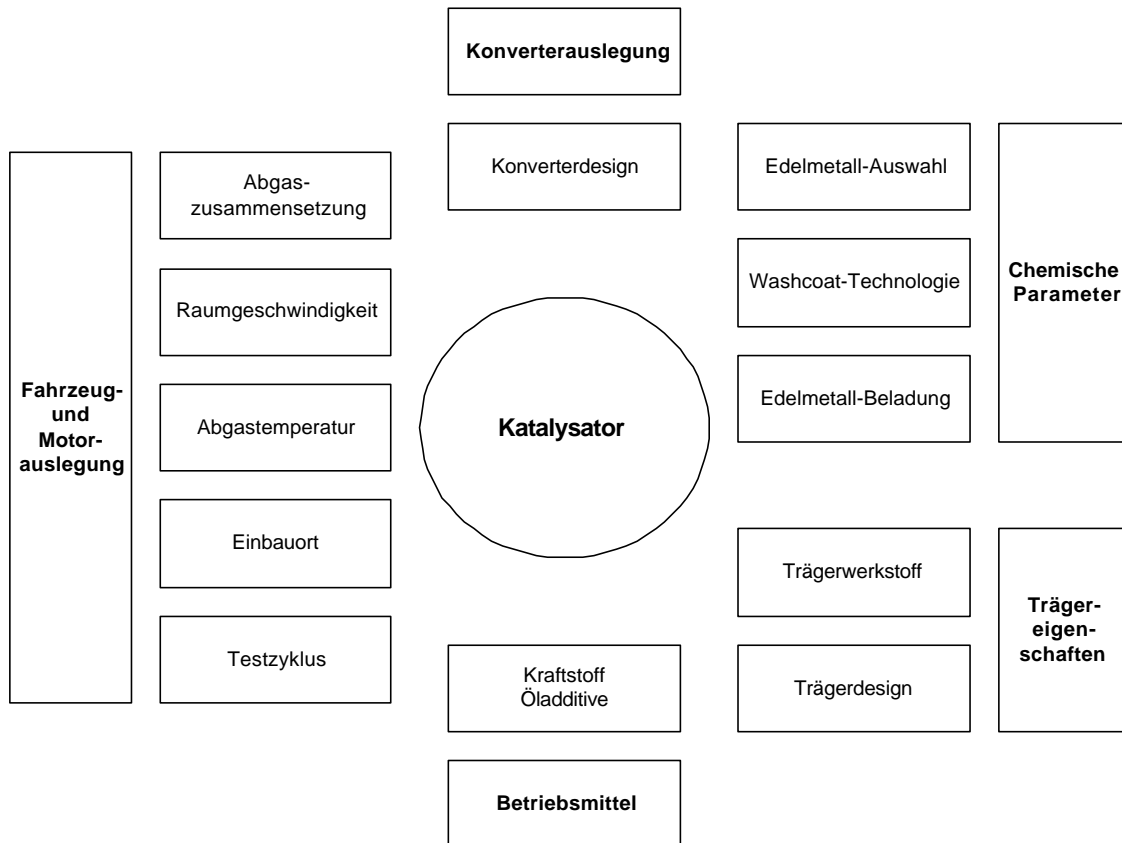
²⁵ Die Luftzahl beschreibt das Verhältnis der angebotenen Luftmasse zur für den Verbrennungsprozess notwendigen Luftmasse. Bei einer Luftzahl von 1 wird exakt die Luftmenge zugeführt, die für die vollständige Umsetzung des Kraftstoffs notwendig ist. Ein Luftzahl größer als eins beschreibt einen Luftüberschuss (mageres Gemisch).

²⁶ Wurden in alten Katalysatoren z.B. Pd-Partikel in der Verteilung von 6-20 nm eingesetzt, sind es bei modernen Katalysatoren homogene Pd-Partikel zwischen 4,1-5,9 nm (Gieshoff 2001b S. 47).

²⁷ Dieser Sachverhalt wurde von Herrn Dr. Gieshoff (2002) (OMG AG & Co. KG Hanau) in einem Gespräch eindeutig bestätigt.

satz sind wesentlich die Leistungsfähigkeit eines Katalysatorsystems beeinflussende Parameter, aber natürlich nicht die einzigen Parameter, wie es die folgende Abbildung verdeutlicht.

Abbildung 3: Parameter, die wesentlichen Einfluss auf die Funktion und Leistung eines Abgasreinigungssystems besitzen



Quelle: Gieshoff 2001a S. 23

6.2 Fokus: Drei-Wege-Katalysator

Die Fallstudie schränkt ihren Fokus im weiteren auf das Anwendungsfeld des Drei-Wege-Katalysators ein, um an dieser konkrete Technologieentwicklungen mit Nano-Bezug zu analysieren und auf Umweltauswirkungen vergleichend zu untersuchen und zu bewerten.

6.2.1 Grundlegende chemische Reaktionen und Aufbau des Drei-Wege-Katalysator

Der Autoabgaskatalysator besteht neben dem Gehäuse insbesondere aus

- dem Katalysatorträger / Substrat (weltweit: 93% keramische Monolith als Wabenkörper; 7% auf Metallträger auf Folienbasis) und
- der Katalysatorbeschichtung.

Die Katalysatorbeschichtung besteht wiederum aus folgenden Komponenten:

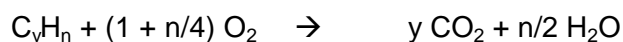
- Trägeroxiden (Aluminiumoxid, bedingt Siliziumdioxid und Titandioxid);
- weiteren oxidischen Komponenten (Zeolithe, Stickoxidspeicherkomponenten (Erdalkali- und Alkalimetalle), Sauerstoffspeicherkomponenten (Ceroxid); Einsatz je nach Katalyseziel) und
- Edelmetallen (Platin, Palladium, Rhodium; die Massenverhältnisse der einzelnen Edelmetalle hängen von den katalytischen Eigenschaften, teilweise auch vom Edelmetallmarkt ab).

Die wässrige Suspension der Beschichtungskomponenten wird Washcoat genannt.

Die katalytische Beschichtung wird auf eines der beiden oben genannten Substrate aufgebracht. An das Trägermaterial eines Abgaskatalysators im Fahrzeug werden die verschiedensten Anforderungen gestellt. Ein sehr wesentlicher Punkt ist darüber hinaus die Frage der Beschichtbarkeit des Trägers bzw. die Haftung des Washcoat. Durch die Beschichtung wird aus dem Substrat ein katalytisch aktives Element, welches die Schadstoffreduktion ermöglicht.

Für die Umsetzung von CO und Kohlenwasserstoffen sind oxidierende Reaktionsbedingungen günstig, da beide Abgaskomponenten zu CO₂ (und H₂O) umgesetzt werden. Die Reduktion der Stickoxide geschieht jedoch bevorzugt mit CO als Reduktionsmittel.

Oxidation von CO und Kohlenwasserstoffen zu CO₂ und H₂O:



Reduktion von NO/NO₂ zu N₂:





Quelle: Heck 2002 S. 72

Neben den oben angegebenen Hauptreaktionen finden weitere chemische Umwandlungen statt. Daneben finden Reaktionen der Gase mit Komponenten der Katalysatorbeschichtung statt.

Ohne Katalysator finden die oben angegebenen Reaktionen zur Umsetzung der Schadstoffe im Abgas bei den vorliegenden Rahmenbedingungen (Temperatur, Druck, Konzentration) nicht mit ausreichender Geschwindigkeit statt. Der Katalysator verändert die Reaktionsgeschwindigkeit einer Reaktion, ohne dabei selbst in der Bruttoreaktionsgleichung aufzutreten bzw. eine permanente Veränderung zu erfahren. Dadurch werden Verringerungen des Schadstoffausstoßes von über 90% möglich.

6.2.2 Ziel der Fallstudie

Ziel der ökologischen Profilbetrachtung ist es, den gesamten Produktlebensweg eines Autoabgaskatalysators von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung und den Gebrauch bis zur Entsorgung/Recycling unter dem Aspekt des nanoskaligen Einsatzes von Platingruppen-Metallen für PKW-Abgaskatalysatoren darzustellen und ökologisch soweit wie möglich zu bewerten.

Dazu wird der Produktlebenszyklus erfasst und die Wirkungszusammenhänge beim Einsatz von Platingruppen-Metallen diskutiert und – wo möglich – durch erhobene Daten quantifiziert.

Auf der Grundlage der aufgezeigten bisherigen Technologieentwicklung sowie den beschriebenen Technologietrends werden verschiedene Szenarien dargestellt, miteinander verglichen und bewertet.

Die Methodik zur Erstellung der Ökopprofile orientiert sich an der Ökobilanzmethode nach DIN ISO 14040, ohne deren Anforderungen in allen Belangen gerecht werden zu können.

6.2.3 Untersuchungsgegenstand und Untersuchungsrahmen

Untersuchungsgegenstand der Studie ist wie bereits oben beschrieben der Drei-Wege-Katalysator für den Einsatz in Automobilen mit Ottomotoren. Der Aufbau etc. wurde schon im Kap. 6.2.1 näher beschrieben.

Betrachtet wird dessen Einsatz auf unterschiedlichen Technologieentwicklungsstufen unter dem Aspekt des nanoskaligen Einsatzes von Platingruppen-Metalle.

Als funktionale Einheit wird ein Drei-Wege-Katalysator mit seiner entsprechenden Edelmetallmenge gewählt.

Der Bilanzraum umfasst erst einmal den gesamten Lebensweg eines Drei-Wege-Katalysators mit den folgenden Lebenszyklusstufen:

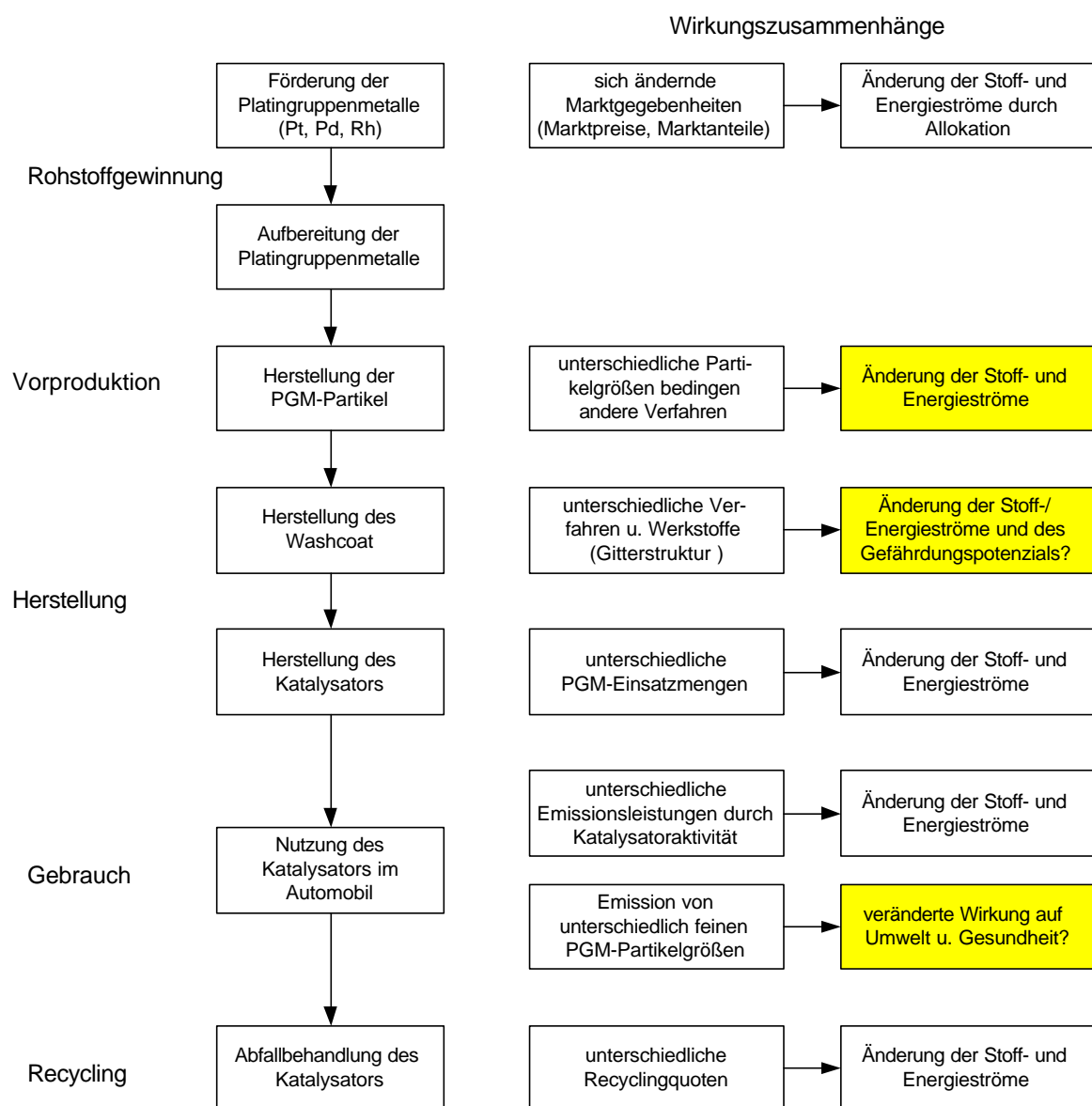
- Rohstoffgewinnung,
- Vorproduktion,
- Herstellung,

- Gebrauch und
- Recycling/Entsorgung.

Andererseits wird bei der vergleichenden Betrachtung der Szenarien auf den Einsatz nanoskaliger Edelmetallpartikel und den dadurch induzierten Umweltwirkungen fokussiert. D.h. die weiteren Einsatzteile eines Katalysators wie z.B. die Ummantelung und der Katalysatorträger werden ökobilanziell nicht betrachtet, soweit man für den Szenarienvergleich von gleichbleibenden Bedingungen ausgehen kann.

Die folgende Abbildung stellt den Bilanzraum dar. Außerdem werden den einzelnen Lebenszyklusstufen Wirkungszusammenhänge mit Bezug zum Edelmetalleinsatz zugeordnet.

Abbildung 4: Bilanzraum des Autokatalysators und dessen Wirkungszusammenhänge unter dem Fokus des Platingruppen-Metalleinsatz



Quelle: Eigene Darstellung

Die konkrete Beschreibung der Lebenswegstufen und der nutzbaren Datengrundlagen werden detailliert im Kap. 6.2.6 beschrieben. Die Einbeziehung der farbig unterlegten Wirkungen konnte in den Variantenbetrachtungen nicht differenziert betrachtet werden, da zu diesen

Aspekten keine ausreichenden Informationen vorliegen bzw. beschafft werden konnten. Dies begründet sich einerseits auf Firmengeheimnisse insbesondere zur Herstellung von Partikel und Washcoat; andererseits existieren keine ausgewiesenen Untersuchungen zu derartigen PGM-Partikel und deren Wirkungen.

6.2.4 Entwicklung des Autoabgaskatalysators

Heck (2002 S 79ff) unterteilt die Katalysatorentwicklung aus amerikanischer Sicht in folgende Generationen:

- **Konverter der ersten Generation: Oxidationskatalysatoren (1976-1979)**

Während der frühen Implementierung des Clean Air Act wurde der Katalysator nur dazu benötigt, CO und HC herabzusetzen.

- **NO_x-, CO- und HC-Reduktion: Die zweite Generation (1979-1986)**

Im Anschluss an die erfolgreiche Implementierung von Katalysatoren, die CO und HC kontrollierten, wurde die Reduktion von NO_x-Emissionen im Autoabgas auf unter 1,0 g/mi in Angriff genommen.

Es erfolgte die Entwicklung eines anspruchsvollen elektronischen Kontrollsystems, welches die Luft-/Kraftstoff-Rate innerhalb eines engen Fensters beibehält und damit die simultane Umsetzung aller drei Schadstoffe erlaubt. Diese Technologie, die auch als Drei-Wege-Katalysator bezeichnet wird, wurde erstmals 1979 im großen Umfang in Fahrzeugen installiert.

- **NO_x-, CO- und HC-Reduktion: Die dritte Generation (1986-1992)**

Ende der Achtziger Jahre beziehungsweise zu Beginn der Neunziger Jahre veränderten sich die Betriebsbedingungen von Automobilen. Eine ökonomische Kraftstoffnutzung und höhere Geschwindigkeiten führten zu Verbesserungen in der Antriebstechnologie. Diese Situation führte allerdings auch zu höheren Expositionstemperaturen für den Drei-Wege-Katalysator. Außerdem wurde der Katalysator durch geändertes Fahrverhalten einer stärker oxidierenden Atmosphäre ausgesetzt.

- **Palladium Drei-Wege-Katalysator: Die vierte Generation (Mitte der 90er)**

Während der Entwicklung von Automobilkatalysatoren war die Nutzung von Pd als Ersatz für Pt und/oder Rh wünschenswert, da es beträchtlich preiswerter war. Die ersten kommerziellen Installationen wurden von Ford im 1995er Baujahr umgesetzt. Die Zugabe von Rh zum Pd-Katalysator verbesserte sowohl die Resistenz gegenüber Pb als auch die Katalysatorleistung speziell bei der NO_x-Umsetzung.

Die Technologie ist jetzt soweit entwickelt, dass je nach Preis-/Bedarfsfrage unter den verschiedenen Edelmetallen: Pd, Pt und Rh ausgewählt werden kann.

- **Moderne Drei-Wege-Katalysator-Technologien für die 2000er**

Die modernen Drei-Wege-Katalysatoren benutzen geschichtete Katalysatoren mit Washcoat-Aufbauten, welche die Drei-Wege-Reaktionen und die Hochtemperaturbeständigkeit des Katalysators erhöhen. Die Notwendigkeit zur besseren Hitzebeständigkeit resultiert aus der Forderung nach Vermeidung von Kaltstartemissionen insb. HC-Emissionen.

Zwei Neuentwicklungen!?

Darüber hinaus sind aktuell zwei separate Entwicklungen von Herstellern in den USA bzw. Japan zu registrieren, die eine weitere Entwicklungsstufe im Katalysatorenbereich darstellen könnten.

Die Leistung eines Katalysators kann verbessert werden, in dem entweder die Edelmetallmenge in einer vorgegebenen Metalloxidbeschichtung variiert oder aber die Metalloxidzusammensetzung verändert wird (Mitani 2001). Problematisch war nur, dass sich die Partikel durch Schwankungen in der Abgaszusammensetzung und in der Temperatur im Dauereinsatz zu größeren Molekülen verbunden und somit an Oberflächenaktivität verloren haben.

Um dieser Alterung durch Sinterung entgegenzuwirken, wurden in den letzten Jahren verschiedene innovative Zusammensetzungen der Metalloxid-Beschichtung entwickelt. Mit Hilfe von Perovskite-Kristallstrukturen²⁸ im Washcoat soll ein weiterer Effizienzsprung erreicht worden sein.

Catalytic Solutions Inc. (CSI), Oxnard, entwickelt seit Mitte der neunziger Jahre Perovskite-basierte Katalysatoren und ist ein neues Unternehmen im Bereich der Katalysatorenherstellung. Im April 2001 wurde erstmals die neue Katalysatorentechnologie bei der Präsentation des neuen Stepwgn-Modells von Honda in Japan vorgestellt, der sich insbesondere dadurch ausweist, dass der PGM-Einsatz bei gleicher Leistung um 50-70 % verringert werden konnte (Honda 2001, Juran 2001).

Der von CSI entwickelte und patentierte Mixed Phase Catalyst („MPC®“) enthält nach eigenen Angaben Nanostrukturen, die extrem thermostabil und beständig gegen das Sintern sind. Dadurch verbessern sich sowohl die Leistung als auch die Kosten des Katalysators (CSI 2002).

Nachdem Honda Motor Co. seit längerem an CSI eine Beteiligung hält, hat sich jetzt auch Ford Motor Co. als zweites Automobilunternehmen an CSI beteiligt (Detroit 2002).

Daihatsu Motor Co., Ltd forscht an ähnlichen Perovskite-Strukturen und hat einen neuen kobaltfreien auf der Perovskite-Struktur basierenden „Intelligenten Katalysator“ entwickelt. (Daihatsu 2002a) Washcoatbestandteile sind hierbei Lanthan, Eisen und Palladium. Dieser Aufbau ist den ehemaligen mit Kobalt versehenen Katalysatoren bei der innewohnenden Kristallstabilität bei hohen Temperaturen überlegen. In Kombination mit ihrer TOPAZ Katalysator-Technologie können hierdurch die Grenzwerte der japanischen J-ULEV (75% Minderung gegenüber dem seit 2000 geltenden Standard) erreicht werden und gleichzeitig bis zu 70% der PGM-Einsatzmenge eingespart werden (Daihatsu 2002a).

Auf der Tokioer Motor Show Ende Oktober 2002 wurde ein derartiges Konzept öffentlich vorgestellt (Daihatsu 2002c).

6.2.5 Auswahl der zu betrachtenden Varianten

Ziel ist der Vergleich von Technologieentwicklungen mit Nano-Bezug. Betrachtet man die Katalysator-Technologieentwicklung unter diesem Fokus, ist festzustellen, dass sich Varianten nach folgenden Kriterien ableiten lassen:

- Unterscheidung nach Einsatz der Edelmetallart

²⁸ Erläuterungen zu Perovskite-Kristallstrukturen erfolgen im Kap. 6.2.6.3.

- Unterscheidung auf Grund der Art der Edelmetallaufbringung in enger Verknüpfung mit Partikelgröße (älteres Imprägnierungsverfahren, neues „Edelmetall im Washcoat“-Verfahren, Perovskite-Strukturen).

Aus Umweltsicht können folgende wesentliche Einflussparameter für die Höhe von Umweltauswirkungen genannt werden:

- *Katalysatorleistung (in Korrelation zu den einzuhaltenden Emissionsgrenzwerten der jeweils geltenden EU-Norm),*
- *Einsatzmenge der PGM-Metalle und die*
- *Recyclingquote des PGM-Einsatzes.*

Ausgehend von diesen Parametern wurden fünf Varianten für vergleichende Betrachtungen abgeleitet, die einerseits die Entwicklung der Katalysatorentechnologie nachzeichnen und andererseits die aktuellen Neuentwicklungen berücksichtigen.

Tabelle 3: Übersicht der betrachteten Varianten

Betrachtungsvarianten	Variante 1 A Imprägnierungskatalysator	Variante 1 B Imprägnierungskatalysator	Variante 2 Mehrschichtkatalysator	Variante 3 CSI: Perovskite-Drei-Wege-Katalysator	Variante 4 Daihatsu: „Intelligenter Katalysator“
Art der Edelmetallaufbringung ²⁹	Imprägnierung	Imprägnierung	„Edelmetall im Washcoat“-Verfahren	Einsatz von Perovskitematerialien	Einsatz hochtemperaturstabiler Beschichtung
Art des Edelmetalleinsatz	überwiegend Platin Pt/Rh 5:1	überwiegend Palladium Pd/Rh 5:1	überwiegend Palladium Pt/Pd/Rh 1:10:1	überwiegend Palladium Pt/Pd/Rh 1:10:1	überwiegend Palladium Pt/Pd/Rh 1:10:1
PGM-Einsatzmenge	2,2 g/ Kat.	4,0 g/ Kat.	3 g/ Kat.	1,5 g/ kat.	1,5 g/ Kat.
Pt-Menge	1,8 g/ Kat.	-	0,25 g/ Kat.	0,125 g/ Kat.	0,125 g/ Kat.
Pd-Menge	-	3,6 g/ Kat.	2,5 g/ Kat.	1,25 g/ Kat.	1,25 g/Kat.
Rh-Menge	0,4 g/ Kat.	0,4 g/ Kat.	0,25 g/ Kat.	0,125 g/ Kat.	0,125 g/Kat.
Einhaltung der EU-Norm ³⁰	EURO II	EURO II	EURO III	EURO III	EURO IV

Die Variante 1 repräsentiert den Katalysatorentwicklungsstand Anfang der 90er Jahre. Die Technologie war noch fähig, die Emissionsgrenzwerte dieser Zeit (EURO II) zu erfüllen. Nach Aussage von Gieshoff (2002) war diese Technologie aber nicht mehr in der Lage, verschärfte Grenzwerte einzuhalten. Auch ein erhöhter unwirtschaftlicher Edelmetalleinsatz (die dreifache Menge) hätte nicht die Einhaltung der EURO III-Norm zur Folge gehabt. Die Varianten A und B unterscheiden sich durch den Ersatz von Platin durch Palladium. Dieser erfolgte in erster Linie aufgrund der bis dahin vorherrschenden gravierenden Preisunterschiede zwischen beiden Metallen (Hagelüken 2001). Der Austausch der Metalle erfolgt auf Grund der Materialeigenschaften nicht im Verhältnis 1:1, sondern eher 1:2 (Gieshoff 2002). Das Verhältnis 5:1 zwischen den Metallen Platin zu Rhodium ist die übliche Einstellung gewesen und wird in der Literatur wiederholt belegt (Hagelüken 2001, WHO 2002, Hochfeld 1997, Amatayakul 1999).

Als Ausgangspunkt für die PGM-Einsatzmenge wurden 2,2 g gewählt. Konkrete Aussagen zu PGM-Einsatzmengen werden nicht gemacht, da sie nach Aussagen von Unternehmen sehr stark variieren (z.B. beträgt der Faktor bei 2 I-Motoren für die Bandbreite der angebotenen Autos in Deutschland bis zu 2 (Pott 2002)) und jeweils auf einen konkreten Motor ausgelegt werden (Gieshoff 2002), so dass ein geschätzter Wert aus den recherchierten Literatur-

²⁹ Eine Erläuterung der Verfahren der Edelmetallaufbringung erfolgt in Kap. 6.2.6.3.

³⁰ Für die Einhaltung von EU-Normen wurde sich entschieden, da nur schwer vergleichbare tatsächliche Automobilemissionsdaten insbesondere auch zu den Neuentwicklungen in den USA und Japan vorliegen. Der Bezug zu den Normen garantiert sozusagen Mindestwerte, die in der Realität aber noch übertroffen werden können. Die aktuellen Kraftstoffverbrauchs- und Emissions-Typprüferte des Kraftfahr-Bundesamtes (2002) führt bei vielen Motortypen teilweise weit unter den derzeitigen EURO III-Norm liegende Emissionswerte auf.

angaben genommen wurde (Hagelücken 2001, Weiken 1985, Hensel 2000, Melber 2002, Hochfeld 1997, Amatayakul 1999).³¹

Dieser Wert stellt außerdem den Ausgangswert für die begründeten Ableitungen der anderen PGM-Einsatzmengen dar.

Die Variante 2 stellt einen Drei-Wege-Katalysator dar, der die derzeitige EURO III-Norm erfüllt, auf dem „Edelmetall im Washcoat“-Verfahren basiert und ein PGM-Verhältnis Pt:Pd:Rh von 1:10:1 unterstellt.³² Die PGM-Einsatzmenge verringert sich gegenüber der Variante 1B um 25% aufgrund von angenommenen Effizienzsteigerungen durch die neue Beschichtungstechnologie. Derartige Steigerungsraten wurden von Gieshoff (2002) als realistisch eingeschätzt. Ein andere Quelle gibt bis zu 20% Einsparmenge bei PGM für die letzten zwanzig Jahre an (Tullo 2002)³³.

Aufbauend auf der Variante 2 werden die Varianten 3 und 4 abgeleitet. Für den CSI Perovskite-Drei-Wege-Katalysator (Variante 3) wird angenommen, dass er die gleichen Emissionswerte mit 50 % weniger PGM erreicht. Die Variante 4 unterstellt außerdem noch, dass die Emissionswerte der EURO IV-Norm eingehalten werden.

6.2.6 Beschreibung der Lebenswegstufen und der verwendeten Datengrundlagen

6.2.6.1 Rohstoffgewinnung

Auf der Ebene der Rohstoffgewinnung wird der Fokus ausschließlich auf die Gewinnung der Platingruppen-Metalle (Abbau der Erze, Aufbereitung und Verhüttung bis hin zur Raffinierung) gelegt.

Grundlage für die verwendeten Daten stellt eine Studie des Ökoinstitutes (Hochfeld 1997) dar, in der detailliert die Umweltauswirkungen bei der Gewinnung von Platingruppen-Metalle mit den damit verbundenen Stoff- und Energieströmen bilanziert werden. Die dort aufgeführten grundlegenden Stoff- und Energiedaten wurden übernommen. Es erfolgte aber eine Aktualisierung der Allokation der Umweltwirkungen auf die heutigen Marktgegebenheiten³⁴.

Hierzu wurden einerseits durchschnittliche Marktpreise für den Zeitraum 11/2001 – 10/2002 für die Metalle Platin, Palladium, Rhodium, Nickel und Kupfer zu Grunde gelegt.

³¹ Die Literaturangaben umfassten eine Bandbreite von 1,8 g – 4,3 g PGM, wobei oft nicht der Bezug zu Platin bzw. Palladium geklärt werden kann.

³² In der Literatur wird auch ein Verhältnis Pt:Pd:Rh von 1:14:1 bzw. nur Pd:Rh von 10:1 genannt.

³³ Eine derartige Annahme erscheint sinnvoll, wenn man bedenkt, dass sich durch die Verkleinerung der durchschnittlichen Partikelgröße der PGM-Partikel die spezifische Oberfläche fast um den Faktor 3 erhöht hat.

³⁴ Definition: Allokation: Zuordnung von Flüssen und Freisetzungen im Falle von Multi-Input-Prozessen oder Multi-Output-Prozessen, z.B. bei Koppelprozessen, wenn die Aufwendungen oder Emissionen den einzelnen Produkten zugewiesen werden sollen. Die DIN ISO 14041 sieht entsprechende Allokationsregeln vor.

In dieser Studie werden die von Hochfeld (1997) festgelegten Allokationsregeln übernommen. PGM werden zusammen mit Nickel und Kupfer gefördert. Da eine Allokation nach physikalischen Relationen in diesem Fall wegen der großen Ungleichgewichtigkeit der hergestellten Produktmassen nicht sinnvoll erscheint, erfolgt die Allokation über die durchschnittlichen Marktpreise für die letzten 12 Monate.

Tabelle 4: Durchschnittliche Metallpreise für den Zeitraum 11/2001 – 10/2002

Metall	Preis
Pt	550 €/troc
Pd	375 €/troc
Rh	925 €/troc
Ni	6943 €/t
Cu	1660 €/t

Quelle: Johnson Matthey 2002b; LME 2002

Andererseits wurden bei der Zuordnung der Stoff- und Energiedaten die aktuelle Weltmarktproduktion und deren regionale Aufteilung berücksichtigt.

Tabelle 5: Weltproduktion von PGM für das Jahr 2001

Weltproduktion [1000 once]	Gesamt	RSA	Russland	Nordamerika	andere
Pt	5.860	4.100	1.300	350	110
Pd	7.320	2.010	4.340	850	120
Rh	604	452	125	23	4

Quelle: Johnson Matthey 2002a

Die in den Varianten verwendeten Daten für die Rohstoffherstellung sind im Anhang aufgeführt.

6.2.6.2 Vorproduktion

Herstellung der PGM-Partikel

Für die Herstellung der unterschiedlich großen PGM-Partikel stehen keine geeigneten quantifizierten Informationen zur Verfügung, so dass mögliche Änderungen von Stoff- und Energieströmen durch unterschiedliche Verfahren zur Herstellung der Partikel keine Berücksichtigung finden konnten.

Die Herstellung von maßgeschneiderten metallischen Nanopartikeln erfolgt durch chemische Fällung, wie sie auch durch den deutschen Hersteller dmc², einem Unternehmen der OMG Group, angewendet wird (dmc² 2001).

Mit Hilfe der chemischen Fällung aus homogener Lösung lassen sich die vielseitigsten Ergebnisse erzielen. Zuerst erfolgt aus einem geeigneten Salz die Reduktion der Metall-Ionen zu -atomen, deren Zusammenlagerung zu größeren Einheiten („Clustern“) anschließend in einem sorgfältig gesteuerten Prozess erfolgt. Die Cluster bilden dann Kristallkeime, die schließlich bis zur Größe von Nanopartikeln anwachsen. Die Nanopartikel liegen dispergiert im Lösungsmittel – meist Wasser – vor, d.h. ein Kolloid ist entstanden.

Um die Partikeleigenschaften gezielt einzustellen, müssen die Fällungsreaktionen bzw. deren Parameter durch die Wahl der Komplexbildner, Reduktionsmittel, Lösungsmittel und Dispergiermittel kontrolliert werden. Die Partikel können je nachdem, wann ihr Wachstum

durch die Zugabe von stabilisierendem Dispergiermittel gestoppt wird, zwischen ungefähr 1 nm und mehreren Mikrometern groß werden. Der Technologiekonzern dmc² beispielsweise erzeugt für katalytische Anwendungen Platinpartikel mit Durchmessern von 2 bis 3 nm (dmc² 2001).

6.2.6.3 Herstellung

Für die vergleichende Betrachtung sind bei der Herstellung des Washcoat und des Katalysators einerseits die sich unterscheidenden Beschichtungsverfahren sowie andererseits die unterschiedlichen verwendeten Trägeroxide im Washcoat von Relevanz. Im folgenden werden die Beschichtungsverfahren qualitativ beschrieben. Quantitative Aussagen zu Stoff- und Energieströmen der dazu gehörigen Produktionsprozesse können nicht gemacht werden, da derartige Informationen weder durch Recherchen noch durch Unternehmensbefragungen (Firmengeheimnis) ermittelt werden konnten.

Die von Amatayakul (1999) in dessen LCA eines Autokatalysators genutzten Daten sind nur Schätzwerte, die zur Übernahme ungeeignet erscheinen.

Nach Gieshoff (2001b) können zwei Beschichtungsverfahren unterschieden werden:

Variante 1 A+B: Älteres Imprägnierungsverfahren in zwei Schritten

1. Zuerst wird ein edelmetallfreier Washcoat auf das Substrat gebracht.
2. Im zweiten Schritt erfolgt die Aufbringung der Edelmetalle durch einen Tauchprozess mit den entsprechenden Edelmetallsalzlösungen, so dass das Edelmetall relativ gleichmäßig an alle Washcoatbestandteile sorbiert (Imprägnierung).

Variante 2: Neuere Mehrschichtverfahren („Edelmetall im Washcoat“-Verfahren)

1. Die Edelmetallkomponenten werden auf definierte Trägeroxide in einem separaten Verfahrensschritt chemisch fixiert.
2. Dann werden die edelmetallhaltigen Komponenten des Washcoat zusammengeführt.
3. Durch einen Tränkprozess wird der Washcoat auf das Substrat aufgebracht.

Durch diese Technologie erreicht man, dass die Edelmetallkomponente auf einem definierten Washcoatbestandteil fixiert ist, so dass Synergien zwischen beiden Komponenten genutzt werden, z.B. die Bindung von Platin an einer Cer-Komponente und die nachfolgende Beimischung von Aluminiumoxid als weiteres Trägeroxid.

Außerdem wird der Aufbau von Mehrschicht-Katalysatoren ermöglicht, die die unterschiedlichen Aktivitäten der einzelnen Edelmetalle für die Reduktion der Schadgase nutzen.

Die Beschichtungsverfahren haben auch Auswirkungen auf die Partikelgröße der katalytisch aktiven Spezies. Im „Edelmetall im Washcoat“-Verfahren verteilt sich die Partikelgröße z.B. von Pd zwischen 4,1-5,9 nm, wohingegen das alte Verfahren eine Partikelverteilung bei Pd von 6-20 nm erzeugte (Gieshoff 2001b S. 47).

Heck (2002 S. 16-18) beschreibt ebenfalls mit dem Hinweis auf Firmengeheimnisse nur qualitativ die gängigsten, allgemein angewandten Prozeduren.

Imprägnierung

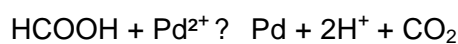
Die gebräuchlichste kommerzielle Prozedur, um die katalytischen Spezies innerhalb des Trägers zu dispergieren, ist das Imprägnieren mit einer wässrigen Lösung, die ein Salz (Vorläufer) des katalytischen Elements oder der Elemente enthält. Die meisten Präparationen enthalten einfach das Eintauchen des Trägers in die Lösung, um den kapillaren und elektrostatischen Kräften die Verteilung des Salzes über die innere Oberfläche des porösen Netzwerkes zu überlassen. Das Salz, welches die Kationen oder Anionen generiert und die katalytischen Elemente enthält, wird kompatibel zur Oberflächenladung des Trägers gewählt, um eine effiziente Adsorption – oder in einigen Fällen einen Ionenaustausch – zu erreichen.

Fixierung der katalytischen Spezies

Im Anschluss an die Imprägnierung ist es meistens wünschenswert, die katalytischen Spezies zu fixieren, damit nachfolgende Prozessschritte wie Waschen, Trocknen und Hochtemperatur-Calcination keine nennenswerte Verschiebung oder Agglomeration der gut dispergierten katalytischen Spezies bewirken.

Der pH-Wert der Lösung ist so angepasst, dass die katalytischen Spezies in den Poren des Trägers abgelagert werden. Zum Beispiel führt das vorherige Eintauchen des Al_2O_3 in eine NH_4OH -Lösung und die Zugabe eines sauren Pd-Salzes wie $\text{Pd}(\text{NO}_3)_2$ dazu, dass sich hydriertes PdO auf der Oberfläche der Poren innerhalb des Trägers ablagert. [...]

Ein alternativer Ansatz ist die Zugabe von reduzierenden Reinigungsmitteln, um die katalytischen Spezies als Metalle innerhalb den Porenstruktur des Trägers abzulagern:



Diese Methode ist besonders effektiv für die Edelmetalle, da diese einfach auf ihren Metallstatus reduziert werden. Der Vorteil der oben erwähnten reduzierenden Reinigungsmittel ist, dass sie in der anschließenden Hitzebehandlung keinen Reststoff zurücklassen.

Variante 3 und 4: Perovskite-Katalysatoren

Exkurs: Perovskitische Oxide (Zühlke 1999)

Perovskitische Oxide mit der allgemeinen Summenformel ABO_3 weisen eine große Bandbreite an Charakteristika auf. Dies kann auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass über 90% der metallischen Elemente des Periodensystems eine stabile, perovskitische Oxidstruktur bilden können.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, durch partielle Substitution der Kationen auf den Positionen A und B des perovskitischen Kristallgitters Multikomponenten-Oxide mit unterschiedlichen und ansonsten unüblichen Oxidationszuständen herzustellen. Dadurch lassen sich die Ionen- und Elektronenleitfähigkeit, das Ab- und Desorptionsvermögen sowie das Redox-Potenzial dieser Materialien gezielt verändern.

Perovskite mit Lanthan auf der A-Position (Summenformel LaBO_3 mit $\text{B} = \text{Mn}, \text{Co}, \text{Fe}, \text{Ni}, \text{Cr}$) nehmen aufgrund interessanter und nützlicher Eigenschaften einen prominenten Platz unter den ternären Mischoxiden ein. So wird LaMnO_3 erfolgreich als Katalysator für die Oxidation halogenierter und nichthalogener, flüchtiger, organischer Substanzen (Volatile Organic Compounds, VOC) in industriellen Abgasen verwendet.

Perovskitische Oxide weisen gegenüber den alternativ bei der katalytischen Oxidation eingesetzten Edelmetallen eine höhere thermische als auch chemische Stabilität auf und sind zudem kostengünstiger.

Die katalytische Oxidation von organischen Substanzen an perovskitischen Oxiden wurde in grundlegender Weise zuerst von R.J.H. VOORHOEVE im Jahre 1977 untersucht. Er stellte während der Totaloxidation kohlenstoffhaltiger Spezies ein Zusammenwirken von im perovskitischen Kristallgitter eingebundenem und an der Katalysatoroberfläche adsorbiertem Sauerstoff fest. Für einen praktischen Einsatz dieser Katalysatormaterialien ist somit sowohl die typische Kristallstruktur als auch eine große katalytisch aktive Oberfläche von Bedeutung.

Die Herstellung von Perovskiten mit großen spezifischen Oberflächen stellt jedoch ein generelles Problem dar. Auf der einen Seite ist genügend thermische Energie nötig, um die Vorläufersubstanzen (Oxide, Nitrate, etc.) in vertretbarer Zeit in die gewünschte Kristallstruktur zu überführen. Andererseits führen hohe Temperaturen zu einer Sinterung der Primärpartikeln und damit zu einem Verlust an spezifischer Oberfläche.

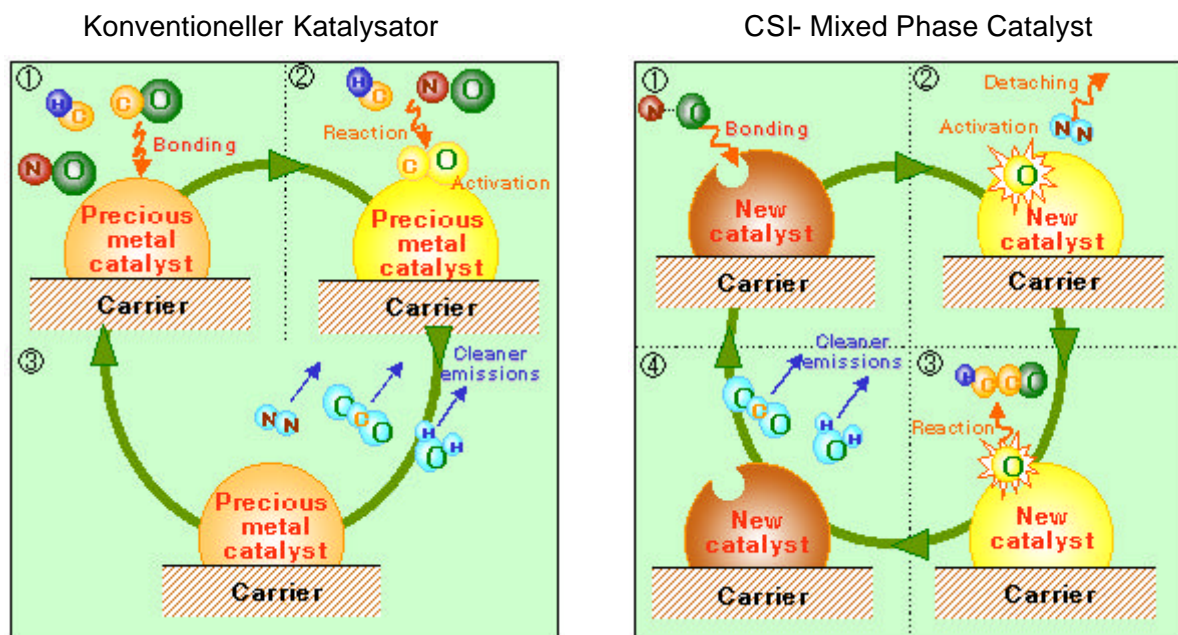
Relativ große Werte für das Verhältnis von Oberfläche zu Feststoffmasse von etwa 20 - 40 m²/g können durch naßchemische Verfahren, z.B. Sprüh-, Gefriertrocknung oder Fällung, erreicht werden. Ein entscheidender Nachteil dieser Herstellungsmethoden ist jedoch, dass ein großer Aufwand bereits für die Generierung relativ kleiner Mengen katalytisch aktiven Materials benötigt wird.

Variante 3: CSI- Mixed Phase Catalyst („MPC®“)

Die Herstellung des CSI-Katalysators erfolgt dadurch, dass der Washcoat spezifisch zusammen gemischt, auf den Keramikträger aufgebracht und dann in einem Transportbandofen fertig gebrannt wird. Als Bestandteile des Washcoat werden Seltene Erden eingesetzt, z.B. Lanthan. Entsprechend einer Veröffentlichung wurden von CSI Perovskite-basierte Katalysatoren auf Basis $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ untersucht. (Mitani 2001)

Die folgende Abbildung verdeutlicht die unterschiedliche Funktionsweise des MPC®-Katalysators im Vergleich zu herkömmlichen Katalysatoren.

Abbildung 5: Vergleich der Funktionsweisen von Katalysatoren



Konventionelle Edelmetall-Katalysatorreaktion:	Perovskite- Katalysatorreaktion:
<ol style="list-style-type: none"> 1. Die einzelnen Elemente des Abgases reagieren mit den Edelmetallen. 2. Die aktivierten Bestandteile des Abgases auf den Edelmetallen treffen auf andere Elemente und reagieren mit diesen. 3. Es entsteht CO₂, H₂O und N₂. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. NO verbindet sich mit den Löchern im Gitter. 2. Während das O von NO sich an den Katalysator bindet, wird die Bindung zum N schwächer und das N löst sich. 3. CO und HC reagieren mit dem instabilen O-Molekül und werden oxidiert. 4. Das O-Molekül löst sich und bildet somit CO₂ und H₂O.

Quelle: Juran 2001

Variante 4: Daihatsu „Intelligent Catalyst“

Daihatsu forschte seit längerem an Katalysatoren mit einer ähnlichen Perovskite-Struktur auf Basis $\text{LaFe}_{0,57}\text{Co}_{0,38}\text{Pd}_{0,05}\text{O}_3$ (Nishihata 2002, Tanaka 2001a,b,c). Inzwischen wurden von Daihatsu bereits Co-freie Materialien entwickelt. (Daihatsu 2002a). Der Vorteil der Perovskite-Struktur ist zum einen die in ersten Tests nahezu kaum wahrnehmbare Alterung des Katalysators, zum anderen eine noch kleinere eingesetzte Partikelgröße von 1-3 nm (Nishihata 2002).

Ein „intelligentes Material“ kann Änderungen in der Umwelt, in der es benutzt wird, wahrnehmen und seine Struktur und Funktion entsprechend anpassen, um seine Wirkungsweise zu optimieren. Daihatsu nennt seinen neu entwickelten Katalysator einen „intelligent catalyst“ aufgrund seiner Fähigkeit, sich selbst auf Nanometer-Ebene zu regenerieren (Daihatsu 2002b).

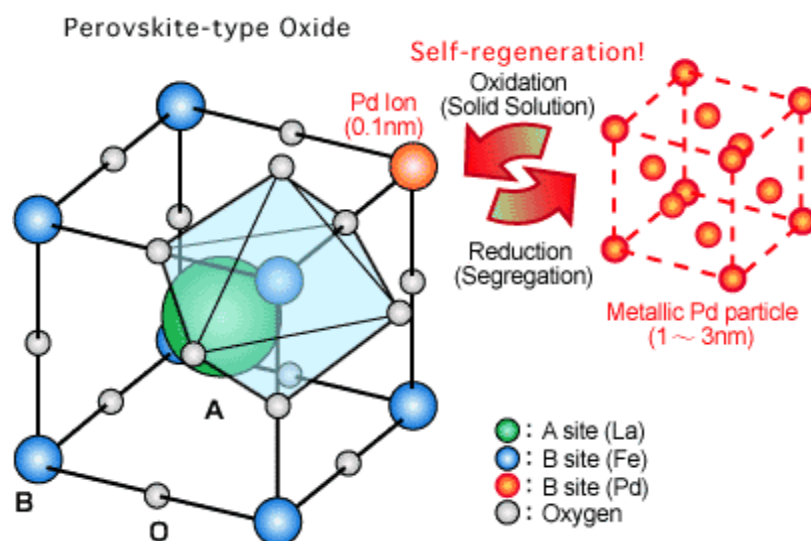
Durch eine zeitliche Verzögerung, die durch das Einstellen des Luft-/Kraftstoff-Verhältnisses hervorgerufen wird, kommt es zu einer Redox-Fluktuation im Abgas. Die Daihatsu-Forscher

haben ihr Katalysator-System so entworfen, dass es auf diese Fluktuation reagiert, eine größere Effizienz erreicht und die wertvollen Metalle erhält.

Daihatsu hat eine Nanotechnologie entwickelt, welche Palladium-Ionen im atomaren Bereich gleichmäßig in einem Perovskite-typischen Kristallgitter verteilt. Die keramische Kristallstruktur ist bekannt für ihre Hochtemperatur-superleitende Eigenschaft. Dies erlaubt dem Palladium, sich als Metall-Ionen während der heißen, oxidativen Atmosphäre in die Perovskite-Kristallstruktur zurückzubewegen, um sich danach in der reduktiven Atmosphäre wieder aus dem Kristall abzutrennen und feine, metallische Partikel zu bilden. Durch die Wiederholung dieses Vorgangs regeneriert sich das Palladium, so dass keine zusätzliche Behandlung zur Unterdrückung des Partikelwachstums benötigt wird (Daihatsu 2002a).

Die folgenden Abbildungen stellen die Funktionsweise sowie das Alterungsverhalten dar.

Abbildung 6: Darstellung der selbstregenerierenden Funktion



Quelle: Daihatsu 2002a

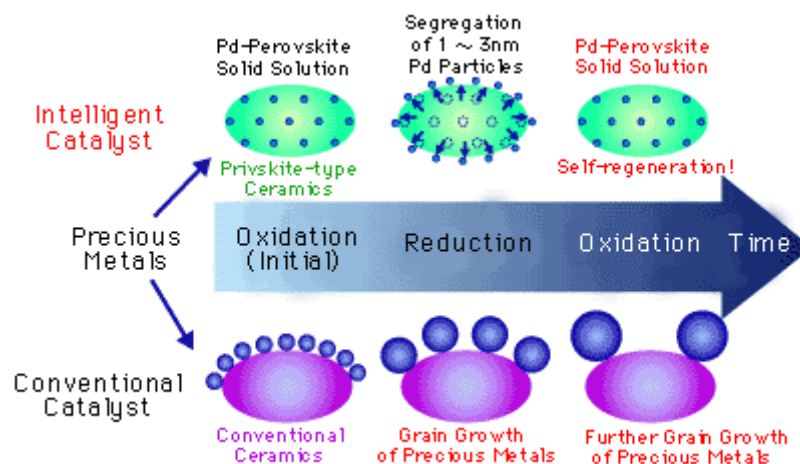


Abbildung 7: Vergleich der Alterung des Edelmetalls

Quelle: Daihatsu 2002a

Für die Synthese von Perovskite-Oxide hat Hooke Chemical Industry Co., Ltd. ein neues Herstellungsverfahren, die „new alkoxide method“ entwickelt (Daihatsu 2002a).

Exkurs: Lanthan und Lanthanoide (Seilnacht 2002)

Lanthan steht mit einem Anteil von 0,0017 % an 36. Stelle der Elementhäufigkeit zwischen Blei und Bor. Alle auf Lanthan folgenden Elemente, von Cer bis Ytterbium (Lanthanoide), ähneln sich sehr in ihren Eigenschaften. Mit Zunahme der Ordnungszahl steigt jedoch ihre Dichte und ihre Tendenz zur Komplexbildung.

Der wichtigste Rohstoff zur Lanthanherstellung ist der Monazitsand. Aus einem Kilogramm können ca. 220g Cer, 120g Lanthan, 100g Neodym, 30g Praseodym und eine ganze Reihe weiterer Lanthanoide gewonnen werden. Das Erz wird zunächst angereichert und mit konzentrierter Schwefelsäure aufgeschlossen. Die erhaltenen Sulfate werden in Eiswasser mit Oxalsäure als Oxalate ausgefällt und durch Glühen in die Oxide umgewandelt. Die Abtrennung des Lanthan(III)-oxids erfolgt durch Ionenaustausch und Komplexbildung. Mit steigender Ordnungszahl, vom Lanthan bis zum Ytterbium, nimmt die Tendenz zur Komplexbildung ständig zu. Diese Eigenschaft kann bei der Abtrennung ausgenutzt werden.

Durch eine Reaktion mit Hydrogenfluorid erhält man Lanthan(III)-fluorid, das durch eine Schmelzflusselektrolyse oder durch eine Reduktion mit Calcium oder Magnesium zu Lanthan umgewandelt wird. Dieses Verfahrensprinzip wird bei allen Seltene Erdenmetallen angewandt (siehe z.B. Yttrium).

Cer ist das häufigste Metall in der Reihe der Lanthanoide und steht mit einem Anteil von 0,0043% an 28. Stelle der Elementhäufigkeit. Cer kommt stets zusammen mit anderen Seltene Erden-Mineralien vor. Die Cererden enthalten vorwiegend Erze der leichteren Lanthanoide von Lanthan bis Gadolinium. Zu ihnen gehört der Monazit (Cerphosphat), aus dem die Elemente Cer und Lanthan gewonnen werden. Bedeutende Lagerstätten an Cer-Mineralien liegen in Skandinavien, in den GUS-Staaten, in Indien, in Südafrika, in Kongo und in den USA.

6.2.6.4 Gebrauch

Für die Gebrauchsphase wird eine Lebensdauer des Katalysators von 120.000 km angenommen. Für diese Katalysatorenleistung werden unter Berücksichtigung der Emissionsgrenzwerte der jeweiligen EURO-Norm die Emissionsminderungen ermittelt.

Als Rohgasemissionen werden folgende Daten zu Grunde gelegt.

Tabelle 6: Rohgasemissionen eines Ottomotors

Emissionen	Ottomotor, ohne Katalysator (g/km)
CO ₂	200
SO ₂	0,01
NO _x	2
CO	10
HC	0,9

Quelle: Amatayakul 1999

Entsprechend den Annahmen von Amatayakul (1999) wird durch den Katalysatoreinsatz eine Erhöhung der CO₂- und der SO₂-Emissionen von 0,5% sowie ein Energiemehrverbrauch von 0,5% angenommen.

Die Annahme für PGM-Emissionen basiert auf Messungen zu Platinemissionen, die im Rahmen des BMBF-Forschungsverbundes „Edelmetallemissionen“ bei Motorstandversuchen mit Drei-Wege-Katalysatoren ermittelt wurden. Je nach Testbedingungen wurden mittlere Emissionsfaktoren zwischen 2 und ca. 120 ng/km gemessen (Rosner 2001).

Unter Berücksichtigung der oberen Quartile (20 – 140 ng/km) wird einen Katalysator der Variante 2 verallgemeinert für PGM-Emissionen ein Wert von 140 ng/km angenommen.

Durch mengenmäßige Umrechnung ergeben sich für die anderen Varianten folgende PGM-Emissionsfaktoren:

Variante 1a: 103 ng/km,

Variante 1b: 187 ng/km,

Variante 3: 70 ng/km,

Variante 4: 70 ng/km.

In der aktuellen WHO-Studie (Melber 2002) werden Palladiumpartikelemissionen eines neuen palladiumhaltigen Katalysators mit 4 bis 108 ng/km angeben und liegen somit im Bereich der getroffenen Annahmen und entsprechen in etwa dem gleichen Ausmaß an Emissionen, wie sie von Platin bekannt sind.

6.2.6.5 Recycling

Das Recycling von PGM hat eine sehr hohe Bedeutung für die Umweltauswirkungen der einzelnen Varianten, da das Recycling wesentlich geringere Aufwendungen benötigt als die Rohstoffgewinnung und Förderung der Edelmetalle. In Deutschland existiert ein leistungsfähiges System zum Recycling. Die Umweltauswirkungen der betrachteten Varianten wurden einerseits bei den gegenwärtigen Recyclingquoten und andererseits bei für einen in der Zukunft erwünschten Recyclinggrad von 80% berechnet.

Tabelle 7: Recyclinggrade für die Variantenbetrachtungen

Einsatzmenge in Autokatalysatoren	Platin Pt in 1000 once	Palladium Pd in 1000 once	Rhodium Rh in 1000 once
Gesamt, 2001	2520	5110	566
Recycling, 2001	520	290	92
Recycling-Quote 2001	20,6%	5,7%	16,3%
Recycling-Quote 2010	80%	80%	80%

Quelle: Johnson Matthey 2002

6.2.6.6 Transportprozesse

Transportprozesse werden nicht bilanziert, da die Varianten sich nur marginal im Grammbereich unterscheiden. Aus diesem Grund sind keine sinnvollen Annahmen möglich.

6.3 Sachbilanz

In der Sachbilanz erfolgt eine Aufzeichnung der stofflichen und energetischen Beziehungen zwischen dem betrachteten Katalysator und der Umwelt, d.h. dass die Inputflüsse, die der Umwelt entnommen werden, und die Outputflüsse, die an die Umwelt abgegeben werden, erfasst werden. Ziel der Sachbilanz ist es, für die ausgewählten Varianten unter Beachtung der funktionellen Äquivalenz ein Dateninventar zu erstellen.

Da quantitative Daten nicht für die Zwischenstufen der Vorproduktion und der Herstellung des Washcoats und der Katalysatorbeschichtung vorliegen, ergeben sich für die jeweiligen Recyclingannahmen nur Berechnungen für die Rohstoffgewinnung sowie für die Gebrauchsphase.

6.3.1 Ergebnisse der Sachbilanz

Die folgenden Tabellen stellen die berechneten Input- und Outputströme für die betrachteten Varianten unter Berücksichtigung der jeweiligen Recyclinggrade dar.

Tab. 8: Input- und Outputströme bei aktuellen Recyclingquoten

Parameter	Einheit	Variante 1A			Variante 1B			Variante 2			Variante 3		
		Imprägnierungskat						Edelmetall in Washcoat			CSI		
		Rohstoff-gewinnung	Nutzungs-phase	Gesamt	Rohstoff-gewinnung	Nutzungs-phase	Gesamt	Rohstoff-gewinnung	Nutzungs-phase	Gesamt	Rohstoff-gewinnung	Nutzungs-phase	Gesamt
INPUT													
Erz	kg	450,73		450,73	420,11		420,11	327,05		327,05	163,52		163,52
Strom	kWh	43,32		43,32	52,11		52,11	39,61		39,61	19,81		19,81
Gas	MJ	33,70		33,70	102,25		102,25	73,80		73,80	36,90		36,90
Wasser	kg			k.A.	k.A.		k.A.	k.A.		k.A.	k.A.		k.A.
Energiemehrverbrauch	MJ		2.040,00	2.040,00		2.040,00	2.040,00		2.040,00	2.040,00		2.040,00	2.040,00
OUTPUT													
Luft													
CO2	kg	39,24	120,00	159,24	48,52	120,00	168,52	36,79	120,00	156,79	18,40	120,00	138,40
CH4	kg	0,12	0,00	0,12	0,13	0,00	0,13	0,10	0,00	0,10	0,05	0,00	0,05
N2O	kg	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00
SO2	kg	6,88	0,01	6,89	23,16	0,01	23,17	16,66	0,01	16,66	8,33	0,01	8,33
NOx	kg	0,23	-210,00	-209,77	0,20	-210,00	-209,80	0,16	-222,00	-221,84	0,08	-222,00	-221,92
HCl	kg	0,02		0,02	0,02		0,02	0,01		0,01	0,01		0,01
HF	kg	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00
NMVOG	kg	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00
Staub	kg	0,04		0,04	0,06		0,06	0,05		0,05	0,02		0,02
CO	kg	0,03	-876,00	-875,97	0,04	-876,00	-875,96	0,03	-924,00	-923,97	0,01	-924,00	-923,99
HC	kg		-70,80	-70,80		-70,80	-70,80		-86,40	-86,40		-86,40	-86,40
PGM	g		0,012	0,012		0,022	0,022		0,017	0,017		0,008	0,008
Feststoff													
Abraum	kg	27,60		27,60	27,90		27,90	21,57		21,57	10,78		10,78
Tailings	kg	355,21		355,21	304,37		304,37	239,13		239,13	119,56		119,56
Schlacke	kg	12,07		12,07	10,05		10,05	7,92		7,92	3,96		3,96
Sonderabfall	kg	0,05		0,05	0,11		0,11	0,08		0,08	0,04		0,04
Schlacke SA	kg	22,03		22,03	43,26		43,26	31,81		31,81	15,91		15,91
Asche	kg	24,37		24,37	18,53		18,53	14,76		14,76	7,38		7,38
REA-Rest	kg	6,02		6,02	4,50		4,50	3,59		3,59	1,79		1,79
Koppelprodukte													
Ni	g	867,78		867,78	2.216,10		2.216,10	1.609,94		1.609,94	804,97		804,97
Cu	g	967,90		967,90	2.779,09		2.779,09	2.009,65		2.009,65	1.004,82		1.004,82
SO2-Äqui.	kg	7,06	-146,99	-139,94	23,32	-146,99	-123,67	16,78	-155,39	-138,61	8,39	-155,39	-147,00

Tab. 9: Input- und Outputströme bei einer Recyclingquote von 80 %

Parameter	Einheit	Variante 1A			Variante 1B			Variante 2			Variante 3		
		Imprägnierungskat						Edelmetall in Washcoat			CSI		
		Rohstoff-gewinnung	Nutzungs-phase	Gesamt	Rohstoff-gewinnung	Nutzungs-phase	Gesamt	Rohstoff-gewinnung	Nutzungs-phase	Gesamt	Rohstoff-gewinnung	Nutzungs-phase	Gesamt
INPUT													
Erz	kg	112,52		112,52	93,84		93,84	74,25		74,25	37,13		37,13
Strom	kWh	11,79		11,79	13,36		13,36	10,26		10,26	5,13		5,13
Gas	MJ	8,37		8,37	21,92		21,92	15,94		15,94	7,97		7,97
Wasser	kg	k.A.		k.A.	k.A.		k.A.	k.A.		k.A.	k.A.		k.A.
Energiemehrverbrauch	MJ		2.040,00	2.040,00		2.040,00	2.040,00		2.040,00	2.040,00		2.040,00	2.040,00
OUTPUT													
Luft													
CO2	kg	10,52	120,00	130,52	12,07	120,00	132,07	9,25	120,00	129,25	4,62	120,00	124,62
CH4	kg	0,03	0,00	0,03	0,03	0,00	0,03	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01
N2O	kg	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00
SO2	kg	1,71	0,01	1,72	4,96	0,01	4,97	3,59	0,01	3,60	1,80	0,01	1,80
NOx	kg	0,06	-210,00	-209,94	0,05	-210,00	-209,95	0,04	-222,00	-221,96	0,02	-222,00	-221,98
HCl	kg	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00
HF	kg	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00
NMVOOC	kg	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00
Staub	kg	0,03		0,03	0,04		0,04	0,03		0,03	0,02		0,02
CO	kg	0,01	-876,00	-875,99	0,01	-876,00	-875,99	0,01	-924,00	-923,99	0,01	-924,00	-923,99
HC	kg		-70,80	-70,80		-70,80	-70,80		-86,40	-86,40		-86,40	-86,40
PGM	g		0,012	0,012		0,022	0,022		0,017	0,017		0,008	0,008
Feststoff													
Abraum	kg	10,02		10,02	12,16		12,16	9,32		9,32	4,66		4,66
Tailings	kg	88,15		88,15	67,31		67,31	53,83		53,83	26,92		26,92
Schlacke	kg	2,99		2,99	2,23		2,23	1,79		1,79	0,89		0,89
Sonderabfall	kg	0,01		0,01	0,02		0,02	0,02		0,02	0,01		0,01
Schlacke SA	kg	5,47		5,47	9,34		9,34	6,94		6,94	3,47		3,47
Asche	kg	6,09		6,09	4,20		4,20	3,40		3,40	1,70		1,70
REA-Rest	kg	1,51		1,51	1,03		1,03	0,84		0,84	0,42		0,42
Koppelprodukte													
Ni	g	215,54		215,54	476,26		476,26	348,84		348,84	174,42		174,42
Cu	g	240,45		240,45	596,29		596,29	434,42		434,42	217,21		217,21
SO2-Äqui.	kg	1,75	-146,99	-145,24	5,00	-146,99	-142,00	3,62	-155,39	-151,77	1,81	-155,39	-153,58

6.3.2 Auswertungen der Sachbilanz

6.3.2.1 Ressourceninanspruchnahme Erz

Die Übersicht der absoluten Erzverbräuche ist in den Tabellen 8 und 9 dargestellt.

In den Varianten 3 und 4 sinkt der Anteil am Erzverbrauch bedingt durch die geringere PGM-Einsatzmenge auf ein gutes Drittel gegenüber der Variante 1A. Die Erreichung der angenommenen Recyclingquote von 80 % würde den Erzverbrauch noch einmal jeweils auf ein Viertel verringern.

Abbildung 8: Ressourceninanspruchnahme, Erz für die aktuelle Recyclingquote (Variante 1A = 100%)

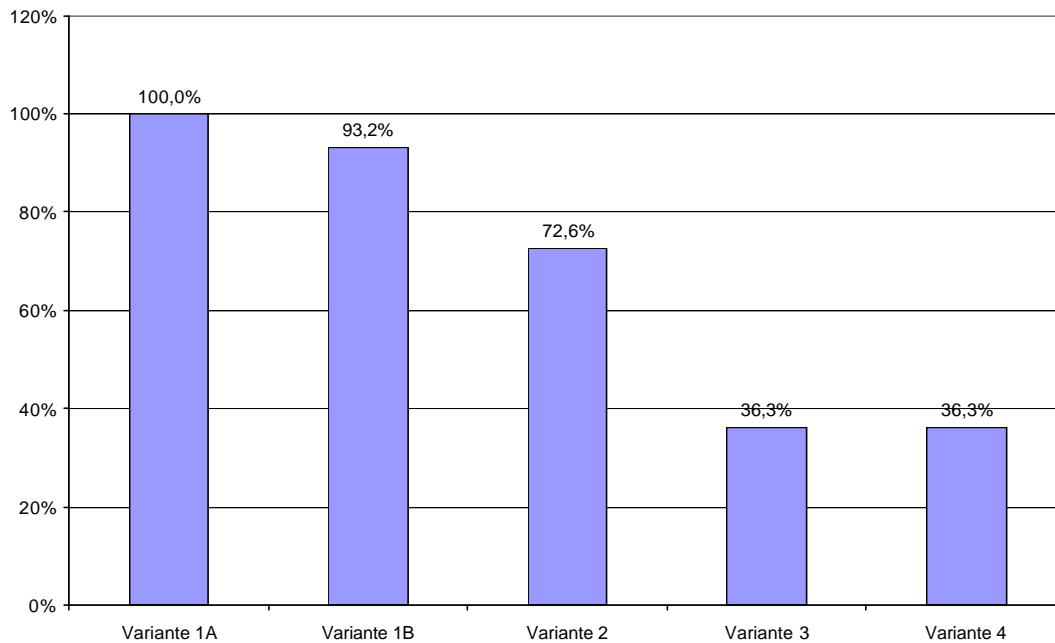
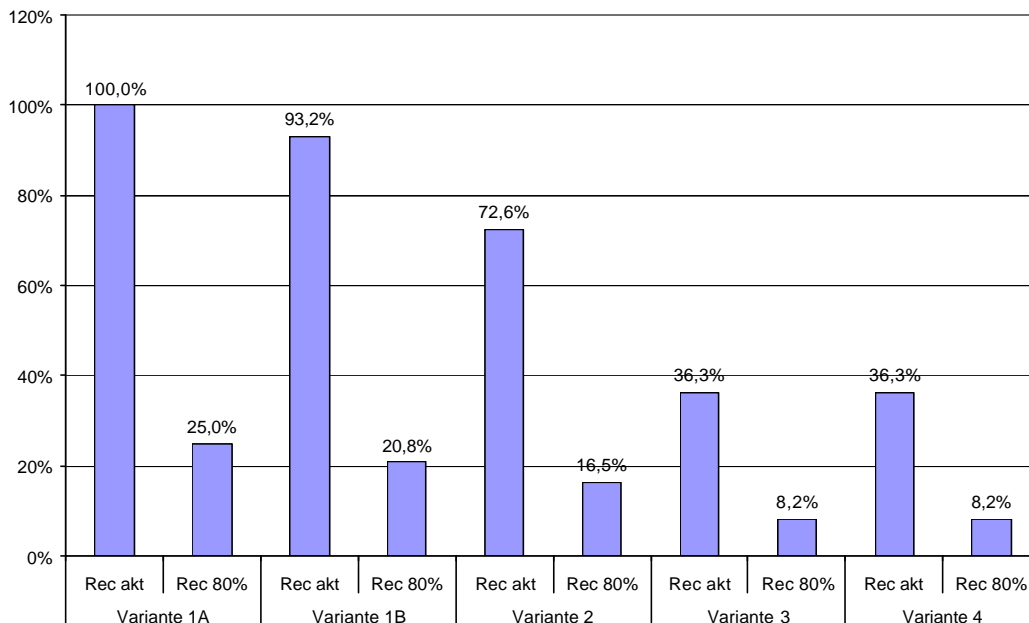


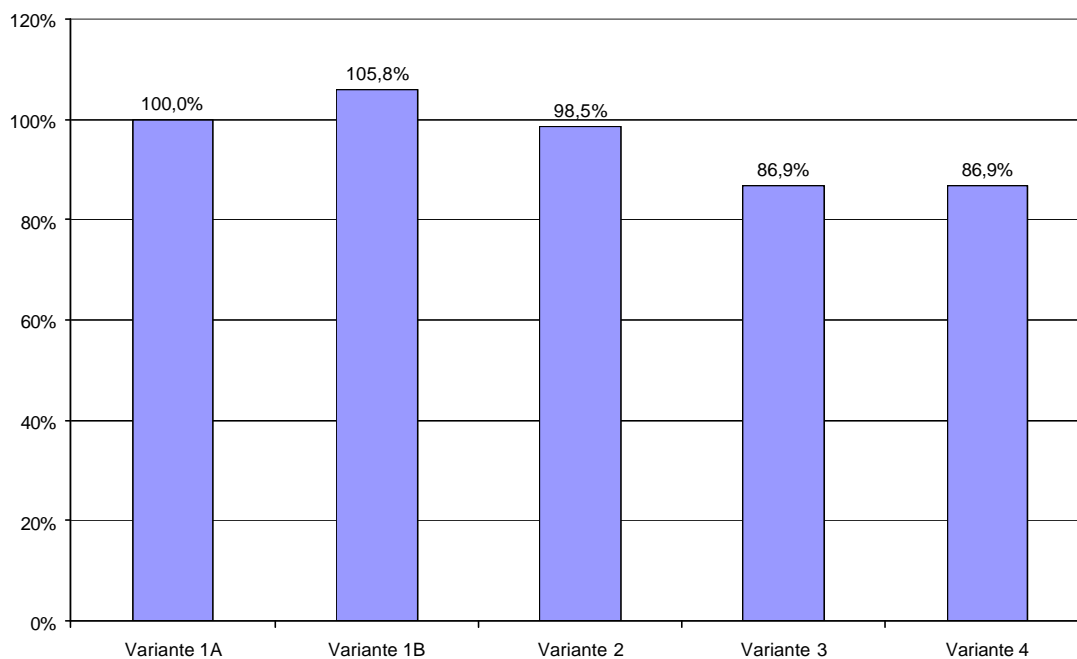
Abbildung 9: Ressourceninanspruchnahme, Erz für verschiedene Recyclingquoten (Variante 1A = 100 %)



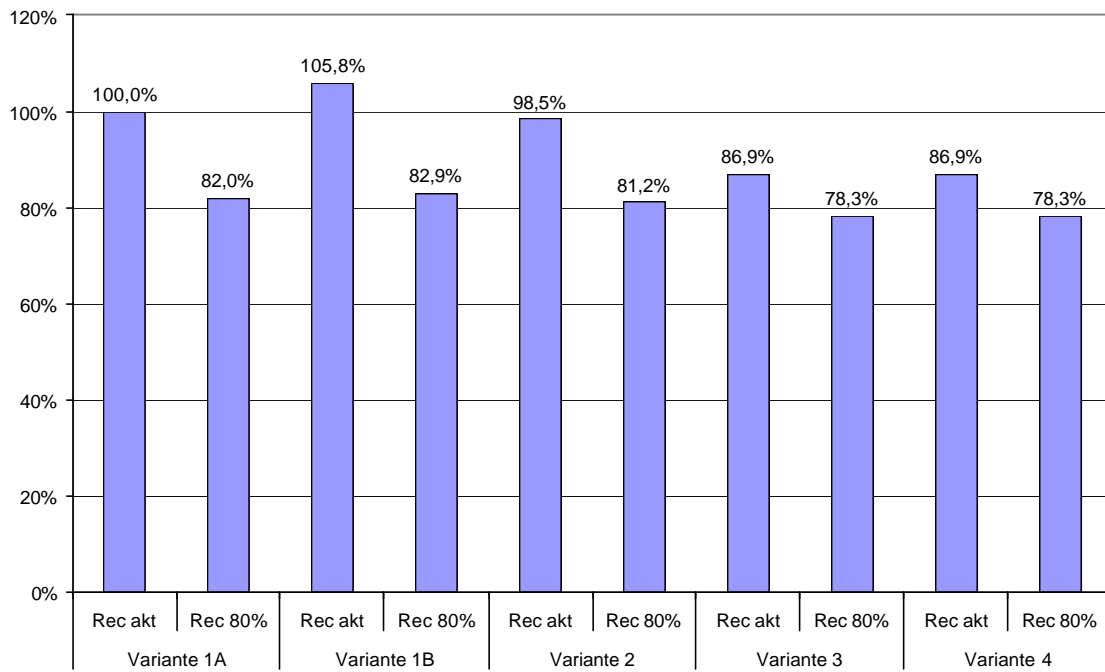
6.3.2.2 CO₂-Emissionen

Die CO₂-Emissionen verringern sich in den Varianten 3 und 4 gegenüber der Variante 1A um ca. 13 %. Dies resultiert durch die geringeren CO₂-Emissionen bei der Rohstoffgewinnung. Die 5 %ige Erhöhung bei Variante 1B resultiert durch die Umstellung von Platin auf Palladium und den damit verbundenen erhöhten CO₂-Emissionen bei der Rohstoffgewinnung.

Abbildung 10: CO₂-Emissionen für die aktuelle Recyclingquote (Variante 1A = 100%)



Eine hohe Recyclingquote bewirkt durchgehend eine Minderung der CO₂-Emissionen von etwa 20 %. Ursache dieser gegenüber dem Ressourcenverbrauch geringe Verbesserung liegt darin begründet, dass die durch den Katalysatorbetrieb zusätzlich verursachten CO₂-Emissionen absolut bedeutend größer sind als die Emissionen bei der Rohstoffgewinnung. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten werden dabei sehr klein und betragen wenige Prozent.

Abbildung 11: CO₂-Emissionen für verschiedene Recyclingquoten (Variante 1A = 100%)

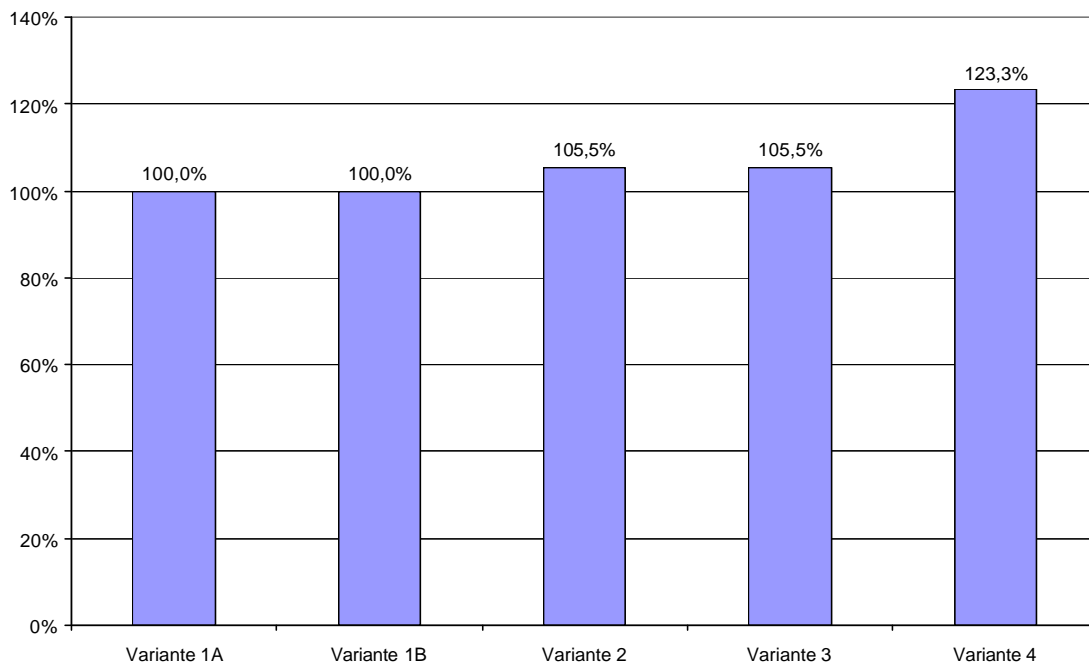
6.3.2.3 CO-Emissionen

Bei den CO-Emissionen fällt besonders die Minderungsleistung der Variante 4 auf, die knapp ein Viertel besser ist als die Varianten 1. Diese Erhöhung spiegelt den verschärften Grenzwert der EURO-Norm IV wieder, der durch die Variante 4 eingehalten wird.

In Absolutzahlen ausgedrückt bedeutet dies, dass die Katalysatoren der Varianten 1 über ihre Lebensdauer hinweg ca. 876 kg CO zurückhalten, die Varianten 2 und 3 ca. 924 kg CO, wohingegen die Variante 4 Emissionen von ca. 1080 kg CO verhindert.

Da die CO-Emissionen fast ausschließlich durch die Nutzungsphase gekennzeichnet sind, ändern sich diese Werte nicht bei einer höheren Recyclingquote.

Abbildung 12: CO-Emissionsminderungsleistung (Variante 1A = 100%)



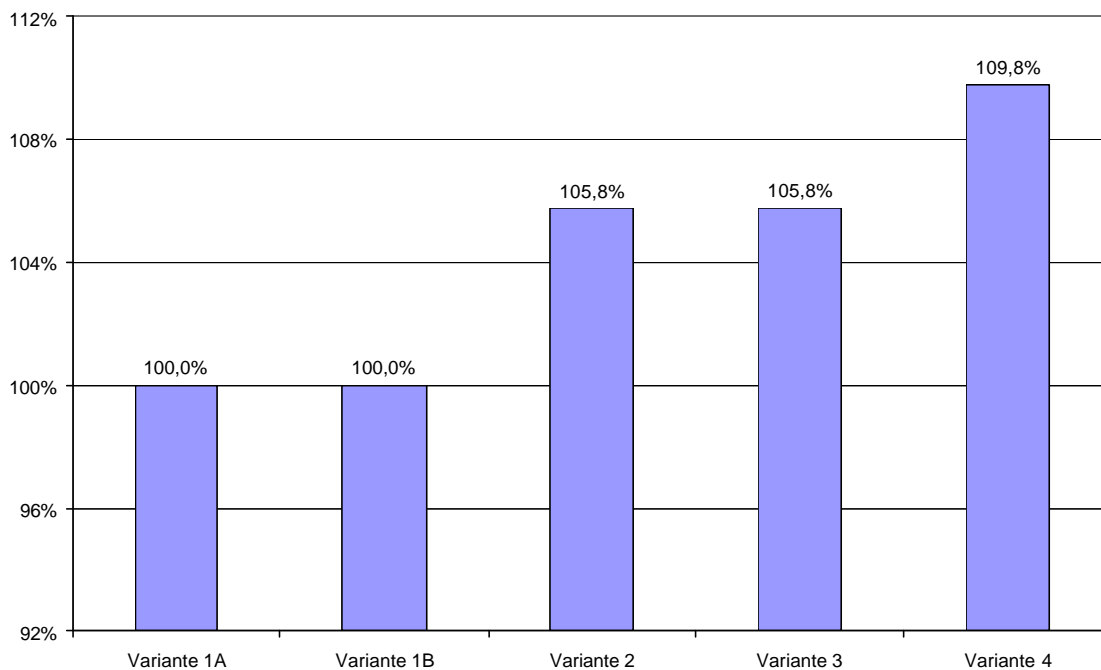
6.3.2.4 NO_x-Emissionen

Bei den NO_x-Emissionen ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den CO-Emissionen nur mit dem Unterschied, dass die Minderungsleistung der Variante 4 nur um ca. 10 % besser ist als Variante 1. Diese Erhöhung spiegelt den verschärften Grenzwert der EURO-Norm IV wieder, der durch die Variante 4 eingehalten wird.

In Absolutzahlen ausgedrückt bedeutet dies, dass die Katalysatoren der Variante 1 über ihre Lebensdauer hinweg ca. 210 kg NO_x zurückhalten, die Varianten 2 und 3 ca. 222 kg NO_x, wohingegen die Variante 4 Emissionen von ca. 230 kg NO_x verhindert.

Da die NO_x-Emissionen ebenfalls fast ausschließlich durch die Nutzungsphase gekennzeichnet sind, ändern sich diese Werte nicht bei einer höheren Recyclingquote.

Abbildung 13: NO_x-Emissionsminderungsleistung (Variante 1A = 100%)



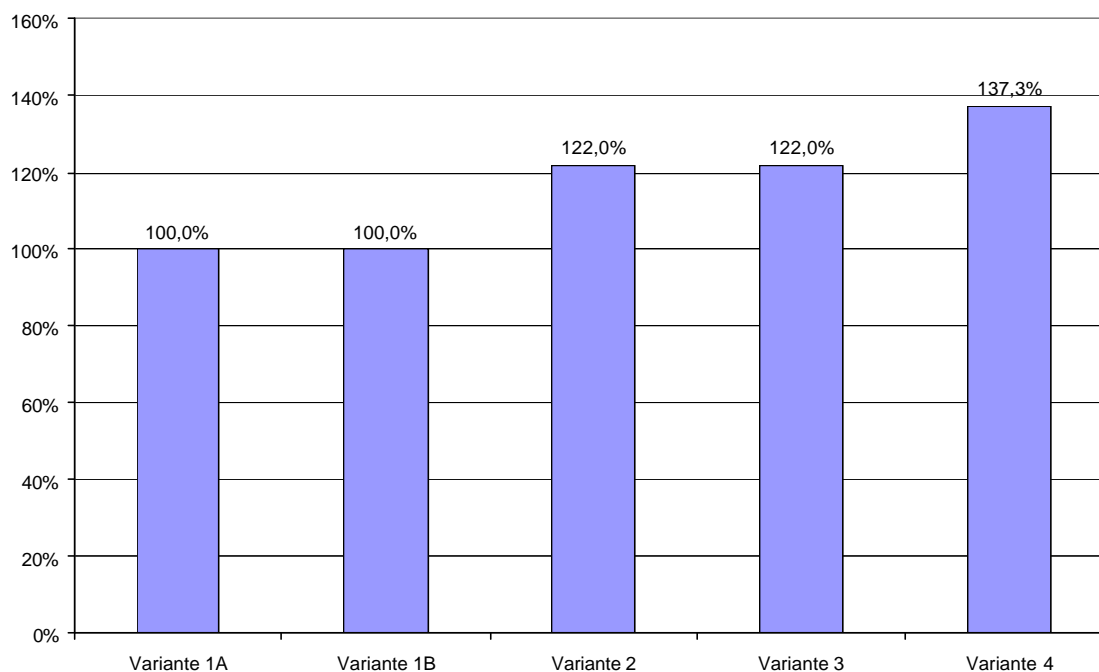
6.3.2.5 HC-Emissionen

Bei den HC-Emissionen als dritte relevante und gesetzlich geregelte Emissionsart bei Automobilemissionen ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den vorherigen Emissionsarten. Die Minderungsleistungen der Varianten 2 bis 4 sind bedeutend höher als die der Variante 1, wobei natürlich auch hier die Variante 4 mit einer um 37 % erhöhten Minderungsleistung am besten abschneidet. Diese Erhöhungen spiegeln die verschärften Grenzwerte der EURO-Normen III und IV wieder.

In Absolutzahlen ausgedrückt bedeutet dies, dass die Katalysatoren der Variante 1 über ihre Lebensdauer hinweg ca. 71 kg HC zurückhalten, die Varianten 2 und 3 ca. 86 kg HC, wohingegen die Variante 4 Emissionen von ca. 97 kg HC verhindert.

Da die HC-Emissionen in unserem Betrachtungsrahmen ausschließlich durch die Nutzungsphase gekennzeichnet sind, ändern sich diese Werte nicht bei einer höheren Recyclingquote.

Abbildung 14: HC-Emissionsminderungsleistung (Variante 1A = 100%)

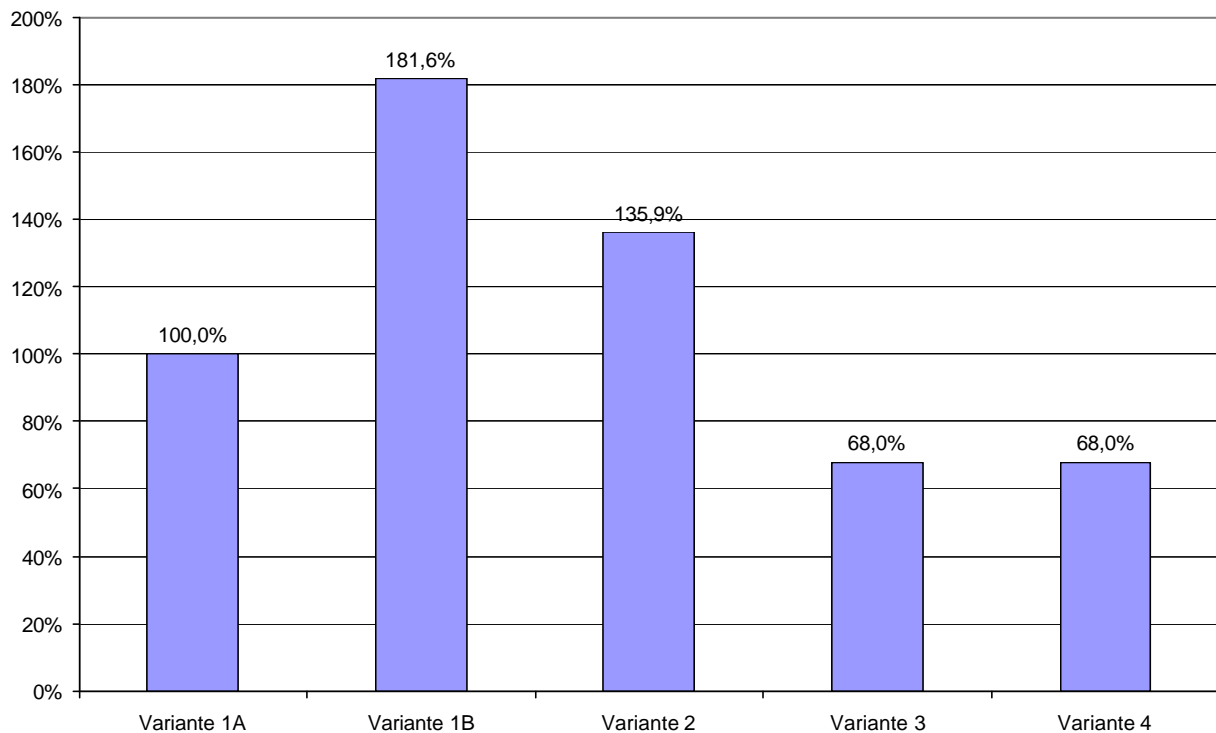


6.3.2.6 PGM-Emissionen

Bei den PGM-Emissionen zeigt sich für die einzelnen Varianten ein unterschiedliches Bild. Während die beiden Varianten 1B und 2 gegenüber der Variante 1A sich stark verschlechtern, sind die Emissionen bei den Varianten 3 und 4 auch bei dieser Emissionsart besser als die Ausgangsvariante. Ursache für die unterschiedlichen PGM-Emissionen ist in entsprechenden PGM-Einsatzmengen zu finden. Außerdem muss beachtet werden, dass es sich bei der Variante 1A um überwiegend Platinemissionen handelt, wohingegen die übrigen Varianten überwiegend Palladium emittieren.

In Absolutzahlen ausgedrückt bedeutet dies, dass der Katalysator der Variante 1A über ihre Lebensdauer hinweg ca. 0,12 g PGM emittiert, Variante 1B 0,022 g PGM, Variante 2 0,017 g PGM sowie die Varianten 3 und 4 jeweils 0,008 g PGM.

Abbildung 15: PGM-Emissionen (Variante 1A = 100%)



6.4 Wirkungsabschätzung

Für eine Wirkungsabschätzung ist es erforderlich, über Emissionsdaten zu verfügen, die sich bestimmten Umweltwirkungen zuordnen lassen. Bei den vorliegenden Daten ist es nur für die Wirkungskategorie Versauerung sinnvoll, eine Auswertung darzustellen.

6.4.1 Quantitative Auswertung der Wirkungsabschätzung, Versauerung

Die Versauerung stellt einen Sammelbegriff für mehrere unterschiedliche Wirkungen dar. Zurückzuführen ist das Phänomen auf Schwefeldioxid- und Stickoxidemissionen aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe in Kraftwerken und in zunehmendem Maße aus dem motorisierten Verkehr. Darüber hinaus tragen auch Emissionen von Ammoniak, Chlor- und Fluorwasserstoff zur Versauerung bei. Schwefeldioxid- und Stickoxidemissionen reagieren mit Luftsauerstoff und Wasser zu Schwefel- oder Salpetersäure.

Vom Säureeintrag betroffen sind Gewässer, Böden und Pflanzen sowie Gebäude, je nachdem, wohin die luftgetragenen Schadstoffemissionen durch Abregnen gelangen.

Als direkte Wirkung auf Pflanzen wird die Wachsschicht auf den Blättern, die als Verdunstungs- und Schädlingsschutz dient, angegriffen. Darüber hinaus sind Verätzungen der Baumrinde zu beobachten. Der Säureeintrag in Böden und Gewässer beeinträchtigt deren Neutralisationsfähigkeit und damit das ökologische Gleichgewicht. Erkennbare Folge ist das Aussterben von Tier- und Pflanzenarten in Gewässern. Die Bodenversauerung zieht eine ganze Reihe von Wirkungen nach sich. Zum einen wird die Anfälligkeit der Pflanzen für Krankheiten erhöht. Daneben werden lebensnotwendige Nährstoffe ausgewaschen und damit den Pflanzen entzogen. Schwermetalle und Aluminiumionen, die reichlich im Boden vorhanden (und toxisch) sind, werden ausgelöst, können dann von Pflanzen aufgenommen werden und so in die Nahrungskette oder ins Grundwasser gelangen. Schließlich schädigt das Aluminium bei gleichzeitigem Vorhandensein von Calcium- und Magnesium-Ionen die Feinwurzeln der Pflanzen.

Eine weitere, bereits seit den späten 70er Jahren bekannt gewordene Wirkung der Stick- und Schwefeloxide ist das Waldsterben, zu dem auch die Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft und die durch den Verkehr bedingte Photooxidantienbildung (Ozon) beitragen.

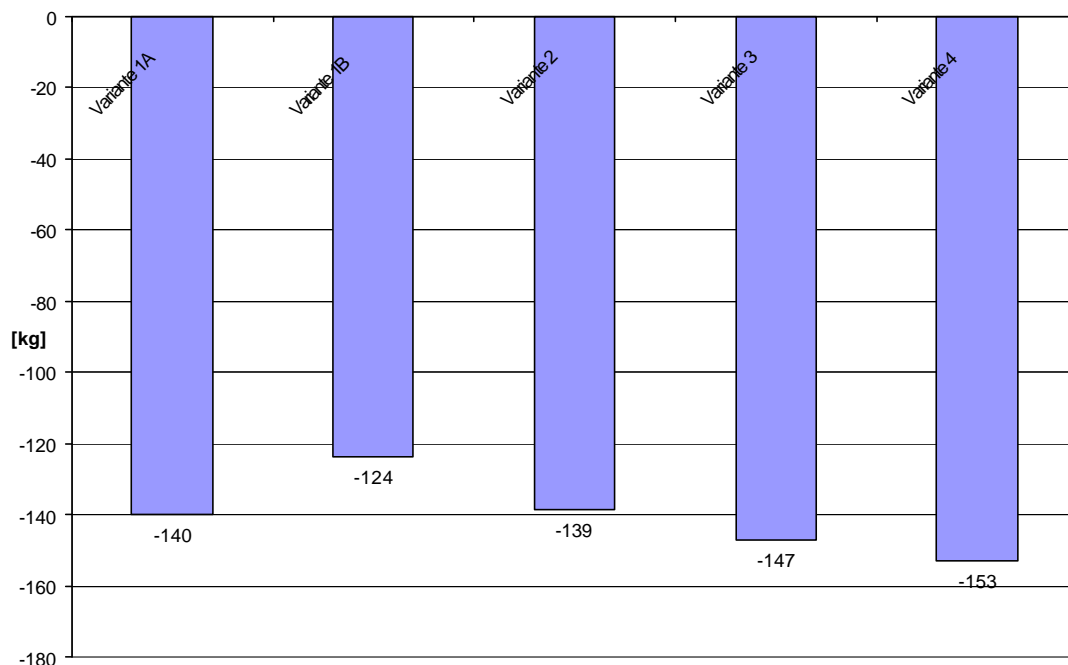
Die mit dem Begriff Versauerung umschriebenen Umweltwirkungen wurden bereits erläutert. In der vorliegenden Wirkungsabschätzung wird das Versauerungspotenzial, englisch Acidification Potential (AP), mit den Faktoren einer Studie des holländischen „Centre for Environmental Science (CML)“ (Heijungs et al. 1992) gebildet. Substanzen, die erst nach der Oxidation (wie z.B. Ammoniak) oder der Hydrolyse (wie z.B. SO_2) zur Versauerung beitragen, gehen dabei ebenfalls ein. Im Modell von CML werden nur Luftemissionen berücksichtigt, Wasseremissionen fließen nicht ein.

Tabelle 10: Verwendete Gewichtungsfaktoren für das Versauerungspotenzial

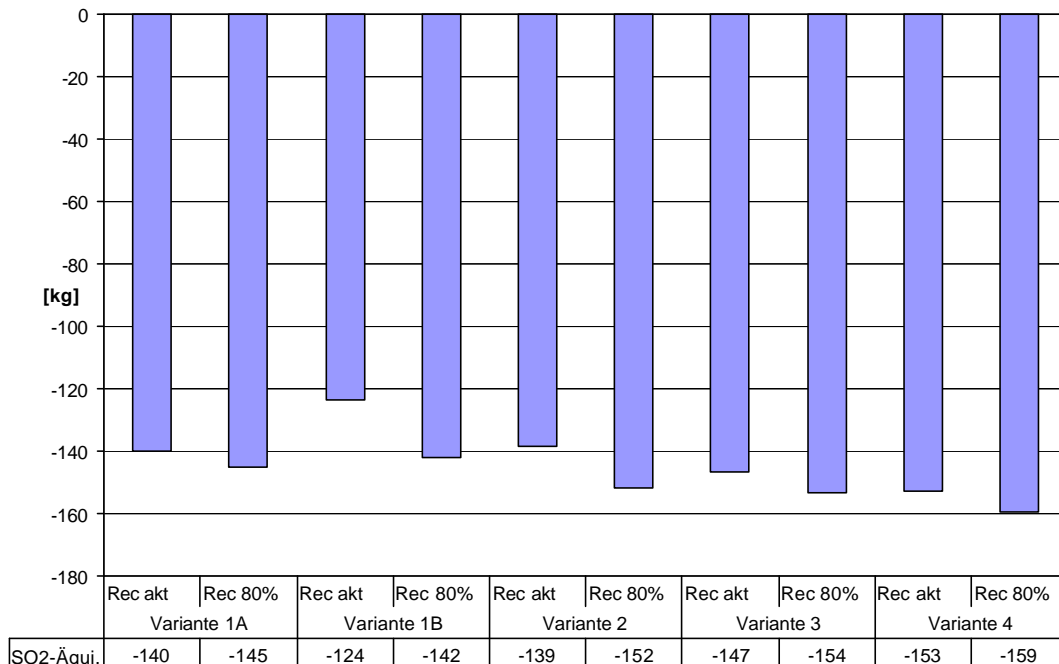
Substanz	Versauerungspotenzial
Luftemissionen	
Salzsäure (HCl)	0,88
Fluorwasserstoff (HF)	1,6
Ammoniak (NH ₃)	1,88
Stickoxide (NO _x)	0,7
Schwefeldioxid (SO ₂)	1

Das Versauerungsminderungspotenzial wird einerseits durch die Verminderung von NO_x-Emissionen bewirkt, andererseits durch die anderen relevanten Emissionen insbesondere durch SO₂-Emissionen wieder verringert.

Auffallend ist der besonders niedrige Wert der Variante 1B. Die Ursache liegt einerseits an den hohen Einsatzmenge an Palladium verbunden mit dem hohen Weltmarktanteil von russischem Palladium. Die gegenüber den anderen Lagerstätten hohen SO₂-Emissionen in Russland führen zu diesem niedrigen Wert. In den anderen Varianten 2-4 wird dieser Aspekt durch die höheren NO_x-Emissionsverminderungen überkompensiert.

Abbildung 16: Versauerungsminderungspotenzial in [kg] für die aktuelle Recyclingquote

Hohe Recyclingquoten verringern den SO₂-Effekt der russischen PGM-Gewinnung und führen jeweils zu höheren Verminderungspotenzialen.

Abbildung 17: Versauerungsminderungspotenzial in [kg] für verschiedene Recyclingquoten

6.4.2 Qualitative Aspekte der Wirkungsabschätzung

Zur Darstellung der Human- und Ökotoxizität in Ökobilanzen existiert noch kein allgemein akzeptiertes quantitatives Verfahren. An dieser Stelle werden daher kurz einzelne Substanzen, die human- und ökotoxisch wirken, qualitativ behandelt. Methodenbedingt können in der Wirkungsabschätzung keine lokalen und zeitabhängigen Aussagen getroffen werden.

Es sollten solche Substanzen erfasst werden, die über die Emissionsquelle hinaus von globaler Bedeutung sind. Ferner sollten Stoffe einbezogen werden, die keine Wirkschwelle besitzen. Ziel sollte es sein, derartige Stoffe möglichst zu minimieren bzw. zu ersetzen.

6.4.2.1 Kohlenmonoxid

Im Bereich der Luftbelastungen stellte Kohlenmonoxid (als erbgutverändernd eingestuft) lange Zeit ein Problem dar, insbesondere durch die Emissionen aus dem Verkehrssektor. Durch die Erfolge der CO-Minderung durch den Einsatz von Katalysatoren konnten die Emissionen sehr stark gesenkt werden, so dass das Umweltbundesamt in einer Veröffentlichung zu technischen Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen zu dem Ergebnis kommt, dass Kohlenmonoxid kein lufthygienisches Problem mehr darstellt. (UBA 1999).

Die dargestellten Minderungspotenziale verdeutlichen außerdem anschaulich, dass die neueren Varianten wesentlich mehr CO zurückhalten als die Variante 1.

6.4.2.2 PGM-Emissionen

Die Gefährdungspotenziale von PGM-Emissionen wurden schon in einigen Publikationen thematisiert, so in den WHO-Veröffentlichungen (z.B. Melber 2002), in der Veröffentlichung von Zereini (1999) sowie einer TAB-Studie (Meyer 1997), in der Platin, Palladium und Rhodium „sensibilisierende und/oder allergisierende Wirkungen“ zugeschrieben werden.

Nach Rosner und Merget (1999 und 2001) muss bezüglich der Wirkung von Platin zwischen metallischem Platin und Platinsalzen unterschieden werden. Metallisches Platin ist nach derzeitigem Kenntnisstand toxikologisch nicht von Bedeutung, obwohl gleichzeitig angemerkt wird, dass zur Wirkung von nanokristallinen, feinstverteilten, lungengängigen Platinpartikeln kaum Untersuchungen vorliegen. In ihrem Fazit kommen die Autoren zu dem Ergebnis, dass von Platin aus Automobilabgaskatalysatoren keine gesundheitliche Gefährdung ausgeht. Bestimmte lösliche (halogenierte) Platinsalze zeichnen sich durch ein hohes Sensibilisierungspotenzial aus. Das Auftreten allergischer Reaktionen infolge Platinsalz-Exposition in Scheidereien und Katalysatorproduktionsbetrieben ist in einigen Studien hoch, in denen halogenierte Platinverbindungen als Ausgangsstoffe zur „Imprägnierung“ des Washcoat eingesetzt werden (Merget 1999).

Bezüglich Palladium wird von einem kontaktallergisierenden Potenzial gesprochen, welches aber nicht auf eine mögliche atemwegsensibilisierende Wirkung übertragbar sei.

Gebel (1999) befürwortet aus Gründen der Risikominimierung den bevorzugten Einsatz von Palladium für die Verwendung in KFZ-Katalysatoren, da Palladium im Vergleich zu Platin eine geringe Toxizität aufweist.

Entsprechend der aktuellen WHO-Studie (Melber 2002: 2) liegt das meiste Palladium in der Biosphäre als Metall oder Metalloxid vor, welche in Wasser unlöslich sind, in der Biosphäre kaum Reaktionen eingehen und sich nicht in der Luft verflüchtigen. In Analogie zu anderen PGM wird von metallischem Palladium nicht angenommen, dass es biologisch transformierbar ist. [...] Palladium wurde in der Asche einer Vielzahl von Pflanzen gefunden, so dass vermutet wird, dass Palladium in der Umwelt mobiler und somit bioverfügbarer für Pflanzen ist als Platin.

Es existieren keine Informationen über die Effekte von Palladium, das von Automobil-Katalysatoren emittiert wird, auf die Bevölkerung. Effekte wurden bei anderen Expositionen berichtet (Melber 2002: 10).

Neben der grundsätzlichen Beurteilung von Gefährdungspotenzialen durch PGM-Emissionen bleibt die Frage einer zusätzlichen kombinierten Wirkung aufgrund der immer geringer werdenden nanoskaligen Partikelgröße in allen bisherigen Studien eher offen. Aussagekräftige Untersuchungen hierzu konnten nicht gefunden werden.

6.4.2.3 Einsatz von Lanthan

Die beiden Varianten 3 und 4 zeichnen sich dadurch aus, dass das bisher als Trägeroxid eingesetzte Al_2O_3 durch Lanthan ersetzt wird. Bezüglich möglicher Gefährdungspotenziale durch den Einsatz von Lanthan ergab eine Recherche keine auswertbaren Ergebnisse, welche auf mögliche Gefahren hinweisen würden.

6.5 Zusammenfassung der Fallstudie Autoabgaskatalysator

Anhand der Fallstudie Autoabgaskatalysator werden Technologieentwicklungen untersucht, die durch den Einsatz immer kleiner werdender nanoskaliger Stoffe gekennzeichnet sind.

Die Fallstudie schränkt hierbei ihren Fokus auf das Anwendungsfeld des Drei-Wege-Katalysators ein und untersucht in vergleichenden Betrachtungen abgeleitet von wesentlichen Einflussparametern fünf Varianten, die einerseits die Entwicklung der Katalysatorentechnologie nachzeichnen und andererseits die aktuellen Neuentwicklungen berücksichtigen. In Bezug zu diesen Entwicklungen werden die damit in Verbindung stehenden ökologischen Effekte untersucht.

Auch unter Berücksichtigung der Lücken bei den vorhandenen Informationen zu Stoff- und Energieströmen in einzelnen Phasen des Produktlebensweges können an diesem Anwendungsbeispiel quantifizierte ökologische Entlastungseffekte festgestellt werden.

Der Trend hin zum Einsatz immer kleinerer und homogenerer nanoskaliger Edelmetallpartikel bewirkt auf Grund des damit in Verbindung stehenden Oberflächen/Volumen-Effektes eine erhöhte katalytische Wirkung dieser PGM-Partikel. Dies sowie die Fähigkeit, diese Partikel immer besser im Autoabgaskatalysator thermostabil zu binden und Alterungsprozesse zu vermindern, führt einerseits zur Verminderung der notwendigen PGM-Einsatzmenge sowie andererseits zur Fähigkeit, die sich verschärfenden Grenzwerte der international geltenden Normen zu erfüllen.

Ökologische Entlastungseffekte werden also dadurch erzielt, dass die Schadstoffemissionen der Autoabgase verringert und durch die „ersparte“ Rohstoffgewinnung von PGM, die mit sehr hohen Aufwendungen verbunden ist, Umweltauswirkungen vermieden werden.

Die realisierbaren Entlastungspotenziale bewegen sich je nach betrachteter Emissionsart im Bereich zwischen 10 – 40 %. Eine Erhöhung der Recyclingquote würde zusätzlich entlastend wirken.

Die Verminderung der notwendigen PGM-Einsatzmenge hat außerdem unter ökonomischen Gesichtspunkten eine hohe Bedeutung, da der Preis des Autokatalysators wesentlich vom Preis der eingesetzten PGM mitbestimmt wird.

Neben der grundsätzlichen Beurteilung von Gefährdungspotenzialen durch PGM-Emissionen bleibt die Frage einer zusätzlichen kombinierten Wirkung aufgrund der immer geringer werdenden nanoskaligen Partikelgröße in allen bisherigen Studien eher offen. Aussagekräftige Untersuchungen hierzu konnten nicht gefunden werden.

6.6 Literaturverzeichnis

- Amatayakul, Wathanyu (1999): Life cycle assessment of a catalytic converter for passenger cars. Göteborg.
- Ankele, Kathrin; Steinfeldt, Michael (2002): Ökobilanzen. In: Der Umweltschutzberater. Loseblattsammlung. Deutscher Wirtschaftsdienst.
- Association for Emissions Control by Catalyst (2001): Zusammenhang zwischen Verkehr und ultrafeinen Partikeln in Lungengewebe von Kindern. In: Newsletter November-Dezember 2001. S. 5. Brüssel.
- Association for Emissions Control by Catalyst (2002): CARB beschließt strengere PM-Luftqualitätsstandards. In: Newsletter Mai-Juni 2002. S. 5-7. Brüssel.
- Bach, Ch.; Heeb, N.; Mattrel, P.; Mohr, M. (1998): Wirkungsorientierte Bewertung von Automobilabgasen. Dübendorf.
- Bachmann, Gerd (1998): Innovationsschub aus dem Nanokosmos. Analyse & Bewertung Zukünftiger Technologien. Nr. 28. Düsseldorf.
- CSI (2002): Technology. 02.12.2002 (<http://www.catsolns.com/technology.htm>)
- Daihatsu News (2002a): Industrialization of the World's First Self-Regenerating "Intelligent Catalyst". News 19.09.2002 (<http://www.daihatsu.com/news/n2002/02091901/>)
- Daihatsu News (2002b): World-Leading Development of a Self-Regenerating „Intelligent Catalyst“, News 11.07.02 (<http://www.daihatsu.com/news/n2002/02071101/>)
- Daihatsu News (2002c): Toyota, Hino, Daihatsu to Highlight Environmental Technologies, Universal Mobility and Logistics Systems at Tokyo Motor Show. News 11.10.02 (<http://www.daihatsu.com/news/n2002/02101101/>)
- Detroit News (2002): Ford, Catalytic to reduce metals. 17.05.2002 (<http://www.detnews.com/2002/business/0205/17/b02-491932.htm>)
- DIN EN ISO 14040 (1997): Umweltmanagement – Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen. Berlin
- dmc² Degussa Metals Catalysts Cerdec AG (2001): dmc² spezial magazine. Forschung und Entwicklung. #1 2001. Hanau-Wolfgang.
- Gebel, T. (1999): Toxikologisches Gefährdungspotenzial der Platingruppenelemente Platin, Palladium und Rhodium. In: Zereini, Fathi; Alt, Friedrich (1999): Emissionen von Platinmetallen. Analytik, Umwelt- und Gesundheitsrelevanz. Berlin.
- Gieshoff, Jürgen (2002), OMG AG & Co. KG: Persönliche Mitteilung am 25.11.2002.
- Gieshoff, Jürgen (2001a): Der Autokatalysator: Allgemeine Grundlagen. In: Hagelüken, Christian und 11 Mitautoren (2001): Autoabgaskatalysatoren: Grundlagen – Herstellung – Entwicklung – Recycling – Ökologie. Renningen.
- Gieshoff, Jürgen (2001b): Der Autokatalysator: Zusammensetzung, Herstellung und Charakterisierung. In: Hagelüken, Christian und 11 Mitautoren (2001): Autoabgaskatalysatoren: Grundlagen – Herstellung – Entwicklung – Recycling – Ökologie. Renningen.
- Hagelüken, Christian und 11 Mitautoren (2001): Autoabgaskatalysatoren: Grundlagen – Herstellung – Entwicklung – Recycling – Ökologie. Renningen.

- Heck, Ronald M.; Farrauto, Robert J.; Gulati, Suresh T. (2002): Catalytic Air Pollution Control. Commercial Technology. New York.
- Heijungs, et al. (1992): Environmental life cycle assessment of products, backgrounds & guide. Centre of Environmental Science, Leiden.
- Hensel, Clemens; Konieczny, Roman; Brück, Rolf (2000): Recycling Technology for Metallic Substrates: a Closed Cycle. SAE 2000-01-0596. Alzenau.
- Hochfeld, Christian (1997): Bilanzierung der Umweltauswirkungen bei der Gewinnung von Platingruppen-Metallen für PKW-Abgaskatalysatoren. Freiburg.
- Honda Motor Co. Ltd. (2001): Honda Announces Development of Breakthrough Emissions Control System. In: Press Release. 22.03.2001. Tokyo.
(<http://world.honda.com/news/2001/4010322.html>)
- Honda Motor Co. Ltd. (2002): Honda Environmental Report 2002. Tokyo.
- Johnson Matthey (2002a): Platinum 2002. London.
- Johnson Matthey (2002b): Price charts. London. 15.11.02
(<http://www.platinum.matthey.com/prices/chartintro.php>)
- Juran, Ken: Honda and Catalytic Solutions Inc. have figured out how to make a catalyst work with fewer precious metals.
(<http://popularmechanics.com/popmech/auto3/0104AUTKWFAM.html>), 13.09.2002
- Köhler, Michael (2001): Nanotechnologie. Eine Einführung in die Nanostrukturtechnik. Weinheim.
- Kraftfahr-Bundesamt (2002): Kraftstoffverbrauchs- und Emissions-Typprüfwerte von Kraftfahrzeugen mit Allgemeiner Betriebserlaubnis oder EU-Typgenehmigung. Flensburg.
- LME – London Metal Exchange (2002): Monthly Prices. Historic Monthly Data. London. 08.11.02 (http://www.lme.co.uk/data_prices/monthly_prices.asp)
- Melber, Christine; Keller, Detlef; Mangelsdorf, Inge (2002): Environmental Health Criteria 226. Palladium. WHO Publication. Genf.
- Merian, Ernest (1984): Metalle in der Umwelt. Verteilung, Analytik und biologische Relevanz. Weinheim.
- Merget (1999): Arbeitsmedizinische Aspekte der Platinsalzallergie: Krankheitsbild, Diagnostik, Prognose, Prävention und Therapie. In: Zereini, Fathi; Alt, Friedrich (1999): Emissionen von Platinmetallen. Analytik, Umwelt- und Gesundheitsrelevanz. Berlin.
- Meyer, R. et.al (1997): TA-Projekt „Umwelt und Gesundheit“ – Vorstudie. Arbeitsbericht Nr. 47. Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag. Bonn.
- Mitani, M.M.; Keller, A.A.; Golden, S.J.; Hatfield, R.; Cheetham, A.K. (2001): Low temperature catalytic decomposition and oxidation of MTBE. In: Applied Catalysis B: Environmental 888 (2001) 1-9. London.
- Nishihata, Y.; Mizuki, J.; Akao, T.; Tanaka, H.; Uenishi, M.; Kimura, M.; Okamoto, T.; Hamada, N. (2002): Self-regeneration of a Pd-perovskite catalyst for automotive emissions control. Tokyo. In: Nature Vol. 418, No. 6894, S. 164-167.
- Pott, Ekkehard (2002), Volkswagen AG: Persönliche Mitteilung am 19.11.2002.

- Riedel, Erwin (1990): Allgemeine und Anorganische Chemie. 5. Auflage. Berlin.
- Rosner, Gerhard; Merget, Rolf (1999): Abschätzung des Gesundheitsrisikos von Platinemissionen aus Automobilabgaskatalysatoren. In: Zereini, Fathi; Alt, Friedrich (1999): Emissionen von Platinmetallen. Analytik, Umwelt- und Gesundheitsrelevanz. Berlin.
- Rosner, Gerhard; Merget, Rolf (2001): Gesundheitsgefährdungspotenzial von Edelmetallemissionen aus Autoabgaskatalysatoren. In: Hagelücken, Christian und 11 Mitautoren (2001): Autoabgaskatalysatoren: Grundlagen – Herstellung – Entwicklung – Recycling – Ökologie. Renningen.
- Rössler, Albert; Skillas, Georgios; Pratsinis, Sotiris E. (2001): Maßgeschneiderte Werkstoffe. Nanopartikel – Materialien der Zukunft. In: Chemie in unserer Zeit. 35. Jahrgang 2001. Nr. 1. Weinheim.
- Rubahn, Horst-Günter (2002): Nanophysik und Nanotechnologie. Stuttgart.
- Seilnacht, Thomas (2002): Lanthan. (<http://www.seilnacht.tuttlingen.com/Lexikon/psframe.htm>), 25.11.2002
- Seifert, B. (1986): Luftverunreinigung durch Kraftfahrzeuge in der Bundesrepublik Deutschland – Stand und Technik. Stuttgart.
- Tanaka, Hirohisa; Misono, Makoto (2001a): Advances in designing perovskite catalysts. Tokyo. In: Current Opinion in Solid State and Materials Science 5, S. 381-387.
- Tanaka, Hirohisa; Tan, Isao; Uenishi, Mari; Kimura, Mareo; Mizuki, Jun'ichiro; Nishihata, Yasuo (2001b): An Intelligent Catalyst. Detroit.
- Tanaka, Hirohisa; Tan, Isao; Uenishi, Mari; Kimura, Mareo; Dohmae, Kazuhiko (2001c): Regeneration of palladium subsequent to solid solution and segregation in a perovskite catalyst: an intelligent catalyst. Tokyo. In: Topics in catalysis Vol. 16/17, Nos. 1-4.
- Thomsen, C.; Gumlich, H.-E. (1995): Ein Jahr für die Physik. Berlin.
- Tiessen, Jan; Nill, Jan (2002): Der Technologiewettbewerb zwischen Magermotor und Katalysator in Europa und Japan. Berlin.
- Tullo, Alexander H. (2002): Going Platinum. In: Chemical & Engineering News Volume 80, Number 34, pp. 17-19. Columbus, OH.
- Umweltbundesamt (UBA) (1999): Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen. Texte-Reihe des UBA Nr. 33/99. Berlin.
- Weiken, Dirk (1985): Steuern sparen mit Katalysator oder Diesel. Der schadstoffarme Pkw. 3. Auflage. München.
- Zajontz, J.; Frey, V.; Gutknecht, C.; Ludewig, M. (1992): Emission nichtlimitierter Abgasbestandteile aus Ottomotoren mit Abgaskatalysatoren. Clausthal.
- Zereini, Fathi; Alt, Friedrich (1999): Emissionen von Platinmetallen. Analytik, Umwelt- und Gesundheitsrelevanz. Berlin.
- Zühlke, Simon (1999): Herstellung und Charakterisierung perowskitischer Katalysatoren zur Nachverbrennung organischer Komponenten. Dissertation. Fakultät für Chemieingenieurwesen der Universität Karlsruhe (TH).

6.7 Anhang

Abbildung 18: Preisentwicklung der Edelmetalle Platin, Palladium und Rhodium für den Zeitraum 11/2001 –10/2002

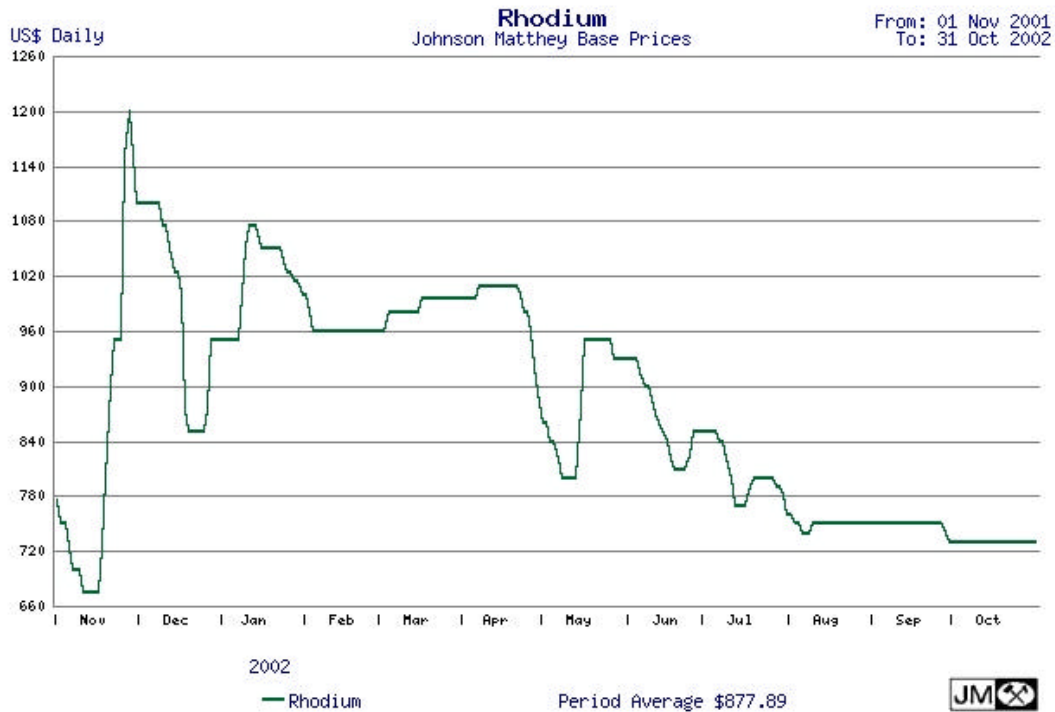
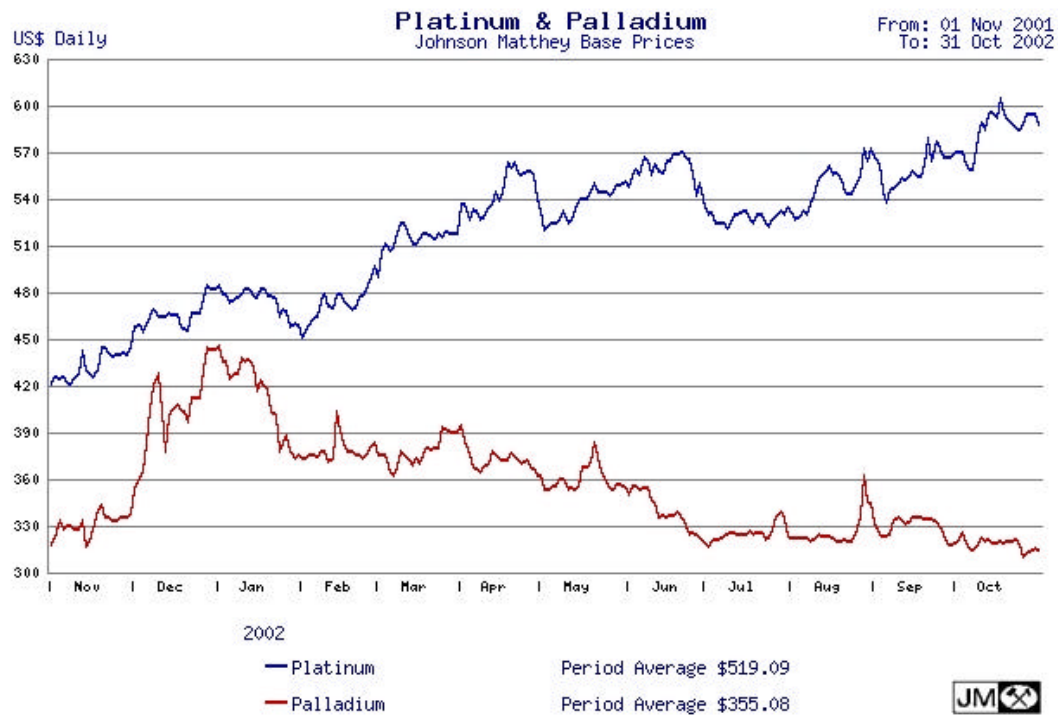


Tabelle 11: Berechnete Daten zum Weltmix Platin

Parameter	Einheit	RSA	USA	Can-FB	Can-INCO	Russland	Rec 0%		Rec.aktuell	Rec.80%
							Recycling D	Weltmix	Weltmix	Weltmix
Anteil Weltmarkt		0,71	0,02	0,02	0,02	0,23		1,00		
INPUT										
Erz	kg/g	286,13	77,55	132,31	193,91	50,12	0,40	223,68	177,61	45,06
Strom	kWh/g	23,56	5,06	57,16	32,18	12,57	0,63	21,46	17,16	4,80
Gas	MJ/g	0,81	1,02	0,00E+00	175,49	55,81	0,00E+00	17,25	13,69	3,45
Wasser	kg/g	172,19	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
OUTPUT										
Luft										
CO2	kg/g	21,64	3,78	13,91	17,74	14,58	0,47	19,45	15,53	4,27
CH4	g/g	77,38	3,05	9,91	12,50	27,25	0,55	61,85	49,20	12,81
N2O	g/g	1,22	0,13	0,55	0,28	0,40	0,01	0,98	0,78	0,20
SO2	kg/g	0,03	0,01	2,39	4,34	14,90	3,60E-04	3,53	2,80	0,71
NOx	g/g	145,55	11,95	33,58	28,10	28,00	0,57	111,57	88,67	22,77
HCl	g/g	10,13	0,25	1,71	0,87	4,73	0,01	8,34	6,62	1,68
HF	g/g	0,91	0,00	0,07	0,03	0,40	0,00E+00	0,74	0,59	0,15
NMVOG	g/g	1,42	3,43	4,62	2,34	1,56	0,01	1,57	1,25	0,32
Staub	g/g	19,14	3,81	21,03	26,74	21,72	9,79	19,61	17,58	11,75
CO	g/g	16,81	3,43	9,98	5,16	11,26	1,92	14,89	12,22	4,51
Feststoff										
Abraum	kg/g	16,20	3,53	23,91	9,91	4,62	1,92	13,30	10,95	4,20
Tailings	kg/g	232,96	65,85	70,98	147,15	18,10	0,00E+00	176,16	139,81	35,23
Schlacke	kg/g	7,81	0,60	23,29	0,00	0,00	4,89E-04	5,98	4,74	1,20
Sonderabfall	kg/g	3,55E-03	0,04	1,45	0,00	0,00	0,00E+00	0,03	0,02	0,01
Schlacke SA	kg/g	7,81	0,64	24,74	16,50	20,83	4,89E-04	11,09	8,80	2,22
Asche	kg/g	16,71	0,40	2,78	1,40	0,17	0,02	12,04	9,56	2,43
REA-Rest	kg/g	4,15	0,07	0,32	0,16	0,00	0,01	2,97	2,36	0,60
Koppelprodukte										
Ni	g/g	148,89	20,85	1799,48	1796,11	1161,37		440,97	349,97	88,19
Cu	g/g	104,33	14,37	831,26	1771,36	1611,33		493,72	391,84	98,74

Tabelle 12: Berechnete Daten zum Weltmix Palladium

Parameter	Einheit	RSA	USA	Can-FB	Can-INCO	Russland	Recycling D	Rec 0%	Rec.aktuell	Rec.80%
								Weltmix	Weltmix	Weltmix
Anteil Weltmarkt		0,28	0,06	0,03	0,04	0,60		1,00		
INPUT										
Erz	kg/g	195,09	52,87	90,21	132,21	34,18	0,40	85,10	80,30	17,34
Strom	kWh/g	16,06	3,45	38,98	21,94	8,57	0,63	11,65	11,02	2,83
Gas	MJ/g	0,55	0,69	0,00E+00	119,65	38,05	0,00E+00	27,44	25,89	5,49
Wasser	kg/g	117,40	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
OUTPUT										
Luft										
CO2	kg/g	14,76	2,57	9,48	12,10	9,94	0,47	10,94	10,34	2,56
CH4	g/g	52,76	2,08	6,76	8,52	18,58	0,55	26,52	25,05	5,74
N2O	g/g	0,83	0,09	0,37	0,19	0,27	0,01	0,42	0,39	0,09
SO2	kg/g	0,02	3,47E-03	1,63	2,96	10,16	0,00	6,28	5,92	1,26
NOx	g/g	99,24	8,15	22,90	19,16	19,09	0,57	40,94	38,65	8,64
HCl	g/g	6,91	0,17	1,16	0,59	3,22	0,01	3,93	3,71	0,79
HF	g/g	0,62	0,00E+00	0,05	0,02	0,27	0,00E+00	0,34	0,32	0,07
NMVOC	g/g	0,97	2,34	3,15	1,59	1,06	0,01	1,18	1,11	0,24
Staub	g/g	13,05	2,60	14,34	18,23	14,81	9,79	13,75	13,52	10,58
CO	g/g	11,46	2,34	6,80	3,52	7,68	1,92	8,26	7,90	3,19
Feststoff										
Abraum	kg/g	11,04	2,41	16,30	6,76	3,15	1,92	5,78	5,56	2,69
Tailings	kg/g	158,84	44,90	48,39	100,33	12,34	0,00E+00	59,14	55,78	11,83
Schlacke	kg/g	5,32	0,41	15,88	0,00	0,00	4,89E-04	1,92	1,81	0,38
Sonderabfall	kg/g	2,42E-03	0,03	0,99	0,00	0,00	0,00E+00	0,03	0,03	0,01
Schlacke SA	kg/g	5,32	0,43	16,87	11,25	14,20	4,89E-04	10,92	10,30	2,18
Asche	kg/g	11,39	0,27	1,90	0,96	0,11	0,02	3,35	3,16	0,69
REA-Rest	kg/g	2,83	0,05	0,22	0,11	0,00	0,01	0,80	0,76	0,17
Koppelprodukte										
Ni	g/g	101,52	14,22	1226,92	1224,62	791,84		582,59	549,52	116,52
Cu	g/g	71,13	9,79	566,77	1207,74	1098,64		741,09	699,03	148,22

Tabelle 13: Berechnete Daten zum Weltmix Rhodium

Parameter	Einheit	RSA	USA	Can-FB	Can-INCO	Russland	Recycling D			Rec.0%	Rec.aktuell	Rec.80%
							Weltmix	Weltmix	Weltmix	Weltmix	Weltmix	Weltmix
Anteil Weltmarkt		0,75	0,00	0,02	0,02	0,21				1,00		
INPUT												
Erz	kg/g	481,23	130,42	222,52	326,13	84,30	0,40			391,11	327,61	78,54
Strom	kWh/g	39,62	8,51	96,14	54,12	21,14	0,63			37,00	31,09	7,90
Gas	MJ/g	1,36	1,71	0,00E+00	295,13	93,86	0,00E+00			27,04	22,65	5,41
Wasser	kg/g	289,59	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.			k.A.	k.A.	k.A.
OUTPUT												
Luft												
CO2	kg/g	36,40	6,35	23,39	29,84	24,52	0,47			33,58	28,20	7,09
CH4	g/g	130,14	5,13	16,66	21,02	45,83	0,55			108,39	90,86	22,12
N2O	g/g	2,04	0,21	0,92	0,46	0,68	0,01			1,71	1,43	0,35
SO2	kg/g	0,06	0,01	4,02	7,30	25,05	3,60E-04			5,48	4,59	1,10
NOx	g/g	244,79	20,10	56,48	47,25	47,10	0,57			196,31	164,49	39,72
HCl	g/g	17,03	0,43	2,87	1,46	7,95	0,01			14,58	12,21	2,92
HF	g/g	1,53	0,00E+00	0,12	0,05	0,68	0,00E+00			1,30	1,09	0,26
NMVOG	g/g	2,38	5,77	7,77	3,93	2,62	0,01			2,55	2,14	0,52
Staub	g/g	32,20	6,41	35,37	44,96	36,53	9,79			33,43	29,59	14,52
CO	g/g	28,28	5,77	16,78	8,67	18,94	1,92			25,72	21,85	6,68
Feststoff												
Abraum	kg/g	27,24	5,94	40,22	16,67	7,76	1,92			23,16	19,71	6,17
Tailings	kg/g	391,80	110,75	119,37	247,49	30,44	0,00E+00			309,10	258,86	61,82
Schlacke	kg/g	13,13	1,00	39,17	0,00E+00	0,00E+00	4,89E-04			10,53	8,82	2,11
Sonderabfall	kg/g	0,01	0,06	2,44	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00			0,04	0,04	0,01
Schlacke SA	kg/g	13,13	1,07	41,61	27,76	35,03	4,89E-04			18,47	15,46	3,69
Asche	kg/g	28,11	0,67	4,68	2,36	0,28	2,38E-02			21,38	17,91	4,29
REA-Rest	kg/g	6,98	0,12	0,54	0,28	0,00	0,01			5,28	4,42	1,06
Koppelprodukte												
Ni	g/g	250,41	35,06	3026,40	3020,73	1953,21				709,95	594,55	141,99
Cu	g/g	175,46	24,16	1398,03	2979,10	2709,97				783,88	656,46	156,78

7 Fallstudie Photovoltaik

7.1 Inhalt, Ziel und Methode der Fallstudie

In dieser Fallstudie werden ökologische Aspekte neuer Solarzellenentwicklungen, die auf den Einsatz von Nanotechnologie basieren, untersucht. Dazu wird für einen herausgehobenen Fall (Farbstoffzellen) ein Vergleich zu konventionellen siliziumbasierten Solarzellen in Form einer ökobilanziellen Abschätzung vorgenommen.

Zunächst werden nachfolgend die wesentlichen nanotechnologiebasierten Entwicklungen im Bereich Photovoltaik dargestellt und daraus eine notwendige Fokussierung für den hier vorliegenden Untersuchungszweck abgeleitet. Die Untersuchung der ökologischen Aspekte erfolgt im Vergleich zu einem klassischen Zellentyp, dessen Auswahl ebenfalls begründet wird. Die angegebenen Daten sowie die eigenen Berechnungen basieren auf einer umfassenden Auswertung mehrerer relevanter Studien inklusive einer Vorstudie des Fraunhofer ISE (im Anhang beigefügt), sowie einzelnen Gespräche mit Forschern / Entwicklern.

Im Rahmen des Vergleichs erfolgen jeweils Darstellungen von Materialien, Emissionen und Energiebilanzen. Darin enthalten sind Berechnungen für einen sog. Standardfall (Status quo), der sich bei den am Markt etablierten Siliziumsolarzellen auf eine tatsächliche Datenbasis stützt, im Fall der nanobasierten Neuentwicklung ein angenommenes Gegenwartsszenario darstellt. Darüber hinaus werden für einzelne Aspekte Zukunftsszenarien bestimmt, bei denen es sich zum Teil um eine Hochrechnung auf der Basis (eines konservativen) technischen Fortschritts handelt. In anderen Berechnungen zu spezifischen Ressourcenverbräuchen knapper Materialien werden Hochrechnungen für den Fall einer weltweiten Verbreitung in großem Maßstab durchgeführt.

7.2 Einführender Überblick: Nanotechnologien im Bereich Photovoltaik

Der Einsatz der Nanotechnologie hat im Bereich Photovoltaik viele Gesichter: sie findet „de facto“ aufgrund der ohnehin gegebenen Suche nach immer dünneren Solarzellen (bzw. aktiven Schichten) statt, sie liefert aber auch durch neue Materialien oder neue Verfahren und Geometrien und deren nano-spezifischen (elektrophysikalischen und -chemischen) Eigenschaften zum Teil ganz neue Zelltypen mit vielversprechenden Perspektiven hinsichtlich zukünftiger Kosteneffizienz.

Um die Vielfalt der Entwicklungen zu erfassen und zu systematisieren, wurde im Vorfeld das Fraunhofer ISE in Freiburg beauftragt, welches selbst in mehreren Forschungen zum Thema Nano-PV aktiv ist.

Dieser Überblick zeigt folgende Zuordnung der gegenwärtigen Entwicklungen (die Langfassung dieser Vorstudie befindet sich im Anhang, ISE 2002):

- a) Nanotechnologien für Solarzellen aus Silizium und Verbindungshalbleitern
- b) Farbstoffsolarzellen
- c) Organische Solarzellen
- d) Nanotechnologie zur Entspiegelung von Gläsern von Solaranlagen

Zu a) Nanotechnologien für Solarzellen aus Silizium und Verbindungshalbleitern

Während in die Technologie der derzeit vorherrschenden klassischen Solarzellen die Nanotechnologie noch keinen Einzug gehalten hat, wird in der halbleiterbasierten Solarzellenentwicklung bereits an und über Nanostrukturen geforscht. Dabei geht es sowohl um die horizontale (z.B. optische Effekte) als auch um die vertikale (Schichtaufbau) Strukturierung, jeweils im Sub- μm -Bereich. Einige dieser Konzepte sind:

- Ultradünne Absorberschichten: gefaltete Absorberschichten zur Verbesserung der Absorbereigenschaften (noch keine entwickelten Solarzellen)
- Quanten-Schicht-Solarzellen: Entwicklung nach Vorbild aus der Optoelektronik (z.B. LED), Schichtenfolge im Nanobereich ermöglicht Erweiterung der spektralen Empfindlichkeit (noch keine marktfähigen Produkte, Effekt noch umstritten)
- Quantenpunkte-Solarzellen: durch die Reduzierung von aktiven Schichten auf (Quanten-) Drähte oder Punkte verändert sich die Energieniveau-Struktur, wodurch die Wirkungsgrade über die theoretische Grenze von etwa 30% erhöht werden können (auch: Zellen 3. Generation, derzeit allerdings noch sehr geringe Wirkungsgrade)
- Nanostrukturen auf Siliziumbasis: Erhöhung der Reflektion durch geätzte Stufen-Biegungsgitter (frühes Laborstadium)

Zu b) Farbstoffsolarzellen

Die Farbstoffsolarzelle zählt zu den Dünnschichtzellen und basiert auf elektrochemischen Prinzipien. Sie sind die erfolversprechendsten Neuentwicklungen in der Photovoltaik der letzten Jahre, die auf Nanotechnologien aufbauen. Es gibt bereits seit mehreren Jahren eine breite Forschung und zunehmende Erfolge bezüglich Wirkungsgraden und Stabilität. Die ersten Produkte sind bereits am Markt erhältlich (siehe auch Ausführungen an späterer Stelle).

Zu c) Organische Solarzellen

Als Vorbild kann hier die erfolgreiche Entwicklung organischer LED gelten: Polymere Elektronik wird nun als Schlüsseltechnologie für das 21. Jahrhundert gesehen. Gegenwärtig wird von eher geringeren Wirkungsgraden auf mittlere Sicht bei allerdings geringen Kosten ausgegangen. Zudem ist die Einsatzvielfalt gegenüber anorganisch-basierten Zellen deutlich größer. Für die längere Perspektive wird im Zusammenhang mit „molecular engineering“ die Erzielung deutlich höherer bzw. höchster Wirkungsgrade nicht ausgeschlossen (Bossert et al. 2000).

Grundsätzlich werden sog. Bilayer- und Komposit-Konzepte unterschieden, wobei ersteres mit der Halbleiterzelle (Schichtenstruktur) vergleichbar ist und letzteres mit der Farbstoffsolarzelle. Verschiedene Typen sind:

- Polymer-Polymer Systeme: ein p- und ein n-leitendes (physikalisches Wirkprinzip der klassischen Solarzelle) Polymer, die gegeneinander gepresst werden
- Farbstoff-Flüssigkristall Systeme (Komposite)
- Farbstoff- Polymer Systeme: Farbstoff im Polymer kovalent gebunden
- Farbstoff-Fullerene (C_{60}) Systeme: Aufdampfung von Schichten
- Quantenpunkte-Polymer Systeme: anorganische Halbleiter-Nanopartikel in Polymeren

- C₆₀-Polymer Systeme: Komposit aus C₆₀-Fullerenen und Polymer; diese Kombination zeichnet sich durch besonders schnellen Elektronentransfer aus

Am besten erforscht und mit den konkretesten Perspektiven ausgestattet ist derzeit das zuletzt genannte Fulleren(C₆₀)-Polymer-System. Während die davor genannten Systeme alle noch unter etwa 1,5% Wirkungsgrad liegen, erreicht das Fulleren-basierte System bereits 3% (Bossert et al. 2000, ISE 2002).

Für alle aufgeführten Polymer-Systeme gilt, dass sie sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch im Labormaßstab und in der Entwicklung bezüglich stabiler Prozesse und nennenswerter, höherer Wirkungsgrade befinden. Darüber hinaus liegen noch keine Studien zu ökologischen Effekten vor, da aufgrund der noch frühen Produktentwicklungsphase auch noch keine Produktionsprozesse feststehen.

Zu d) Nanotechnologie zur Entspiegelung von Gläsern von Solaranlagen

Für die Entspiegelung des vorderseitigen (lichtseitigen) Abdeckglases von Solarzellen werden ebenfalls Nanotechnologien eingesetzt. Hier werden z.B. nanoporöse Schichten mittels Sol-Gel-Technik aufgetragen, oder durch holographische Methoden oder Sputtertechniken spezielle Oberflächenstrukturen erzeugt. Dies kann schon heute zur Effizienzsteigerung von herkömmlichen Solarmodulen beitragen, perspektivisch jedoch auch für die neuentwickelten Technologien.

7.3 Eingrenzung des Untersuchungsbereichs im Rahmen dieser Fallstudie

7.3.1 Nanotechnologiebasierte Photovoltaik

Aufgrund des derzeitigen Forschungsstandes, des Innovationsgrades und der Datenverfügbarkeit werden im Rahmen dieser Studie die Farbstoffsolarzelle bzw. die daraus hergestellten Module fokussiert. Auf der Basis einzelner Studien zu Farbstoffsolarzellen, die auch bereits die Umweltrelevanz thematisieren, wird ein abschätzender, auf einzelne Indikatoren fokussierter ökobilanzieller Vergleich mit einem klassischen, siliziumbasierten Modul durchgeführt.

Die Entwicklungen im Bereich der organischen Zellen werden kursorisch zum Abschluss behandelt. Die Forschungslinien sind hier gegenwärtig noch zu heterogen und zudem existieren noch keine ausreichenden Daten, die eine vergleichende Umweltbewertung sinnvoll ermöglichen würden.

Die zuletzt genannten Beschichtungen zur Entspiegelung sind wichtig und können bei allen (glasbasierten) Solartechnologien zu Verbesserungen der Wirkungsgrade beitragen. Sie sind jedoch bzgl. des Innovationsgrades nicht mit den neuen Zelltypen vergleichbar, bei denen es um neue elektrophysikalische bzw. elektrochemische Wirkungsprinzipien geht und damit auch darum, die physikalischen Grenzen bisheriger Zellkonzepte zu überschreiten - und dies zudem mit deutlich kostengünstigeren Materialien.

Aus den genannten Gründen wird nachfolgend die Farbstoffzelle im Vordergrund stehen, die ökologischen Aspekte bei organischen Zellen werden anschließend kursorisch behandelt.

7.3.2 Klassische PV-Zelltypen: Status quo und Auswahl des Standardfalls

Die neuen Entwicklungen nanotechnologiebasierter Solarzellen spielen derzeit noch keine Rolle am Markt. Die weltweit dominierenden Zellen sind nach wie vor die Solarzellen der „ersten Generation“ aus kristallinem Silizium: Seit 1999 liegt ihr Anteil stabil bei etwa 85%. Bei den kristallinen Zellen sind mono- und multi- (auch genannt: poly-) kristalline Zellen zu unterscheiden, wobei die multikristalline die Mono-Variante überholt hat: seit 2001 liegt der Anteil der polykristallinen Zellen allein bei etwa 50% (vgl. Abbildung 19). Weitere siliziumbasierte Herstellungstechniken, die bandgezogenen und die mikrokristallinen Zellen, haben ein leichtes Wachstum auf niedrigem Niveau, d.h. von ca. 4% auf 5,6% in 2001 zu verzeichnen.

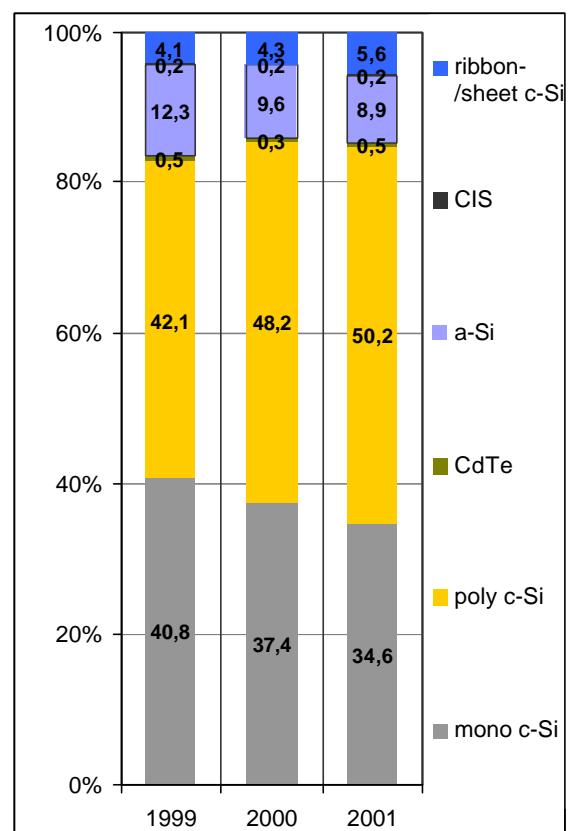
Bei den Dünnschichttechnologien (sog. Zellen 2. Generation) ist die am weitesten fortgeschrittene Technik nach wie vor dominierend: Zellen bzw. Module aus amorphem Silizium, deren Anteil jedoch von 12,3% in 1999 kontinuierlich auf 8,9% in 2001 gesunken ist. Dieser (relative) Rückgang ist primär auf die Zunahme des Absatzes der konventionellen Solarzellen zurückzuführen. Die neueren Dünnschichtzellen CIS und CdTe benötigen einen längeren Entwicklungszeitraum als von den Herstellern angekündigt und liegen nach wie vor zusammen noch unterhalb 1% Marktanteil.

Damit wird klar, dass zum Vergleich mit neueren nanotechnologiebasierten Entwicklungen als Basis die kristalline Solarzelle dienen muss. Hier wiederum wird die multikristalline Variante ausgewählt, wobei die folgenden Argumente eine Rolle spielen:

- Diese Variante hat mit zunehmender Tendenz die größten Marktanteile (siehe Abbildung 19) erreicht,
- sie erreicht heutzutage auch die Wirkungsgrade der monokristallinen Variante, so dass diesbezüglich kein Qualitätsunterschied mehr besteht (vgl. Hirschl PV-Machbarkeitsstudie) und
- sie verursacht einen geringeren (energetischen) Produktionsaufwand als die Mono-Zelle (vgl. z.B. Öko-Institut 2000).

Damit ist der Ansatz der multikristallinen Variante sowohl der Marktentwicklung entsprechend als auch der „progressivere“ Ansatz in Bezug auf wesentliche ökologische Vergleichswerte. Dennoch werden in der nachfolgenden Analyse an einigen Stellen auch Werte der neueren Dünnschichtzellen zum Vergleich angeführt, um besonders signifikante Unterschiede dieser technologisch wiederum sehr verschiedenen Zelltypen (bzgl. der Materialien und Umwelteigenschaften) zu verdeutlichen.

Abbildung 19: Anteile der Zelltechnologien am Weltmarkt von 1999 bis 2001



7.4 Vergleichende ökobilanzielle Analyse von PV-Modulen aus multikristallinen Silizium- und Farbstoffsolarzellen

In dieser Untersuchung geht es um den ökologischen Vergleich verschiedener PV-Technologien. Fokussiert wird im wesentlichen der oben ausgewählte Standardfall der multikristallinen Zellen im Vergleich zu nanotechnologiebasierten Anwendungen, von denen bislang nur die Farbstoffzelle eine Praxisrelevanz aufweist und von der einige Daten verfügbar sind.

Die vergleichende ökobilanzielle Analyse orientiert sich am Vorgehen und Aufbau der Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040, verbleibt jedoch aufgrund der zum Teil sehr unsicheren oder nicht verallgemeinerbaren Datenlage oft auf dem Niveau einer Abschätzung. Dies gilt insbesondere für den noch sehr ungenau untersuchten Fall der Farbstoffzellen, die sich in einer sehr frühen Produktentwicklungsphase befinden.

Bei der Festlegung des **Untersuchungsrahmens** einer vergleichenden Analyse von photovoltaischen Systemen sind die folgenden grundsätzlichen Aspekte zu beachten:

a) Welchen Einsatzbereich hat die Photovoltaik?

Hier lassen sich folgende Funktionen in Abhängigkeit vom Einsatzbereich unterscheiden, einerseits mit Blick auf die Stromnutzung, andererseits mit Blick auf wesentliche einsatzspezifische Eigenschaften:

- Stromerzeugung Netzstrom („Kraftwerksfunktion“)
- Stromerzeugung an Fassaden (Fassadenfunktionen: ggf. Dämmung, Design)
- Stromerzeugung für Gerätebetrieb
- Flexible Oberflächen (Wölbung etc.)
- Design (Transparenz, Farbe, Form etc.)

Die aufgeführten Eigenschaften stellen gleichzeitig unterschiedliche Anforderungen an eine Solarzelle oder ein Modul, die im Hinblick auf die Vergleichbarkeit zu beachten sind. Beispielsweise hängt die Frage der Höhe der Wirkungsgrade immer auch mit den Kosten und der zur Verfügung stehenden Fläche zusammen: die Anforderungen an die PV-Technologie für ein Großkraftwerk sind deutlich andere als die für eine spezielle Geräteversorgung.

Für die nachfolgende vergleichende Untersuchung gilt, dass auch die neue Farbstoffzelle für den Einsatz zur Stromproduktion als geeignet angesehen wird, wobei hier seitens der Entwickler zunächst eher der Fassadeneinsatz gesehen wird (z.B. ISE 2002).

b) Wie sehen die **Systemgrenzen** der untersuchten Produkte aus?

Hier ist zwischen produkt- bzw. anlagenbezogenen Systemgrenzen einerseits und lebenswegbezogenen Systemgrenzen andererseits zu unterscheiden:

- Für die **anlagenbezogenen Grenzen** wird angenommen, dass sich im wesentlichen nur die Generatoren, d.h. die PV-Module unterscheiden und alle anderen Systemkomponenten gleich und damit vernachlässigbar sind. Dies gilt auch für die Annahme typischer Einsatzorte und somit für die Vernachlässigung von diesbezüglichen Transporten. Zudem wird der Modulrahmen in allen Fällen weggelassen

bzw. herausgerechnet, da er eine meist optionale und bei beiden Modulen vorkommende Komponente ist.

- In Bezug auf den **Lebensweg** sollte im Grunde gelten, dass alle wesentlichen Phasen Beachtung finden. Bei der Untersuchung von PV-Modulen steht allerdings bislang primär der **Produktionsprozess im Vordergrund**. Für die **Gebrauchsphase** wird im allgemeinen davon ausgegangen, dass keine relevanten Material- und Energieflüsse sowie Emissionen (z.B. durch Auswaschung) entstehen (vgl. hierzu auch weitere Ausführungen an späterer Stelle). Gelegentliche Reinigungen dürften bei PV-Anlagen zwar stattfinden, hierfür finden sich jedoch keine brauchbaren Angaben in der Literatur.³⁵ Am Ende der Nutzungsdauer kann Deponierung, thermische Verwertung oder Recycling stattfinden; hier verfolgen die Studien zum Teil sehr unterschiedliche Ansätze. Daher wurde ein einheitliches Profil wie folgt angesetzt: da es in der Praxis noch kein industrielles Modulrecycling gibt, wird hier auch keinerlei Recycling berücksichtigt (dies ist auf einfache Weise ohnehin nur für den Rahmen möglich, der in unserer Betrachtung jedoch entfällt, s.o.). Weitere Ausführungen zum Stand des Recyclings bei den kristallinen Modulen erfolgt an späterer Stelle.

Als einheitliche Bezugsbasis bzw. **funktionelle Einheit** werden alle berechneten Angaben in der Regel auf **eine kWh elektrischen (Solar-)Strom** umgerechnet. Hierbei ist einerseits zu berücksichtigen, dass die Einheiten von Daten in diversen Studien sehr unterschiedlich sind. Häufig wird beispielsweise als Bezug ein Quadratmeter aktive Zellenfläche (oder Modulfläche) angegeben oder aber die Leistung in W_p oder kW_p , oder bei energiebezogenen Daten auch thermische kWh oder Primärenergieeinheiten in Megajoule (MJ). Bei Umrechnungen wurden daher jeweils die Annahmen, die hinter den gewählten Einheiten stehen, sorgfältig analysiert und in die Berechnungen einbezogen.

Die Analyse von Umweltwirkungen kann hier nicht in einer kompletten Darstellung einer vollständigen Liste der Wirkungskategorien erfolgen (wie z.B. nach: Ankele 2002, UBA 1999, siehe auch allg. Einführung). Die Umweltwirkungen werden im wesentlichen anhand folgender Aspekte bzw. z.T. auch Indikatoren behandelt:

- Treibhauseffekt: dargestellt durch CO_2 -Emissionen
- Ressourcenbeanspruchung / Ressourcenknappheit einzelner kritischer Materialien
- Toxizitäten einzelner kritischer Materialien bzw. Emissionen
- Versauerung: dargestellt durch SO_2 - und NO_x -Emissionen

³⁵ In der Regel sind die Anlagen so (schräg) angebracht, dass sich eine Selbstreinigung ergibt; zudem werden die Oberflächen zunehmend schmutzabweisend beschichtet.

7.5 Sachbilanzen

Für den Bereich der kristallinen und der Dünnschichtzellen wurden im Laufe des letzten Jahrzehnts einige ökobilanzielle Untersuchungen durchgeführt und mehrere Studien veröffentlicht. Dabei greifen die meisten der Studien allerdings auf Datenmaterial von nur 1-2 umfangreicheren Untersuchungen zurück (wesentlich: Hagedorn/Hellriegel 1992) und schreiben diese z.B. mit Annahmen zum technischen Fortschritt in die Zukunft fort (zum Sachverhalt der Datenquellen auch Alsema 1996, S. 8).

Ein wesentlicher Schwerpunkt in der Debatte um die Umweltbewertung von Photovoltaik war ursprünglich die Energiebilanz und damit Fragen nach dem Aufwand für die Herstellung und seiner Relation zum Anlagenenertrag. Die unterstellte negative Energiebilanz war eine generelle Kritik an der PV. Dies ist jedoch bereits seit Beginn der 1990er Jahre durch mehrere Studien widerlegt, in denen gezeigt werden konnte, dass bereits vor mehr als 10 Jahren eine positive Energiebilanz bestand und diese unter heutigen Produktionsbedingungen und Produktqualitäten weiter deutlich verbessert werden konnte. (Übersichten hierzu in Pearce 2002, Knapp/Jester 2000).

Da für die energetische Bilanzierung im wesentlichen die mengenmäßig relevanten Anteile zählen, liefern diese Analysen dementsprechend vergleichsweise unvollständige Angaben zur Sachbilanz. Allerdings liegen einzelne Untersuchungen zu Umweltbelastungen von PV vor, die recht vollständige Sachbilanzen für kristalline und teilweise auch Dünnschicht-Zellen liefern (basierend auf speziellen Herstellungsverfahren, siehe hierzu z.B. Hagedorn 1992, Wagener 1993). Aber es wird in keinem Fall bisher von einer „vollständigen“ Erfassung gesprochen, und insbesondere die Bewertung der Bilanzdaten ist aufgrund der Vielfalt der Stoffe noch unvollständig (ebenda).

Nachfolgend werden für die Sachbilanz die Stoffe und Stoffflüsse sowie die Energieverbräuche der Modulproduktionen aufgeführt, wobei auf jeweils vorhandenes Sekundärmaterial zurückgegriffen wird. Es werden Materiallisten angegeben und Energieverbräuche und Emissionen aufgeführt. Hierbei sind prozessbedingte Emissionen von denjenigen zu unterscheiden, die durch den Primärenergieeinsatz zur allgemeinen (vorgelagerten) Stromerzeugung entstehen.

Es wurde versucht, eine einheitliche Datenbasis sicherzustellen, wobei die Ergebnisse aus den einzelnen Quellen zum Teil leicht modifiziert werden mussten. Die Daten für die multikristalline und die Farbstoffzelle entstammen im wesentlichen den folgenden Quellen:

- Im Fall der Farbstoffzelle ist dies die Studie von Greijer et al. (2001), was darauf zurückzuführen ist, dass bislang erst diese eine Untersuchung mit den geforderten Daten und Informationen zur Farbstoffzelle vorliegt.
- Im Fall des multikristallinen Moduls wurde eine Studie von Phylipsen/Alsema (1995) ausgewählt, die sich einerseits auf die umfassendsten Daten stützt, die bislang erhoben wurden (Hagedorn 1992), diese zudem aktualisiert und darüber hinaus eine gute Datenaufbereitung zur Verfügung stellt.

Für die Vergleichbarkeit der beiden Datensätze sind einheitliche Systemgrenzen (siehe auch Ausführungen weiter oben) bzw. deren nachträgliche Vereinheitlichung wichtig. Dies gilt für alle nachfolgenden Untersuchungsbestandteile der ökobilanziellen Analyse (Tabelle 14).

Tabelle 14: Untersuchungsbestandteile der ökobilanziellen Analyse

Sachbilanz	Energiebilanz
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Materialien ▪ prozessbedingte Emissionen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kumul. Energieverbrauch ▪ energiebedingte Emissionen ▪ Energetische Amortisationszeit

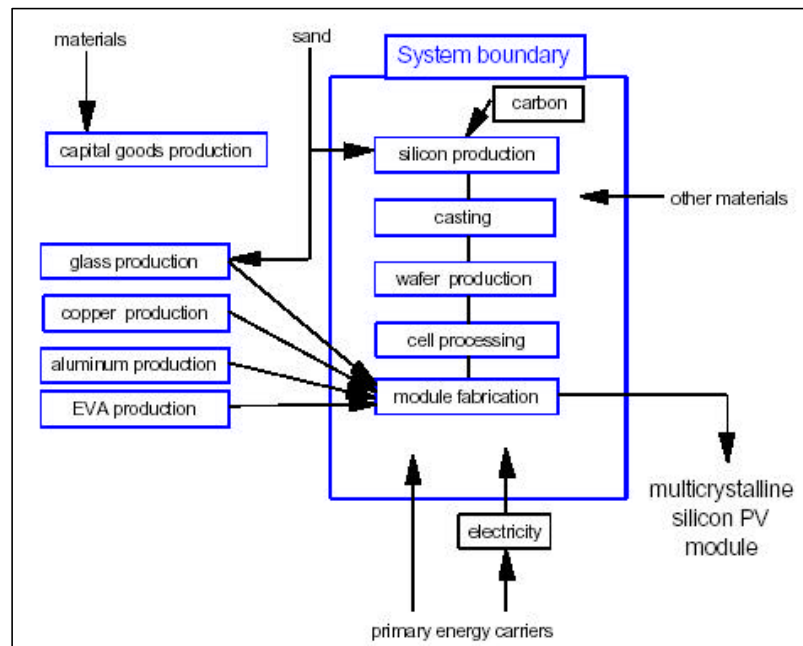
Für die Bestimmung der prozessbedingten Emissionen gelten die Systemgrenzen der Materialbilanz für die Herstellung eines Moduls, wie in der nachfolgenden Abbildung am Beispiel für das multikristalline Modul dargestellt. Bei der Energiebilanz hingegen werden alle relevanten Stoffe bzw. die Energieverbräuche für ihre Herstellung mit einbezogen (vgl. Abbildung 21, ebenfalls multikristallines Si-Modul). Aus den Energiebilanzen liegen im wesentlichen nur die zentralen bzw. quantitativ bedeutenden Leit-Emissionen vor (CO₂, SO₂, NO_x).

Die energetische Bewertung bezieht in der Regel drei wesentliche Kenngrößen ein:

- Kumulierter Energieverbrauch / -aufwand (KEA): Summe der energetischen Aufwendungen für ein Produkt von der Herstellung über die Nutzung bis hin zur Entsorgung. Hierin stecken sowohl die Energie, die für den Produktionsprozess nötig ist, als auch diejenige zur Gewinnung der eingehenden Rohstoffe. Aus dieser Kumulierung lässt sich der gesamte energetisch bedingte Primärenergieaufwand und daraus abgeleitet die entsprechenden Emissionen bestimmen.
- Energetische Amortisationszeit: in Anlehnung an den ökonomischen Terminus ist dies die Betriebsdauer, in der ein Energiesystem soviel nutzbare Energie wie sein kumulierter Energieverbrauch abgibt. In der Literatur erfolgen oft verschiedene Ansätze bezüglich der nutzbaren, erzeugten Solarenergie. Wir werden nachfolgend die Amortisationszeit aus dem Verhältnis des in kWh elektrisch umgerechneten Primärenergieaufwand (aus dem KEA) und der in Deutschland durchschnittlich geernteten Solarstrommenge errechnen, beides pro kWp und Jahr.³⁶ Entscheidend ist bei der Bildung des Faktors, dass die beiden zu vergleichenden Energieformen gleich sind – in unserem Fall jeweils die Nutzenergieform Strom.
- Energetischer Erntefaktor: Quotient aus der gesamten Nettoenergieerzeugung einer Anlage während ihrer gesamten Betriebsdauer und ihrem kumulierten Energieverbrauch. Die Berechnung erfolgt wie bei der Amortisationszeit auf der Basis gleicher Energieformen.

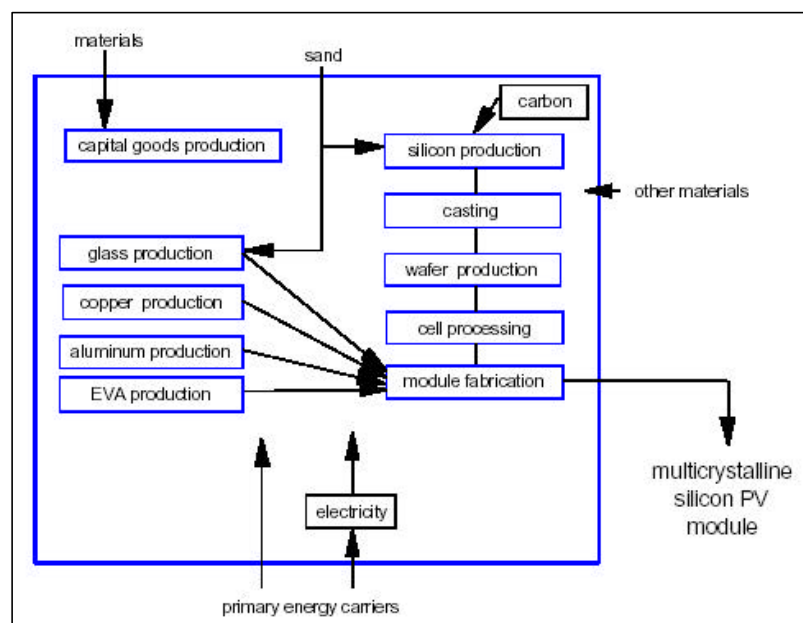
³⁶ Der Durchschnittswert basiert auf empirischen Daten und beinhaltet damit auch die gegenwärtig am Markt gängigen Modultypen (fast ausschließlich kristalline Si-Module) (Vgl. hierzu Hirschl et al. 2002).

Abbildung 20: Systemgrenzen für Materialbilanzanalyse



Quelle: Alsema 1996, S. 10

Abbildung 21: Systemgrenzen für Energiebilanzanalyse



Quelle: Alsema 1996, S. 10

7.5.1 Multikristallines Modul

7.5.1.1 Stoffliche Bilanzierung

Der Produktionsprozess von klassischen Si-Modulen verläuft in Stufen wie in den obigen Abbildungen gezeigt. In Bezug auf die technischen Verfahren zur Herstellung der benötigten Vorprodukte Solar-Silizium und Wafer ist festzustellen, dass es sich hierbei im wesentlichen um etablierte und beherrschte Verfahren der chemisch-physikalischen Verfahrens- und Produktionstechnik handelt, jeweils vergleichbar mit Prozessen aus der Chip-Herstellung.

Die Darstellung der Systemgrenzen verdeutlicht, dass die Erfassung der stofflichen Flüsse, die Herstellung des Solarmoduls und somit die damit verbundenen Materialien fokussiert, d.h. im wesentlichen:

- : Silizium und Siliziumproduktion,
- : Metalle wie Silber, Aluminium, Kupfer,
- : Säuren und alkalische Chemikalien und
- : mengenrelevante Produkte wie Glas und EVA.

Nicht betrachtet werden hier die Vorketten und Vorprodukte von Glas, Kupfer, Aluminium sowie diejenigen der Kapitalgüter, d.h. der Produktionsmaschinen. Das gleiche gilt auch für die sekundären Energieträger wie Koks oder Strom. All diese Vorprodukte und Rohstoffe fließen jedoch bei der energetischen Bilanzierung mit ein (vgl. Abbildung 21).

In Tabelle 16 werden nun alle relevanten Materialien gelistet, die während des Lebenszyklus eines multikristallinen Moduls eine Rolle spielen. Die Angaben sind in kg pro Quadratmeter aktiver Zellenfläche eines Moduls. Als Status quo werden die empirisch vergleichsweise sicheren Daten der Studie aus dem Jahr 1995 verwendet. Zum Vergleich werden hochgerechnete Daten für eine technische Entwicklung in etwa 2005 verwendet, bei der die Autoren technischen Fortschritt auf der Basis kommerziell verfügbarer Technologien zu Grunde gelegt haben. Aufgrund vereinzelt abweichender Verfahren erklären sich teilweise unterschiedliche Datensätze in der Sachbilanz und den Emissionen.

Die wesentlichen Unterschiede der beiden Produktionswege, die den zwei Datenreihen zu Grunde liegen, werden in Tabelle 15 aufgezeigt.

Tabelle 15: Technologische Unterschiede der beiden Fälle „Status quo“ und „Trend“

Process/Parameter	Status quo (1995)	Trend (~2005)
silica reduction	carbothermic	carbothermic
high purity Si-production	UCC-process	UCC-process
casting	conventional casting	improv. convent. casting
wafer size	10 x 10 cm	12.5 x 12.5 cm
wafer thickness	300µ	200µ
wafering loss	300µ	200µ
emitter back etch	no	yes
back surface field	yes	yes
back side metal coverage	100%	100%
front side metal coverage	10%	7%
EVA foil thickness	0.5 mm	0.5 mm
module size	0.44 m ²	0.65 m ²
module life time	20 years	25 years
encapsulated cell efficiency	13%	16%

Quelle: Philipsen/Alsema 1995, table 5.1

Tabelle 16: Materialbedarf multikristallines Modul

Prozess	Material	Status quo (1995)	Tech. Fortschritt (~2005)
		kg/m ²	kg/m ²
Si-production	quartz	5,160	3,120
silica-reduction	charcoal	0,720	0,410
	low ash coal	1,090	0,610
	cokes	0,720	0,410
	wood scrap	2,540	1,450
high purity Si-production	silane tetra chloride	0,250	0,078
casting	argon gas	0,670	0,390
wafering	mineral oil	0,620	0,670
	SiC	1,340	0,860
etching/texturing	NaOH	0,610	
	H ₂ SO ₄	0,450	
	KOH		0,870
	HNO ₃		0,042
emitter formation	POCL ₃	0,006	0,006
	HF	0,120	0,074
	CF ₄	0,007	0,006
metallization	Al/Ag-paste	0,053	0,053
	Ag-paste	0,011	0,007
passivation/ARC	SiH ₄	0,002	0,002
	NH ₃	0,009	0,009
	N ₂	0,100	0,100
module assembly	Sn-coated Cu-strips	0,050	0,032
	EVA-foil	1,210	1,140
	chem. hardened glass	8,680	8,440
	Tedlar/Al/Tedlar	0,170	0,160
	polyester	1,230	0,780
	silicon adhesive	0,110	0,068
framing	aluminum	2,800	2,100
	polysulphide elastomer	0,740	0,700

Quelle: Philipsen/Alsema 1995, table 3.1

Die Unterschiede in den Mengenangaben der Sachbilanz vom Status quo zum zukünftigen Verfahren sind vorrangig auf die veränderten Wafer- und Modulmaße zurückzuführen: die abnehmende Dicke vermindert den Quartz und Carbon-Bedarf, die größere Fläche führt zudem zu geringerem SiC- und Kupferverbrauch. Die deutlich dominierenden Materialien sind Glas, EVA, für den Fall einer Rahmung auch noch Aluminium.

Weitergehende Bewertungen der Sachbilanz bzw. einzelner Positionen erfolgen im Rahmen der Wirkungsabschätzung.

7.5.1.2 Emissionen

In Tabelle 17 sind die **prozessbezogenen** Emissionen aufgelistet, aufgeschlüsselt nach den einzelnen Herstellungsphasen. Die Einheit der Daten entspricht hier der Quelle und ist zum Vergleich der Größenordnung einheitlich in kg pro m² angegeben, wobei die Bezugsgröße Quadratmeter die aktive Zellenfläche meint.³⁷ Die Emissionen sind je nach Eintrags-Medium aufgeschlüsselt: Luft, Wasser, feste und sonstige Abfälle. Für die Zeit nach der Nutzungsdauer des Moduls wird eine Entsorgung über den normalen Siedlungsabfall angenommen,

³⁷ Die aktive Zellfläche unterscheidet sich mit folgenden Faktoren von der Modulfläche (Unterschied = Teilfläche ohne Solarzellen): 1 m² Zellfläche entspricht 1,22 m² im heutigen und 1,16 m² im zukünftigen Fall.

da derzeit noch kein Recyclingverfahren für Module existiert und durch den Eintrag keine wesentlichen Probleme für Umwelt oder Gesundheit gesehen werden (Hagedorn/Hellriegel 1992, siehe hierzu auch spätere Ausführungen).

Tabelle 17: Lebenswegbezogene Emissionen eines multikristallinen Moduls

Prozess	Emission	Status quo	Trend
		kg/m ²	kg/m ²
Emissionen in Luft			
Mining and refining	respirable dust	0,00003	0,00002
silica reduction	CO ₂	10,9	4,93
	SO ₂	0,051	0,023
high purity Si-production	Si-powder	0,049	0,015
Casting	argon gas	0,67	0,39
passivation/ARC	N ₂	0,1	0,104
metallization	solvents	0,015	0,01
	CO ₂ + H ₂ O	0,003	0,003
module assembly	cross linking products	p.m.	p.m.
Emissionen in Wasser			
high purity Si-production	CaCl ₂	0,35	0,1
etching/texturing	Na ₂ SO ₄	0,37	
	KCl		0,77
	NaNO ₃		0,053
emitter formation	NaH ₂ PO ₄	0,004	0,004
	NaOCl	0,006	0,006
	NaF	0,025	0,016
module cleaning	detergents	p.m.	p.m.
Fester Abfall			
silica reduction	SiO ₂	0,015	0,006
high purity Si-production	SiO ₂	0,093	0,028
contouring	contaminated Si	0,29	0,11
emitter formation	CaF ₂	0,22	0,14
cell testing	rejected cells (cells/m ²)	5	3,2
module production	EVA foil	0,053	0,052
	silicon adhesive	0,003	0,002
framing	polysulphide elastomerf	0,059	0,056
module testing	rejected moduls	0,11	0,11
PV system decommissioning	module waste	12	10,8
Sonstiger Abfall			
wafering	Si (in mineral oil)	0,73	0,73
	SiC	1,34	1,34
	mineral oil	0,62	0,62

Quelle: Philipsen/Alsema 1995, table 3.2

Man sieht deutlich, dass der höchste Wert der prozessbezogenen Emissionen durch die CO₂-Emissionen gegeben ist, die aus dem Prozess der Siliziumherstellung entstehen. Zum Vergleich ist hier anzuführen, dass bei der Herstellung von amorphen Siliziummodulen (a-Si) im Vergleich zum ersten Fall etwa 200 mal weniger CO₂ entsteht (Engelenburg et al. 1992).

Zusätzlich zu den prozessbezogenen Emissionen sind diejenigen zu betrachten, die durch den Energieverbrauch entstehen. Von diesen **energiebezogenen Emissionen**, d.h. den durch den kumulierten Energieverbrauch verursachten Emissionen liegen für das multikristalline Modul nur die Daten der wesentlichen Leitindikatoren der

Tabelle 18: Energiebezogene Emissionen

<i>Emissionen in Luft</i>	PV multikr. Status quo	PV multikr. Trend	Vergleich: Durchschnitt Stromversorg.*
	kg/GWh _{el}	kg/GWh _{el}	kg/GWh _{el}
CO ₂	167.000	31.000	666.000
SO ₂	315	58	1.210
NO _x	370	21	1.720

* Niederländische Werte Quelle: Philipsen/Alsema 1995, 51

Luftemissionen vor, wie sie in der Tabelle 18 aufgeführt sind. Bei der Bestimmung dieser Daten wurde davon ausgegangen, dass die Module über eine Nutzungsdauer von 15 Jahren einer Bestrahlung von 1.000 kWh pro m² und Jahr ausgesetzt sind. Zum Vergleich sind durchschnittlichen Emissionsdaten aufgeführt, die für die niederländische Elektrizitätsversorgung gelten, deren Struktur und Emissionsfaktoren den Berechnungen zugrunde lagen. Auch wenn die vergleichbaren Daten für Deutschland oder den europäischen Mix von den niederländischen absolut betrachtet abweichen, so zeigt der Vergleich dennoch gut die Relation, d.h. das deutlich günstigere Verhältnis der PV gegenüber dem durchschnittlichen Energiemix auf.

7.5.1.3 Energetische Bilanz

Für die energetische Bilanzierung wird der oben definierte kumulierte Energieaufwand bestimmt, bei dem sowohl die direkten Prozessenergien als auch alle indirekt zurechenbaren Energieverbräuche (von Beleuchtung bis Maschinen) sowie die Vorprodukte (Glas, EVA etc.) mit einfließen. In unserer Betrachtung der Energiebilanz des Moduls bleibt lediglich der Rahmen außen vor, da dieser Produktbestandteil optional und bei allen Modulen vergleichbar ist. Er wird jedoch hier separat ausgewiesen.

Da im Rahmen von Untersuchungen zur Umweltbilanz meistens die Energiebilanz fokussiert wurde, liegen hierzu auch die meisten Studien und Ergebnisse vor. Allerdings sind auch hier die Systemgrenzen und die angenommenen oder untersuchten Verfahren nicht immer klar angegeben, was einen Vergleich der Ergebnisse erschwert. Die Tabelle 6 zeigt einige der kumulierten Energieverbrauchswerte, die für die Produktion von multikristallinen Solarmodulen ermittelt wurden.

Tabelle 19: Vergleich von kumulierten Energieverbrauchswerten multikristall. Module

Studie / Autor	Hagedorn 1992**	Wagner/ Pfisterer 1993	Eversheim et al. 1998	Knapp/ Jester 2000	Philipsen/ Alsema 1995
MJ / qm*	5.735	3.065	4.813	5.757	3.490

* Primärenergieverbrauch bezogen auf die aktive Solarzellenfläche

** Die Daten stammen aus Untersuchungen im Zeitraum 1989-1992. Da diese Ergebnisse zu den Fundiertesten gehören, sind sie auch bei einigen der anderen Autoren zum Teil mit eingeflossen.

Die Abweichungen in den Ergebnissen der Studien sind auf verschiedene Ursachen zurückzuführen, u.a. die Aktualität der Daten und (daher) zum Teil unterschiedliche Herstellungsverfahren, die Genauigkeit der Erhebung etc. Zudem ist nicht immer klar, wie die Produkte

im Detail aufgebaut sind (wesentlich: mit oder ohne Rahmen) und welche Lebensweg-Phasen in welcher Form einbezogen wurden (z.B. mit oder ohne Entsorgungsphase / Recycling von einzelnen oder mehreren Komponenten).

Nachfolgend verwenden wir aus Gründen der Konsistenz wiederum die Daten von Philipsen/Alsema (1995), die zum einen auf den bislang fundiertesten Erhebungen aufbauen und diese zum anderen in transparenter Weise um aktuelle Entwicklungen ergänzt haben. In der Tabelle 20 sind die prozessbezogenen Energieverbräuche aufgeführt, in der nebenstehenden Tabelle 21 die jeweiligen Energieverbräuche, die den Inputmaterialien wie Glas, EVA etc. zuzuordnen sind.

Tabelle 20: Prozessbezogene direkte Energieverbräuche eines multikristallinen Moduls

Prozessschritt	Status quo		Trend	
	MJ/m ²	%	MJ/m ²	%
mining and refining	1,44	0,1%	0,72	0,1%
silica reduction	216	11,7%	104,4	12,0%
hp-Si production	676,8	36,8%	399,6	46,1%
casting/portioning	194,4	10,6%	108	12,4%
wafering	72	3,9%	72	8,3%
cell processing (inc. cell testing)	583,2	31,7%	126	14,5%
module production (excl. framing)	97,2	5,3%	57,6	6,6%
total	1839,6	100,0%	867,6	100,0%

Quelle: eigene Berechnungen, Daten nach Philipsen/Alsema (1995)

Die Werte zeigen deutlich die energieintensiven Prozesse, die bei der Herstellung eines Moduls aus kristallinen Solarzellen anfallen: dies ist mit Abstand die Siliziumherstellung, aber auch die Zellenproduktion. Bei der Zellenproduktion liegen allerdings, wie die Daten für den Fall II aufzeigen, sehr große Reduktionspotenziale. Dies wird auch durch aufgeschlüsselte Daten von Eversheim et al. bestätigt, dessen Ergebnisse ebenfalls verdeutlichen, dass der wesentliche Energiebedarf für die Solar-Siliziumherstellung anfällt.

Tabelle 21: Energieverbräuche von Vorprodukten eines multikristallinen Moduls

Material	Status quo		Trend	
	MJ/m ²	%	MJ/m ²	%
carbon	75,6	23,6%	43,2	17,1%
Cu strip	5,04	1,6%	2,88	1,1%
EVA foil	90	28,1%	79,2	31,4%
chem. hardened glass	129,6	40,4%	111,6	44,3%
Tedlar	19,44	6,1%	16,92	6,7%
total materials (excl. frame)	320,4	100,0%	252	100,0%
Aluminum	630	34,2%	432	23,5%

Quelle: eigene Berechnungen, Daten nach Philipsen/Alsema (1995)

Tabelle 22: Primärenergiebedarf für gesamte Solarmodulproduktion

	MJ/m ²	in %
Rohsiliziumherstellung (metallurgic grade)	1.284	26,7%
Reinsiliziumherstellung (electronic grade)	1.844	38,3%
Waferherstellung	579	12,0%
Zellenherstellung	613	12,7%
Modulherstellung	493	10,2%
Summe	4.813	100,0%

Quelle: Eversheim et al. 1998, S. 3

7.5.2 Farbstoffsolarzelle

Die Daten zur Sachbilanz der Farbstoffzelle sind von deutlich geringerer Qualität und Aufbereitung als die der kristallinen Variante. Dies ist natürlich darauf zurückzuführen, dass Farbstoffzellen sich noch nicht in der Phase industrialisierter Produktion befinden und somit nicht über alle Prozesse Daten existieren können. Daher basieren die wenigen vorhandenen Daten auf vielen Abschätzungen und Annahmen und sind zudem nicht in der Form aufgeschlüsselt, wie dies bei den kristallinen Varianten der Fall ist. Die Angaben zur Sachbilanz, die wir hier maßgeblich verwenden, stammen aus Greijer (2001), die für die Materialbilanz der Farbstoffzelle hauptsächlich auf Kay/Grätzel 1996 zurückgreifen und für die Energiebilanz Angaben von Petersson et al. (1998) verwenden.

Ein zentraler Vorteil der Farbstoffsolarzellen liegt in der Verwendung vergleichsweise kostengünstiger Herstellungstechnologien - insbesondere im Vergleich zur teuren und energieaufwändigen Herstellung von Solarsilizium. Ein Hauptverfahrensschritt ist das Siebdruckverfahren, welches als industriell beherrscht bezeichnet werden kann. Eine ausführlichere Darstellung zum Herstellungsverfahren, eine Übersicht der einzelnen Schritte sowie eine Darstellung zum gegenwärtigen Entwicklungsstadium befindet sich im Anhang (Vorstudie ISE 2002).

7.5.2.1 Stoffliche Bilanzierung

Die Farbstoffsolarzelle besteht im wesentlichen aus einer nanokristallinen Titandioxid-Elektrode mit einem organometallischen Farbstoff. An dem Farbstoff findet die primäre Lichtenergiekonversion statt.

Die in der nebenstehenden Sachbilanz aufgeführten Materialien weisen folgende Eigenschaften und Funktionen auf:³⁸

- Der nanokristalline Titandioxid-Halbleiter fungiert als (Front-)Elektrode, an der der lichtaktive Farbstoff adsorbiert ist.
- Als Gegenelektrode ist hier eine kohlenstoffbasierte Schicht aufgeführt. (Modell nach Kay et al. 1996). Es werden allerdings auch Platinelektroden verwendet (vgl. ISE 2002).
- Als Elektrolyt, der die nanoporöse Schicht durchdringt, fungiert eine Iodid-Lösung, in der als Lösungsmittel derzeit verschiedene Nitrile eingesetzt werden.
- Das eingesetzte Glas wird zusätzlich beschichtet (transparent leitendes Oxid). Wie bei den konventionellen Modulen werden auch bei den Farbstoffmodulen

Tabelle 23: Materialbilanz Farbstoffzellenmodul

Komponente	Material	Menge g/m ² *
Substrat	Glas, 2 mm dick	7145,5
	Zinn	2,7
Photoelektrode	Titandioxid	19,5
Farbstoff	Ruthenium	0,07
Poröser spacer	Titandioxid	19,4
	Zirconiumoxid	1,8
Elektrolyt	Acetonitril	31,2
	Iodine	2
Poröse Gegenelektrode	Kohlenstoff	91,7
	Titandioxid	16,2
Obere Abdeckung	Polyester	100,1
	Aluminiumfolie	96,5
	Polyethylene	28,1
Junction Box	Polyester	489
	Silikon	42
Elektrische Kabel	PVC	72
	Kupfer	800
	Zinn	0,16
Rahmen	Aluminium	2127,7
Summe		11,1 kg

*) Die Modulfläche pro 1 m² aktiver Solarzellenfläche entspricht 1,43 m².

Quelle: Greijer (2001), Tabelle 1

³⁸ Zur näheren Beschreibung von Funktionsweise und Aufbau der Farbstoffzelle siehe im Anhang ISE 2002.

Zellen mit zwei Glasplatten (Front- und Rückglas) und mit einem Glas und einer (rückseitigen) Schutzschicht (vgl. in der Tabelle: top cover) hergestellt.

- Das zentrale Element der Zelle, namensgebend und gleichsam verantwortlich für die Entdeckung eines neuen Funktionsprinzips ist der **Farbstoff**.

Der Durchbruch für die Farbstoffsolarzelle kam durch die Entdeckung eines metalloorganischen Ruthenium-Komplexes, der in Verbindung mit nanostrukturierten TiO₂-Elektroden gebracht wird. Die meisten heutzutage verwendeten (bzw. erforschten) Farbstoffsolarzellen bauen auf Ruthenium-Komplexen auf.³⁹ Der am meisten verwendete Farbkomplex ist N3 (cis-RuL₂(NCS)₂), mit welchem Wirkungsgrade von 10% erreicht wurden. Ein neuerer, ebenfalls auf Ruthenium basierender Farbstoff ist „black dye“⁴⁰, der den bisherigen Effizienzrekord von 10,4% hält (Hagfeld und Grätzel 2000).

Vereinzelt wird auch mit Farbstoffkomplexen experimentiert, die kein Ruthenium enthalten. So hat Hara et al. (2001) ein Coumarin-Derivat (5,6-benzo-[a]-pyrone) verwendet, mit dem ein Wirkungsgrad von 5,6% erzielt wurde. Kay und Grätzel (1993) nutzten Cu-2-a-Oxymesoisochlorin und erzielten damit einen Wirkungsgrad von 2,6%. Der Ruthenium-Komplex bietet allerdings offensichtlich bis jetzt (in verschiedenen Varianten) die besten Wirkungsgrade und wird deshalb für die Farbstoffsolarzelle zumindest in näherer bis mittlerer Zukunft seine zentrale Bedeutung behalten.

7.5.2.2 Emissionen

Die Daten von Greijer et al. (2001) zu den Emissionen liegen leider nicht in aufgeschlüsselter Form nach Prozessschritten und energiespezifischem Energieverbrauch, sondern nur in zusammengefasster Form vor. Zudem werden nur die Emissionen in Luft genannt und hierbei ist nicht transparent, mit welchen spezifischen Emissionsfaktoren die Werte bestimmt wurden. Damit lässt sich nicht zuordnen, welche Emissionen produktionsbedingt entstehen und welche auf den allgemeinen Energiemix zurückzuführen sind.

Die Tabelle 24 zeigt die von Greijer et al. aufgeführte Spannweite an Emissionswerten für die Farbstoffzelle (2001, S. 35), die im wesentlichen auf eine angenommene Spanne des kumulierten Energieaufwands zurückzuführen ist: dieser wurde zwischen 100 kWh und 280 kWh für einen Quadratmeter aktive Zellfläche des Moduls angesetzt. Daneben spielen aufgrund der Darstellung der Emissionen pro kWh Solarstrom alle ertragsrelevanten Daten eine Rolle, d.h. der Zell- bzw. Modulwirkungsgrad sowie die gesamte Systemperformance (Performance Ratio), die technische Lebensdauer der Anlage und natürlich die Strahlungsbedingungen des angenommenen Standorts.

Tabelle 24: Durch Farbstoffzelle verursachte Emissionen in Luft

Emission	Einheit pro kWh	Spanne
CO ₂	g	19-47
SO ₂	mg	89-230
Zinn	mg	7-17
Aromate	mg	0,17-0,47
NOx	µg	40-100
Ni	µg	18-49
Blei	µg	25-46
Kupfer	µg	5-12
Mangan	µg	1,6-4,5
Quecksilber	µg	0,4-1,2
Cadmium	µg	0,3-0,8

Quelle: Greijer et al. 2001, S. 35

³⁹ Die allgemeine Struktur ist mit ML₂(X)₂ angegeben, wobei M für Ruthenium (oder auch Osmium), L für 2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylsäure und X für Halide, Cyanide oder thiocyanide steht (Hagfeld und Grätzel 2000, Sauv e et al. 2000).

⁴⁰ Genaue Bezeichnung: tri(cyanato)-2,2',2''-terpyridyl-4,4',4''-tricarboxylate-ruthenium(II).

Berechnet wurden von Greijer et al. Varianten von Wirkungsgraden zwischen 7% und 12% (aktive Zellfläche). Dabei wurde angenommen, dass die Produktion von Zellen mit höherem Wirkungsgrad auch einen höheren Energieverbrauch bedeutet. Allerdings wirkt diesem Effekt die höhere Solarstromausbeute bei steigendem Wirkungsgrad entgegen. Die Stromausbeute wurde dabei aufgrund einer (sehr) hoch angesetzten Lebensdauer von 20 Jahren (bei konstantem Wirkungsgrad) und einem „bestmöglichen“ Standort in der Sahara sehr hoch gewählt. Diese Annahmen wurden für den späteren Vergleich des Farbstoffzellenmoduls mit dem multikristallinen Standardmodul auf einen Normalfall umgerechnet und die Daten mit denen aus dem anderen Fall vereinheitlicht.

7.5.2.3 Energetische Bilanz Farbstoffzelle

Zur energetischen Bilanz liegt, wie bereits erwähnt, nur eine nicht näher aufgeschlüsselte Spannweite des kumulierten Energieaufwands vor: Greijer et al. bestimmten den (primär-energiebasierten) Energieverbrauch für die Produktion von Farbstoffzellen **zwischen 100 und 280 kWh**.

Diese Spannweite stützt sich dabei einerseits auf Daten einer Studie über mögliche Produktionsprozesse bei Farbstoffzellen (Pettersson et al. 1998), zum anderen bezieht sie sich auf (eher empirisch abgeleitete) Daten von Produktionen verschiedener anderer Dünnschichtzellen bzw. -module, die sich in einer vergleichbaren Spannweite befinden (Alsema 1996 und van Brummelen 1994). In einer weiteren Studie von Ruseler (1999) wird ebenfalls ein Wert für den kumulierten Energieverbrauch zur Produktion von Farbstoffsolarzellen angegeben, der mit 90 kWh eher am unteren Ende des von Greijer et al. genannten Spektrums liegt. Da es jedoch auch zu diesem Wert keine näheren Aufschlüsselungen oder Erläuterungen einer möglicherweise empirischen Grundlage gibt, verwenden wir für die nachfolgenden Berechnungen das von Greijer et al. angegebene Spektrum.

7.5.3 Vergleich von multikristallinem und Farbstoffmodul

In diesem Abschnitt werden nun einige Daten des verfügbaren, marktgängigen Standardmoduls aus multikristallinen Solarzellen denen einer neuen Farbstoffzelle gegenübergestellt. Dies lässt sich aufgrund der Unvollständigkeit der beiden Datensätze nur sinnvoll mit den luftseitigen Hauptemissionen sowie den energiebezogenen Angaben durchführen. Daraus lassen sich einige grundsätzliche Aussagen ableiten.

7.5.3.1 Technische Parameter, Annahmen und Normierungen

Für die Gegenüberstellung der Daten wurden die Systemgrenzen zum Teil nachträglich angepasst, die zentralen Annahmen vereinheitlicht und als vergleichbare Grundeinheit alle Daten auf eine kWh (elektrisch) bezogen.⁴¹ Die Tabelle 25 stellt alle für die Berechnungen benötigten Daten für die beiden betrachteten Fälle des derzeitigen Status quo (bzw. theoretischen Status quo) und des technischen Trends für ein auf multikristallinen Zellen und ein auf Farbstoffzellen basierendes Modul dar. Als technischer Trend wird eine auf technischem

⁴¹ Bei der Nachberechnung von einzelnen Ergebnissen aus Datensätzen zur Farbstoffzelle fiel auf, dass in den Studien oftmals besonders progressive Annahmen getroffen wurden. Dies reichte von der Annahme einer Installation in der Sahara (Strahlungswert: 2190 kWh/m²/a) bis hin zur Annahme einer Langzeitstabilität der Zelle von 20 Jahren und einem Wirkungsgrad von bis zu 12%, oder der Annahme von Recycling, obwohl derzeit noch keinerlei flächendeckendes Recycling stattfindet. Derartige Annahmen sind für die Zukunft durchaus berechtigt. Es ist jedoch darauf zu achten, dass bei einem Systemvergleich keine ungleichen Parameter gesetzt werden, wenn diese für beide Systeme im Grunde gleich sein müssten. An diesem Grundsatz orientierte sich die hier durchgeführte Berechnung.

Fortschritt beruhende Weiterentwicklung von im wesentlichen bestehenden Technologien gesehen.

Tabelle 25: Technische Parameter und Annahmen für den Vergleich

	Multikristalline Solarzelle		Farbstoffsolarzelle	
	Status quo	Trend	Status quo	Trend
Modulwirkungsgrad	13%	16%	7%	9%
Lebensdauer (Jahre)	20	25	10	15
Solareinstrahlung (kWh/m ² a)	1700	1700	1700	1700
Performance Ratio	80%	85%	80%	85%
Effizienz für Stromerzeugung	35%	40%	35%	40%
KEA für Modulproduktion* (kWh/m ²)	970	400	100 - 280	70 - 200

* Empirische bzw. angenommene Werte für den kumulierten Energieaufwand (KEA), basierend auf Primärenergieverbräuchen.

Bei der multikristallinen Zelle kann aufgrund der langjährigen Produktions- und Praxiserfahrungen bei der Festlegung der Daten von einer vergleichsweise hohen (empirischen) Sicherheit ausgegangen werden. Dies betrifft die Angaben zum Wirkungsgrad und zur systemischen Performance Ratio für den gegenwärtigen, aber auch den prognostizierten Zustand etwa in 2005. Bezüglich der Lebensdauer liegen zwar noch keine so langen Zeitraumerfahrungen vor, bisherige Erfahrungen, Langzeittests und auch Garantien der Hersteller sind jedoch gute Indikatoren für die vergleichsweise hohe Sicherheit der Werte.

Für die Farbstoffzelle wurde ein Wirkungsgrad von 7% für einen gegenwärtigen bzw. „nahen“ Marktauftritt auf der Basis einer größeren Produktionsmenge angesetzt. Im Labormaßstab werden bereits 10% erreicht, und für einen größeren Zellmaßstab konnten 8% gezeigt werden (ISE 2002). Allerdings ist demgegenüber auch zu beachten, dass es derzeit noch keine Produktion in größerem, sondern nur im Demonstrationsmaßstab gibt. Es konnte erst ein kommerzieller Anbieter von Farbstoffsolarzellen und -modulen ermittelt werden, der Produkte mit einem Wirkungsgrad von 5% anbietet, der aber wohl ebenfalls noch nicht in einem größeren Maßstab produziert.⁴²

In Bezug auf die Lebensdauer ist zu konstatieren, dass sich die Performance der Zellen diesbezüglich verbessert und hier auch noch Potenziale und technische Lösungen gesehen werden. Allerdings liegen nach spezifischen Tests zur Langzeitstabilität die Zellen bislang erst bei einer Dauer von 3-4 Jahren, und dies bei einem abnehmenden Zellwirkungsgrad. Insofern ist der für den „nahen“ Marktauftritt angesetzte Zeitraum von 10 Jahren eine ambitionierte, aber andererseits auch eine praxisnahe Anforderung, ohne die die Zelle kaum eine Marktchance haben wird.

In Bezug auf die Strahlungsbedingungen wurde hier einheitlich der globale Durchschnitt gewählt. Bezüglich der Effizienz der Stromerzeugung, die den höchsten Anteil am gesamten Energieverbrauch ausmacht, wird in etwa der Wert der deutschen Stromversorgung angenommen, mit einer entsprechenden Verbesserung für die Zukunft.

⁴² Bei dem Anbieter handelt es sich um die australische STI, die Farbstoffsolarzellenmodule produziert; die Produktion läuft seit Mai 2001 nach einem Patent aus dem Grätzel-Labor; die Produktionsmengen und Herstellungsverfahren sind nicht bekannt.

7.5.3.2 Vergleich: Energiebilanz

Für den Vergleich zwischen dem multikristallinen und dem Farbstoffzellen-Modul wurden die oben aufgeführten vier Fälle für die Status quo und die Trenddaten berechnet. Dabei wurde beim Farbstoffzellen-Modul die Unsicherheit dahingehend berücksichtigt, dass für die angegebene Spannweite des kumulierten Energieverbrauchs der höchste (als konservativer, A) und der niedrigste Wert (B) berechnet wurden (angesetzte Energieverbrauchswerte siehe letzte Zeile). Somit ergeben sich wie in Tabelle 26 dargestellt sechs Ergebnisspalten.

Tabelle 26: Vergleich der Energiebilanzen

		Multikristalline Solarzelle		Farbstoffsolarzelle			
		Status quo	Trend	Status quo		Trend	
				S-A	S-B	T-A	T-B
KEA für Modulproduktion	kWh PE / m ²	970	400	280	100	200	70
Energieertrag	kWh _{el} / m ² a	177	231	95		130	
Energieertrag	kWh PE / m ² a	505	578	272		325	
Energieertrag über Lebenszeit	kWh _{el} / m ²	3536	5780	952		1951	
Energy Payback Time	Jahre	1,9	0,7	1,0	0,4	0,6	0,2
Erntefaktor		10,4	36,1	9,7	27,2	24,4	69,7

Das Ergebnis der Energiebilanz ist trotz der deutlich geringeren Wirkungsgrade und Lebensdauern in Gegenwart und Zukunft jeweils besser: Aufgrund des geringeren Energieverbrauchs in der Herstellung wird auch bei geringerer Stromausbeute eine noch kürzere energetische Amortisationszeit erzielt. Der gegenwärtige Status Quo des multikristallinen Moduls weist eine Energy Pay Back-Time von knapp 2 Jahren auf, demgegenüber liegt das Farbstoffmodul zwischen 0,4 und 1 Jahr. In der Zukunftsbetrachtung können sich die beiden Varianten jedoch annähern, wenn die Energieeinsparungen bei der klassischen Siliziumvariante schneller voranschreiten als die Wirkungsgrade und Langzeitstabilität bei den Farbstoffzellen. Die prognostizierten Zahlen liegen bei 0,7 Jahren für die multikristalline Zelle und einer Spanne von 0,2 bis 0,6 Jahren für die Farbstoffzelle. Dieser jetzige, energetische Vorsprung der neuen Farbstoffzelle kann weiter vergrößert werden, wenn sie ähnliche Effizienzgrade erreicht wie die derzeitigen klassischen Siliziumzellen.

7.5.3.3 Vergleich: Emissionen in Luft

Der Vergleich der Emissionsdaten ist von deutlich geringerer Aussagefähigkeit, da wesentliche Hintergründe zur Bestimmung der Emissionen in den Quellen fehlen. Da die Daten zur Farbstoffzelle jedoch die einzigen verfügbaren Daten derzeit darstellen, wird der Vergleich trotzdem an dieser Stelle aufgeführt und die Ergebnisse kurz kommentiert. Wie beim obigen Energiebilanzvergleich wurden auch hier wieder für die Farbstoffzelle Werte für die Spanne des möglichen kumulierten Energieverbrauchs berechnet.

Tabelle 27: Vergleich von Emissionen in Luft

		Multikristalline Solarzelle		Farbstoffsolarzelle			
		Status quo	Trend	Status quo		Trend	
				S-A	S-B	T-A	T-B
CO ₂	g/kWh _{el.}	73,46	13,73	149,32	53,33	52,05	18,22
SO ₂	mg/kWh _{el.}	150,80	28,22	739,30	264,04	257,71	90,20
NO _x	mg/kWh _{el.}	153,03	28,13	325,71	116,32	113,54	39,74
Si-powder	mg/kWh _{el.}	13,86	2,60				
Argon gas	mg/kWh _{el.}	189,48	67,47				
N ₂	mg/kWh _{el.}	28,28	17,99				
Aromatics	mg/kWh _{el.}	4,24	1,73	1,51	0,54	0,53	0,18
Ni	µg/kWh _{el.}			156,52	55,90	54,56	19,10
Zinn	µg/kWh _{el.}			56,87	20,31	19,82	6,94
Blei	µg/kWh _{el.}			27,24	9,73	9,49	3,32
Mangan	µg/kWh _{el.}			13,96	4,99	4,87	1,70
Kupfer	µg/kWh _{el.}			3,62	1,29	1,26	0,44
Quecksilber	µg/kWh _{el.}			3,65	1,30	1,27	0,45
Cadmium	µg/kWh _{el.}			2,61	0,93	0,91	0,32
KEA für Modulproduktion	kWh PE/m ²	970	400	280	100	200	70

Quelle: eigene Berechnung nach Daten von Phylipsen/Alsema 1995 und Greijer et al. 2001.

Die Emissionsdaten lassen sich im Grunde nur für die zuerst aufgeführten quantitativ bedeutenden Emissionen CO₂, SO₂ und NO_x bewerten. Die Werte für die freigesetzten Aromate lassen sich zwar ebenfalls vergleichen, hier fehlen aber genaue Angaben über die Art der chemischen Verbindungen. Die weiteren Emissionen, die für das multikristalline Modul genannt werden, sind durch den Siliziumherstellungsprozess bedingt und fallen somit bei der Farbstoffzelle nicht an. Bei den Emissionen, die seitens der Farbstoffzelle noch aufgeführt sind, ist unklar, ob diese prozessbedingt oder durch die allgemeine Energiebereitstellung anfallen. Sollte letzteres der Fall sein, so ist davon auszugehen, dass diese Emissionen in proportionaler Weise auch bei der multikristallinen Variante auftreten (in Phylipsen und Alsema (1995) nicht aufgeführt).

Die Ergebnisse weisen insgesamt tendenziell höhere Emissionen der Farbstoffzelle im Vergleich zur multikristallinen Zelle auf. Sie unterschreitet lediglich unter sehr günstigen Energieverbrauchsannahmen die CO₂-Emissionen, bleibt aber in allen Fällen bezüglich SO₂ und NO_x schlechter. Dies verwundert angesichts der oben aufgezeigten eindeutig besseren Energiebilanz, zumal es keine Hinweise auf relevante prozessbedingte Emissionen bei der Produktion von Farbstoffzellen gibt. Es ist zu vermuten, dass den Emissionsdaten unterschiedliche Emissionsfaktoren in den Studien zu Grunde lagen; dies ist jedoch aus den Quellen nicht ersichtlich und aufgrund der wenig aufgeschlüsselten Aufbereitung der Daten auch nicht nachträglich korrigierbar gewesen.

Damit bleibt als sichereres Ergebnis die verbesserte Energiebilanz der Farbstoffzelle im Vergleich zur klassischen multikristallinen Siliziumvariante, aus der vermutlich auch eine geringere Emissionsbelastung abzuleiten ist. Dies wird sicher dann gelten, wenn sich die Zelleneff-

fizienz und damit die Stromausbeute der Farbstoffzellen denen der heutigen Siliziumzellen angleichen wird.

7.6 Diskussion weiterer Umweltwirkungen im Vergleich

Nachfolgend werden einige Umweltwirkungen noch einmal eingehender behandelt und vergleichend gegenübergestellt. Im Zuge der Emissionen wurden bereits mit den zentralen, im wesentlichen energiebedingten CO₂, SO₂ und NO_x-Emissionen zwei wesentliche Umweltwirkungen behandelt: der Treibhauseffekt (CO₂) und die Versauerung (SO₂ und NO_x).

Nachfolgend werden zwei weitere wichtige Wirkungen diskutiert und quantifiziert: die Frage der Ressourcen und ihrer Verfügbarkeit, da dies ökologische Implikationen hat, aber auch mit Blick auf eine erfolgreiche Diffusion der neuen Innovationen eine zentrale ökonomische Anforderung darstellt. Im Anschluss daran werden schließlich Aspekte zur Toxizität behandelt, soweit hierzu Daten und Erkenntnisse vorliegen.

7.6.1 Ressourcenverbrauch / Ressourcenknappheit

Herkömmliche Solarzellen verwenden mit Silizium einen Halbleiter, der als Rohstoff in sehr großen Mengen zur Verfügung steht: es ist das zweithäufigste Element auf der Erde, leicht zugänglich und stellt keine Umweltgefährdung dar. Unter der Voraussetzung, dass keine weiteren knappen Ressourcen in konventionellen Zellen zum Einsatz kommen, müssen sich neue Zelltypen mit Blick auf ihre Massenproduktionstauglichkeit daran messen lassen. Dies ist eine ökonomische *und* ökologische Anforderung.

Daher soll an dieser Stelle ein vergleichender Blick auf die Verfügbarkeit relevanter Rohstoffe der klassischen Siliziumzelle und des Farbstoffmoduls gerichtet werden.

Bei beiden Modulen kommt als quantitativ bedeutendstes Material Glas zum Einsatz. Dies stellt insofern keinen Unterschied, und es stellt auch kein knappes Material dar.

7.6.1.1 Multikristalline Zelle / Modul

- Die quantitativ bedeutenden Materialbedarfe sind neben Glas und Silizium das Polymer EVA, welches ebenfalls kein knappes Gut ist.
- In den klassischen Siliziumzellen kommen einige Metalle zum Einsatz, am häufigsten sind dies Aluminium, Kupfer und Silber.
- Von diesen ist lediglich das **Silber** ein vergleichsweise knappes und zudem das wertvollste Gut. Der Silberverbrauch wird von Phylipsen/Alsema (1995) mit etwa 50g/m² (entsprechend 0,38 g/Wp) angegeben. Unter der Annahme eines Anteils der PV an der Weltstromerzeugung von 5% würde der Anteil des Silberverbrauchs etwa 30% der gegenwärtigen gesamten Silberproduktion ausmachen (Bedarf von etwa 4 kt/Jahr bei insgesamt 13,8 kt/Jahr Förderung, bei einem existierenden Silberbestand von 420 kt (Alsema 1996, S. 30)).
- Kupfer (Cu) ist demgegenüber als vergleichsweise mäßig knappe Ressource deutlich weniger kritisch, da der Bedarf auch bei stark steigender PV-Produktion im Verhältnis zur Gesamtkupfermenge gering ist. Das gleiche gilt für Aluminium, zumal der Rahmen eines Moduls in den meisten Anwendungen optional ist und auch durch andere Materialien ersetzt werden kann.

- Im Kontext der Ressourcenknappheit, aber auch der ökologischen Entlastung steht die Frage von **Recycling** „alter“ PV-Module. Obgleich es einige Forschungsansätze zum Recycling gibt, wird dies noch nicht im industriellen Maßstab durchgeführt. Dies hat einerseits die Ursache in zu geringen Rücklaufströmen, da die Produkte noch nicht in ausreichender Stückzahl am Markt sind und der erste Zeitpunkt abgelaufener Nutzungsdauern (>20 Jahre) in größerer Zahl noch nicht stattgefunden hat. Zudem zeigte sich die technisch-ökonomische Machbarkeit des Recyclings in bisherigen Forschungsvorhaben als schwierig.⁴³

Der Schritt in die industrielle Umsetzung fehlt bislang ebenso wie eine breitere Verankerung in der Branche, und dies gilt bezogen auf die verschiedenen Modultypen mit ihren sehr unterschiedlichen Recycling-Eigenschaften. Hier ist insofern noch einiger Forschungs- und Abstimmungsbedarf. Grundsätzlich muss die PV-Branche jedoch mit einer zukünftigen Rücknahmepflicht rechnen, die beispielsweise aus der europäischen Elektronikschrottverordnung oder deren deutscher Umsetzung abgeleitet wird. Grundsätzlich ließe sich die Rücknahme durch das (de-)installierende Handwerk logistisch recht gut erschließen und organisieren.

7.6.1.2 Exkurs: Dünnschichtzellen CIS / CdTe und knappe Ressourcen

Die neuen Dünnschichtzellen CIS (Cu, In, Si₂) und CdTe, die gegenwärtig zur Marktreife entwickelt werden, basieren jeweils auf speziellen Schichten von verschiedenen Elementen, u.a. Metallen. Mit Blick auf das oben durchgeführte Szenario werden an dieser Stelle auch die Ressourcenbedarfe für die kritischen Materialien, die in den neuen Dünnschichtzellen verwendet werden, bei einem weltweiten Upscaling von etwa 5% Anteil des jeweiligen Modultyps an der weltweiten Energieversorgung angegeben.

Aus diesen Szenarien zeigt sich, dass sowohl die CdTe-Zelle⁴⁴ als auch die CIS-Zelle bei einem derartigen Upscaling Probleme mit knappen Ressourcen bekommen würden: bei der CdTe würde das Tellurid knapp werden, bei der CIS-Zelle Indium und Selen. In allen Fällen müssten die vorhandenen Reserven de facto oder bei weiterer Ausdehnung genutzt werden (wobei hier unklar ist, ob dies die frei verfügbaren Reserven oder gebundene sind).

⁴³ Wambach (1997) hat Mitte der 90er Jahre einige Verfahren untersucht und festgestellt, dass mit der bestehenden Technik keine wirtschaftliche Trennung von Solarmodulen in Komponenten auf Basis spezieller Trennverfahren möglich ist, er schlug daher ein einfaches Trennverfahren zur Rückgewinnung der Wafer vor. Jüngst werden von dem deutschen Unternehmen SolarWorld die Entwicklung eines vollständigen Recyclingkonzepts für Module und Zellen und dessen erstmalige Umsetzung im industriellen Maßstab geplant. Der gegenwärtige Stand ist, dass dem Unternehmen ein patentiertes Verfahren zur Verfügung steht und Mittel für die industrielle Erprobung in Aussicht stehen. Ebenfalls an der Recyclierung von kristallinen Silizium-Standarddickschicht-Modulen hat eine Forschergruppe unter der Leitung von BP Solarex gearbeitet.

⁴⁴ Die CdTe-Zelle ist aufgrund der negativen ökologischen Eigenschaften des Cd bzw. dem Bestreben, dieses Element aus den Produktionskreisläufen weitgehend zu eliminieren, ohnehin in der Kritik.

Tabelle 28: Ressourcenbedarf zentraler Elemente neuer Dünnschichtmodule

Cell type	Resource material	Requirement for 5% electr. Prod. by PV (kton/y)	Mondial production (kton/y)	Max. production as by-product (kton/y)	Reserve base (kton/y)
CdTe	Cd	0,8	20	30	970
	Te	0,8	0,5	4	38
CIS	In	0,9	0,14	1	5
	Se	1,6	1,8	10	130

Quelle: Alsema 1996, Tabelle 5.1

7.6.1.3 Farbstoffmodul

Beim Farbstoffmodul kommen gegenwärtig und wohl auch in den nächsten Jahren primär nur **Ruthenium**-basierte Farbstoffe zum Einsatz. Ruthenium ist auch das knappste Material der Farbstoffzelle (vgl. Bossert et al. 2000, S. 36)⁴⁵ und würde somit auch eine Massenproduktion limitieren.

Ruthenium gehört zu den sogenannten Platingruppenmetallen (PGM platinum group metals), da es natürlicherweise zusammen mit Platin vorkommt. Aus diesem Grund gibt es auch keine eigene Rutheniumförderung, sondern die Gewinnung des Metalls fällt beim Platinabbau ab. Es gibt nur wenige Angaben zu Rutheniumressourcen. Andersson (2000) gibt z.B. Rutheniumreserven von 6 kt an, Ruseler (1999) dagegen geht von nur 1,6 kt aus. Ähnlich unterschiedlich sieht die Spanne des spezifischen Verbrauchs von Ruthenium in einem Modul aus. Während Greijer et al. (s.o.) von 0,07 g/m² ausgehen, liegt der Verbrauch bei Ruseler nur bei 22 mg/m², bei Andersson hingegen sogar bei 0,1 g/m². Rechnet man nach dem gleichen Verhältnis wie im Silber-Beispiel (s.o.) auf 5% des Weltenergieverbrauchs hoch, so ergibt sich daraus eine Größenordnung im zweistelligen Tonnenbereich. Andersson (1998) hat für eine Energiebereitstellung von 100.000 TWh pro Jahr durch Farbstoffsolarzellen einen Anteil von 0,3 bis 3% an der weltweiten Rutheniumförderung errechnet. Daraus ergibt sich, dass der Farbstoff als vergleichsweise gut erschließbar und quantitativ verfügbar bezeichnet werden kann. Die Verfügbarkeit, d.h. die Knappheit und somit auch der Preis ist allerdings eng verknüpft mit der Platinförderung.

Zum Thema **Recycling** von Farbstoffzellenmodulen gibt es noch keinerlei praktische Erfahrungen. Greijer et al. gehen in ihren Annahmen davon aus, dass neben dem Glas auch ein Recycling von Metallen - insofern auch von Ruthenium - möglich sein wird. Anorganische Stoffe und Silikone werden deponiert und die restlichen Polymere verbrannt. Die ökologischen Effekte dieser Annahmen sind demnach positiv und negativ: Recycling ersetzt Neuproduktion und Rohstoffverbrauch, thermische Verwertung erzeugt Nutzenergie. Demgegenüber entstehen Emissionen in Luft und Wasser durch die Verbrennung und Deponierung. Eine Bewertung dieser Effekte wurde bislang noch nicht vorgenommen.

⁴⁵ Dies gilt für den Fall, dass in der Farbstoffzelle kein anderes knappes Material wie z.B. Silber für den Rückkontakt eingesetzt wird. Derzeit gibt es sowohl Zellen mit Silber und solche mit Graphit, d.h. es gibt bereits eine „silberfreie“ Alternative. Da jedoch noch viele Eigenschaftsverbesserungen und Praxisanforderungen zu erforschen sind, bleibt offen, welche Materialien sich letztlich durchsetzen werden, und ob dies auf technischen oder ökonomischen Restriktionen basieren wird.

7.6.2 Toxizitätsaspekte

Eine toxische Wirkung für den Menschen (Humantoxizität) oder die Umwelt (Ökotoxizität) kann im normalen Gebrauch eines PV-Modul nahezu ausgeschlossen werden. Dies gilt im Grunde für alle Typen von Zellen und Module, da diese in der Regel fest verkapselt und durch Glas oder andere Beschichtungsmaterialien abgeschirmt sind. Für die existierenden Module gibt es diesbezüglich auch einige Testergebnisse, die während des „normalen“ Gebrauchs die Emissionen und Auswaschungseffekte untersucht haben (vgl. Steinberger 1998). Insofern beziehen sich die Toxizitätsgefahren auf folgende Stationen und Situationen im Leben eines PV-Moduls:

- a) Herstellung (inkl. Gesundheit am Arbeitsplatz),
- b) Gebrauch: Unfall, Schaden, Brand und
- c) Entsorgung: Deponierung, Verbrennung.

Zu diesen Fällen liegen nur beschränkte Informationen vor, dies gilt vor allem natürlich für die Farbstoffzelle.

7.6.2.1 Herstellung (inkl. Gesundheit am Arbeitsplatz)

Siliziummodul

Von den prozessbedingten Emissionen, die bei der Siliziummodulproduktion entstehen, sind die meisten vergleichsweise gering und von ihrer Wirkung vernachlässigbar.

- Als erwähnenswerte Ausnahme nennen Phylipsen und Alsema die Chlor- und Fluor-Eintragungen ins Wasser. Die Autoren setzen diese ins Verhältnis zu einem kohlegefeuerten Stromkraftwerk, wonach sich ergibt, dass die Eintragungen durch eine Solaranlage pro erzeugter Energieeinheit etwa in einer Höhe von 20-25% der kohlebasierten Anlage liegen (Phylipsen/Alsema 1995, S. 32). Daneben werden mit Nitraten, Isopropanol und Lösemitteln weitere Stoffe freigesetzt, die ein humantoxisches Potenzial aufweisen. Dies gilt auch für SO_2 , welches in nicht vernachlässigbaren Mengen in der Siliziumherstellung entsteht und zudem zur Versauerung beiträgt.
- Für den Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz entstehen durch die Herstellung von siliziumbasierten Solarzellen und -modulen keine neuen Probleme. Da die Produktionsprozesse und der Umgang mit den eingesetzten Stoffen im wesentlichen als etabliert bezeichnet werden kann stellen produktionsbedingte, lokale Emissionen bei Einhaltung der existierenden Vorsichtsmaßnahmen und Grenzwerte (MAK-Werte) kein Problem dar. In einem niederländischen Report über Arbeitsschutzaspekte in der Solarzellenindustrie (Brookhaven National Laboratory, siehe Alsema 1996) werden als relevant erwähnt: möglicher Hautkontakt mit Chlorsilanen, HCl und HNO_3 , Inhalation von HF und HNO_3 . Darüber hinaus können feine Silizium-Partikel zu einer Lungenkrankheit „Silicosis“ führen, wenn sie eingeatmet werden. Derartige Stäube werden allerdings nach heutigem Stand der Technik im Produktionsprozess vermieden (Phylipsen/Alsema 1995, S.31).

Farbstoffmodul

- Zu produktionsbedingten Emissionen liegen keine Daten vor. Wie bei der Siliziumbasierten Zelle handelt es sich auch bei der Farbstoffzelle im wesentlichen um bekannte und beherrschte technische (Standard-)Verfahren, wie z.B. Siebdruckverfahren, Sintern, Versiegeln etc.

- In Bezug auf den Gesundheitsschutz könnte der Umgang mit dem Elektrolyten kritisch sein, falls es sich hierbei nicht um einen „geschlossenen“ und emissionsfreien Vorgang handelt.

7.6.2.2 Gebrauch: Unfall, Schaden, Brand

In einer Untersuchung von Bossert et al. (2000) wurde als Schadensursache ein Hausbrand angenommen, der innerhalb von einer Stunde eine Temperatur von 900°C erreicht. Dabei verbrennen die Materialien des Moduls in „definierten“ Mengen, die Metalle zu 50%. Während alle anderen Materialien, z.B. die Polymere vollständig in Form verschiedener Reaktionsprodukte verbrennen. Bossert et al. haben aus diesen Emissionen einen Faktor für den Grad der Toxizität gebildet, der die von ihnen untersuchten Fälle miteinander vergleichbar macht.

- **Siliziummodul:**

Die Toxizität eines in obiger Weise verbrannten Quadratmeters eines multikristallinen Silizium-Moduls ergab sich danach zu 0,086. Dieser Wert ist maßgeblich auf Aluminium und Blei-Emissionen zurückzuführen.

- **Farbstoffmodul:**

Für ein Farbstoffmodul ergab sich ein Wert von 0,021, also etwa nur ein Viertel des Toxizitätswerts des Siliziummoduls. Einen vergleichsweise hohen Anteil an diesem Wert hat das Ruthenium mit 15%. Aufgrund fehlender Kenntnisse über die Wirkung von Ruthenium wurde hier allerdings der Wert von Molybdän angesetzt. Erste eingehendere Untersuchungen zur Toxizität von Ruthenium zeigen jedoch, dass hier keine besonderen gesundheitlichen Risiken zu erwarten sind: von Vries et al. (2000) wurde ein sog. AMES-Test zur Prüfung der Mutagenität durchgeführt, der ein negatives Ergebnis lieferte.

Eine weitere gesundheitsschädliche Komponente sind die derzeit als Lösemittel eingesetzte Nitrile. Ob und wenn ja in welcher Höhe diese in den oben genannten Toxizitätsfaktor eingeflossen sind, ist unklar. Allerdings gibt es derzeit Forschungen, in denen nach Alternativen gesucht wird, beispielsweise indem die flüssigen Lösungsmittel durch ionische Flüssigkeiten (geschmolzene Salze) ersetzt werden.

7.6.2.3 Entsorgung: Deponierung, Verbrennung

Für den Fall der Verbrennung können vereinfachend die oben für den Hausbrand angegebenen Informationen herangezogen werden. Im Unterschied dazu lassen sich jedoch bei einer kontrollierten Verbrennung einige Emissionen vermeiden (z.B. durch Filtersysteme) und Metalle ggf. rückgewinnen.

Bei der Deponierung von klassischen Siliziummodulen wird von keiner besonderen Gefahr für Mensch und Umwelt ausgegangen. Dies sollte auch für Farbstoffmodule gelten, wenn die Ergebnisse für Ruthenium weiterhin negativ bleiben und die eingesetzten Lösemittel (Nitrile) ersetzt werden können.

Mit der Deponierung von PV-Modulen erhöht sich der Schwermetallgehalt der Deponie, da die Module nahezu jeden Typs in der Regel Schwermetalle enthalten. Mit Silber und Kupfer werden dabei zwei Metalle eingesetzt, die zum Teil heutzutage noch einen Anteil aufweisen, der Schwellenwerte von Gefahrstoffverordnungen (bzw. produktbezogenen Siedlungsabfallgrenzen) erreichen kann (vgl. hierzu Alsema 1996). Allerdings werden zunehmend geringere

Mengen oder sogar andere Materialien eingesetzt, so dass dies für die Zukunft (neben der Recycling-Option) als lösbares Problem anzusehen ist.

7.7 Ökologische Aspekte organischer Zellen

Unter der Voraussetzung, dass Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen eine positive Energiebilanz und keine „überproportionalen“ ökologischen Risiken in der Herstellung, Nutzung und Entsorgung aufweisen, stellen sie einen Gewinn für den (energieverbrauchenden) Menschen und die Umwelt dar. Unter diesen Voraussetzungen wird das ökonomische Argument wichtig: erneuerbare Energien sollten so günstig sein, dass sie die ökologisch schlechteren Varianten verdrängen können. Aus dieser (ökonomischen) Argumentation gewinnen die organischen Solarzellen ihre primären Vorteile: die Vision der Produktion von Solarzellen aus Kunststoff wird mit einer enormen Verbilligung des Herstellungsprozesses verbunden sowie mit einer großen Erweiterung des Anwendungsspektrums der Solartechnologie. Wichtige Gründe hierfür sind

- der Einsatz preisgünstiger, niederenergetischer und (prinzipiell) automatisierbarer Produktionen, auch in großen Flächen,
- hohe Flexibilität und Formanpassungsfähigkeit,
- Gewichtsreduktion und eine einfache Montage.

Der heute übliche prinzipielle Aufbau von organischen Solarzellen sieht als Substrat Glas oder ein Polymer vor, welches mit einer transparenten Elektrode (in der Regel) aus ITO (Indiumzinnoxid) beschichtet ist. Da ITO-beschichtete Gläser oder Folien kommerziell verfügbar sind, wird der Aufbau meist von diesen begonnen. Darauf kommt die aktive Schicht (Komposit) bzw. die aktiven Schichten (Bilayer-System), und schließlich wird eine metallische Top-Elektrode (Kathode), meist aus Aluminium, aufgedampft.

Die Umweltverträglichkeit der organischen Solarzellen wird als hoch prognostiziert und es wird von ihrer Recyclierbarkeit ausgegangen (Bossert et al. 2000, Roosmalen 2000, ISE 2002).

Eine hohe Umweltverträglichkeit kann jedoch nicht sicher für alle derzeit in der Entwicklung befindlichen Zellkonzepte a priori festgestellt werden. Eine solche Aussage ist angesichts der derzeitigen heterogenen Entwicklungsstränge mit sehr unterschiedlichen Zellkonzepten und eingesetzten Materialien noch zu früh. Einzelne Aspekte, welche die Umweltverträglichkeit beeinflussen, sind:

- Die eingesetzten **Polymere** sind oftmals Kunststoffe, d.h. Produkte aus fossilen Energieträgern (z.B. Erdöl). Inwieweit hier zukünftig eventuell auch „Bio-Polymere“ eine Rolle spielen können, ist unklar.
- Die Menge der eingesetzten Polymere ist jedoch vergleichsweise gering, aufgrund der sehr dünnen photoaktiven Schicht von nur etwa 100-200 nm. Für ein zukünftiges Modul einer Fläche von 1 m² wären somit etwa nur 1 g Polymere erforderlich.
- Für den Fall des Einsatzes von **Farbstoffen** hängt die Umweltwirkung u.a. von der Verfügbarkeit des Stoffes und ggf. seiner Toxizität ab. Die bisherigen Aussagen, die sich diesbezüglich zu Ruthenium-basierten Farbstoffkomplexen treffen lassen, sind jedoch positiv (vgl. hierzu die Ausführungen zur Farbstoffzelle in Abschnitt 7.6.2).

- Beim Einsatz von mit **Indiumzinnoxid** beschichteten Gläsern bzw. Polymeren handelt es sich zwar auf der einen Seite um ein industriellen Standard, auf der anderen Seite wäre bei einer weltweiten Massenproduktion nach derzeitiger Kenntnis das Element Indium als knappe Ressource nur begrenzt verfügbar (vgl. hierzu auch Tabelle 28).
- Die Frage der **Entsorgung** läuft wie bei den anderen Modulen/Zellen auf die Optionen Deponierung, Verbrennung (thermische Verwertung) und Recycling hinaus.
- Bezüglich der **Recycling**-Option gelten wahrscheinlich die bekannten Probleme der Polymerrecyclings: es ist in der Regel bei Verbundmaterialien nur ein Downcycling möglich, d.h. die Wiederherstellung von minderwertigerem Polymeren; zudem gestaltet sich die Wiedergewinnung von eingebundenen Wertstoffen schwierig. Dies wird auch für die Anwendungen gelten, in denen die „Solarfolien“ in technische Geräte, Bekleidung etc. eingebunden ist.
- Bei der **Verbrennung** von organischen Solarzellen ist überwiegend mit einem bekannten Emissionsspektrum zu rechnen, welches zwar eindeutig zur Umweltbelastung beiträgt, aber auf der anderen Seite (voraussichtlich) als technisch beherrschbar angesehen werden kann.
- Allerdings ist auch in Bezug auf die Entsorgungsaspekte auf die geringe Menge eingesetzter Polymere hinzuweisen.
- **Fullerene**: Die in den bislang vielversprechendsten organischen Zellen verwendeten C_{60} -Moleküle werden auch als Fullerene bezeichnet. Fullerene sind neben Graphit und Diamant eine weitere reine Form des Kohlenstoffs. Dabei sind die einzelnen C-Atome in Polyedern aus Fünf- und Sechsecken angeordnet. Das kleinste Fulleren ist das C_{60} . Aussagen über die Umweltrelevanz von Fullerenen liegen nicht vor, es ist jedoch anzunehmen, dass sie keine Gefährdung für Mensch und Umwelt darstellen. Allerdings ist ihre Herstellung gegenwärtig noch vergleichsweise energieintensiv, so dass dies die Energiebilanz von derartigen organischen Zellen negativ beeinflussen kann.⁴⁶

Wichtig für die ökologische Performance von organischen Solarzellen wird ihre **Energiebilanz** sein. Dies betrifft die Erreichung von höheren Wirkungsgraden (derzeit 1% bis 3%) und einer ausreichenden Langzeitstabilität (derzeit noch unter einem Jahr). Als besondere Herausforderung ist hier die Problematik der Sauerstoffunverträglichkeit, die insbesondere unter Lichteinfluss eine Abnahme des Photostromes und eine Verschlechterung der Zellparameter bewirkt (siehe hier auch Anhang ISE 2002).

In Bezug auf beide Aspekte (Wirkungsgrad und Langzeitstabilität) gibt es derzeit zwar noch großen Entwicklungsbedarf und erste kleine Verbesserungsschritte, aber gleichzeitig werden große Entwicklungs- und Verbesserungspotenziale gesehen. In Verbindung mit den großen

⁴⁶ Die Herstellung von Fullerenen in makroskopischen Mengen wurde wesentlich von Forschern um Krätschmer und Huffmann (1990) entwickelt. Bei diesem Verfahren werden in einem Ofen Graphitstäbe mittels eines elektrischen Lichtbogens verdampft (Krätschmer et al. 1990). In nachfolgender Zeit wurde über verschiedene Abwandlungen dieses Verfahrens berichtet. Direktes induktives Erhitzen von Graphit und das Verbrennen kohlenwasserstoffhaltiger Gase stellen weitere Möglichkeiten zur Synthese von Fullerenen dar. Weitere Verfahren zur Fullerenproduktion sind die Pyrolyse von Naphthalin im Argonstrom bei 1000° C und die Produktion von Fullerenen in rußenden Flammen von Gemischen aus Benzen, Sauerstoff und Argon (Hirsch 1994). Da bei der Produktion von Fullerenen immer ein Gemisch anfällt, ist eine Trennung erforderlich, wobei sich chromatographische Verfahren (HPLC) durchgesetzt haben. Diese Trennung ist jedoch ein arbeitsaufwändiger Schritt, so dass an Möglichkeiten zur Herstellung spezifischer Fullerene geforscht wird.

ökonomischen Vorteilen, die prognostiziert werden, wird der Einsatz von organischen Solarzellen möglicherweise bereits bei geringeren Wirkungsgraden und Nutzungsdauern wirtschaftlich.

Um die Forschungsziele zu erreichen, sind noch viele Anstrengungen nötig, die sowohl das Grundlagenverständnis betreffen, als auch die praktische Erprobung neuer Zellanordnungen und Materialien, aber auch neue Herstellungsverfahren. Beispiele sind der Einsatz von Stabilisatoren oder luftdichter Folien zur Erhöhung der Langzeitstabilität oder in Zukunft sogar ein spezielles molekulares Design, um spezifische Eigenschaften zu erzielen.

7.8 Zusammenfassung und Fazit

Der Einsatz der Nanotechnologie im Bereich Photovoltaik ist vielfältig: sie findet „de facto“ aufgrund der ohnehin gegebenen Suche nach immer dünneren Solarzellen (bzw. aktiven Schichten) statt, sie liefert aber auch durch neue Materialien oder neue Verfahren und Geometrien und deren nano-spezifische (elektrophysikalische und -chemische) Eigenschaften zum Teil ganz neue Zelltypen mit vielversprechenden Perspektiven hinsichtlich zukünftiger Kosteneffizienz.

In der vorliegenden Fallstudie werden ökologische Aspekte von solchen neuen Nano-Solarzellenentwicklungen untersucht. Aufgrund des derzeitigen Forschungsstandes, des Innovationsgrades und der Datenverfügbarkeit wird im Rahmen dieser Studie die Farbstoff-solarzelle bzw. die daraus hergestellten Module fokussiert. Auf der Basis einzelner Studien zu Farbstoff-solarzellen, die auch bereits die Umweltrelevanz thematisieren, wird ein abschätzender, auf einzelne Indikatoren fokussierender ökobilanzieller Vergleich mit einem klassischen, siliziumbasierten Modul durchgeführt. Als Standard-Vergleichsmodul (Status Quo) wird aufgrund der höchsten Marktrelevanz und weiterer Eigenschaften ein Solarmodul auf der Basis von multikristallinem Silizium gewählt. In geringerem Umfang werden schließlich die Entwicklungen im Bereich der organischen Solarzellen cursorisch behandelt. Die Forschungslinien sind hier gegenwärtig noch zu heterogen und zudem existieren noch keine ausreichenden Daten, die eine vergleichende Umweltbewertung sinnvoll ermöglichen würden.

Eine grundsätzliche Schwierigkeit für den Vergleich der beiden Konzepte einer Farbstoff- und einer auf multikristallinem Silizium basierenden (Halbleiter-) Solarzelle liegt darin, dass die Materialien und Wirkungsweisen völlig unterschiedlich sind. Insofern können quantitative Vergleiche nicht über Aspekte wie Material- oder Emissionsreduktionen gezogen werden. Dies gilt um so mehr, als dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt in Ermangelung an Daten noch keine aggregierten Wirkungsindikatoren aus allen relevanten Umwelteinflüssen gebildet werden können. Es konnten jedoch Aussagen zur Energiebilanz getroffen werden, darüber hinaus zur Ressourcenfrage und Toxizität bei einigen kritischen Stoffen. Aussagen über Emissionen waren aufgrund der Datenqualität nur sehr eingeschränkt möglich.

Die Ansprüche an die ökologische Performance von neuen Solarzellen sind sehr hoch, denn die herkömmlichen, klassischen Halbleiterzellen auf der Basis von kristallinem Silizium setzen hier bereits einen relativ hohen Maßstab:

- Das eingesetzte Halbleitermaterial ist aus Silizium, welches als Rohstoff unbegrenzt zur Verfügung steht. Allerdings wird für die Herstellung von Solarsilizium vergleichsweise viel Energie benötigt.

- Daraus resultiert auch der größte Einfluss auf die Energiebilanz eines kristallsiliziumbasierten Moduls. Dennoch liegt die energetische Amortisationszeit eines multikristallinen PV-Moduls bei derzeit etwa 2 Jahren. Mit steigender Effizienz der Herstellungstechnik, sowie weiteren realisierbaren Skaleneffekten lässt sich dieser Zeitraum auch bei diesem klassischen Modul weiter verringern, der für 2005 prognostizierte Wert liegt bei 0,7 Jahren.
- Als knappe Materialien gelten in multikristallinen Zellen im Grunde nur die Kontakte aus Silber, zugleich das teuerste Material. Bei einem Anteil von 5% der PV an der Stromversorgung auf Basis dieser Module würden annähernd 30% der jährlichen Silber-Förderung benötigt. Allerdings gibt es hier Möglichkeiten der Materialreduzierung bzw. sogar des Einsatzes alternativer Materialien.
- Recycling findet derzeit noch nicht statt, und es gibt auch noch keine technisch-ökonomisch praktikablen Lösungen (außer für den Rahmen). Die Problematik der Verbundstoffe bzw. der eingekapselten Wertstoffe gilt im Grunde für alle Solarzellen, auch für die neuen nanobasierten Entwicklungen.
- Wesentliche Verbesserungen hinsichtlich der Material- und Energieeffizienz werden in zukünftigen Verfahren durch die verringerte Wafer-Dicke bei gleichzeitig größerer Fläche erreicht.

Die Farbstoffsolarzelle besteht im wesentlichen aus einer nanokristallinen Titandioxid-Elektrode mit einem organometallischen Farbstoff. An dem Farbstoff findet die primäre Lichtenergiekonversion statt. Des Weiteren wird ein Elektrolyt benötigt, derzeit noch eine Iodidlösung, in der als Lösungsmittel verschiedene Nitrile eingesetzt werden. Als Gegenelektrode kommen kohlenstoffbasierte Schichten, aber auch Platin zum Einsatz. Die möglichen materialbezogenen Optionen zeigen, dass hier noch keine abschließende ökologische Bewertung möglich ist. Auf der Basis eines definierten Zelltyps, der auf dem gegenwärtigen Forschungsstand basiert, ergeben sich folgende Aspekte zur Umweltrelevanz der Zelle:

- Beim eingesetzten Farbstoff handelt es überwiegend um rutheniumbasierte Komplexe. Ruthenium fällt über die Platingewinnung an und wird auch bei einem größeren Verbrauch (entsprechend den oben genannten 5% Anteil an der Weltenergieerzeugung durch derartige PV-Module) nicht knapp. Zudem ist Ruthenium nach derzeitigen Forschungen nicht als toxisch einzustufen. Problematisch hingegen sind die als Lösemittel eingesetzten Nitrile, die jedoch wahrscheinlich auch ersetzbar sind.
- Für die Energiebilanz eines Farbstoffmoduls wurden technische Parameter für einen zeitnahen Marktauftritt bestimmt: 7% Wirkungsgrad bei 10 Jahren (stabiler) Lebensdauer. Für das Fortschritts- bzw. Trendszenario wurde von 9% und 15 Jahren ausgegangen. Demgegenüber erreichen die multikristallinen Module heutzutage durchschnittliche 13% und 20 Jahre, als Trend wurden hier 16% und 25 Jahre angesetzt. Das Ergebnis zeigt, dass das Farbstoffmodul trotz deutlich geringerer Erträge eine niedrigere energetische Amortisationszeit aufweist: für den „zeitnahen“ Status quo-Fall wurde eine Spanne von 0,4 bis 1 Jahr errechnet, dies reduziert sich im Zukunftsszenario auf 0,2 bis 0,6 Jahre.
- Die ermittelten ökologischen Vorteile der Farbstoffzelle lassen sich insbesondere in Bezug auf die Ressourcenfrage und auch einige Toxizitätsaspekte auf den Vergleich mit neuen Dünnschichtzellen (CdTe und CIS) übertragen: In CdTe und CIS-Zellen kommen mehr Schwermetalle vor, und beide weisen bei einem weltweiten Absatzsprung in Höhe

von 5% der Energieversorgung Probleme mit knappen Ressourcen auf: bei der CdTe in Bezug auf Tellurid, bei der CIS-Zelle in Bezug auf Indium und Selen. Diese Vorteile der Farbstoffzelle gelten jedoch nicht gegenüber den amorphen Siliziumzellen - im Vergleich zu diesen a-Si-Zellen kann der entscheidende Vorteil der Farbstoffzelle nach derzeitigem Kenntnisstand im wesentlichen durch höhere Wirkungsgrade erzielt werden.

Zu organischen Zellen lässt sich festhalten: ein zentraler ökologischer Vorteil wird in ihrer deutlich kostengünstigeren Produktion und Anwendungsvielfalt gesehen - wobei für eine solche pauschale Aussage noch zu viele Unbekannte existieren. Von ökologischer Relevanz sind zunächst die eingesetzten Polymere (hinsichtlich ihres fossilen Ursprungs, Recyclingproblematik und Emissionen), wenn gleich diese aufgrund geringer Schichtdicke nur zu geringen Mengen anfallen (ca. 1 g pro m² Fläche). Der Einsatz von Farbstoffen in einigen Zelltypen kann als vergleichbar unproblematisch wie bei der Farbstoffzelle gesehen werden; dies gilt ebenso für die häufig eingesetzten Fullerene (Kohlenstoffmoleküle).

Die Untersuchung hat - mit dem Fokus auf die Farbstoffzelle - gezeigt, dass mit dem Einsatz neuer nanotechnologischer Verfahren und neuer Materialien ökologische Vorteile hinsichtlich der Umweltwirkungen und Energiebilanz im Vergleich zu klassischen PV-Modulen erzielt werden können. Dies gilt allerdings auch für die nanotechnologische Weiterentwicklung der konventionellen Halbleitertechnologien, die durch Überschreitung der physikalischen Grenzen durch Nano- und Sub-Nanoeffekte ebenfalls effizienter werden können (Zellen „3. Generation“). Die Untersuchung weist insofern eine positive ökologische Indikation für die fokussierten nanobasierten Technologien auf. Für eine abschließende Bewertung der verschiedenen technologischen Entwicklungen ist es jedoch zu früh. Aufgrund der vielversprechenden Perspektiven in ökologischer und ökonomischer Hinsicht ist eine breite Förderung aller Forschungsansätze zu fordern, bei der allerdings bereits in frühem Stadium die hier diskutierten Aspekte wie etwa Ressourcenverfügbarkeit, Energiebilanz und Toxizität mit berücksichtigt werden sollten.

7.9 Literatur

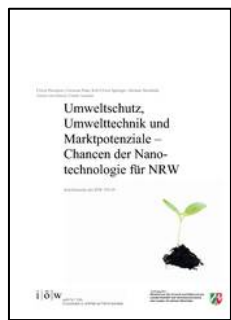
- Andersson B, Azar C, Holmberg J, Karlson S. (1998): Material constraints for thin-film solar cells. In: *Energy* 23,407–11.
- Andersson, B.A. (2000): Materials availability for large-scale thin-film photovoltaics. In: *Progress in photovoltaics: research and applications*. John Wiley & Sons.
- Bossert, R.H.; Tool, C.J.J.; van Roosmalen, J.A.M.; Wentink, C.H.M.; de Vaan, M.J.M. (2000): Thin-film solar cells – Technology Evaluation and Perspectives, NOVEM report number DV 1.1.170.
- Engelenburg, B.C.W. van, and E.A. Alsema (1993): Environmental aspects and risks of amorphous silicon solar cells, department of Science, Technology and Society, Utrecht University.
- Hagedorn, G., und E. Hellriegel (1992): Umweltrelevante Masseneinträgen bei der Herstellung verschiedener Solarzellentypen, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München.
- Hagfeldt A., Grätzel M. (2000): Molecular Photovoltaics, *Acc. Chem. Res.*, 33, 5, 269-277.
- Halme, J. (2002): Dye-sensitized nanostructured and organic photovoltaic cells: technical review and preliminary tests, master's thesis, Helsinki University of Technology.
- Hirsch, A. (1994): The Chemistry of the Fullerenes. Organic Chemistry Monograph Series, Stuttgart
- Kay A, Grätzel M. (1996): Low cost photovoltaic modules based on dye sensitized nanocrystalline titanium dioxide and carbon powder. In: *Solar Energy Mat Solar Cells* 44, 99–117.
- Kay A., Grätzel M. (1993): Artificial Photosynthesis. 1. Photosensitization of TiO₂ Solar Cells with Chlorophyll Derivatives and Related Natural Porphyrins, *J. Phys. Chem.*, 97, 6272-6277.
- Knapp, K. und Jester, T. (2000): An Empirical Perspective on the Energy Payback Time for Photovoltaic Modules, American Solar Energy Society Solar 2000 Conference, Madison, Wisconsin. June 16-21, pp. 641-646.
- Krätschmer, W. / Lamb, L.D. / Fostiropoulos, K. / Huffman, D.R. (1990): Solid C₆₀: a new form of carbon. In: *Nature*, 347:354 - 358.
- Pettersson H, Bradbury C, Hagfeldt A, Burnside S, Winkel S, Brooks K, Shklover V, Grätzel M, Hinsch A, Kinderman R. (1998): Dye photovoltaic cells for indoor application.
- Phylipsen, G.J.M.; Alsema, E.A. (1995): Environmental life-cycle assessment of multicrystalline silicon solar cell modules, NOVEM report no. 95057. Ruseler, C.H.. (1999): De LCA-methodiek als richtinggevend element in ontwikkelingstrajecten? : Case study naar organische zonnecellen. Petten, Energieonderzoek Centrum Nederland.
- Roosmalen, J.A.M. van (2000): Third generation solar cells; European Research Conference Photovoltaic Devices Thin Film Technology, 31.3-5.4.2000, Teltow, Germany.
- Sauvé, G., et al. (2000): Dye Sensitization of Nanocrystalline Titanium Dioxide with Osmium and Ruthenium Polypyridyl Complexes, *J. Phys. Chem. B*, 104, 6821-36.
- SolarWorld 2002 - aktuelle info / Pressemitteilung / veröffentlichung zu recycling.

- Steinberger, Hartmut (1998): Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen der Herstellung und Anwendung sowie Entsorgung von Dünnschichtsolarzellen und Modulen; Bericht zum BMBF-Projekt des Fraunhoferinstituts für Festkörperphysik, München.
- van Brummelen M, Nieuwlaar E. (1994): Life cycle assessment of roof integrated solar cell systems. Department of Science, Technology and Society, Utrecht University, The Netherlands.
- Wagener, H.-J.; Pfisterer, F. (1993): „Umweltaspekte photovoltaischer Systeme“, Forschungsverbund Sonnenenergie: „Themen 92/93“.
- Wambach, Carsten (1998): Untersuchungen zu den technischen Möglichkeiten der Verwertung und des Recyclings von Solarmodulen auf Basis von kristallinem und amorphem Silizium; in Bine Projekt Info, Nr. 6/1998, Gelsenkirchen.

Publikationen des Instituts für ökologische Wirtschaftsforschung

Das IÖW veröffentlicht die Ergebnisse seiner Forschungstätigkeit in einer Schriftenreihe, in Diskussionspapieren sowie in Broschüren und Büchern. Des Weiteren ist das IÖW Mitherausgeber der Fachzeitschrift „Ökologisches Wirtschaften“, die allvierteljährlich im oekom-Verlag erscheint, und veröffentlicht den IÖW-Newsletter, der regelmäßig per Email über Neuigkeiten aus dem Institut informiert.

Schriftenreihe/Diskussionspapiere



Seit 1985, als das IÖW mit seiner ersten Schriftenreihe „Auswege aus dem industriellen Wachstumsdilemma“ suchte, veröffentlicht das Institut im Eigenverlag seine Forschungstätigkeit in Schriftenreihen. Sie sind direkt beim IÖW zu bestellen und auch online als PDF-Dateien verfügbar. Neben den Schriftenreihen veröffentlicht das IÖW seine Forschungsergebnisse in Diskussionspapieren – 1990 wurde im ersten Papier „Die volkswirtschaftliche Theorie der Firma“ diskutiert. Auch die Diskussionspapiere können direkt über das IÖW bezogen werden. Informationen unter www.ioew.de/schriftenreihe_diskussionspapiere.

Fachzeitschrift „Ökologisches Wirtschaften“



Ausgabe 2/2010

Das IÖW gibt gemeinsam mit der Vereinigung für ökologische Wirtschaftsforschung (VÖW) das Journal „Ökologisches Wirtschaften“ heraus, das in vier Ausgaben pro Jahr im oekom-Verlag erscheint. Das interdisziplinäre Magazin stellt neue Forschungsansätze in Beziehung zu praktischen Erfahrungen aus Politik und Wirtschaft. Im Spannungsfeld von Ökonomie, Ökologie und Gesellschaft stellt die Zeitschrift neue Ideen für ein zukunftsfähiges, nachhaltiges Wirtschaften vor. Zusätzlich bietet „Ökologisches Wirtschaften online“ als Open Access Portal Zugang zu allen Fachartikeln seit der Gründung der Zeitschrift 1986. In diesem reichen Wissensfundus können Sie über 1.000 Artikeln durchsuchen und herunterladen. Die Ausgaben der letzten zwei Jahre stehen exklusiv für Abonnent/innen zur Verfügung. Abonnement unter: www.oekom.de.

IÖW-Newsletter

Der IÖW-Newsletter informiert rund vier Mal im Jahr über Neuigkeiten aus dem Institut. Stets über Projektergebnisse und Veröffentlichungen informiert sowie die aktuellen Termine im Blick – Abonnement des Newsletters unter www.ioew.de/service/newsletter.

Weitere Informationen erhalten Sie unter www.ioew.de oder Sie kontaktieren die

IÖW-Geschäftsstelle Berlin
Potsdamer Straße 105
10785 Berlin
Telefon: +49 30-884 594-0
Fax: +49 30-882 54 39
Email: [vertrieb\(at\)ioew.de](mailto:vertrieb(at)ioew.de)



| i | ö | w

INSTITUT FÜR
ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

GESCHÄFTSTELLE BERLIN

MAIN OFFICE

Potsdamer Straße 105

10785 Berlin

Telefon: + 49 – 30 – 884 594-0

Fax: + 49 – 30 – 882 54 39

BÜRO HEIDELBERG

HEIDELBERG OFFICE

Bergstraße 7

69120 Heidelberg

Telefon: + 49 – 6221 – 649 16-0

Fax: + 49 – 6221 – 270 60

mailbox@ioew.de

www.ioew.de