

TEXTE

21/2014

Untersuchung der Auswirkungen ausge- wählter nanotechnischer Produkte auf den Roh- stoff- und Energiebedarf

TEXTE 21/2014

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3711 93 428
UBA-FB 001881

Untersuchung der Auswirkungen ausgewählter nanotechnischer Produkte auf den Rohstoff- und Energiebedarf

von

Dipl.-Ing. Martin Möller
Dr. Mark-Oliver Diesner
Dipl.-Geol. Andreas Manhart
Dipl.-Chem. Peter Küppers
Dipl.-Biol. (t.o.) Angelika Spieth-Achtnich
Dr. Christoph Pistner

Öko-Institut e.V., Freiburg

Im Auftrag des Umweltbundesamt

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt

Wörlitzer Platz 1

06844 Dessau-Roßlau

Tel.: 0340/2103-0

Telefax: 0340/2103 2285

info@umweltbundesamt.de

Internet: www.umweltbundesamt.de

<http://fuer-mensch-und-umwelt.de/>

www.facebook.com/umweltbundesamt.de

www.twitter.com/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e.V., Geschäftsstelle Freiburg, Postfach 17 71, 79017 Freiburg, Deutschland
Hausadresse Merzhauser Straße 173, 79100 Freiburg

Abschlussdatum:

Juli 2013

Redaktion:

Fachgebiet III 2.1 Übergreifende Angelegenheiten, Chemische Industrie,
Feuerungsanlagen

Dr. Wolfgang Dubbert

Fachgebiet IV 2.2 Arzneimittel, Wasch- und Reinigungsmittel

Dr. Doris Völker

Publikation als pdf:

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/untersuchung-der-auswirkungen-ausgewaehlter>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Februar 2014

Kurzbeschreibung

In der vorliegenden Studie werden für besonders aussichtsreiche nanotechnische Anwendungsfelder die zu erwartenden Rohstoff- und Energieaufwendungen qualitativ und so weit wie möglich quantitativ beschrieben. Hierzu wurden insbesondere elektrisch dimmbare Fenster (Fa. EControl-Glas GmbH & Co. KG) und organische Photovoltaik-Module (Fa. BELECTRIC OPV GmbH) einer quantitativen Analyse mit unternehmensspezifischen Daten unterzogen. Die Ergebnisse aus den beiden Fallbeispielen zeigen, dass diese Innovationen grundsätzlich signifikante Einsparungen im Bereich der Rohstoff- und Energieaufwendungen ermöglichen können. So ergeben sich beispielsweise bei den elektrisch dimmbaren Fenstern Einsparpotenziale hinsichtlich des Energieaufwands und den damit verbundenen CO₂-Emissionen in Höhe von rund 30% im Vergleich zu herkömmlichen Fenstern mit einer Jalousierschattung. In Hinblick auf die Triebkräfte für die betrachteten besonders aussichtsreichen Anwendungen der Nanotechnik konnte anhand von Neodym-Magneten gezeigt werden, dass insbesondere auch die Aspekte Materialeinsparung und Energieeffizienz zu primär wichtigen Triebkräften für nanotechnische Neuentwicklungen geworden sind. Vor dem Hintergrund dieser Studie wird besonders deutlich, dass eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus essentiell wichtig ist und darüber hinaus Rebound-Effekte (direkte wie auch indirekte) in die Betrachtung mit einbezogen werden müssen.

Abstract

In the present study, the expected raw material and energy demands for particularly promising nanotechnology application fields are qualitatively and quantitatively described as far as possible. In particular, electrically dimmable windows (EControl-Glas GmbH & Co. KG) and organic photovoltaic modules (BELECTRIC OPV GmbH) were subject to a quantitative analysis using company-specific data. Basically, the results from these two case studies show that these innovations offer significant potentials for savings on raw material and energy. When compared to conventional windows with blinds, electrically dimmable windows, for instance, lead to savings potentials in terms of energy demand and associated CO₂ emissions of approximately 30%. As regards the driving forces for those applications of nanotechnology that are considered particularly promising, it could be shown by means of neodymium magnets that aspects such as material conservation and energy efficiency have become driving forces for nanotechnology developments of utmost importance. Against the background of this study, it is particularly evident that a consideration of the entire life cycle is essentially important, and that rebound effects (direct and indirect) must be included in the analysis as well.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
1 Einführung.....	1
2 Zielstellung	4
3 Begriffsdefinitionen	6
4 Grundlegende methodische Vorgehensweise	7
4.1 Identifizierung von geeigneten Anwendungsbereichen.....	7
4.2 Ansprache von Unternehmen.....	7
4.3 Auswahl der Fallbeispiele.....	8
4.3.1 Fallbeispiel: Elektrisch dimmbare Fenster (EControl-Glas).....	9
4.3.2 Fallbeispiel: Organische Photovoltaik (Konarka Technologies).....	9
4.4 Datenerfassung	10
4.4.1 Systemgrenzen.....	11
4.4.2 Vergleichseinheiten („funktionelle Einheit“).....	11
4.4.3 Anforderungen an die Datenqualität	11
4.5 Datenauswertung	12
4.6 Analyse von Rebound-Effekten	12
5 Hintergründe und methodische Anknüpfungspunkte	15
5.1 Aktionsplan Nanotechnologie 2015 der Bundesregierung.....	15
5.2 Kriterienkatalog der Themengruppe 2 des NanoDialogs 2009-2011	16
5.3 Schlüsselindikatoren des Nano-NachhaltigkeitsCheck.....	18
5.3.1 Energieeffizienz	18
5.3.2 CO ₂ -Fußabdruck (Product Carbon Footprint)	19
5.4 Aktueller Wissensstand zu kritischen Rohstoffen und Materialien	20
5.4.1 Einbezug neuer Forschungsergebnisse.....	20
5.4.2 Unterteilung in ökonomisch, soziale und ökologische Auswirkungen der Rohstoffnutzung	21
5.4.3 Berücksichtigung der Relevanz der Rohstoffverbräuche	24
5.4.4 Berücksichtigung der Rezyklierbarkeit.....	24
6 Ergebnisse der Recherchen aus prioritären Anwendungsbereichen.....	26

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

6.1	Neodym-Magneten	26
6.1.1	Anwendungsfelder	26
6.1.2	Referenzprodukt.....	26
6.1.3	Funktionalität der Nano-Komponente.....	27
6.1.4	Rohstoff- und Materialaspekte	27
6.1.5	Energieeffizienz	28
6.1.6	Exposition und Toxikologie	29
6.1.7	Weitere Nachhaltigkeitsaspekte.....	29
6.1.8	Fazit.....	29
6.2	Nanotechnisch hergestellte Separatormembranen in Lithium-Ionen Batterien	30
6.2.1	Anwendungsfelder	30
6.2.2	Referenzprodukt.....	31
6.2.3	Funktionalität der Nano-Komponente.....	31
6.2.4	Rohstoff- und Materialaspekte	32
6.2.5	Energieeffizienz	32
6.2.6	Exposition und Toxikologie	32
6.2.7	Weitere Nachhaltigkeitsaspekte.....	32
6.2.8	Fazit.....	33
6.3	Thermoplastische Verbundwerkstoffe mit Kohlenstoff-Nanoröhren	33
6.3.1	Anwendungsfelder	33
6.3.2	Referenzprodukt.....	34
6.3.3	Funktionalität der Nanokomponente	34
6.3.4	Rohstoff- und Materialaspekte	34
6.3.5	Energieeffizienz	35
6.3.6	Exposition und Toxikologie	35
6.3.7	Weitere Nachhaltigkeitsaspekte.....	36
6.3.8	Fazit.....	36
6.4	Organische Leuchtdioden.....	36
6.4.1	Anwendungsfelder	36
6.4.2	Referenzprodukt.....	37
6.4.3	Funktionalität der Nano-Komponente.....	37
6.4.4	Rohstoff- und Materialaspekte	37
6.4.5	Energieeffizienz	38

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

6.4.6	Exposition und Toxikologie	38
6.4.7	Weitere Nachhaltigkeitsaspekte.....	39
6.4.8	Fazit.....	39
6.5	Aerogele.....	39
6.5.1	Anwendungsfelder	39
6.5.2	Referenzprodukt.....	40
6.5.3	Funktion der Nano-Komponente.....	40
6.5.4	Rohstoff- und Materialaspekte	40
6.5.5	Energieeffizienz	41
6.5.6	Exposition und Toxikologie	41
6.5.7	Weitere Nachhaltigkeitsaspekte.....	41
6.5.8	Fazit.....	42
6.6	Lösungsmittelstabile Polymermembranen für die organophile Nanofiltration.....	42
6.6.1	Anwendungsfelder	42
6.6.2	Referenzprodukt.....	43
6.6.3	Funktionalität der Nanokomponente	43
6.6.4	Rohstoff- und Materialaspekte	43
6.6.5	Energieeffizienz	44
6.6.6	Exposition und Toxikologie	44
6.6.7	Weitere Nachhaltigkeitsaspekte.....	44
6.6.8	Fazit.....	45
6.7	NSTF-Membran-Elektroden für Wasserstoffbrennstoffzellen.....	45
6.7.1	Anwendungsfelder	45
6.7.2	Referenzprodukt.....	45
6.7.3	Funktionalität der Nano-Komponente.....	46
6.7.4	Rohstoff- und Materialaspekte	47
6.7.5	Energieeffizienz	47
6.7.6	Human- und ökotoxikologische Faktoren	47
6.7.7	Weitere Nachhaltigkeitsaspekte.....	47
6.7.8	Fazit.....	48
6.8	Bionanotechnische Beschichtung von keramischen Katalysatorträgermaterialien	48
6.8.1	Anwendungsfelder	48

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

6.8.2	Referenzprodukt.....	48
6.8.3	Funktionalität der Nano-Komponente.....	49
6.8.4	Rohstoff- und Materialaspekte.....	49
6.8.5	Energieeffizienz.....	49
6.8.6	Exposition und Toxikologie.....	50
6.8.7	Weitere Nachhaltigkeitsaspekte.....	50
6.8.8	Fazit.....	50
7	Ergebnisse des Fallbeispiels „EControl-Glas“.....	51
7.1	Produktbeschreibung.....	51
7.2	Definition des Referenzprodukts.....	55
7.3	Ergebnisse der Anwendung des Kriterienkatalogs der TG2.....	55
7.3.1	Funktionalität der Nano-Komponente.....	55
7.3.2	Rohstoff- und Materialaspekte.....	56
7.3.3	Energieeffizienz.....	56
7.3.4	Exposition und Toxikologie.....	57
7.3.5	Weitere Nachhaltigkeitsaspekte.....	57
7.4	Ergebnisse der untersuchten Schlüsselindikatoren.....	57
7.4.1	Grundlegende Modellierungsannahmen.....	57
7.4.2	Rohstoffverbrauch.....	60
7.4.3	Energieeffizienz.....	63
7.4.4	CO ₂ -Fußabdruck.....	65
7.5	Diskussion der Ergebnisse und strategische Optimierung des Produkts.....	66
8	Ergebnisse des Fallbeispiels „Organische Photovoltaik“.....	69
8.1	Produktbeschreibung.....	69
8.2	Definition des Referenzprodukts.....	72
8.3	Ergebnisse der Anwendung des Kriterienkatalogs der TG2.....	72
8.3.1	Funktionalität der Nano-Komponente.....	72
8.3.2	Rohstoff- und Materialaspekte.....	73
8.3.3	Energieeffizienz.....	73
8.3.4	Toxikologie und Exposition.....	73
8.3.5	Weitere Nachhaltigkeitsaspekte.....	74
8.4	Ergebnisse der untersuchten Schlüsselindikatoren.....	74
8.4.1	Rohstoffverbrauch.....	74

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

8.4.2	Energieeffizienz.....	78
8.5	Diskussion der Ergebnisse und strategische Optimierung	80
9	Schlussfolgerungen in Hinblick auf die übergeordneten Forschungsfragen.....	82
9.1	Triebkräfte für nanotechnische Innovationen.....	82
9.2	Rebound-Effekte durch nanotechnische Innovationen	85
10	Gesamtfazit.....	90
11	Quellenverzeichnis.....	92

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematischer Aufbau des elektrochromen Glases von EControl-Glas. Bei Anlegen einer Spannung interagieren die Lithium-Ionen mit dem Wolframoxid und erzeugen so die Blaufärbung des Glases. Der Vorgang ist durch erneute Anlage der umgekehrten Spannung reversibel. (Bild von EControl-Glas)51
Abbildung 2:	Schematische Darstellung der filterabhängigen Attenuation des Energiespektrums durch Abdunkelung des EControl-Glases. Ist die Scheibe hell, werden ca. 38% der Energie transmittiert. Ist die Scheibe abgedunkelt, können ca. 12% der eingestrahnten Energie das Glas durchdringen. (Bild von EControl-Glas)53
Abbildung 3:	Raummodell gemäß DIN EN ISO 13791. Dieses Raummodell wird in dieser Analyse als Basis für die Auswertungen zum CO ₂ -Fußabdruck und zur Energieeffizienz genutzt.59
Abbildung 4:	Aufbau des Photovoltaik-Moduls (Öko-Institut, eigene Grafik)71
Abbildung 5:	Vergleich des primären Energiebedarfs bei der Produktion von Photovoltaikmodulen. Die ersten 4 Balken von links zeigen verschiedene Vertreter von anorganischen PV-Modulen. Verschiedene Produktionsformen von OPV-Modulen sind in den Balken 5 bis 12 (von links) dargestellt. Das anorganische Referenzprodukt in der vorliegenden Analyse entspricht dem 2. Balken von links (a-Si). Das Konarka-Produkt ist hier nicht explizit gelistet, entspricht aber dem Produkt P3HT C60 PCBM (siebter Balken von links.) Die Wirkungsgrade der OPV-Module sind in % hinter ihren chemischen Spezifikationen angegeben. (Grafik aus Anctil et al., 2010).....79
Abbildung 6:	Zeitraum für unterschiedliche Photovoltaikmodule bis zur energetischen Amortisation. EPBT steht für ‚energy payback time‘. Auch hier zeigt sich, dass das OPV-Modul das chemisch dem Konarka-Modul am meisten ähnelt (siebtes von links) ca. ein Drittel der Zeit eines anorganischen Modules aus amorphem Silizium benötigt. Die Wirkungsgrade der OPV-Module sind in % hinter ihren chemischen Spezifikationen angegeben. (Grafik aus Anctil et al., 2010).....80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auswertung des Fallbeispiels „elektrisch dimmbare Fenster“ in Hinblick auf die relevanten Auswahlkriterien.....	9
Tabelle 2:	Auswertung des Fallbeispiels „organische Photovoltaik“ in Hinblick auf die relevanten Auswahlkriterien	10
Tabelle 3:	Schätzung des maximalen Anteils des artisanalen Kleinbergbaus an der weltweiten Gesamtproduktion (Wagner et al., 2007).....	22
Tabelle 4:	Weltmarktanteile der Demokratischen Republik Kongo an der Primärgewinnung ausgewählter Metalle (Tsurukawa et al., 2011; USGS, 2012; Wagner et al., 2007).....	23
Tabelle 5:	Konzentrationsbereiche der im EControl-Glas enthaltenen Metalle.....	60
Tabelle 6:	Kritikalitätsbewertung von Lithium, Vanadium, Wolfram und Zinn gemäß verschiedener relevanter Studien.....	61
Tabelle 7:	Indikatoren zur Abschätzung der sozialen Risiken der verwendeten Metalle	62
Tabelle 8:	Anteil des jährlichen Metallbedarfs von 1 m ² EControl-Glas an der heutigen Weltprimärproduktion dieser Metalle.....	62
Tabelle 9:	Anteil des jährlichen Gesamtmetallbedarfs von EControl-Glas an der heutigen Weltprimärproduktion bei einer angenommenen Fertigung von 500.000 m ² pro Jahr.....	63
Tabelle 10:	Vergleich zwischen Nano- und Referenzprodukt hinsichtlich des Schlüsselindikators „Energieeffizienz“ (Kumulierter Energieaufwand, KEA) für die beiden Szenarien 2011 und 2020.....	64
Tabelle 11:	Vergleich zwischen Nano- und Referenzprodukt hinsichtlich des Schlüsselindikators „CO ₂ -Fußabdruck“ (Product Carbon Footprint, PCF) für die beiden Szenarien 2011 und 2020.....	65
Tabelle 12:	Konzentrationsbereiche der in Konarka PP 540 OPV enthaltenen Metalle	75
Tabelle 13:	Kritikalitätsbewertung von Indium, Silber und Zinn gemäß verschiedener relevanter Studien.....	75
Tabelle 14:	Indikatorenwerte zur Abschätzung der sozialen Risiken der verwendeten Metalle.....	76
Tabelle 15:	Anteil des Metallbedarfs von 1 m ² Konarka PP 540 OPV an der heutigen jährlichen Weltprimärproduktion dieser Metalle	76
Tabelle 16:	Anteil des jährlichen Gesamtmetallbedarfs von Konarka PP 540 OPV an der heutigen Weltprimärproduktion bei einer angenommenen Fertigung von 500.000m ² pro Jahr.....	77

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Tabelle 17:	Übersicht über die Triebkräfte der betrachteten besonders aussichtsreichen Anwendungsfelder sowie die relevanten Aspekte in Hinblick auf Ressourcen- und Energieverbrauch83
Tabelle 18:	Übersicht über die möglichen Rebound-Effekte sowie Überlegungen in Hinblick auf Exposition und Toxikologie.87

Abkürzungsverzeichnis

ApN2015	Aktionsplan Nanotechnologie 2015
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CCM	englisch: catalyst coated membrane; deutsch: katalysatorbeschichtete Membran)
CIGS	englisch: copper, indium, gallium, selenium; deutsch: Kupfer, Indium, Gallium, Selen
CNT	englisch: carbon nanotubes; deutsch: Kohlenstoffnanoröhren
DIN	Deutsches Institut für Normung
d.h.	das heißt
eV	Elektronenvolt
FE	Funktionseinheit
Fa.	Firma
ggf.	gegebenenfalls
GWP	englisch: global warming potential; deutsch: Treibhauspotenzial
h	Stunde
i.d.R.	in der Regel
IE4	Internationaler Effizienzstandard für Elektromotoren
IPCC	englisch: Intergovernmental Panel on Climate Change; deutsch: Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen
KEA	kumulierter Energieraufwand
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
kWh	Kilowattstunden
LED	englisch: light emitting diode; deutsch: Leuchtdiode
LKW	Lastkraftwagen
MJ	Megajoule
n.d.	nicht definiert
NSTF	englisch: nanostructured thin film technology; deutsch: nanostrukturierte Dünnschichttechnologie
OLED	englisch: organic light emitting diodes; deutsch: organische Leuchtdioden

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

OPV	organische Photovoltaik
P3HT	Poly-3-Hexylthiophen
PCBM	[6,6]-Phenyl-C61-Butyric-Acidmethylester
PCF	englisch: product carbon footprint; deutsch: produktspezifischer Kohlendioxid-Fußabdruck
PEM	englisch: proton exchange membrane; deutsch: Protonenaustauschmembran
PET	Polyethylenterephthalat
PPT	1ppt (parts per trillion) = 1 Billionstel (10^{-12})
PTFE	Polytetrafluorethylen
PV	Photovoltaik
PVdF	Polyvinylidenflourid
s.o.	siehe oben
UBA	Umweltbundesamt
v.a.	vor allem
vgl.	vergleiche
vs.	versus
W	Watt
Wh	Wattstunden
Wp	englisch: watt peak; deutsch: Watt (peak)
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

1 Einführung

Weltweit müssen die anthropogenen Treibhausmissionen drastisch reduziert werden, um die Klimaerwärmung auf einen Wert von unter 2°C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Laut der Studie „Modell Deutschland“, die das Öko-Institut, die Prognos AG und Dr. Hans-Joachim Ziesing im Auftrag vom WWF erstellt hat, sind für Deutschland daher z.B. Minderungen um 95 Prozent bis zum Jahr 2050 erforderlich (Öko-Institut e.V. & Prognos AG, 2009), was umgerechnet weniger als eine Tonne Treibhausgasemissionen pro Kopf bedeuten würde. „Modell Deutschland“ geht dabei davon aus, dass 60 Prozent dieser Einsparungen durch technologische Innovationen erfolgen müssen.

Prioritärer Innovationsbedarf besteht vor allem in den Bereichen regenerative Energiebereitstellung, Wärmedämmung, Stromspeicher, neue Werk- und Baustoffe und industrielle Produktionsprozesse. Wie auf der Jahrestagung des Öko-Instituts im Jahre 2010 festgestellt wurde, existieren bei all diesen Technologiebereichen bereits heute vielversprechende nanotechnische Produkte bzw. Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen, die neben einem Beitrag zu mehr Klimaschutz auch zu mehr Energieeffizienz und zu einer Steigerung der Rohstoffeffizienz beitragen können.¹ Beispielsweise existieren bei der regenerativen Energiebereitstellung durch Photovoltaik drei verschiedene Ansätze, mit denen die spezifischen Kosten dieser Technologie erheblich gesenkt und damit ihre Konkurrenzfähigkeit deutlich verbessert werden könnten. Im Einzelnen handelt es sich dabei um Nanokristalle aus Kupfer, Indium, Gallium und Selen („CIGS“), die eine Herstellung der Solarmodule in einem besonders effizienten Druckverfahren „Rolle zu Rolle“ ermöglichen. Daneben werden Zellen aus polymeren Halbleitern entwickelt, bei denen der Elektronentransport mittels Fullerenen erfolgt. Als dritter Ansatz sind die sogenannten „Grätzel-Zellen“ zu nennen. Dabei handelt es sich um Farbstoffmoleküle auf Ruthen-Basis, welche die Elektronen an Titandioxid-Nanopartikel abgeben. Nur durch den Einsatz von Nanomaterialien kann bei diesen drei Entwicklungsrichtungen die Funktionalität sowie die für die Kostenreduktion erforderliche Senkung des Materialverbrauchs erreicht werden. Im Bereich der Wärmedämmung sind mit den Aerogelen bereits hocheffiziente nanoporöse Dämmmaterialien erhältlich, die nachträglich eingebaut werden und damit insbesondere die Altbausanierung erleichtern können. Darüber hinaus wird für die Wärmedämmung von Fenstern an transluzenten (d.h. lichtdurchlässigen) Elementen geforscht, die je nach Sonneneinstrahlung eine wärmedämmende oder eine Strom produzierende Funktion haben.

Die beschriebenen Konzepte beruhen zum einen auf der durch Nanomaterialien ermöglichten gezielten Nutzung von Quanteneffekten im Halbleiterbereich, zum anderen auch auf der großen spezifischen Oberfläche der nanostrukturierten Materialien. Dank z.T. völlig neuer bzw. schrittweise verbesserter mechanischer, elektrischer, optischer bzw. magnetischer Eigenschaften kann so während des gesamten ‚Lebenszyklus‘ der nanotechnischen Anwendungen eine Verringerung der Rohstoff- und Energieintensität erreicht werden. Aus diesem Grund hat die Bundesregierung in ihrem „Aktionsplan Nanotechnologie 2015“ unter dem Dach der Hightech-

¹ Siehe hierzu auch die Synopse zur Jahrestagung Nanotechnologien des Öko-Instituts. Diese ist online abrufbar unter: <http://www.oeko.de/aktuelles/dok/998.php>

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Strategie die Neuausrichtung der Energieversorgung und die Erhöhung der Ressourceneffizienz² in den Vordergrund gestellt.

Allerdings muss bei nanotechnischen Anwendungen auch berücksichtigt werden, dass einige der verwendeten metallischen Rohstoffe in den letzten Jahren einem starken Nachfragewachstum unterlagen und so zunehmend als „knapp“ oder „kritisch“ hinsichtlich ihrer Versorgung eingestuft werden (EUCOM, 2010a; Öko-Institut e.V., 2009; U.S. Department of Energy, 2010). Bei einigen Metallen wird diese Situation noch zusätzlich durch Handelshemmnisse oder eine starke Konzentration der Primärgewinnung in wenigen, zum Teil politisch instabilen Ländern verschärft. In diesem Zusammenhang muss frühzeitig erkannt werden, ob eine bestimmte nanotechnische Anwendung einen wesentlichen zusätzlichen Beitrag zur Verknappung leistet. Umgekehrt sollte schon allein im Eigeninteresse der Industrie geprüft werden, ob kurz- bis mittelfristig Knappheiten und somit starke Preisanstiege bei den verwendeten Rohstoffen auftreten können, sodass sich die entsprechende Anwendung gegenüber konkurrierenden Technologien signifikant verteuern würde.

Aus Umweltsicht ist zudem relevant, dass die Primärgewinnung von vielen Edel- und Sondermetallen mit sehr hohem Energieaufwand, Treibhausgasemissionen und z.T. Emission von Schadstoffen einher geht. Umgekehrt bietet zwar das Recycling dieser Stoffe große Entlastungspotenziale, gerade im nanoskaligen Einsatz sind allerdings die Konzentrationen oftmals zu gering, um eine Kreislaufführung technisch zu realisieren oder wirtschaftlich tragfähig zu machen. Insofern bergen viele nanotechnische Anwendungen das Potenzial dissipativer Rohstoffverluste, die – aufgrund der geringen Konzentration – als unumkehrbar eingestuft werden müssen.

Als potenzieller Vorteil bleibt aber bestehen, dass nanotechnische Anwendungen – zumindest bei optimierten Produktionsprozessen – oftmals wesentlich kleinere Mengen an Rohstoffen beanspruchen als vergleichbare konventionelle Techniken. Insgesamt ist deshalb eine umfassende Betrachtung und Bewertung des Rohstoffeinsatzes in nanotechnischen Anwendungen nötig. Diese integrierte Betrachtung muss auf solider wissenschaftlicher Basis erarbeitet und mit bestehenden Bewertungstools verzahnt werden.

Hierfür existieren bereits mehrere Vorarbeiten und Anknüpfungspunkte, auf die eine Studie zum Thema aufbauen kann. Zu nennen ist in diesem Zusammenhang der „Leitfaden zur Erhebung und Gegenüberstellung von Nutzen- und Risikoaspekten von Nanoprodukten“, der während des NanoDialogs der Bundesregierung (Phase 2009-2011) von der Themengruppe 2 im Rahmen der NanoKommission³ erarbeitet wurde (BMU, 2011).

Eine weitere relevante Vorarbeit bildet das Projekt „Analyse und strategisches Management der Nachhaltigkeitspotenziale von Nanoprodukten“, welches vom Öko-Institut unter Förderung von

² Vergleiche hierzu Kapitel 3; im Originaldokument wurde „Ressourceneffizienz“ abweichend von der Begriffsdefinition in diesem Bericht so verwendet.

³ Das Öko-Institut hat sich durch die Teilnahme von Herrn Martin Möller aktiv an den Arbeiten der Themengruppe beteiligt.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Umweltbundesamt und Bundesumweltministerium durchgeführt wurde (Öko-Institut e.V., 2012a). Im Rahmen dieses Projekts wurde mit dem so genannten Nano-NachhaltigkeitsCheck ein Instrument zur betriebsinternen Selbstevaluierung entwickelt, mit dem Unternehmen für ihre Nanoprodukte⁴ während der Entwicklung oder im Zuge der Markteinführung datenbasierte Nachhaltigkeitsanalysen durchführen können. Anhand von genau definierten Schlüsselindikatoren können sie frühzeitig evaluieren, wie sich das Nanoprodukt im Vergleich zu einem bestimmten Nicht-Nanoprodukt positioniert und wo gegebenenfalls Optimierungsmöglichkeiten, aber auch Vorteile durch den Einsatz des Produktes bestehen.

⁴ Bei Nanoprodukten handelt es sich um Produkte, in denen zur Erzielung einer bestimmten Funktion Nanomaterialien enthalten sind.

2 Zielstellung

Das übergeordnete Ziel der Studie besteht darin, für besonders aussichtsreiche nanotechnische Anwendungen und Produkte die in der Zukunft zu erwartenden Rohstoff- und Energieaufwendungen qualitativ und so weit wie möglich quantitativ zu beschreiben, um auf diese Weise die Effizienz und ggf. vorhandene Rebound-Effekte der Rohstoffnutzung zu analysieren. In Abgrenzung zu den bislang bestehenden Studien, die sich schwerpunktmäßig an Outputkategorien wie Marktpotenzialen, Produktnutzen und Emissionen orientiert haben, soll in dem vorliegenden Projekt der Fokus klar auf der Inputseite liegen. Dabei sollen die bereits bestehenden Vorarbeiten aufgegriffen und ggf. fortgeschrieben werden. Insbesondere wird der von der NanoKommission 2011 erarbeitete „Leitfaden zur Erhebung und Gegenüberstellung von Nutzen- und Risikoaspekten von Nanoprodukten“ (BMU, 2011) berücksichtigt. Darüber hinaus soll die vom Öko-Institut bereits im Projekt „Analyse und strategisches Management der Nachhaltigkeitspotenziale von Nanoprodukten“ (Öko-Institut e.V., 2012a) entwickelte Bewertungsmatrix genutzt werden, wobei schwerpunktmäßig die dort erarbeiteten Schlüsselindikatoren Energieeffizienz, Ressourcenverfügbarkeit und Recyclingfähigkeit aufgegriffen, in die Bewertung eingebracht weiterentwickelt und inhaltlich ergänzt werden.

Die Resultate der Studie sollen einen Beitrag zur Bewertung der Ressourcen- und Energieeffizienz nanotechnischer Produkte liefern sowie darüber hinaus Empfehlungen für die Herstellung und Anwendung dieser Produkte und ggf. weiteren Handlungsbedarf aufzeigen.

Vor dem Hintergrund der beschriebenen übergeordneten Zielsetzung bestehen weitere Unterziele des Projektes darin,

1. die **aussichtsreichsten Anwendungsfelder** nanotechnischer Anwendungen und Produkte auf Grundlage der mechanischen, elektrischen und chemischen Funktionalisierungen durch nanoskalige Partikel und Additive zu systematisieren,
2. die **Triebkräfte** für eine nanotechnische Funktionalisierung oder Substitution etablierter Materialien oder Produktsysteme unter Herausstellung der lebenszyklusweiten Zusatznutzen, Mehraufwände und Risiken zu ermitteln,
3. die jeweils zu Grunde liegenden **nanoaktiven Komponenten** anhand ihrer Funktionalitäten, der relevanten Elemente/Stoffe, deren Masserelevanz und Substituierbarkeit zu charakterisieren und zu clustern,
4. **Stoffstromszenarien** für die betrachteten Anwendungsfelder und Stoffe unter Einbindung der Herstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase zu entwickeln.

Anhand dessen sind Aussagen zu treffen,

- ob der Einsatz von Nanotechniken durch Substitution oder Funktionalisierung etablierter Werkstoffe zur **Material- und Energieeffizienz beitragen** kann. Dabei sind die Rohstoff- und Energieaufwendungen für relevante Anwendungsfelder beginnend von der Rohstoffgewinnung und der Verarbeitung über die Nutzung bis zum Recycling zu untersuchen und gegenüber konventionellen Produkten und Anwendungen zu bewerten. Insbesondere sind Zusatznutzen, die sich in der Nutzungsphase ergeben, zu berücksichtigen.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

- ob durch den vermehrten Rohstoffeinsatz ein besonders relevantes Umweltproblem erwächst oder die zukünftige **Rohstoffverfügbarkeit** unter Berücksichtigung der Bedarfsentwicklung nach bestimmten Elementen für nanotechnische Anwendungen als kritisch zu bewerten ist.
- ob durch einen vermehrten Einsatz nanoskaliger Komponenten in Verbraucherprodukten **Rebound-Effekte** auftreten werden, die eine erhoffte bzw. in Aussicht gestellte Nachhaltigkeit solcher „Nanoprodukte“ konterkarieren können.

3 Begriffsdefinitionen

Die in diesem Bericht verwendeten Begriffe im Hinblick auf Ressourcen-, Rohstoff-, und Materialaspekte sind im Glossar zum Ressourcenschutz vom UBA definiert (Umweltbundesamt, 2012a).

Im Folgenden werden einige der Kernbegriffe aus dem Glossar zum Ressourcenschutz wiedergegeben:

Ressource: Mittel, das in einem Prozess genutzt wird oder genutzt werden kann. Eine Ressource kann materieller oder immaterieller Art sein.

Wird im umweltwissenschaftlichen Kontext der Begriff „Ressource“ verwendet, ist damit eine „natürliche Ressource“ gemeint.

Anders als hier wird der Ressourcenbegriff oft auch sehr eng gefasst im Sinne von Rohstoffen verwendet.

Material: 1. Sammelbegriff für Stoffe und Stoffgemische.
2. Stoff oder Stoffgemisch, der oder das für die Herstellung von Produkten bestimmt ist. Dies umfasst sowohl Rohstoffe als auch höher verarbeitete Stoffe und Stoffgemische.

Rohstoff: Stoff oder Stoffgemisch in un- oder gering bearbeitetem Zustand, der / das in einen Produktionsprozess eingehen kann.

Man unterscheidet Primär- und Sekundärrohstoffe. Weitere Unterscheidungen, wie in erneuerbare und nicht erneuerbare, biotische und abiotische Rohstoffe, sind gängig.

Die Begriffe haben gemeinsame Schnittmengen, und es wurde Wert darauf gelegt, möglichst genau in der Verwendung der Begriffe zu differenzieren. Falls in den jeweiligen Quelltexten Bezeichnungen abweichend von den hier vorgenommenen Definitionen verwendet wurden, sind diese mit entsprechender Kennzeichnung original übernommen worden.

4 Grundlegende methodische Vorgehensweise

Im Folgenden wird die grundlegende methodische Vorgehensweise erläutert, um die im vorherigen Kapitel skizzierte Zielsetzung des Projekts zu erreichen.

4.1 Identifizierung von geeigneten Anwendungsbereichen

In einem ersten Schritt wurde zunächst eine Vorstudie durchgeführt. Diese begann mit einer breit gefächerten Recherche, bei der, aufgeschlüsselt nach Branchen, konkrete nanotechnische Anwendungen identifiziert wurden, die über viel versprechende Potenziale in Hinblick auf die Ressourcenschonung verfügen bzw. bei denen solche Potenziale zu vermuten sind. Ausgangspunkt hierfür bildeten die Recherchen, die im Rahmen des Projektes „Analyse und strategisches Management der Nachhaltigkeitspotenziale von Nanoprodukten“ durchgeführt wurden (Öko-Institut e.V., 2012a). Im Rahmen der Recherche, bei der neben einer Relevanz für die Ressourceneffizienz auch ggf. vorhandener Zusatznutzen sowie Mehraufwände / Risiken während des Lebenszyklus berücksichtigt wurden, konnten folgende prioritäre Anwendungsfelder identifiziert werden:

- **Energietechnik:** v.a. organische Photovoltaik, nanostrukturierte Verbindungshalbleiterschichtstapel für Multi-Junction-Solarzellen, nanokristalline Legierungen für Dauermagneten in Windkraftwerken, nanoskalige Katalysatoren und Membranen für Brennstoffzellen, nanostrukturierte Schichtverbundsysteme für Turbinenschaufeln in Gas- und Dampfkraftwerken;
- **Energiespeicher:** v.a. Lithium-Ionen-Akkus mit nanotechnischer Membran, nanoporöse Wasserstoffspeicher;
- **Industrielle Produktionsprozesse:** v.a. Abgasfilterung und -reinigung mittels Nanotechnik, lösemittelstabile Polymermembranen für die organophile Nanofiltration;
- **Wärmedämmung:** v.a. Smart-Glazing-Verglasung, nanoporöse Aerogelgranulate für Fassadenkomponenten;
- **Werk- und Baustoffe:** Mikrospiegelarrays, thermoplastische Verbundwerkstoffe;
- **Oberflächenfunktionalisierung / Sonstiges:** OLED Flächenlichtquellen zur Realisierung von Bauelementen im Beleuchtungssektor.

Die ermittelten Anwendungsfelder und die zugehörigen Einzelanwendungen bildeten die Grundlage für die anschließende Ansprache von Unternehmen.

4.2 Ansprache von Unternehmen

In einem zweiten Schritt wurde mit den Herstellern bzw. Entwicklern der identifizierten Anwendungen Kontakt aufgenommen, um die Rahmenbedingungen und Voraussetzungen für eine Teilnahme an dem vorliegenden Projekt zu erkunden.

Dabei wurden folgende elf Unternehmen, Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen bzw. Branchenverbände direkt angesprochen, wobei z.T. Präsentationen des Projekts vor Ort stattgefunden haben:

- Cabot Aerogel GmbH: Aerogel-Dämmstoffe;

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

- EControl-Glas GmbH & Co. KG: Elektrisch dimmbare Fenster;
- Institut für Nanostrukturtechnologie und Analyse (INA) der Universität Kassel: Erforschung und Erprobung von Mikrospiegel-Arrays (Smart-Glazing);
- International Platinum Association (IPA): Verband der Platinindustrie und damit Brücke zu Unternehmen im Bereich nanoskaliger Industriekatalysatoren;
- Konarka Technologies GmbH: Organische Solarzellen;
- Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung (IFW-Dresden): Forschung im Bereich leistungsstarker Permanentmagneten ;
- Magnequench GmbH: Nanoskalige Magnetpulver;
- OSRAM Opto Semiconductors GmbH: Organische Leuchtdioden (OLED);
- Siemens AG, TACR GmbH (Turbine Airfoil Coating and Repair GmbH): Nano-Beschichtung von Turbinenschaufeln;
- Umicore AG: Katalysatoren in Brennstoffzellen, Kfz und feinchemischen Anwendungen;
- Vacuumschmelze (VAC): Seltene-Erden-Magnete (Neodym-Eisen-Bor) für verschiedene technische Anwendungen.

4.3 Auswahl der Fallbeispiele

Auf Basis der geführten Gespräche wurde in einem dritten Schritt vom Öko-Institut in enger Abstimmung mit dem Umweltbundesamt eine Auswahl von zwei geeigneten Fallbeispielen vorgenommen. Hierfür wurde zuvor ein Satz mit geeigneten Kriterien entwickelt. Im Einzelnen müssen die folgenden Voraussetzungen erfüllt sein:

- Das Produkt muss ein „echtes“ Nanoprodukt sein, das heißt, bei der Produktion ist der **Einsatz von Nanomaterialien** erforderlich (EUCOM, 2011a);
- Es muss ein konventionelles Produkt bzw. eine konventionelle Anwendung mit vergleichbarer Funktionalität wie das Nanoprodukt auf dem Markt existieren, um die in der Zielsetzung geforderte vergleichende Betrachtung durchführen zu können („**Referenzprodukt**“);
- Das Produkt sollte **massenmarktauglich**⁵ sein, um eine relevante Hebelwirkung bezüglich der Schonung natürlicher Ressourcen entfalten zu können;
- Das Produkt sollte sich **bereits in der Anwendung** befinden, um eine belastbare Datenbasis für die Herstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase zu gewährleisten;
- Der Kooperationspartner sollte **unmittelbar mit der Herstellung oder mit dem Vertrieb** des zu untersuchenden Fallbeispiels befasst sein;

⁵ Massenmarktauglich bedeutet, dass das Produkt für einen Markt geeignet ist, der sich durch ein hohes Umsatzvolumen sowie eine starke Nachfrage und starke Konkurrenz auszeichnet.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

- Der Kooperationspartner muss in der Lage sein, für das Projekt **ausreichende (personelle) Ressourcen** für die Datenerfassung sowie die erforderlichen Besprechungen und Präsentationen zur Verfügung zu stellen.

Die beiden ausgewählten Fallbeispiele werden im Folgenden kurz vorgestellt.

4.3.1 Fallbeispiel: Elektrisch dimmbare Fenster (EControl-Glas)

Elektrisch dimmbare Fenster können je nach Bedarf mittels Anlegen einer geringen Spannung transparent oder teildurchlässig für Licht und Wärmestrahlung werden. Damit ermöglichen diese Gläser eine aktive Wärme- und Lichtregelung, insbesondere zur Verhinderung der Überhitzung von Räumen und Gebäuden.

In der folgenden Tabelle werden die Ergebnisse bezüglich der Auswahlkriterien zusammengefasst.

Tabelle 1: Auswertung des Fallbeispiels „elektrisch dimmbare Fenster“ in Hinblick auf die relevanten Auswahlkriterien

Kriterium	Ergebnis
Einsatz von Nanomaterialien	Laut Angaben von EControl-Glas werden im Sputterverfahren Nanomaterialien mit einem Durchmesser von 20-50nm abgeschieden. Diese nanoskaligen Teilchen bilden im Verbund die porösen Elektrodenschichten mit Gesamtschichtdicken von 100 und 400nm. Die Kathodenschicht besteht aus Wolframoxid. Somit handelt es sich bei den Elektroden um nanostrukturierte Schichten.
Referenzprodukt	Konventionelle Floatglasisolierfenster mit Aluminiumjalousien
Massenmarkttauglichkeit	EControl-Glas produziert seit knapp 3 Jahren schaltbare Fenstergläser für den Markt. Das Produktionsvolumen hat sich von 600qm (2010) über 2500qm (2011) auf prognostizierte 5000-6000qm (2012) erhöht. Neben EControl-Glas produziert noch ein US-amerikanisches Unternehmen ein vergleichbares Produkt.
Anwendungsreife	Die Produkte von EControl-Glas sind bereits auf dem Markt verfügbar.
Unternehmen befasst sich direkt mit Herstellung / Vertrieb	Trifft zu (siehe Beschreibungen oben)
Ausreichende (personelle) Ressourcen beim Unternehmen	Wurde seitens EControl-Glas zugesagt. Daten zur Energiebilanz in der Nutzungsphase (Vergleich mit konventionellen Isolierfenstern sowie mit Lösungen mit Aluminiumjalousien) liegen in einer Studie vor.

4.3.2 Fallbeispiel: Organische Photovoltaik (Konarka Technologies)

Organische Solarzellen werden aus Werkstoffen der organischen Chemie (Kohlenwasserstoffverbindungen) hergestellt. Insbesondere aufgrund effizienter Produktionsverfahren (z.B. Rolle-zu-Rolle-Fertigung) und ihrer Flexibilität werden sie als eine interessante Alternative zu konventionellen Solarzellen auf Siliziumbasis gehandelt. Einer der bedeutendsten Entwickler und Hersteller von organischen Solarzellen ist die US-amerikanische Firma Konarka Technologies, die in Nürnberg eine ihrer beiden Forschungszentren betreibt (vgl. hierzu auch Kapitel 8).

Die folgende Tabelle enthält die zusammenfassende Charakterisierung des Produkts anhand der zuvor definierten Auswahlkriterien.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Tabelle 2: Auswertung des Fallbeispiels „organische Photovoltaik“ in Hinblick auf die relevanten Auswahlkriterien

Kriterium	Ergebnis
Einsatz von Nanomaterialien	Fullerene (als Elektronenakzeptor)
Referenzprodukt	Solarzellen aus amorphem Silizium
Massenmarktauglichkeit	Durch die Flexibilität des Materials sowie die Möglichkeit zur Fassadenintegration können attraktive neue Flächen für die Installation der Module erschlossen werden.
Anwendungsreife	Gebäudeprodukte sind als Prototypen in Europa geplant.
Unternehmen befasst sich direkt mit Herstellung / Vertrieb	Trifft zu (siehe Beschreibungen oben)
Ausreichende (personelle) Ressourcen beim Unternehmen	Wurde seitens Konarka Technologies in der Entwicklungsabteilung am Standort Nürnberg zugesagt. Generische Daten für die Herstellung sind schon aus öffentlich verfügbaren Studien vorhanden.

4.4 Datenerfassung

Nach Auswahl der Fallbeispiele wurden alle erforderlichen Daten erfasst, um die in Kapitel 2 aufgeführten Ziele zu erreichen. Die Verantwortung hierfür lag bei den jeweiligen Unternehmen, jedoch leistete das Öko-Institut

- methodische Unterstützung sowie
- Unterstützung beim Schließen von etwaigen Datenlücken.

Die methodische Unterstützung beinhaltete Zielformulierung und Festsetzung des Untersuchungsrahmens für die Datenerfassung. Dadurch wurde sichergestellt, dass in beiden Fallbeispielen die erforderlichen Daten auf der Basis von vergleichbaren Modellannahmen und Qualitätskriterien erhoben werden.

Dies beinhaltete zunächst eine Festlegung, für welche Aspekte, Kriterien und Indikatoren von den Unternehmen Daten erfasst werden sollen. Dabei wurde vereinbart, dass die beiden Fallbeispielgeber für eine erste qualitative Analyse zunächst den von der Themengruppe 2 der NanoKommission erarbeiteten „Leitfaden zur Erhebung und Gegenüberstellung von Nutzen- und Risikoaspekten von Nanoprodukten“ anwenden („TG2- Kriterienkatalog“, siehe Kapitel 5.2). Anschließend sollen ausgewählte Schlüsselindikatoren aus der im Nano-NachhaltigkeitsCheck (siehe Kapitel 5.3) „Analyse und strategisches Management der Nachhaltigkeitspotenziale von Nanoprodukten“ erarbeiteten Bewertungsmatrix genutzt werden, wobei schwerpunktmäßig die dort erarbeiteten Schlüsselindikatoren Energieeffizienz, und CO₂-Fußabdruck in die Bewertung einzubringen sind. Für die Auswertung der Auswirkungen der Fallbeispiele auf den Rohstoffverbrauch wurde vom Öko-Institut der Schlüsselindikator „Ressourcenverfügbarkeit“ des Nano-NachhaltigkeitsChecks weiterentwickelt und um quantitative Aspekte des Verbrauchs sowie um Aspekte der Rezyklierbarkeit der verwendeten Materialien ergänzt (vgl. Kapitel 5.4).

Ferner wurden vom Öko-Institut in Abstimmung mit den für die Fallbeispiele zuständigen Unternehmen die für die Datenerfassung jeweils zugrunde liegenden Systemgrenzen, Vergleichseinheiten („funktionelle Einheit“), Anforderungen an die Datenqualität und sonstigen Randbedingungen festgelegt.

Es wird in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass in der vorliegenden Studie entsprechend der gewählten Ziel- und Schwerpunktsetzung keine umfassende Betrachtung human- und ökotoxikologischer Aspekte erfolgen kann. Gleichwohl werden im Rahmen einer

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

„Hotspot“-Analyse und ausgehend von den Fragestellungen des TG2-Kriterienkatalogs relevante (öko-)toxikologische Gesichtspunkt vorrangig aus der Herstellungs- und Gebrauchsphase der betrachteten nanotechnischen Anwendungen adressiert und qualitativ beschrieben. Diese Analyse erhebt jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Insbesondere wird auf human- und ökotoxikologische Aspekte während der Rohstoffgewinnung und der Entsorgung nicht näher eingegangen. Ursache hierfür ist, dass diese Auswirkungen rohstoffspezifisch sehr unterschiedlich sind und zudem die Datenlage teilweise sehr unscharf ist.

4.4.1 Systemgrenzen

Mit der Festlegung der Systemgrenzen wird letztlich bestimmt, welche Produktsysteme Bestandteil der Datenerfassung sind, und ferner welche (Einzel-)Prozesse untersucht werden müssen. Prozesse wiederum stellen diejenigen Teile der untersuchten Systeme dar, für die zur quantitativen bzw. qualitativen Analyse der zuvor festgelegten Aspekte, Kriterien und Indikatoren Daten gesammelt werden sollen. Neben diesen zentralen Festlegungen müssen erfahrungsgemäß während der Bearbeitung weitere Vereinfachungen getroffen werden; diese werden anhand von Abschneidekriterien explizit dargestellt, sodass ggf. eine spätere Ergänzung problemlos möglich ist.

4.4.2 Vergleichseinheiten („funktionelle Einheit“)

Die funktionelle Einheit stellt den quantifizierten Nutzen dar, der für alle untersuchten Produktsysteme gleichermaßen Gültigkeit besitzt und ggf. als Vergleichseinheit zu einem nicht-nanotechnischen Referenzprodukt verwendet wird.

Die Referenzflüsse, also die zur Bereitstellung der funktionellen Einheit erforderlichen Stoff- und Energieströme, werden in Form von bestimmten Mengen an Rohstoffverbräuchen und Energiemengen dargestellt.

4.4.3 Anforderungen an die Datenqualität

Mit den Anforderungen an die Datenqualität werden in allgemeiner Form Merkmale für die Daten festgelegt, die für die Durchführung der Studie benötigt werden. Eine zentral wichtige Anforderung an die Datenqualität stellt die Repräsentativität der verwendeten Daten dar, wobei in eine zeitbezogene, geographische und technische Komponente unterschieden wird:

- **Zeitbezogener Erfassungsbereich:** Grundsätzlich wurde angestrebt, die relevanten Prozesse mit möglichst aktuellen Daten zu modellieren, um eine gute zeitbezogene Repräsentativität der Ergebnisse sicherzustellen. Hierzu wurden Daten aus den Kernprozessen der untersuchten Produktsysteme verwendet, die zum Zeitpunkt der Untersuchung aus dem zurückliegenden Geschäftsjahr (2011) stammten. Bei eher peripheren Prozessen (z.B. generischen Daten zur Herstellung von sonstigen Hilfs- und Betriebsstoffen) wurde ein Datenalter von maximal zehn Jahren als ausreichend erachtet. Dies ist gängige Praxis in Ökobilanzstudien.
- Als **geographischer Geltungsbereich** der Studie wurde Deutschland gewählt. Dies bedeutet, dass sich die Modellierung auf die Herstellung bzw. Anwendung des Nanoprodukts in Deutschland bezieht. Prozesse wie die Gewinnung der Rohstoffe und Energieträger oder Herstellung und Transport von Halbzeugen, die ggf. außerhalb Deutschlands lokalisiert sind, wurden in ihrem jeweiligen geographischen Kontext modelliert.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

- Hinsichtlich des **technischen Erfassungsbereiches** wird der derzeit gültige Stand der Technik verwendet.

In Ergänzung zu der Datenerfassung für die Fallbeispiele wurden für acht weitere, besonders aussichtsreiche Anwendungsfelder (vgl. Kapitel 4.1) vom Öko-Institut rein qualitative Analysen durchgeführt. Dies diente dazu, die übergeordneten Fragestellungen in Hinblick auf die Zielsetzung der vorliegenden Studie (vgl. Kapitel 2) nicht nur auf Basis der beiden ausführlichen Fallbeispiele (elektrisch dimmbare Fenster und organische Photovoltaik), sondern auf die Auswertung von insgesamt zehn Anwendungsfeldern stützen zu können.

Zu diesem Zweck wurde für die acht betrachteten Anwendungsfelder ebenfalls der „Leitfaden zur Erhebung und Gegenüberstellung von Nutzen- und Risikoaspekten von Nanoprodukten“ der Themengruppe 2 des NanoDialogs 2009-2011 der NanoKommission (BMU, 2011) herangezogen und auf Basis generischer, aus öffentlichen Quellen verfügbarer Informationen ausgewertet.

4.5 Datenauswertung

Im Anschluss an die Datenerfassung wertete das Öko-Institut die vorliegende Datenbasis der beiden Fallbeispiele in enger Zusammenarbeit mit den jeweiligen Unternehmen aus. Wie bereits im vorherigen Kapitel dargestellt, wurden hierbei insbesondere der Kriterienkatalog der Themengruppe 2 des NanoDialogs 2009-2011 der NanoKommission (BMU 2011) sowie die quantitativen Schlüsselindikatoren „Ressourcenverbrauch“, „Energieeffizienz“, und „CO₂-Fußabdruck“ verwendet.

Wichtige Schwerpunkte waren dabei die Identifizierung der bedeutendsten Beiträge (der besonders relevanten Prozesse bzw. Aspekte) zum jeweiligen Gesamtergebnis für den Schlüsselindikator („Stellschrauben“) sowie eine Beurteilung der Robustheit der Ergebnisse auf der Grundlage einer Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfung.

Die Ergebnisse dieser Auswertung wurden in Form von Schlussfolgerungen und Empfehlungen zusammengefasst, wobei insbesondere auf die Tragfähigkeit der Aussagen in Abhängigkeit der methodischen Herangehensweise und der Datengrundlagen eingegangen wird.

Die Resultate der beiden Fallbeispiele sind im Rahmen dieses Berichts in den Kapiteln 7 und 8 dokumentiert, während die Auswertungen zu den acht zusätzlichen, auf generischer Ebene betrachteten Anwendungsfelder in Kapitel 6 dargestellt werden.

4.6 Analyse von Rebound-Effekten

Rebound-Effekte werden in der Praxis in erster Linie im Zusammenhang mit einem Energieeinsatz betrachtet und in Prozent ausgedrückt. Ein Rebound-Effekt in Höhe von 20% bedeutet, dass von dem theoretisch möglichen Einsparpotential 20% abgezogen werden müssen, weil in der Praxis ein verändertes Konsumverhalten z.B. aufgrund der Kostenersparnis bei der Nutzung des effizienteren Produktes oder zusätzlicher Anwendungsbereiche eintritt. Prinzipiell kann auch ein negativer Rebound-Effekt eintreten: Ein Rebound-Effekt von -20% würde bedeuten, dass die erwarteten Einsparungen um 20% übertroffen wurden.

Rebound-Effekte können jedoch nicht nur bei energiebezogenen Fragestellungen, sondern auch bei anderen materiellen wie immateriellen Ressourcen (z.B. auch Zeit) auftreten.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Darüber hinaus sollten bei der Analyse von Rebound-Effekten folgende Gesichtspunkte berücksichtigt werden:

- **zeitliche Rebound-Effekte**, bei denen eine Innovation mehr oder weniger Zeitverbrauch bei der Nutzung nach sich zieht. Als Konsequenz daraus kann bei den Konsument/innen mehr Zeit für andere Konsumprodukte zur Verfügung stehen (Beispiel Waschmaschine vs. Handwäsche) oder mehr Energie verbraucht werden, weil das entsprechende Produkt z.B. länger genutzt wird (Beispiel traditionelles Handy vs. Smartphone);
- **räumliche Rebound-Effekte**, bei denen die Innovation mehr oder weniger Raum in Anspruch nimmt, woraus Veränderungen im Konsumverhalten resultieren können (Röhrenfernseher wurden durch Flachbildfernseher mit noch größerer Bilddiagonale ersetzt);
- **technologische Rebound-Effekte**, bei denen z.B. eine Vergünstigung eines Gerätes oder Produktes zu einer stark verbreiteten Anwendung führt.

In den meisten Fällen sind mehrere der oben dargestellten Aspekte relevant. Wie sehr sie sich schließlich als Rebound-Effekt manifestieren, hängt von produkt-, marktsegment- und konsumspezifischen Faktoren ab, die analysiert werden müssen.

Zur besseren Einordnung bietet es sich zudem an, zwischen direkten, indirekten und gesamtwirtschaftlichen Rebound-Effekten zu differenzieren:

- **Direkte Rebound-Effekte** beschreiben einen Prozess, bei dem die Verminderung der Konsumkosten eines Produktes zu vermehrtem Konsum dieses Produkts führt. (Bsp.: treibstoffeffizientere PKWs können eine erhöhte Nutzung induzieren; per saldo kommt es zu weniger Einsparung, als dies bei unverändertem Konsumverhalten der Fall gewesen wäre).
- **Indirekte Rebound-Effekte** sind ebenfalls abhängig von Kosteneinsparungen bei der jeweiligen Anwendung. Die Kosteneinsparungen werden allerdings durch erhöhte oder neue Ausgaben für eine andere Anwendung konterkariert (Bsp.: eingesparte Stromkosten bei einem Kühlschrank führen zu der Anschaffung eines neuen Fernsehers).
- **Gesamtwirtschaftliche Rebound-Effekte** beziehen sich auf die erhöhte Produktion und das erhöhte Wachstum, welche durch z.B. effizientere Produktionstechniken ermöglicht werden.

Übersteigt ein Rebound-Effekt die prognostizierten Einsparungen so wird oftmals auch von ‚backfire‘⁶ gesprochen.

In Hinblick auf weitergehende Informationen zum Thema Rebound-Effekte wird auf eine umfassende Studie aus dem Jahr 2011 hingewiesen, die durch die Europäische Kommission DG Environment in Auftrag gegeben wurde (Maxwell et. al., 2011).

⁶ Der Begriff ‚backfire‘ bezieht sich auf die explosive Fehlzündung einer Schusswaffe. Die Schadenswirkung richtet sich in einem solchen Fall auch gegen den Nutzer der Waffe.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Die Komplexität einer quantitativen Erfassung von Rebound-Effekten übersteigt den Rahmen der hier vorliegenden Studie. Daher werden Rebound-Effekte für die Untersuchungsgegenstände soweit wie möglich entsprechend der oben genannten Aspekte und Einordnungen qualitativ beschrieben, jedoch nicht beziffert. Eine Quantifizierung würde insbesondere auch eine vertiefte Auseinandersetzung mit konsumspezifischen Faktoren erforderlich machen, welche oftmals auch psychologische Komponenten aufweisen. Dies würde jedoch den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen.

5 Hintergründe und methodische Anknüpfungspunkte

5.1 Aktionsplan Nanotechnologie 2015 der Bundesregierung

Anschließend an die „Nano-Initiative – Aktionsplan 2010“ (BMBF, 2006) wurde der „Aktionsplan Nanotechnologie 2015“ (ApN2015; BMBF, 2011) als Fortführung der damals beschriebenen, ressortübergreifenden Zusammenarbeit konzipiert. Die im ApN2015 beschriebenen Maßnahmen gruppieren sich um die globalen, gesellschaftlichen Herausforderungen, die in der Hightech-Strategie Deutschland beschrieben sind (BMBF, 2007). Deutschland setzt sich zum Ziel, in den Bereichen

- Klima / Energie
- Gesundheit / Ernährung
- Mobilität
- Sicherheit / Kommunikation

wichtige Innovationen zu platzieren und Lösungsmodelle zu implementieren, die weltweit als mögliche Antwort zu den drängenden Problemen der Menschheit Akzeptanz finden. In diesen Bereichen werden Forschungsanstrengungen gebündelt und Forschung sowie Forschungsförderung konzentriert. Es muss sich um Lösungen und Strategien handeln, die natürliche Ressourcen schonen, die energieeffizient anwendbar sind, die robust in der Implementation sind und die gesundheitlich und ökologisch unbedenklich oder weniger bedenklich als bestehende Techniken sind.

Die Nanotechnologie als interdisziplinäres und jüngstes Forschungsfeld ist ein Hoffnungsträger auf der Suche nach Lösungen für die oben genannten Bereiche. Deutschland und die EU sind hier mit international anerkannten Forschungsinstitutionen und einem hohen Anteil an kleinen und mittleren Unternehmen (KMUs) weltweit ernstzunehmende Mitspieler auf einem Markt, der für 2015 mit einem Volumen von einer Billion Euro beziffert wird. In der Spitzengruppe aus den USA, Japan, Deutschland und China bewegt sich Deutschland je nach Rubrik zwischen dem 3. und 4. Platz.

Um hier weiterhin unter den führenden Innovatoren und Wirtschaftsstandorten zu bestehen und diese Position weiter auszubauen, wird im ApN2015 beschrieben, welche Bereiche in Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft gefördert oder angepasst werden müssen. Lösungsansätze für die Früherkennung und -minimierung von Risiken im Zusammenhang mit der Nanotechnologie sind genauso entscheidend wie

- den Wissenstransfer von der Forschung in die Industrie zu intensivieren;
- die Rahmenbedingungen für KMUs und qualifizierten Nachwuchs durch neue Möglichkeiten der Finanzierung und Risikokontrolle sowie der Aus- und Weiterbildung zu verbessern;
- die Kommunikation mit Öffentlichkeit und Verbrauchern zu intensivieren, um reflektierte Diskussion und informierte Entscheidungen möglich zu machen.

Es existiert nahezu kein ‚Hightech‘-Produkt mehr, das nicht in irgendeinem Stadium seiner Fertigung, Nutzung oder Entsorgung mit Nanotechnik in Verbindung tritt. Dies wird auch in den folgenden Fallbeispielen deutlich (s. Kapitel 6). Der Einfluss, den die Nanotechnik auf

etablierte Märkte haben kann, ist an den stichprobenartig gewählten Beispielen gut erkennbar. Einige von ihnen entspringen den in Deutschland geförderten Innovationsallianzen im Bereich der Nanotechnologie u.a. aus InnoCNT, Organische Leuchtdioden oder Organische Photovoltaik. Nicht in allen Fällen ist ein Gewinn an Nachhaltigkeit, eine Verringerung der Toxizität, o.ä. im Vergleich zum gewählten Referenzprodukt feststellbar. Dennoch zeigen sich in allen Fallbeispielen selbst bei oberflächlicher Betrachtung signifikante Einsparmöglichkeiten im Bereich Rohstoffe und Energie.

Ob die Potenziale, die in der Nanotechnologie liegen, sinnvoll und zeitnah genutzt werden können, liegt nicht nur an Innovation und einem guten Klima für die Wirtschaft, sondern ganz maßgeblich auch an der Akzeptanz der Verbraucher. Umfragen zeigen, dass die Verbraucher nicht oder nur unzureichend über Produkte und Nanomaterialien in ihrer Umgebung informiert sind (EUCOM, 2010b). Die Bundesrepublik Deutschland erkennt an, dass eine reflektierte und unvoreingenommene Informationspolitik wichtig ist, um eine öffentliche Wahrnehmung, Diskussion und bei – verantwortungsvoll konzipierten Produkten – Akzeptanz beim Verbraucher zu erzeugen. Die Wahl der Produkte, die konsumiert werden, ist von entscheidender Bedeutung. Ohne die Akzeptanz und Kooperation des Verbrauchers kann kein signifikanter Fortschritt in den globalen Problemfeldern (s.o.) erreicht werden.

5.2 Kriterienkatalog der Themengruppe 2 des NanoDialogs 2009-2011

In der ersten Phase des NanoDialogs der Bundesregierung (2006-2008) wurden verschiedene Nanoprodukte hinsichtlich ihrer Risiko- und Nutzenpotenziale beschrieben. Da ein Vergleich dieser Beschreibungen untereinander beziehungsweise eine Interpretation der Ergebnisse nur schwer möglich war, erhielt in der zweiten Dialogphase (2009-2011) die Themengruppe 2 den Arbeitsauftrag, „eine Methode zu erarbeiten, in der Nutzen- und Risikopotenziale von Nanoprodukten systematisch erfasst, transparent beschrieben und bewertet werden können. Das zu erarbeitende Bewertungsinstrument sollte von verschiedenen Anwendergruppen nutzbar sein und anhand von mindestens zwei Beispielen getestet werden“ (BMU, 2011).

Zentrales Ergebnis der Arbeiten des Stakeholderdiskurses⁷ in der Themengruppe 2 war ein „Leitfaden zur Erhebung und Gegenüberstellung von Nutzen- und Risikoaspekten von Nanoprodukten“. Dieser Leitfaden soll vor allem dazu dienen, weitere fallspezifische Stakeholderdiskurse über mögliche Nutzen- und Risikopotenziale von Nanoprodukten zu strukturieren und eine erste Orientierung zu den Nutzen- und Risikoaspekten der betrachteten nanotechnischen Anwendung zu geben. Diese werden jedoch nicht mit Bewertungsindikatoren gegeneinander abgewogen, da diese Bewertung weitergehenden Instrumenten (zum Beispiel Ökobilanzen, regulatorischen Risikobewertungen) vorbehalten bleiben soll, die im Anschluss an die Anwendung des Leitfadens herangezogen werden können. Die ursprüngliche Zielsetzung, eine indikatorbasierte methodische Vorgehensweise zur Bewertung der Nutzen- und Risikoaspekte zu erarbeiten, konnte damit nicht erreicht werden. Neben den methodischen Schwierigkeiten, objektive und allgemein anwendbare Bewertungen der Parameter zu entwickeln, spielten

⁷ Das Öko-Institut hat sich durch die Teilnahme von Herrn Martin Möller aktiv an den Arbeiten der Themengruppe beteiligt.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

hierbei nicht zuletzt auch Zeit- und Ressourcen Gründe eine wichtige Rolle. Dennoch wurden für die Anwendung des Leitfadens von der Themengruppe 2 zwei interessante Hilfsmittel mit einem so genannten Produktsteckbrief und einem Kriterienkatalog entwickelt, die im Folgenden kurz vorgestellt werden sollen.

Der Produktsteckbrief dient dazu, das Endprodukt und das jeweils dabei eingesetzte Nanomaterial zu charakterisieren. Hierfür werden vom Hersteller vorhandene Informationen, zum Beispiel aus dem Sicherheitsdatenblatt, zusammengestellt. Darüber hinaus wird in diesem Dokument auch das Referenzprodukt definiert, welches bezüglich der untersuchten Funktionalität keine Nanomaterialien enthält und das für die Analyse der Nutzen- und Risikoaspekte als Vergleichsobjekt herangezogen wird.

Der erarbeitete Kriterienkatalog enthält Kriterien sowohl zu Nutzen- als auch zu Risikoaspekten. Beide Kriteriensets sind in die fünf Kategorien „Umwelt“, „Verbraucher“, „Arbeitnehmer“, „Gesellschaft“ und „Unternehmen“ untergliedert, wobei innerhalb jeder Kategorie bis zu sechs verschiedene Kriterien aufgeführt sind, die zum Teil durch weitere Unterkriterien erläutert werden. Dieses Dokument, das als Excel-Datei online verfügbar ist, erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, sondern repräsentiert verschiedene, von den Stakeholdern in der Themengruppe 2 als relevant erachtete Aspekte.

Bei den Nutzenaspekten werden innerhalb der fünf Kategorien so genannte Kernkriterien besonders hervorgehoben, deren Betrachtung für die Anwender des Kriterienkatalogs obligatorisch ist.

Der erarbeitete Leitfaden ist so aufgebaut und dokumentiert, dass er von verschiedenen Anwender- beziehungsweise Stakeholdergruppen verwendet werden kann. Im Einzelnen sind dies (BMU, 2011):

- Entwickler in Unternehmen, die eine Ersteinschätzung von Nutzen- und Risikoaspekten neuer Produkte vornehmen möchten;
- Marketingexperten in Unternehmen, welche eine transparente Kommunikation der Nutzen- und Risikoaspekten eines Nanoprodukts beabsichtigen;
- Behörden, die beim Vollzug oder bei Genehmigungen sowie bei der Bewilligung der Förderung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten die Nutzen- und Risikoaspekte einstufen wollen;
- Nichtregierungsorganisationen, die positive beziehungsweise negative Empfehlungen zu Nanoprodukten abgeben und diese Einschätzung mit Unternehmen, Behörden, Medien und der Öffentlichkeit kommunizieren möchten.

Die erarbeiteten Kriterien wurden im Zuge der Entwicklung des Leitfadens anhand von fünf Fallbeispielen einem Praxistests unterzogen. Neben bereits auf dem Markt befindlichen Produkten wie Glasreinigern, PET-Flaschen, Markisengeweben wurden dabei auch Produkte im Entwicklungsstadium (Textilreinigung) sowie sehr frühe Stadien der Materialentwicklung (Windrotorblätter aus CNT-haltigen Materialien) als Beispiele herangezogen. Nur bei zwei der fünf Fallbeispiele war es möglich, den Kriterienkatalog der Themengruppe 2 vollständig anzuwenden und die Ergebnisse für die Veröffentlichung aufzubereiten. Dabei handelte es sich um ein mit Nanomaterial (Kieselsäure) ausgerüstetes Markisengewebe sowie um PET-Flaschen mit nanoskaligem Titanitrid. Diese Praxisanwendung des Instruments zeigte, dass der Kriterienkatalog prinzipiell für eine qualitative beziehungsweise überblicksartige Gegenüberstellung der

Nutzen- und Risikoaspekte geeignet ist. So war es innerhalb eines überschaubaren Zeitraums möglich, relativ vollständige, schlüssige und nachvollziehbare Aussagen zu den zugrunde gelegten Kriterien zusammenzustellen. Im Abschlussbericht der Themengruppe 2 der Nano-Kommission wird aber auch darauf hingewiesen, dass die erzielten „Ergebnisse nur ein erster Schritt in der Betrachtung von potenziellen Nutzen und Risiken von Nanoprodukten“ sein können und einer „tiefer gehenden Prüfung und nach Möglichkeit auch einer Quantifizierung“ bedürfen. Weiter wird empfohlen, die Ergebnisse des Projektes „NachhaltigkeitsCheck für Nanoprodukte“ in den Leitfaden zu integrieren beziehungsweise den Leitfaden als „Vorstufe“ für den Nano-NachhaltigkeitsCheck zu verwenden (BMU, 2011).

5.3 Schlüsselindikatoren des Nano-NachhaltigkeitsCheck

Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, wird in dem hier vorliegenden Projekt auf methodische Vorarbeiten des Nano-NachhaltigkeitsCheck zurückgegriffen. Hierzu gehören insbesondere die Vorgehensweise zur Ermittlung der Schlüsselindikatoren „Energieeffizienz“ und „CO₂-Fußabdruck“, die im Folgenden kurz beschrieben wird. Für weitergehende Informationen wird auf den Abschlussbericht des Nano-NachhaltigkeitsChecks verwiesen (Öko-Institut e.V., 2012a).

5.3.1 Energieeffizienz

Der Schlüsselindikator „Energieeffizienz“ stellt einen quantitativen Parameter dar, der den Kumulierten Energieaufwand (KEA) des Nanoprodukts im Vergleich zum Referenzprodukt vergleichbarer Funktionalität und bezogen auf eine definierte Nutzeinheit (funktionelle Einheit) zum Ausdruck bringt. Der KEA ist die Summe aller während des Lebenszyklus von Nano- und Referenzprodukt auftretenden Primärenergieinputs, inklusive der zur Materialherstellung.

Der Lebenszyklus der Vergleichsobjekte beinhaltet dabei die gesamte Wertschöpfungskette, von Herstellung und Transport der Rohstoffe und Vorprodukte über Produktion und Distribution bis hin zur Nutzung, Nachnutzung und Entsorgung.

Gemäß dem ökonomischen Minimalprinzip wird unter Maximierung der Energieeffizienz verstanden, dass die funktionelle Einheit mit möglichst wenig Energieeinsatz realisiert wird.

Für alle innerhalb der Systemgrenzen identifizierten und relevanten Endenergiemengen, Energieträger, Stoffe, Dienstleistungen und Transporte müssen die jeweiligen Primärenergieinhalte ermittelt werden. Die dafür erforderlichen spezifischen KEA-Daten (zum Beispiel MJ Primärenergie / kWh Elektrizität) können entsprechenden Datenbanken, zum Beispiel GEMIS⁸ entnommen werden.

Je nach Ressourcenquelle werden die ermittelten Primärenergieinhalte eine der folgenden drei Komponenten des Kumulierten Energieaufwandes zugeordnet:

⁸ GEMIS (Globales Emissions-Modell integrierter Systeme) ist eine öffentlich zugängliche Datenbank für Energiesysteme, Stoffe und Dienstleistungen, online abrufbar unter www.gemis.de.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

- $KEA_{\text{nicht-erneuerbar}}$: Summe des Kumulierten Energieaufwands aus fossilen und nuklearen Quellen;
- $KEA_{\text{erneuerbar}}$: Summe des Kumulierten Energieaufwands aus erneuerbaren Quellen sowie
- KEA_{andere} : Summe des Kumulierten Energieaufwands aus energetisch genutzten Reststoffen (zum Beispiel Abfall).

Aus Sicht der Ressourcen spiegelt der Gesamt-KEA (das heißt die Summe des gesamten Kumulierten Energieaufwandes, unabhängig vom jeweiligen Energieträger) keine Knappheiten wider, vor allem weil auch erhebliche Anteile regenerativer und rezyklierter Energie enthalten sein können. Daher wird im Rahmen der gewählten Zielstellung für die Ermittlung der Energieeffizienz der $KEA_{\text{nicht-erneuerbar}}$ herangezogen⁹. Neben einer absoluten Darstellung der Energieeffizienz soll (sofern vorhanden) auch die Energieeinsparung durch das Nanoprodukt im Vergleich zum Referenzprodukt ausgewiesen werden.

5.3.2 CO₂-Fußabdruck (Product Carbon Footprint)

Angesichts der vielversprechenden Potenziale und Lösungsansätze, die nanotechnische Neuentwicklungen zu den vorhandenen Klimaschutzzielen bieten (vergleiche hierzu Kapitel 1), kommt dem Schlüsselindikator „CO₂-Fußabdruck“ eine besondere Bedeutung zu. Bei diesem Schlüsselindikator handelt es sich um einen quantitativen Parameter, der das Treibhausgaspotenzial des Nanoprodukts im Vergleich zum Referenzprodukt vergleichbarer Funktionalität zum Ausdruck bringt. Das Treibhausgaspotenzial bezeichnet die Bilanz aller klimarelevanten Emissionen entlang des gesamten Lebenszyklus eines Produkts in einer definierten Anwendung und bezogen auf eine definierte Nutzeinheit (funktionelle Einheit) (Grießhammer & Hochfeld, 2009). Treibhausgas-Emissionen im Sinne dieser Definition sind all diejenigen gasförmigen Stoffe, für die vom Weltklimarat IPCC ein Koeffizient für das Treibhauspotenzial (engl.: global warming potential = GWP) definiert wurde. Der Lebenszyklus der Vergleichsobjekte beinhaltet dabei die gesamte Wertschöpfungskette, von Herstellung und Transport der Rohstoffe und Vorprodukte über Produktion und Distribution bis hin zur Nutzung, Nachnutzung und Entsorgung. Bezüglich der grundsätzlichen Vorgehensweise wird auf die entsprechende DIN-Norm (DIN EN ISO 14040) verwiesen. Ergänzende Informationen zur methodischen Vorgehensweise befinden sich in PAS 2050¹⁰ (BSI, 2008).

⁹ Es wird in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass eine alleinige Betrachtung des $KEA_{\text{nicht-erneuerbar}}$ im Einzelfall problematisch sein kann. Dies gilt insbesondere dann, wenn Produkte aus Ländern mit großen Unterschieden bezüglich ihres Strommixes verglichen werden (z.B. Produkt aus Deutschland mit einem vergleichsweise hohen Anteil fossiler energetischer Ressourcen vs. Produkt aus der Schweiz mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energieträger). Dies trifft jedoch bei den im Rahmen der vorliegenden Studie betrachteten Fallbeispielen nicht zu, so dass eine alleinige Betrachtung des $KEA_{\text{nicht-erneuerbar}}$ zu robusten Ergebnissen führt.

¹⁰ PAS 2050: Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services: Standard für die Bestimmung der Treibhausgasbilanz eines Products.

Die Auswertung für den Schlüsselindikator „CO₂-Fußabdruck“ entspricht der Wirkungsabschätzung einer Ökobilanz, wobei allerdings nur die Wirkungskategorie des Treibhauspotenzials ermittelt wird. In diesem Schritt werden die im Rahmen der Datenerfassung ermittelten Sachbilanzdaten klassifiziert¹¹ und charakterisiert¹² und zum Schlüsselindikator aggregiert. Neben einer absoluten Darstellung des CO₂-Fußabdrucks soll (sofern vorhanden) auch die relative CO₂-Einsparung durch das Nanoprodukt im Vergleich zum Referenzprodukt ausgewiesen werden.

5.4 Aktueller Wissensstand zu kritischen Rohstoffen und Materialien

5.4.1 Einbezug neuer Forschungsergebnisse

Der Schlüsselindikator „Ressourcenverfügbarkeit“ des Nano-NachhaltigkeitsCheck basiert im Wesentlichen auf Vorgehen und Methodik der Studie „Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential“ (Öko-Institut e.V., 2009). Diese Studie geht im Wesentlichen der Frage nach, bei welchen metallischen Rohstoffen in absehbarer Zeit Versorgungsengpässe zu befürchten sind, die die Entwicklung so genannter „Zukunftstechniken“ beeinträchtigen könnten.¹³ Zwar ist die Methode ebenso auf andere metallische und z.T. auch nichtmetallische nicht-erneuerbare Rohstoffe übertragbar, sie erfordert aber vom Anwender ein hohes Maß an wissenschaftlicher Analyse. Insbesondere bei Rohstoffe mit unklarer Datenlage hängt das Ergebnis der Analyse vielmals vom Hintergrundwissen und den geologisch-technischen Erfahrungen des Anwenders ab. Unklare Datenlagen sind insbesondere bei der Frage nach den geologisch nachgewiesenen Reserven anzutreffen, da sich diese oftmals auf die Angaben von nationalen geologischen Diensten oder den Veröffentlichungen privatwirtschaftlich agierender Organisationen stützen, die mit ihren jeweiligen Angaben und Prognosen zum Teil Eigeninteressen verfolgen können.

Die Frage nach potenziellen Versorgungsengpässen hat dennoch eine hohe ökonomische und politische Bedeutung und erfuhr im Zuge steigender Rohstoffpreise seit dem Jahr 2003 – mit einem signifikanten Einbruch von Mitte 2008 bis ca. Ende 2009 – eine zunehmende Bedeutung. In der Folge dieser Entwicklung wurden seit 2009 verschiedene unabhängige Studien in Auftrag gegeben, die die Frage nach möglichen Versorgungsengpässen gezielt und ergebnisoffen untersuchen sollten (siehe wesentliche Publikationen: Angerer et al., 2009; Elsner, 2010; Erdmann et al., 2011; EUCOM, 2010c; T. E. Graedel et al., 2011; JRC et al., 2011; Morley & Eatherley, 2008; Nassar et al., 2012; Öko-Institut e.V., 2009, 2011; Poole, 2012; Schweizer Akademie der Technischen Wissenschaften, 2010).

¹¹ Klassifizierung bedeutet die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den ausgewählten Wirkungskategorien (vergleiche DIN EN ISO 14040).

¹² Charakterisierung bezeichnet die Umwandlung des zugeordneten Sachbilanzergebnisses in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators. Hierfür kommen Charakterisierungsfaktoren zum Einsatz, die aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurden (vergleiche DIN EN ISO 14040).

¹³ In der Studie wurden folgende vier Technikfelder als Zukunftstechniken definiert: Elektronik, Photovoltaik, Batterien, Katalysatoren.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Dabei ist zu betonen, dass jede dieser Arbeiten bezüglich Zielsetzung und Methodik anders aufgebaut ist und somit nicht uneingeschränkt miteinander verglichen werden kann. Während beispielsweise die Studie von UNEP & Öko-Institut (Öko-Institut e.V., 2009) der Frage nach Knappheiten für "Zukunftstechnologien" nachgeht, analysiert die Studie vom U.S. Department of Energy (2010) mögliche negative Beeinträchtigungen durch Versorgungsengpässe für die US-amerikanische Wirtschaft. Vergleichbare regionale und nationale Perspektiven weisen die Studien der britischen Environment Agency (Morley & Eatherley, 2008), der Europäischen Kommission (EUCOM, 2010c) und von IZT & Adelphi (Erdmann et al., 2011) auf.

Dennoch kann mit Hilfe einer Zusammenschau dieser Arbeiten ein guter Überblick über den Stand der Forschung zu diesem Thema erlangt werden. Dabei muss allerdings einschränkend bemerkt werden, dass die meisten dieser Studien einen deutlichen Fokus auf metallische Rohstoffe legen und andere Rohstoffe zumeist ausgeklammert werden.

Dennoch wird an dieser Stelle empfohlen, die mittlerweile durch diese Studien verfügbare Datenlage zu nutzen und somit die Beantwortung der Frage nach möglichen Versorgungsengpässen bzw. Knappheiten für die Nutzer zu vereinfachen.

Dabei soll darauf hingewiesen werden, dass die oben aufgelisteten Studien laufend durch neue Arbeiten ergänzt und aktualisiert werden. Insbesondere ist für die kommenden Monate mit einer überarbeiteten Studie der Europäischen Kommission, sowie mindestens einer weiteren wissenschaftlichen Arbeit bezüglich Rohstoffe für nicht-energieerzeugende Techniken von Seiten des Joint Research Centers (JRC) zu rechnen.

5.4.2 Unterteilung in ökonomisch, soziale und ökologische Auswirkungen der Rohstoffnutzung

Knappheit oder Kritikalität stellen zwar einen sehr wesentlichen Aspekt der derzeitigen Ressourcendebatte – insbesondere in Bezug auf Metalle – dar, decken jedoch nicht das gesamte Spektrum der zu betrachtenden Nachhaltigkeitsauswirkungen (ökologisch, sozial, ökonomisch) ab. Wie bereits im oberen Abschnitt dargelegt, orientieren sich die derzeitigen Arbeiten zu Knappheiten und Kritikalitäten primär auf die Reduzierung negativer ökonomischer Auswirkungen (ökonomische Nachhaltigkeitsdimension) und nur teilweise auf potenziell negative Auswirkungen auf die Entwicklung so genannter Zukunfts- oder Nachhaltigkeitstechniken (Teilbereich der ökologischen Dimension).

Darüber hinaus spielen allerdings noch weitere ökologische und soziale Aspekte im Zusammenhang mit der Rohstoffentnahme eine wesentliche Rolle. Dies betrifft insbesondere folgende Aspekte:

- Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen bei Förderung und Verarbeitung;
- Umweltzerstörung und Schadstoffemissionen bei Förderung und Verarbeitung;
- Negative soziale Auswirkungen auf Arbeitnehmer und benachbarte Bevölkerungsgruppen;
- Konflikte um Zugriffsrechte bzw. Erlöse aus dem Ressourcenabbau.

Um diesen Aspekten auch in der Bewertung gerecht zu werden, wird folgendes Vorgehen empfohlen:

Integration ökologischer Aspekte

Die berücksichtigten ökologischen Aspekte ergeben sich aus den Wirkungsabschätzungsmethoden zur Ökobilanz Zu den häufigsten Umweltwirkungskategorien der Bewertung, die in nahezu allen existierenden Datensätzen bilanziert werden, zählen: Energieaufwand, Treibhausgasemissionen, Versauerungspotenzial, Eutrophierungspotenzial und Ozonerstörungspotenzial.

Diese Daten sollten sowohl für Produkt als auch Referenzprodukt erhoben und gegenübergestellt werden. Wird parallel dazu, in einem anderen Bewertungsmodul, ein ökobilanzieller Vergleich der beiden Alternativen durchgeführt, so ist darauf zu achten, dass die Ökobilanzdaten nur einmal in die Gesamtbewertung einfließen (Vermeidung einer indirekten Doppelgewichtung ökologischer Auswertungen).

Integration sozialer Aspekte

Zusätzlich zu ökonomischen und ökologischen Aspekten ist zu prüfen, ob die verwendeten Rohstoffe signifikante negative soziale Auswirkungen in den Abbauregionen aufweisen. Neben verschiedenen Aspekten wie Kinderarbeit und Arbeitsstandards ist dabei auch die Konfliktwirkung relevant. Generell gilt das Risiko für Kinderarbeit und substanzielle Mängel bei den Arbeitsstandards besonders beim so genannten „artisanalen“ Abbau von Erzen¹⁴ als besonders groß.¹⁵ Tabelle 3 gibt einen orientierenden Überblick über diejenigen Metalle und Minerale, die zu einem relativ hohen Anteil im artisanalen Abbau gewonnen werden.

Tabelle 3: Schätzung des maximalen Anteils des artisanalen Kleinbergbaus an der weltweiten Gesamtproduktion (Wagner et al., 2007)

Metalle*			
Antimon	≈ 4%	Mangan	11%
Beryll	5%	Platin	5% (1%**)
Blei	2,5%	Quecksilber	≈ 18%
Chrom	5%	Silber	6,8%
Eisen	4%	Tantal	20%***
Gold	≈ 10%	Wolfram	6%
Kobalt	30%	Zink	1,1%
Kupfer	0,5%	Zinn	≈ 30%****

* Ohne VR China / ** Vermutete Kleinbergbauproduktion in Russland und Kolumbien / *** Bergbau aus afrikanischen Ländern (DR Kongo, Mosambik, Ruanda, Äthiopien und Burundi) / **** Unter Einbezug der PT-Timah-Subunternehmen auf Banka Island, die dem Kleinbergbau zuzurechnen sind, sowie des vietnamesischen Staatsbergbaus, der artisanale Methoden anwendet.

¹⁴ Kleinbergbau, bei dem die bergmännischen Arbeiten nur manuell getätigt werden, bezeichnet man auch als artisanalen Bergbau.

¹⁵ Zusätzlich dazu existieren zahlreiche soziale Brennpunkte im Bereich der Produktion nachwachsender Rohstoffe.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Dabei sollte allerdings bedacht werden, dass artisanaler Abbau nicht zwangsläufig als negativ bewertet werden darf.¹⁶ Ein Hinweis auf artisanale Abbaumethoden stellt jedoch ein Indiz für erhöhte soziale Risiken bei der Rohstoffgewinnung dar, welchen mit Hilfe wirkungsvoller Maßnahmen (z.B. Engagement für sozial gerechten Abbau, verbessertes Recycling) z.T. begegnet werden kann.

Hinsichtlich der Konfliktwirkung sind vor allem diejenigen Minerale und Metalle zu berücksichtigen, die teilweise in den östlichen Landesteilen der Demokratischen Republik Kongo abgebaut werden. Dies trifft im Wesentlichen auf Tantal (Coltan), Wolfram, Zinn, Gold und mit einigen Einschränkungen auch Kobalt zu (vgl. Weltmarktanteile in der folgenden Tabelle 4).¹⁷ Zwar spielt die Frage nach Zugriffsrechten auf Rohstoffe und weitere natürliche Ressourcen sowie der Verteilung der Erlöse aus den extraktiven Industrien in vielen Regionen eine große Rolle, die Problemlage ist aber in keinem Fall so eindeutig beschrieben und bewertet wie in der Demokratischen Republik Kongo, wo der Zusammenhang zwischen Rohstoffabbau und Konflikten in einem Bericht des UN-Sicherheitsrates festgestellt wurde (UNSC, 2003). Auch hier gilt, dass die Verwendung eines der gelisteten Metalle nicht zwangsläufig als negativ bewertet werden darf, sondern vielmehr als Indiz für mögliche negative sozialer Auswirkungen gesehen werden muss.

Tabelle 4: Weltmarktanteile der Demokratischen Republik Kongo an der Primärgewinnung ausgewählter Metalle (Tsurukawa et al., 2011; USGS, 2012; Wagner et al., 2007)

Metall	Anteil der Demokratischen Republik Kongo an der Weltprimärförderung
Gold	Keine Angaben
Kobalt	50%
Tantal	5-50% ¹⁸
Wolfram	Keine Angaben
Zinn	2%

¹⁶ Zwar weisen artisanale Abbaumethoden vielerorts eklatante Mängel hinsichtlich Arbeitssicherheit und Sozialstandards auf, die meist hohen Arbeitsintensitäten stellen aber auch beträchtliche Entwicklungschancen dar, da i.d.R. eine sehr große Zahl von Arbeitnehmern vom Rohstoffabbau unmittelbar profitiert. Im Gegensatz dazu werden industrielle Abbaumethoden oftmals wegen ihrem verhältnismäßig geringem Arbeitskräfteeinsatzes sowie ihrer geringen wirtschaftlichen Breitenwirkung kritisiert.

¹⁷ Kobalt wird in der Republik Katanga im Südosten des Landes abgebaut. Die Region ist seit längerem nicht mehr von bewaffneten Konflikten betroffen.

¹⁸ Über den Marktanteil der DR Kongo liegen keine exakten Daten vor, da ein Großteil des Erzes in betrügerischer Absicht falsch deklariert auf den Weltmarkt gelangt. Die dargestellten Werte markieren die Bandbreite existierender Schätzungen.

5.4.3 Berücksichtigung der Relevanz der Rohstoffverbräuche

Zur Bewertung des Rohstoffverbrauchs ist zudem erforderlich, die derzeitige und zukünftige Nachfragewirkungen einer Anwendung zu quantifizieren und in ein Verhältnis mit den jeweiligen Gesamtfördermengen zu setzen. So ist beispielsweise denkbar, dass die Gesamtnachfrage einer bestimmten Anwendung nach einem Rohstoff selbst im optimistischsten Marktdurchdringungsszenario deutlich hinter der Nachfrage anderer Sektoren und Anwendungsbereiche zurückbleibt. Dieser Fall hätte unter Anderem deutliche Auswirkungen auf die Frage nach den Verantwortlichkeiten hinsichtlich möglicher Knappheiten sowie eventueller sozialer Auswirkungen.

Generell sollte bei einer Bewertung der Ressourcenverbräuche grundsätzlich der jetzige jährliche Rohstoffbedarf der zu untersuchenden Anwendung sowie deren Alternative mit dem weltweiten Gesamtverbrauch des Rohstoffs in Beziehung gesetzt werden. Zudem ist eine Prognose erforderlich, wie sich dieser Marktanteil bis in 10 und 20 Jahren entwickeln könnte. Hier sollte insbesondere auch ein Maximalszenario (hohe Marktdurchdringung der Anwendung) berücksichtigt werden.

Zu beachten ist bei dieser Analyse insbesondere die Definitionsbreite der Anwendung: Dabei muss die Definition auf der technischen Funktionsweise beruhen und nicht nur auf dem Produktionsvolumen eines Herstellers (d.h. es müssen auch die Anteile jetziger und evtl. zukünftiger Konkurrenten mit berücksichtigt werden).

Um die ermittelten Werte in anschaulichen Bezug setzen zu können, können Angaben zu anderen Anwendungsbereichen des betrachteten Rohstoffes als ergänzende Information hinzugefügt werden (z.B. bei Wolfram: Marktanteil des Einsatzes für Hartmetalle).

5.4.4 Berücksichtigung der Rezyklierbarkeit

Zur Bewertung des Rohstoffverbrauchs ist es zudem erforderlich, die Rezyklierbarkeit des Produktes sowie dessen Referenzprodukt zu betrachten. Dabei soll auf alle Rohstoffe – aber insbesondere die als kritisch/knapp eingestuft sowie die als ökologisch oder sozial relevanten Rohstoffe – eingegangen werden.

Es ist zu ermitteln, ob diese Stoffe in technologischer Hinsicht aus der zu untersuchenden Anwendung und dessen Alternative zurückgeholt werden können.¹⁹ Zudem muss ermittelt bzw. abgeschätzt werden, wie hoch die tatsächlichen bzw. prognostizierten Rücklauf- und Recyclingraten ausfallen. Hierbei müssen auch mögliche wirtschaftliche und logistische Beschränkungen berücksichtigt werden (intrinsischer Materialwert versus Sammel- und Recyclingkosten).

¹⁹ Hier ist insbesondere Vorsicht in Bezug auf „Downcycling“ geboten: Viele Rezyklate werden zwar einer „stofflichen Verwertung“ zugeführt, es handelt sich dabei aber oft um eine Sekundärverwertung mit geringeren technischen Ansprüchen (z.B. Verwendung als Bauschutt zur Verfüllung und Stabilisierung von Schächten). Auch bei Metalllegierungen werden oft stoffliche Verwertungsquoten von 100% angegeben, obwohl einzelne Legierungsbestandteile in der Rezyklatlegierung nicht benötigt werden und dort dissipativ verteilt werden.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Im Einzelfall kann auch die Situation auftreten, dass ein bestimmter Stoff so in einer Fraktion vorliegt, dass er jetzt zwar nicht zurückgeholt werden kann, dies aber evtl. in der Zukunft relevant erscheinen könnte (z.B. in Fällen in denen jetzt Recycling technisch/wirtschaftlich noch nicht möglich ist). Hier kann ein Vergleich der Stoffkonzentrationen zu denen in Erzen und anderen Schrotten und Abfällen eine Hilfestellung bieten: Liegt die Konzentration deutlich unter denjenigen in anderen Stoffströmen, so ist ein Recycling auch perspektivisch unwahrscheinlich. Damit ist der Verlust den so genannten „dissipativen Verlusten“ zuzuordnen.

6 Ergebnisse der Recherchen aus prioritären Anwendungsbereichen

Im Folgenden werden vielversprechende, nanotechnische Entwicklungen mit den entsprechenden Referenzprodukten verglichen. Im Vordergrund stehen dabei Material- und Energieaspekte. Es wird für jeden Anwendungsbereich dargestellt, welche Einsparungsmöglichkeiten bei Material in Bezug auf die zu Grunde liegenden Rohstoffe und Energie in relevanten Marktsegmenten bestehen. In diesem Zusammenhang werden die Triebkräfte für Innovationen an bestehenden Produkten vorgestellt. Aussichtsreiche Entwicklungen werden daher auf Potenziale, aber auch möglicherweise vorhandene Rebound-Effekte untersucht. Es werden in diesem Zusammenhang folglich auch human- und ökotoxikologische Gesichtspunkte sowie weitere Nachhaltigkeitsaspekte diskutiert, sofern sie sich im direkten Vergleich signifikant vom Referenzprodukt unterscheiden.

Die diskutierten Daten werden verwendet, um die Forschungsfragen, die Kern dieser Arbeit sind, für jedes vorgestellte Produkt zu beantworten.

Von den zehn Fallbeispielen wurden acht auf qualitativer Ebene betrachtet. Vier Fallbeispiele hiervon vergleichen „echte“ Nanoprodukte (vgl. 5.3) und nicht nanotechnischen Referenzprodukte. Zwei weitere Fallbeispiele sind Grenzfälle, in denen Nanotechnik die Funktion ermöglicht, aber keine Nanopartikel verwendet werden. Vielmehr werden hier Filter oder Siebe mit nanometergroßen Poren verwendet, um Prozesse zu optimieren. Als Referenz dienen hier die bisher genutzten Trennverfahren. Die letzten zwei der acht qualitativen Fallbeispiele beschäftigen sich mit Produkten, deren Referenzprodukte Nanomaterialien enthalten und die durch das bessere Verständnis und den gezielten Einsatz weiterer Nanotechnik erheblich modifiziert werden konnten.

Die zwei verbleibenden Fallbeispiele sind quantitativ. Sie befassen sich mit schaltbaren Fenstern und organischer Photovoltaik (vgl. Kapitel 7 und 8). In beiden Fällen wurden die Schlüsselindikatoren mit Hilfe von jeweils einer repräsentativen Firma aus den genannten Bereichen quantifiziert.

6.1 Neodym-Magneten

6.1.1 Anwendungsfelder

Starke Magneten haben industriell eine wichtige Bedeutung, da sie eine unverzichtbare Komponente der Energiewandler in Elektromotoren sind. Für die Umwandlung von elektrischer Energie in kinetische Energie (Elektromotor; von Haushalt-Kleinstgeräten bis zu Motoren in den Bereichen Elektromobilität und Industriemaschinen) und umgekehrt (Generator, z.B. Wind- und Gezeitenkraftwerke) sind sie unabdingbar. Moderne Windkraftanlagen verwenden bevorzugt diese Magneten, sie werden aber auch in Lautsprechern, Festplatten und elektrischen Fahrzeugen eingesetzt.

6.1.2 Referenzprodukt

Das Referenzprodukt ist auch ein Neodym-Magnet. Gesinterte Magneten aus Neodym (Nd) wurden in den 80er Jahren des vergangenen Jahrhunderts entwickelt. Seitdem hat sich die grundsätzliche Mixtur nicht verändert. Die Summenformel für Nd-Magneten lautet $\text{Nd}_3\text{Fe}_{14}\text{B}$ (Neodym-Eisen-Bor) (Herbst et al., 1984). Im Unterschied zu dem Nanoprodukt werden hier

keine nanogekörnten Metalle eingesetzt. Da die Magneten in dieser Zusammensetzung sowohl anfällig gegenüber erhöhten Temperaturen (>80°C) als auch gegenüber Korrosion sind, wird ihnen Dysprosium zugesetzt und sie werden beschichtet (meist mit Nickel). Darüber hinaus können die Magneten Praseodym, Terbium und Kobalt enthalten. Praseodym wird als partieller Ersatz für Neodym verwendet, da es ähnliche Eigenschaften hat aber günstiger ist. Terbium und Kobalt sind als Teil der herstellereigenspezifischen Mixturen beigemischt, um die Materialeigenschaften zu beeinflussen. Nd-Magneten sind deutlich stärker und damit in der gleichen Anwendung leichter als etwa Ferritmagneten. Die Effizienz der Nd-Magneten kann nach Einschätzung von Wissenschaft und Industrie über die Materialzusammensetzung nicht weiter gesteigert werden (Bourzac, 2011; Gutfleisch et al., 2011).

6.1.3 Funktionalität der Nano-Komponente

Es werden große Erwartungen in die Verwendung von Metallpulvern mit Nano-Körnung (20 nm) gelegt. Die Vermengung von nanoskaligem Nd- und Fe-Pulver und die anschließende Formung des Magneten ermöglichen magnetische Austauschwechselwirkungen zwischen den Partikeln, die zur Erhöhung des Energieproduktes führen (Wecker et al., 1995). Das Energieprodukt ist ein Maß für die magnetische Energie, die in einem Magneten gespeichert ist. Je größer das Energieprodukt ist, desto größer sind auch die magnetischen Kräfte, die von dem Magneten ausgehen. Man spricht von Energie'produkt', weil es als Produkt aus Magnetfeldstärke und magnetischer Flussdichte bestimmt wird. Prof. Gutfleisch²⁰ geht davon aus, dass durch den Einsatz von nanoskaligen Metallpulvern eine Erhöhung des Energieproduktes um 10-30% erzielt werden kann. In solchen Magneten würden hart- und nanostrukturierte, weichmagnetische Schichten verpresst werden.

6.1.4 Rohstoff- und Materialaspekte

Nd-Magneten benötigen neben Neodym weitere Seltene Erden wie z.B. Praseodym, Dysprosium oder Terbium. 2008 wurden ca. 70% der weltweiten Nd-Produktion für Nd-Magneten aufgewendet (ca. 18.200 t). Dieser Wert wird weiter ansteigen (Öko-Institut e.V., 2011). Die Gewinnung von Seltenen Erden ist mit einer starken Belastung der Umwelt vor Ort und durch hohen technischen Aufwand gekennzeichnet. Da Seltene Erden immer im Verbund miteinander vorkommen und die prozentualen Anteile von jedem Element in der jeweiligen Lagerstätte unterschiedlich sind, müssen für jede Lagerstätte spezielle Methoden zur Aufreinigung der individuellen Seltenen Erden etabliert werden. In jedem Fall werden große Mengen toxischer oder radioaktiver Chemikalien (Thorium, Uran, Schwermetalle, Säuren u.a.) benötigt oder bei unzureichenden Sicherheitsvorkehrungen freigesetzt, um die Aufreinigung durchzuführen (Öko-Institut e.V., 2011). Diese Chemikalien müssen nach dem Aufreinigungsprozess entsorgt werden und stellen damit einen wesentlichen Kostenfaktor in der Gewinnung der Seltenen Erden dar (Murphy & Spitz, 2011). Durch den aufwendigen Gewinnungsprozess der Seltenen Erden und deren limitiertes Vorkommen (die größten Lagerstätten befinden sich in China) ist

²⁰ Prof. Dr. Oliver Gutfleisch Fraunhofer-Projektgruppe IWKS; Telefoninterview zwischen dem Öko-Institut e.V. und Prof. Gutfleisch

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

es von großer wirtschaftlicher und technologischer Bedeutung, die Magneten weiter zu optimieren, um wahlweise eine höhere Energieeffizienz oder eine Verminderung des Gewichtes und der verwendeten Seltenen Erden zu erreichen.

Das oben genannte Verfahren zur Herstellung von optimierten Nd-Magneten (s. Kapitel 6.1.3) ermöglicht unterschiedliche Geometrien für das Endprodukt und eliminiert Schnittverluste bei der Produktion. Im Anbetracht der Weltmarktsituation für Seltene Erden und insbesondere für Neodymoxid und Dysprosium wird eine effizientere Rohstoffnutzung angestrebt. Das U.S.-amerikanische Amt für Energie (U.S. Department of Energy) prognostiziert einen Bedarf von ca. 30.657 t im Jahr 2015. Selbst in konservativen Annahmen dieser Studie wird ein Bedarf von Nd weit über dem Weltmarktangebot spätestens für 2020 vorhergesagt (U.S. Department of Energy, 2010). Andere Schätzungen liegen deutlich darunter und prognostizieren maximal 23.000 t Nd-Oxid Bedarf bis 2020 (Öko-Institut e.V., 2011). Ein großer Faktor in dieser Entwicklung wird die gesellschaftliche Akzeptanz von Elektro-Mobilität sein, also wie hoch der zukünftige Bedarf an Elektromotoren im Alltag werden wird. Gekoppelt damit bleibt abzuwarten, ob in Europa eine neue Effizienzverordnung zu Elektromotoren (IE4)²¹ implementiert wird (IEC, 2009). Sollte dies geschehen, würde die Nachfrage nach Nd-Magneten weiter gesteigert werden. Byron Capital Markets nimmt einen Bedarf von 193 g Nd für einen 55 kW Elektromotor an, während Kingsnorth bis zu 1,9 kg Nd pro Motor für ihre Schätzungen zugrunde legen (Öko-Institut e.V., 2011). Basierend auf diesen sehr unterschiedlichen Annahmen erklären sich die hohen Variationen in den Bedarfsprognosen.

Angesichts der potenziell hohen Nachfrage nach diesen Rohstoffen gewinnt auch die Forschung zur Rezyklierbarkeit der Nd-Magneten immer mehr an Bedeutung. Japan hat als Reaktion auf die chinesische Drosselung der Exportrate für Seltene Erden (China stellt etwa 97% der Weltproduktion von Nd-Oxid) ein mit 1,2 Mrd. \$ dotiertes Forschungsprogramm aufgelegt, in welchem z.B. Hitachi Erfolge bei der säurefreien Rohstoffrückgewinnung aufweisen kann. Dort wird erwartet, mit der Rückgewinnung 2013 beginnen zu können. Dennoch wird die Rückgewinnung der Seltenen Erden nach Schätzung von Experten nur wenige Prozent des wirtschaftlichen Bedarfs decken (Hitachi, 2010; Poole, 2012).

6.1.5 Energieeffizienz

Der wesentliche Unterschied zwischen den klassischen und den nanogekörnten Nd-Magneten besteht in dem Herstellungsprozess. Für die Herstellung des nanogekörnten Nd-Magneten müssen Nd und Fe in die gewünschten Korngrößen zermahlen werden. Hier ist zusätzliche Energie erforderlich. Während des Formungsprozesses müssen zudem hohe Drücke und Temperaturen von ca. 600°C erzeugt werden (Wecker et al., 1995). Leider sind derzeit keine näheren Angaben zu den benötigten Energiemengen verfügbar. Die Einschichtung von hart- und weichmagnetischen Lagen in dem Endprodukt erlaubt eine gute Formbarkeit und minimiert Schnittverluste. Das gegenüber dem Referenzprodukt erhöhte Energieprodukt der nanogekörnten Nd-Magneten erlaubt eine Verbesserung der Energieausbeute z.B. bei Einsatz in Windkraftanlagen. Die Steigerung der Magneteffizienz um 30% wird sich wahrscheinlich nicht in

²¹ International Efficiency: Internationaler Effizienzstandard für Elektromotoren.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

einer 30%igen Steigerung der Effizienz von Windkraftanlagen zeigen, da weitere Faktoren, wie z.B. Reibungs- und Wärmeverluste, Verschleißerscheinungen, physikalische Rahmenbedingungen, u.a. dort eine Rolle spielen könnten. Diese zu untersuchen ist aber jenseits des Rahmens dieser Studie.

6.1.6 Exposition und Toxikologie

Grundsätzlich ist in Hinblick auf die toxikologischen Gesichtspunkte von Seltenen Erden zu beachten, dass diese ökotoxikologisch bislang kaum untersucht sind und aufgrund des natürlichen Hintergrunds im Boden bzw. Sediment eine anthropogene Belastung nur schwer nachweisbar ist. Es ist bekannt, dass Seltene Erden, die als Ionen freigesetzt werden, in der Umwelt zu Nanopartikeln und Kolloiden ausfallen können. Humantoxikologisch liegen ebenfalls nur wenige Daten vor. Neodymstäube können zu Schleimhautreizungen führen. Neodym in Lösungen zeigte zytotoxische Eigenschaften mit einem LC_{50} Wert von $101 \mu\text{M}$ (Rim et al., 2013).

Ausgehend von diesen grundsätzlichen Überlegungen ist jedoch festzuhalten, dass für die nanostrukturierten Nd-Magneten die gleichen Rohstoffe wie auch für die gesinterten, nicht nanostrukturierten Nd-Magneten verwendet werden. Im Vergleich zum Referenzprodukt ergeben sich allenfalls während der Produktionsphase Risiken durch Exposition von Mensch und Umwelt, falls es während des Herstellungsprozesses zur Freisetzung von Metallstäuben kommen sollte. Dies wäre allerdings nur im Rahmen eines Störfalls als Szenario vorstellbar, da die hohe Reaktivität von nanoskaligem Eisen und Neodym ohnehin eine vollständige Kapselung des Produktionsprozesses erfordert. Im Endprodukt sind die nanoskaligen Stäube fest miteinander verbunden und mit z.B. Epoxidharz oder Nickel ummantelt, um Korrosion vorzubeugen. Das Freiwerden von nanoskaligen Komponenten während der Gebrauchs- und Entsorgungs- bzw. Rezyklierungsphase ist daher unwahrscheinlich. Ursache hierfür ist, dass die nanopartikulären Metallstäube, die in der Produktion eingesetzt wurden, fest in der Produktmatrix eingelassen sind.

6.1.7 Weitere Nachhaltigkeitsaspekte

Im Licht der Klimaschutzziele der industrialisierten Länder, insbesondere der Europäischen Union und der Bundesrepublik Deutschland, ist jede Effizienzsteigerung, die sich auf den Bereich der erneuerbaren Energien oder auf die eine sonstige Schonung von natürlichen Ressourcen positiv auswirkt, sehr attraktiv. Darüber hinaus können mit kleineren Magneten gleicher Leistung kompaktere Elektromotoren gebaut und neue Formfaktoren für Geräte des Alltags und der Elektromobilität realisiert werden.

Die Beschäftigungswirkung für die Magnetproduktion selbst ist in Europa begrenzt, da nur ca. 3% der weltweiten Produktion von Nd-Magneten in Europa stattfindet (Öko-Institut e.V., 2011). Im Zuge der Weiterverarbeitung der neuen Magneten zur Nutzung in Motoren und Generatoren könnte eine erhöhte Nachfrage aufgrund des Innovationspotenzials der neuen Produkte entstehen und sich positiv auf Beschäftigungssituationen in Europa auswirken, sowohl im Produktionssektor als auch im Recycling-Bereich.

6.1.8 Fazit

Wesentliche Triebkräfte für den Wechsel zu Nd-Magneten mit Nanokörnung sind die damit verbundenen Rohstoffeinsparungen im Bereich der Seltenen Erden und die Energieeffizienzsteigerung. Eine Effizienzsteigerung von 10-30% ist vor dem Hintergrund der Situation auf den

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Rohstoffmärkten von großer Relevanz. China als Hauptlieferant von Neodym und anderen Seltenen Erden verfügt über die Möglichkeit, den Weltmarkt aus dieser Monopolstellung heraus zu kontrollieren und macht davon auch Gebrauch. Darüber hinaus werden selbst bei voller chinesischer Kooperation Rohstoffengpässe in den nächsten 20 Jahren vorhergesagt, da die Vorräte dieser Seltenen Erden auf der Erde stark begrenzt sind.

Da weder die Nutzen- noch die Entsorgungsphase der nanostrukturierten Nd-Magneten mit neuen Risiken für Umwelt und menschliche Gesundheit behaftet sind, beschränken sich die Risiken auf mögliche Störfälle in der Produktionsphase. Ein potenzieller Rebound-Effekt könnte sich durch den erhöhten Energiebedarf für den Mahlprozess in der Produktionsphase ergeben. Es liegen keine Daten zum Energiebedarf des Mahl- und anschließenden Pressprozesses vor, aber es ist wahrscheinlich, dass der erhöhte Energiebedarf für diesen Arbeitsschritt durch die erhöhte Effizienz der Magneten und den damit verbundenen Gewichtsreduktionen oder Effizienzsteigerungen von Elektromotoren und Generatoren zunächst mehr als kompensiert wird. Trotz dieses möglichen Energieeinsparpotenzials pro Produkteinheit können Rebound-Effekte nicht ausgeschlossen werden, wobei das Potenzial zur Materialdissipation²² zu berücksichtigen ist. Mit effizienteren bzw. kleineren Magneten ist es möglich, sowohl preisgünstigere Produkte gleicher Effizienz als auch weitere, zuvor unattraktive Produkte mit kleinen Magneten auszustatten. Dies könnte direkte Rebound-Effekte zur Folge haben. Konsument/innen könnten in zusätzlichem Umfang Produkte mit Neodym-Magneten nachfragen und dadurch einen zusätzlichen Rohstoffverbrauch induzieren sowie die Materialdissipation befördern. Letztere würde das Recycling weiter erschweren.

6.2 Nanotechnisch hergestellte Separatormembranen in Lithium-Ionen Batterien

6.2.1 Anwendungsfelder

Batterien gewinnen zunehmend an Bedeutung, da sie wichtige Komponenten für die Nutzung von erneuerbaren Energien sind und darüber hinaus elektrische Energie in immer mehr Anwendungen nutzbar machen. Der Verkauf von Lithium-Ionen-Batterien ist von 1999 bis 2011 von ehemals ca. 114 Mio. Stück auf ca. 1.690 Mio. Stück angestiegen (Cluzel & Douglas, 2012). Der Begriff „Batterien“ wird hier synonym mit dem gebräuchlichen Begriff „Akkumulatoren“ verwendet, da im angelsächsischen Sprachgebrauch nur der Begriff „battery“ verwendet wird. Vor allem bei Großgeräten wie Elektrofahrzeugen ist eine sehr hohe Energiedichte notwendig, um die Funktion zu ermöglichen (Gutsch et al., 2007). Die spezifische Energie der Lithium-Oxidationsreaktion (11.779 Wh/kg) ist theoretisch ähnlich hoch wie die von Diesel (12.000 Wh/kg) (Cluzel & Douglas, 2012). In anderen Anwendungen, z.B. im Bereich der mobilen Kommunikationstechnik, besteht ein hohes Interesse, immer kleinere und damit leichtere Batterien für immer größere Energiedichten zu bauen. Es müssen perspektivisch aber auch große Mengen von Energie in unregelmäßigen Zyklen gespeichert werden, insbesondere bei der Nutzung von Wind-, Gezeiten-, oder Solarenergie. In diesen Anwendungen ist die physika-

²² Dissipation wird in diesem Zusammenhang die weiträumige Verteilung der Ressourcen bei gleichzeitig niedrigen Konzentrationen in Technosphäre und Umwelt bezeichnet, welche deren Nicht-Rückholbarkeit zur Folge hat.

lisch-chemische Stabilität der eingesetzten Materialien von großer Bedeutung. Gleichzeitig ist es notwendig, die Produktkosten zu senken, um größere Anwendungsbereiche zu erschließen. Separatoren spielen in allen Batterien eine Schlüsselrolle. Sie verhindern den Kurzschluss zwischen der Anode und der Kathode einer Batterie und erlauben gleichzeitig, selektiv die Migration von Lithium-Ionen von der Kathode zur Anode beim Ladeprozess und umgekehrt beim Entladungsprozess. Der Verlust ihrer Funktion kann u.a. durch Überhitzung hervorgerufen werden. Bei hohen Kapazitäten ist Selbstentzündung der Akkumulatoren ein bekanntes Problem (Arora & Zhang, 2004). Das Problem verstärkt sich bei der Herstellung von Batterien mit höheren Kapazitäten, da diese dünnere Separatoren voraussetzen.

6.2.2 Referenzprodukt

Das Referenzprodukt sind polymere Separatoren. Diese können in verschiedenen Formen konstruiert werden (z.B. gegossen, gewoben, papierartig, mikroporös oder als Laminate). In all diesen Fällen hängen Temperaturstabilität, Energiedichte und physiko-chemische Widerstandsfähigkeit gegenüber Kristallisationsprozessen auch von dem gewählten Material ab. In Lithium-Ionen-Batterien werden überwiegend mikroporöse Membranen aus Polyolefinen eingesetzt. Die Reaktivität von Li-Ionen bedingt die Nutzung von nichtwässrigen Elektrolytlösungssystemen. Außer den mikroporösen Membranen können auch Polyvinylidenfluorid (PVdF) -Separatoren oder eine Kombination aus mikroporösen Membranen und PVdF-Separatoren eingesetzt werden. Bei Batterien in Produkten für Endkonsumenten dienen diese Membranen gleichzeitig als Separatoren und als thermische Sicherungen. Wenn Temperaturen von ca. 130-170°C überschritten werden (je nach Material des Separators), schmelzen die Poren und der Separator wird undurchlässig (Arora & Zhang, 2004; Choi et al., 2001).

6.2.3 Funktionalität der Nano-Komponente

Bei den Membranen der Firma Separion (Evonik, 2006; Gutsch et al., 2007) handelt es sich um mit Keramik-Nanopartikeln ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) beschichtete PET-Membranen, die als Teilergebnis aus dem Projekt „Lithium Ion Batteries – LIB 2015 (BMBF, 2012) hervorgegangen sind. Als Separatoren zeichnen sie sich durch große Temperaturstabilität aus. Sie sind bis 210°C stabil und schrumpfen bis zu diesen Temperaturen auch nicht ein. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit von Kurzschlüssen und explosiven Entladungen der Lithium-Ionen Batterien stark vermindert. Durch die erhöhte Stabilität des keramikmodifizierten Separators ist auch die Wahrscheinlichkeit der Dendritenbildung²³ von Lithium an der Kathode durch lokale Variationen des Stromflusses vermindert. In Kombination erhöhen diese Effekte die Lebensdauer einer Batterie und vermindern das Unfallrisiko, das mit Kurzschlüssen in der Batterie einhergeht. Darüber hinaus sind diese Separatoren sehr gut durch die Elektrolytlösung benetzbar und sie können in sehr dünnen Schichten verwendet werden. Dadurch wird die Verwendung in Hochleistungs-Batterien für Fahrzeuge und Werkzeuge weiter begünstigt (Zhang, 2007). Die Membranen machen ca. 30% des Endpreises von Lithium-Ionen-Batterien aus.

²³ Dendriten sind vielfach verzweigte polymerisations- und Kristallisationsprozesse, die zu Verminderung der Batteriefunktion und zum Kurzschluss zwischen Kathode und Anode führen.

6.2.4 Rohstoff- und Materialaspekte

Aufgrund der erhöhten Haltbarkeit müssen die mit den Keramikseparatoren ausgestatteten Lithium-Ionen Batterien wahrscheinlich seltener ausgetauscht werden. Zudem lässt sich auch das Anwendungsspektrum erweitern. Die stark verminderte Explosionswahrscheinlichkeit könnte zu geringeren Sicherheitsmaßnahmen im Endprodukt führen, wodurch der Aufwand hierfür eventuell gesenkt werden könnte. Geringere Sicherheitsmaßnahmen könnten z.B. verminderte Wärmeableitungskapazitäten oder verminderte Explosionsdämmung beinhalten.

Während der Fertigung werden die Keramikpartikel mit der Polymermembran fest verbunden. Der hierfür erforderliche Sinterprozess erfordert kurzfristige Erwärmung des Polymer-Keramik-Schichtsystems auf 200°C. Es kann hier gegenüber herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterien zu einer Erhöhung des Energiebedarfs kommen, der einer Vereinfachung des Produktionsprozesses bei den Separation-Membranen gegenüber steht (Zhang, 2007).

6.2.5 Energieeffizienz

Die nanostrukturierte Separatormembran wirkt sich nicht direkt auf die Energieeffizienz der Batterie aus, in der sie eingesetzt wird. Aufgrund ihrer erhöhten Stabilität und der zu erwartenden Verlängerung der Lebensdauer (Cluzel & Douglas, 2012) von Batterien mit einer solchen Membran, ergeben sich aber sekundäre Energieeinsparungen entlang des Lebensweges von der Produktion neuer Batterien über die verlängerte Lebensdauer und der damit verbundenen Verminderung von Abfall. In Ergänzung dazu kann ein breiteres Anwendungsspektrum dazu führen, dass neue Anwendungen erschlossen werden können. Aufgrund des Einsatzes der neuen Technologie resultieren daraus, aus den gleichen Gründen wie zuvor genannt, möglicherweise Energieeinsparungen.

6.2.6 Exposition und Toxikologie

Bei der Produktion, während der Gebrauchsphase und in der Entsorgung ist keine von herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterien abweichende Gefährdung für Mensch und Umwelt zu erwarten. Die keramischen Nanopartikel liegen in Suspension vor und werden als solche auf die Polymermembran aufgebracht und *in situ* getrocknet und gleichzeitig fest mit der Membran verbunden.²⁴ Eine Freisetzung bzw. eine Inhalation der Keramiknanopartikel ist abgesehen von spezifischen Unfallsituationen oder unsachgemäßen Verbrauch ausgeschlossen. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Studie keine weitergehende toxikologische Betrachtung vorgenommen.

6.2.7 Weitere Nachhaltigkeitsaspekte

Die mit keramischen Separatormembranen ausgestatteten Lithium-Ionen-Batterien sind robuster gegenüber Temperaturerhöhungen und können in dünneren Schichten verbaut werden. Die Temperaturstabilität der Membran verhindert das Schrumpfen der Membran bei erhöhten Temperaturen und damit eine Ursache für Kurzschlüsse. Die mit Kurzschlüssen verbundenen,

²⁴ Informationen zu konkreten Arbeitsschutzmaßnahmen konnten nicht gefunden werden.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

drastischen Temperaturerhöhungen, die zur Selbstentzündung der Elektrolytlösungen führen können, sind damit unwahrscheinlicher geworden (Cluzel & Douglas, 2012). Bei Untersuchungen, in denen Nägel durch die Batterielagen geschlagen wurden, zeigte sich ebenfalls eine deutlich geringere Temperaturerhöhung bei mit Separation-Membranen ausgestatteten Batterien gegenüber herkömmlichen Batterien (58°C vs. 500°C) (Zhang, 2007). Dadurch kann die Kapazität der Batterien weiter erhöht werden. Batterien in Hochleistungsapplikationen müssen weniger oft aufgrund von Kurzschlüssen ausgetauscht werden. Dies alles führt zu einem höheren Gebrauchsnutzen der Lithium-Ionen-Batterien mit nanotechnischer Membran.

6.2.8 Fazit

Keramische Separatormembranen erhöhen die Sicherheit von Hochleistungsbatterien, indem sie die Temperaturempfindlichkeit herkömmlicher Separatormembranen in Lithium-Ionen-Batterien vermindern. Dadurch werden Kurzschlüsse verhindert, die bei geladenen Batterien zu Selbstentzündung und Explosion führen können.

In Bezug herkömmlicher Separatormembranen zeigen die keramischen Membranen kaum Unterschiede bezüglich der direkten Materialverbräuche. Die keramischen Bestandteile der Separation-Membranen sind in einer Schichtdicke zwischen 10 und 100 nm auf eine polymere Trägermembran aufgetragen. Die verwendeten Materialmengen sind sehr niedrig und beinhalten keine kritischen Materialien.

Die gegenüber dem Referenzprodukt erhöhte Haltbarkeit der mit keramischen Separatormembranen ausgestatteten Lithium-Ionen-Batterien könnte den Anteil der aufgrund von Kurzschlüssen zu ersetzenden Batterien vermindern und so ressourcenschonend wirken. Durch die geringere Schichtdicke der stabilen Separatoren kann die Energieeffizienz, die Energiedichte und das Anwendungsspektrum der Batterien indirekt erhöht werden. Auf diese Weise können Lithium-Ionen-Batterien mit nanotechnischer Membran u.a. einen wichtigen Beitrag zu der Zwischenspeicherung von regenerativ erzeugtem Strom (v.a. Wind- und Sonnenenergie) leisten. Bei jetzigem Kenntnisstand sind keine Rebound-Effekte erkennbar.

6.3 Thermoplastische Verbundwerkstoffe mit Kohlenstoff-Nanoröhren

6.3.1 Anwendungsfelder

Aufgrund ihrer einzigartigen Eigenschaften sind Kohlenstoff-Nanoröhren (Carbon Nanotubes, CNTs) für viele Anwendungsfelder interessant (Inno CNT, 2011). Dies erklärt die großen Forschungsaktivitäten für neue Einsatzmöglichkeiten für CNTs. So könnten neue, leistungsstarke elektronische Bauteile aufgrund der hervorragenden elektrischen Leitfähigkeit von CNTs neue Entwicklungen in der Elektrotechnik erlauben. Druckbare, dünne und preiswerte Leiterbahnen können dazu beitragen, photovoltaische Systeme erheblich kostengünstiger und materialsparender herzustellen. Auch in medizinischen Anwendungen (wie Sensorik, hoch sensitiven Messgeräte, u.a.) können neue Technologien basierend auf CNTs zum Einsatz kommen (Abdollahad et al., 2013; Anik et al., 2013; Lerner et al., 2013; Madani et al., 2013; Ren et al., 2013). Neu entwickelte Verbundwerkstoffe, bei denen CNTs in die Polymermatrix eingebaut sind, versprechen neue Materialeigenschaften und somit eine Ausweitung der Anwendungsmöglichkeiten sowie Materialeinsparung durch erhöhte mechanische Stabilität. Dies sind nur einige Beispiele für Einsatzmöglichkeiten von CNTs.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Da die größten Substitutionspotenziale im Bereich der Werkstoffe liegen, soll im Folgenden näher auf den Einsatz von neuen Verbundwerkstoffen aus Kunststoff im Automobilbau eingegangen werden.

6.3.2 Referenzprodukt

Als Referenzprodukt dient konventionelles Aluminiumblech bzw. Aluminiumdruckguss. Beide Formen von Aluminium werden im Automobilbau als Teil oder Verschalung der Karosserie oder für bestimmte Motorkomponenten eingesetzt. CNTs sind sehr vielfältig einsetzbar. Um einen Vergleich zu ermöglichen, musste eine Eingrenzung vorgenommen werden, da die Substitutionsmöglichkeiten sonst die Wahl eines Referenzproduktes unmöglich gemacht hätten. Über die hier betrachtete Substitution von Aluminiumkomponenten hinaus sind vielfältige weitere Substitutionen und Modifikationen von Automobilkomponenten möglich.

6.3.3 Funktionalität der Nanokomponente

Die Beimischung von CNTs verleiht Kunststoffen verbesserte und z.T. neue Materialeigenschaften. Sie erhöhen die mechanische und thermische Stabilität und verleihen den Kunststoffen elektrische Leitfähigkeit und antistatische Eigenschaften (Rehahn et al., 2009). So verbesserten sich beispielsweise durch Beimischung von 1 Gewichts-% CNTs zu Polyethylen im Zugversuch die mechanischen Eigenschaften um 25% gegenüber homopolymeren Polyethylen (Fischer, 2010). Dadurch ermöglichen Verbundwerkstoffe mit CNTs ultraleichte Bauweise bei gleichbleibender mechanischer Stabilität. In der Automobilindustrie beruhen moderne Lackierverfahren auf der Aufbringung von Lack auf statisch aufgeladene Karosserieteile. Der Einsatz von Verbundwerkstoffen mit CNTs ermöglicht folglich die elektrostatische Lackierung von Kunststoffbauteilen ohne vorherige Oberflächenbehandlung mit Hilfsstoffen.

Auch in der Luftfahrtindustrie eröffnen sich durch die neu dazugewonnenen antistatischen Eigenschaften neue Einsatzmöglichkeiten, da nun bei der Nutzung von Außenbauteilen aus Kunststoff keine zusätzlichen metallischen Systeme zur Blitzableitung benötigt werden, was die Substitution von metallischen Bauteilen ermöglicht. Durch erhöhte thermische Stabilität der Verbundstoffe ist auch ein erweiterter Einsatz im heißen Motorraum von Fahrzeugen möglich.

6.3.4 Rohstoff- und Materialaspekte

Die hohe mechanische Festigkeit und neuen Materialeigenschaften ermöglichen die Substitution metallischer Bauteile und eine Gewichtsreduktion gegenüber Aluminiumdruckguss-Komponenten. Beides führt zu einer Reduktion des Rohstoffverbrauchs im Automobilsektor. Aluminium wird von keiner existierenden Studie als versorgungskritisch eingestuft und ist ebenso hinsichtlich der Indikatoren zur Abschätzung der sozialen Risiken bei der Primärgewinnung unauffällig. Durch einen verringerten Verschleiß ist außerdem mit einer verlängerten Lebensdauer der neuen Verbundwerkstoffe zu rechnen.

Die Verminderung des Rohstoffverbrauchs durch den Einsatz von leichteren und möglicherweise haltbareren Komponenten lässt sich nur schwer quantifizieren, da CNTs in sehr unterschiedlichen Applikationen Einsatz finden. Eine genauere Analyse ist außerhalb der Grenzen dieser Studie.

6.3.5 Energieeffizienz

Im Automobilssektor führt eine Gewichtsreduktion von 10% zu einem verringerten Treibstoffverbrauch von etwa 5-10%. Nach Schätzungen einer Studie von Cientifica könnten bis zum Jahr 2015 etwa 900.000 Tonnen CO₂-Emissionen durch den Einsatz von Verbundwerkstoffen mit CNTs im Transportsektor eingespart werden (Cientifica Ltd, 2007). Auch bei der Herstellung von spritzgegossenen Kunststoffteilen kann durch den Einsatz von CNTs und der dadurch erreichten besseren Fließeigenschaften Energie eingespart werden, da die Verarbeitungstemperatur gesenkt werden kann (Rehahn et al., 2009). Auf der Gegenseite steht der erhöhte Energiebedarf von CNTs in der Produktion. 1 kg Aluminium bedarf einer Energiemenge von ca. 200 MJ/kg. 1 kg einwandiger CNTs (SWCNT) benötigt in der Produktion je nach Studie zwischen ca. 12–400 Mal so viel Energie. (Healy et al., 2008; Kushnir & Sandén, 2008) Abhängig von dem Mischungsverhältnis von Kunststoff zu CNTs, dem Herstellungsverfahren für die CNTs und der Lebensdauer der Produkte kann sich der CNT-Einsatz energetisch rentieren. Detaillierte Untersuchungen hierzu liegen jedoch außerhalb der Schwerpunktsetzung dieser Studie.

6.3.6 Exposition und Toxikologie

Obwohl das Ausgangsmaterial Kohlenstoff unbedenklich ist, ergeben sich durch die Struktur der Nanoröhren besondere Eigenschaften, die ein Risikopotenzial für Mensch und Umwelt ergeben. Durch die Faserstruktur mit sehr großem Verhältnis von Länge zu Durchmesser zeigen sich große Ähnlichkeiten mit asbestähnlichen Mineralfasern, für die 5 µm und mehr als kritische Länge gilt (Voetz, 2012).

CNTs können entlang ihres Lebensweges chemischen Modifikationen unterliegen. Neben den asbestähnlichen Eigenschaften stellen diese Modifikationen eine weitere Ursache für potenzielle Toxizität dar (Grainger & Castner, 2008; Landsiedel et al., 2012; Yokel & MacPhail, 2011). Die in den voranstehenden Artikeln beschriebenen chemischen Modifikationen können direkte toxikologische Konsequenzen nach sich ziehen, so z.B. wenn CNTs mit polyzyklischen, aromatischen Kohlenwasserstoffen interagieren und als Träger für diese fungieren. Indirekte toxikologische Konsequenzen können z.B. Oberflächenmodifikationen nach sich ziehen, die die Wasserlöslichkeit erhöhen oder vermindern und somit zu unterschiedlichen Verteilungen in der Umwelt und in Organismen führen. Des Weiteren sind CNTs nicht biologisch abbaubar und können sich, unter bestimmten, im Labor getesteten Bedingungen in Organismen anreichern.

Der Hauptexpositionsweg des Menschen ist die Inhalation, welche hauptsächlich bei der Weiterverarbeitung zu fertigen Kompositmaterialien bei unsachgemäßer Handhabung und ungenügenden Sicherheitsvorkehrungen zu erwarten ist. Diese können zu sehr hohen Konzentrationen von CNTs am Arbeitsplatz führen (SRU, 2011).

Da bisher nur wenig über die Freisetzung von CNTs aus Kompositmaterialien bekannt ist, wird derzeit im Projekt „CarboLife“ unter der Leitung des Instituts für Umweltforschung der RWTH Aachen der Lebensweg von CNTs aus Kompositmaterialien näher betrachtet. Hierfür werden abbauende Umwelteinflüsse simuliert um die Freisetzung von CNTs aus dem Komposit und den Abbau des Komposit-Matrixmaterials zu bestimmen. Des Weiteren sollen Auswirkungen der CNT-Zell-Interaktion in Langzeit-Toxizitätstests genauer untersucht werden.

Trotz ihrer geringen Bioabbaubarkeit und hohen Persistenz schätzen Experten das Umweltisiko und die Exposition als sehr gering ein, da die CNTs für die meisten Anwendungen fest in Kompositmaterialien eingebettet sind (Robichaud et al., 2005).

6.3.7 Weitere Nachhaltigkeitsaspekte

Neben einer Treibstoffeinsparung im Transportsektor bieten CNTs auch in anderen Anwendungsfeldern Potenziale, um zu mehr Nachhaltigkeit beizutragen. So ermöglichen CNTs die Herstellung verbesserter Dämmstoffe und können für neue Innovationen bei Photovoltaik, Energiespeichern und Wasserstofftechnik führen (Inno CNT, 2011). Auch der Einsatz verbesserter Katalysatoren trägt dazu bei, die gebrauchten Materialien effizienter zu nutzen. So schätzte das britische Umweltministerium 2007, dass der Einsatz von CNTs die Treibhausgasemissionen Großbritanniens kurzfristig um bis zu 2% und längerfristig bis zum Jahr 2050 um 20% senken könnte (Cientifica Ltd, 2007).

6.3.8 Fazit

CNTs besitzen ein breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten, großes Substitutionspotenzial und die Chance zu einem relevanten Beitrag zu mehr Nachhaltigkeit im Transportwesen. Hier kann durch Gewichtseinsparung der Treibstoffverbrauch gesenkt werden, da Metalle substituiert und bei Kunststoffbauteilen Material eingespart werden kann. Triebkräfte für die Nutzung des nanotechnisch modifizierten Kunststoffes sind sowohl die Senkung von Transportkosten als auch die Verminderung des Schadstoff- und CO₂-Ausstoßes. Über die Freisetzung von CNTs während Gebrauch und Entsorgung und die damit verbundenen Risiken für Mensch und Umwelt bestehen noch große Wissenslücken. Dennoch weisen bisherige Erkenntnisse auf eine Unbedenklichkeit in diesen Lebenszyklusphasen hin, da die CNTs fest in ihre Polymermatrix eingebettet sind. Während der Produktion ist außerhalb von Unfällen ebenfalls nicht mit Risiken für Mensch und Umwelt zu rechnen, falls die notwendigen Sicherheitsvorkehrungen eingehalten werden. Etwaige Rebound-Effekte sind schwer zu charakterisieren ohne weitere Daten zu End-of-Life Prozessen zur Verfügung zu haben. Sobald die CNT-haltigen Kunststoffe in Verbrennungsanlagen gelangen, werden sie in den dort generell vorherrschenden Temperaturen zerstört. Ob die Verwitterung von Kunststoffbauteilen zur Freisetzung von CNTs führen kann, ist noch nicht bekannt.

Die Energieeffizienz der durch CNT modifizierten Kunststoffe gegenüber Aluminiumbauteilen ist maßgeblich von der gewählten Produktionsart für die CNTs, dem Mischungsverhältnis pro kg Kunststoff mit CNTs und der resultierenden Gewichtsersparnis bzw. Treibstoffersparnis abhängig.

6.4 Organische Leuchtdioden

6.4.1 Anwendungsfelder

Organische Leuchtdioden (englisch: organic light emitting diodes, OLED) werden bereits im Bereich kleiner Bildschirme (z.B. bei Mobiltelefonen und anderen mobilen Geräte) eingesetzt. Auch als großflächigere Bildschirme für Monitore und Fernseher sind sie technisch und ökologisch interessant, aber derzeit technisch noch nicht ausgereift genug (Schlaak, 2012).

Aufgrund ihrer vorteilhaften ökologischen Aspekte (vgl. Kapitel 6.4.4 und 6.4.5) sind sie auch als Flächenlichtquellen (englisch: solid state lighting, SSL) im Innen- und Außenbereich interessant. Diese Anwendung ist in der Herstellung und Nutzung einfacher als die Anwendung von OLEDs in Bildschirmen, weil die für Bildschirme notwendige Auflösung in Pixel für SSLs nicht relevant ist. Ein einzelner „Pixel“ kann bei Flächenlichtquellen Kantenlängen von Zentimetern und mehr haben im Gegensatz zu Micrometern bei Bildschirmen. Da OLEDs sehr flach sein

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

können ($\gg 1$ mm) und vieles dafür spricht, dass sie in naher Zukunft biegsam bzw. elastisch verformbar hergestellt werden können, eröffnen sich interessante Design- und Verarbeitungsoptionen (Aschenbrenner, 2010).

6.4.2 Referenzprodukt

Durch den zunehmenden Wechsel von Glühbirnen auf Energiesparlampen und LED-Lampen rücken nicht nur die Vor- sondern auch die Nachteile dieser Techniken mehr ins Zentrum der Wahrnehmung. LED-Lampen, welche hier als Referenzprodukt zu OLEDs dienen, zeichnen sich gegenüber klassischen Glühbirnen durch eine extrem niedrige Leistungsaufnahme aus. Ihre Bauhöhe beträgt ca. 5 mm und sie erreichen einen 5–8-mal so hohen Wirkungsgrad gegenüber konventionellen Glühbirnen (Umwandlungsrate von Strom zu Licht) (So et al., 2008). Dabei erreichen LEDs gleichzeitig eine Lebensdauer von 20.000 bis 100.000 Stunden. Handelsübliche Glühbirnen erreichen ca. 1000 Stunden Lebensdauer (Greßler, 2010). Um allerdings die Lichtleistung von einer Glühbirne von mehr als 60 Watt zu erreichen, müssen mehrere Leuchtdioden parallel verwendet werden. LEDs sind teurer (ca. 0,01 Euro / Lumen) als Glühbirnen (ca. 0,0003 \$ / Lumen) (So et al., 2008). Ähnlich wie bei konventionellen Leuchtmitteln muss bei dem Einsatz von LED-Lampen auf den Wärmehaushalt geachtet werden, da sie sonst aufgrund von Überhitzung ihre Lichtfarbe verändern.

6.4.3 Funktionalität der Nano-Komponente

Wenn die Halbleiterschichten nicht eine Dicke im Nanometer Bereich hätten, wäre die Funktionalität von OLEDs nicht gegeben.

Ursprünglich bestanden OLEDs aus einer organischen Doppelschicht, die zwischen einer Anode und einer Kathode angeordnet ist. Bereits in dieser Konfiguration betrug die Dicke der einzelnen Schichten nur einige Nanometer. Um Energieeffizienz und Lichtfarbe zu modulieren, bestehen moderne OLEDs aus mehreren, einige Nanometer dicken Schichten, von denen die meisten aus mindestens zwei verschiedenen, oft aber organischen Halbleitern bestehen (So et al., 2008). Diese Schichten werden auf einen durchsichtigen Träger aus Glas oder Kunststoff aufgebracht. Als Anode fungiert dabei eine Schicht aus Indium-Zinnoxid (ITO). Die darauf folgenden Schichten aus leitendem Kunststoff und organischem Farbstoff können jeweils bis zu 100 nm dick sein. Zum Schluss wird über einen Sputter-Prozess eine Kathodenschicht aufgedampft (Greßler, 2010). Das Schichtsystem kann transparent sein und erlaubt so vielfältige Verwendungen.

6.4.4 Rohstoff- und Materialaspekte

Das blaue Lichtspektrum ist schwierig zu erreichen und erfordert derzeit bei OLEDs den Einsatz von Edelmetallen wie Iridium oder Platin. Aus ökologischer Sicht sind Metalle der Platingruppe problematisch, weil große Energiemengen bei ihrer Gewinnung und Aufreinigung nötig sind. Zudem ist die Umgebung von Raffinerien für Materialien aus der Platingruppe häufig mit Metallen und chemischen Abfällen schwer belastet (Blacksmith Institute, 2007; Hagelüken et al., 2005). Die Platingruppenmetalle sind hinsichtlich der Versorgungssicherheit als kritisch eingestuft und werden entsprechend auf der EU-Liste der 14 kritischen Metalle geführt (EUCOM, 2010c). Darüber hinaus gelten die Platingruppenmetalle als entscheidende Stoffgruppe für viele Nachhaltigkeitstechniken (insbesondere im Bereich der Katalyse). Dies verleiht

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

dem Thema der Versorgungssicherheit auch ökologische Relevanz (EUCOM, 2010c; Öko-Institut e.V., 2009).

Trotz der Verwendung solcher Edelmetalle ist die Lebensdauer von OLEDs (ca. 10.000 h; So et al., 2008) deutlich geringer als die von LEDs (20.000 bis 100.000 h; s.o.). Zudem tendieren aktuelle OLEDs zum Farbshift, da unterschiedliche Farbpixel unterschiedliche Haltbarkeiten aufweisen. Blaue Farbpixel haben eine deutlich geringere Haltbarkeit als andere Farben. Dies beeinflusst vor allem die Darstellung von Weiß (Schlaak, 2012). Während der Nutzung der OLED verändert sich die Lichtfarbe langsam zum roten Lichtspektrum hin. Dadurch wird die Funktionalität der OLEDs bereits vor dem Ende ihrer Gebrauchsphase vermindert.

Aktuelle Forschung widmet sich der Vermeidung von kritischen Rohstoffen und dem Farbshift. Bei einem neuen Elektrolumineszenz-Verfahren – dem Singulett-Harvesting – wird ein sehr hoher Wirkungsgrad der OLEDs erzielt. OLEDs, die mit dieser Technologie ausgestattet sind, unterliegen weder dem Farbshift noch benötigen sie Platin oder Iridium für ihre Funktion (Yersin et al., 2010).

LEDs benötigen zur Erzeugung spezifischer Lichtfarben kritische Metalle, von denen einige Seltene Erden sind. In einer durch das Öko-Institut e.V. durchgeführten Studie von 2012 werden die verwendeten Metalle Indium, Gallium, Cer, Europium, Gadolinium und Yttrium genannt (Buchert et al., 2012). Darüber hinaus werden Arsen und Phosphor in verschiedenen Verbindungen in LEDs verwendet (Greßler, 2010; Öko-Institut e.V., 2012b). Der Weltmarktanteil der hier verwendeten kritischen Metalle und Seltenen Erden ist selbst mit steigender Nutzung niedrig. Weitere Entwicklungen im LED Segment des Marktes sind zu erwarten, so dass der Anteil der jeweiligen Metalle pro LED möglicherweise noch sinkt.

6.4.5 Energieeffizienz

OLEDs konvertieren 1 W Strom in ca. 65 Lumen Licht. LEDs sind ihnen mit einer Konversionsrate von ca. 80 lm/W noch überlegen (So et al., 2008). Beide Produkte erfordern noch den Einsatz kritischer Metalle und die damit verbundenen hohen Primärenergieaufwendungen. Bei OLEDs ist jedoch eine Abkehr von Metallen wie Platin und Iridium absehbar, wodurch die oben diskutierten Energieaufwendungen bei der Gewinnung und Aufreinigung dieser Metalle vermieden werden würden. Weiterhin wird Energie durch die flachere Bauform eingespart, da weniger Material verwendet wird. Gleiches gilt für den Bedarf an zumindest passiver Kühlung in Form von baulichen Maßnahmen, der bei LEDs erforderlich ist und bei OLEDs nicht.

6.4.6 Exposition und Toxikologie

LED-Lampen können, abhängig von ihrer Farbe Arsen, Gallium, Phosphor und deren Verbindungen enthalten. Diese Verbindungen sind aus human- und ökotoxikologischer Sicht bedenklich. Aus diesem Grund werden Hersteller in den Europäischen Richtlinien zu Elektronik und Elektronikaltgeräten verpflichtet, LEDs kostenlos zurückzunehmen und diese fachgerecht zu entsorgen. OLEDs verwenden keine arsenhaltigen Verbindungen und auch keine anderen hoch toxischen Verbindungen (Greßler, 2010). Im Rahmen der zu dem vorliegenden Anwendungsfeld vorgenommenen Recherchen konnten keine weitergehenden Informationen zu möglichen human- und ökotoxikologischen Wirkungen der eingesetzten Stoffe ermittelt werden.

6.4.7 Weitere Nachhaltigkeitsaspekte

Das von OLEDs erzeugte Licht ist blendfrei, da es sich bei OLEDs nicht um Punktlichtquellen, sondern Flächenlichtquellen handelt. Gleichzeitig lässt es sich ähnlich wie ein Arrangement verschiedenfarbiger LEDs über die „Stapelung“ vieler Lagen verschiedener organischer Halbleiter in seinem Spektrum modulieren, warme Lichtfarben sind daher bei OLEDs ebenfalls möglich. Darüber hinaus sind OLEDs biegsam, sehr flach sowie leicht und sie können darüber hinaus transparent hergestellt werden. Dies erweitert ihre möglichen Applikationen gegenüber LED-Lampen deutlich. Die Tatsache, dass sie keine Abwärme produzieren, bietet weitere Vorteile.

Ein kreisförmiges Paneel mit einem Durchmesser von 8 cm kostete daher 2010 noch 250 € pro Stück (Aschenbrenner, 2010). Der hohe Preis limitiert aktuell die beschriebenen Nachhaltigkeitseffekte auf dem Markt, weil die Marktdurchdringung noch nicht hoch ist.

6.4.8 Fazit

OLEDs sind eine interessante Alternative gegenüber LEDs in Bezug auf ihr breites Einsatzspektrum und ihre Unabhängigkeit von Wärmeableitung. Sie benötigen allerdings noch kritische Metalle, um bestimmte Wellenlängen zu generieren und haben eine kürzere Lebensdauer als LEDs. Aktuelle Forschung beschäftigt sich mit der Lösung dieser beiden Probleme.

In LEDs werden eine Vielzahl von kritischen Metallen zusätzlich zu Arsen und Phosphor und deren Verbindungen genutzt. Dadurch ist die Entsorgung von LEDs schwieriger. OLEDs enthalten keine Arsenverbindungen.

Die Konversionsrate von Elektrizität zu Licht ist ebenfalls etwas niedriger als bei LEDs. Damit benötigen OLEDs während der Gebrauchsphase bisher mehr Energie als LEDs. OLEDs sind als Flächenlichtquellen auch deutlich teurer als LEDs (250 € pro rundem Panel mit 8 cm Durchmesser). Weitere Forschung zur Vermeidung der Nutzung von Metallen wie Platin oder Iridium und großtechnische Produktion könnten den Preis signifikant vermindern und OLED-Flächenlichtquellen für den Markt von Endkonsumentenprodukten attraktiv machen. Diese Entwicklung würde die Einsparung von kritischen Metallen auf dem Beleuchtungsmarkt und die vereinfachte Entsorgung nach der Nutzenphase von OLEDs gegenüber LEDs hervorheben. Ob die sich derzeit in der Forschung befindlichen Entwicklungen zu OLEDs auch die Konversionsrate und damit die Energiebilanz während der Nutzenphase beeinflussen können, ist nicht bekannt. Derzeit sind für OLEDs im direkten Vergleich mit LEDs im Hinblick auf Rohstoffverbrauch und Energieeffizienz weder signifikante Vor- noch Nachteile erkennbar.

6.5 Aerogele

6.5.1 Anwendungsfelder

Aerogele wurden 1931 erstmalig in wissenschaftlichen Publikationen erwähnt (Kistler, 1931a, 1931b). Wie dort bereits beschrieben, lassen sie sich aus verschiedenen Materialien herstellen. Die Aerogele zählen aufgrund ihrer feinporigen Struktur zu den Nanomaterialien. Aerogele aus Kieselsäure (SiO_2), welche im Folgenden beschrieben werden, haben eine Porengrößenverteilung mit einem Maximum zwischen 2–50 nm, die auch als mesoporös bezeichnet wird (Environmental Energy Technologies Division, 2004). Kleinere Poren werden als Mikroporen und größere als Makroporen beschrieben. Mit einem Hohlraumanteil von über 90% sind Aero-

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

gele allgemein in der Lage, hocheffizienten, Temperatur-, Wasser-, Schallschutz und mechanische Stabilität zu vermitteln (Lawrence Berkeley Laboratories, 2004; WECOBIS, 2011a). Mit diesen Eigenschaften finden sie Verwendung in vielfältigen Bereichen: Aerogele haben gegenüber konventionellen Isolationsmaterialien eine sehr viel niedrigere Wärmeleitfähigkeit und können Gebäude mit hoher Effizienz und geringerem Raumbedarf als konventionelle Isolationsmaterialien wie etwa Glaswolle vor externen Temperatureinflüssen abschirmen (Berge & Johansson, 2012). Feinkörnige Aerogele können in Gebrauchsgegenständen wie Jacken oder Schuhen zur Temperaturisolierung eingesetzt werden, um vor großer Kälte oder Hitze zu schützen. In Beton verstärken Aerogele die mechanische Belastbarkeit (Lambauer et al., 2008). Als lichtdurchlässige Isolierungsschicht auf Solarzellen erhöhen sie die Effizienz von Photovoltaikanlagen (Bachmann et al., 2007). Mit einem Staubkollektor aus Aerogelen konnte die Raumsonde „Stardust“ kosmischen Staub einfangen (NASA, 2005). Im Folgenden sollen die Eigenschaften von SiO_2 -Aerogelen im Bausektor zur Wärmedämmung analysiert werden.

6.5.2 Referenzprodukt

Bei dem Referenzprodukt handelt es sich um Glaswolle, die zusammen mit Steinwolle das am meisten genutzte Dämmmaterial beim Wohnungsbau darstellt. Zusammen haben beide einen Marktanteil von 54%. Glaswolle entsteht durch die Einschmelzung von Borosilikatglas, welches anschließend zerfasert und mit Formaldehydharzen gebunden wird. Glaswolle wird in Form von Matten, Filzen oder losen Mengen verkauft. Die Wärmeleitfähigkeit liegt bei 0,032–0,034 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (WECOBIS, 2011a).

6.5.3 Funktion der Nano-Komponente

SiO_2 -Aerogel zeichnet sich durch seine nanoporöse Struktur aus. Durch den Einsatz als Granulat lässt sich das Material sehr gut dosieren. Die nanoskaligen Hohlräume mit einem Durchmesser von 20–40 nm sind kleiner als die mittlere Wellenlänge von Gasmolekülen in der Luft, wodurch die Wärmeleitfähigkeit von Aerogelen deutlich vermindert wird. Gegenüber herkömmlichen Dämmmaterialien wie Polystyrol oder Glaswolle ist die Wärmeleitfähigkeit mit 0,018 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ nur etwa halb so hoch (WECOBIS, 2011a). Es kann in Form von Verbundelementen, Vliesen oder Granulat verarbeitet werden.

6.5.4 Rohstoff- und Materialaspekte

Aerogel erzielt die gleiche Isolationswirkung wie Glaswolle bei wesentlich geringerer Schichtstärke. Dieser Vorteil kann für eine Reduktion des Raumanteils von Isolierschichten in Gebäuden genutzt werden. Da das Material sehr feuerfest ist und zudem als wasserabweisend und UV-beständig gilt, kann die Nutzungsdauer bis zu 50 Jahre betragen (Koebel, 2008). Allerdings wird angenommen, dass sich nanoskalige Strukturen mit der Zeit miteinander verschmelzen und sich so zu Mikrostrukturen umwandeln (WECOBIS, 2011a).

Für die Glaswolleproduktion können bis zu 60% Altglas verwendet werden. Obwohl keiner der zur Glaswolleproduktion notwendigen Rohstoffe kritisch ist, fällt dieser Recyclingaspekt positiv ins Gewicht (WECOBIS, 2011b).

Silizium ist kein kritischer Rohstoff und sowohl unter Gesichtspunkten der Gewinnung als auch der Verfügbarkeit unbedenklich. Sowohl Aerogele als auch Glaswolle sind Träger des Blauen Engels (Ecobine, 2012; WECOBIS, 2011a).

6.5.5 Energieeffizienz

Aerogele benötigen bei ihrer Produktion einen geringeren Energieaufwand als Glaswolle, wie aus den Daten des amerikanischen Herstellers Aspen hervorgeht. Beispielsweise wird beim Aerogel-Produkt „Spaceloft“ mit einer Schichtdicke von 10 mm der Primärenergieaufwand während der Produktion mit 56 MJ/m angegeben. In Relation zur Dämmleistung sind die eingesetzten energetischen Ressourcen bei der Herstellung von „Spaceloft“ etwa vergleichbar mit denen für expandiertes Polystyrol (WECOBIS, 2011a). Das Informationsportal Nachhaltiges Bauen des BMVBS gibt für Glaswolle einen Energieverbrauch von ca. 700 MJ/m³ an (WECOBIS, 2011b). Während der Gebrauchsphase kommt es zu Energieeinsparungen bei der Verwendung von Aerogel-Dämmstoffen gegenüber Glaswolle-Dämmstoffen, da die Wärmeleitfähigkeit von Aerogelen ca. halb so hoch ist wie bei Glaswolle (0,018 vs. 0,032 W/(m*K)).

6.5.6 Exposition und Toxikologie

Bei beiden Produkten muss die Inhalation von eventuell frei werdenden Stäuben verhindert werden. Amorphes Siliziumdioxid ist Gegenstand aktueller toxikologischer Untersuchungen zum Feld der Nanomaterialien. Bisher konnte eine akute Gefahr für den Menschen nur bei der Inhalation von unrealistisch hohen Dosen von Stäuben experimentell gezeigt werden. Ökotoxikologisch treten akute Effekte ebenfalls nur bei der Verwendung von hohen Partikelkonzentrationen auf (Kaewamatawong et al., 2005; Waters et al., 2009). Hier konnten im Labor Kieferfehlbildungen und embryonale Deformationen bei Zebrafischarbungen beobachtet werden (Adams et al., 2006; Möller et al., 2013).

Für die Produktion von Aerogelen wird Tetramethylorthosilicat (TMOS) bzw. Tetraethylorthosilicat (TEOS) eingesetzt. TMOS ist als sehr giftig eingestuft und TEOS als gesundheitsschädlich. Für die Verwendung beider Substanzen müssen spezielle Arbeitsschutzmaßnahmen umgesetzt werden.

Während der Gebrauchsphase ist das Inhalationsrisiko von Stäuben bei der Verwendung von Aerogelen geringer als bei Glaswolle.

Hinsichtlich der Entsorgung von Aerogelen gibt Aspen an, dass eine Entsorgung auf Deponien für Industrieabfälle möglich ist, so dass die Entsorgung ähnlich der von Glaswolle gestaltet werden kann. Staubbildung sollte bei der Entsorgung durch Abdeckung des Bauschutts vermieden werden (Stadur-Sued, 2013; WECOBIS, 2011a, 2011b).

6.5.7 Weitere Nachhaltigkeitsaspekte

Der Kaufpreis im Vergleich zu Mineralwolle ist bis zu zehnmal so hoch (Baetens et al., 2011; Berge & Johansson, 2012). Andere Bautechniken, wie z.B. Dreifachfenster oder Glaswolle sind dem Aerogel in der Breitenanwendung auch deswegen noch überlegen (Berge & Johansson, 2012). Solange die Produktionskosten nicht sinken z.B. durch steigende Nachfrage, werden die Nachhaltigkeitsgewinne im Einsatz von Aerogelen sich in Grenzen halten, da sie geringe Marktanteile halten.

6.5.8 Fazit

Aerogele bieten sich für Bereiche an, die mit konventionellen Produkten wie Glas- oder Mineralwolle schwer zu isolieren sind, z.B. fein strukturierte Fassaden historischer Bauwerke. Außer den Daten zur Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu anderen Dämmstoffen, können keine gesicherten Angaben zu den Herstellungskosten und zur Lebensdauer getroffen werden. Vor allem während der Bauphase sind Aerogel-Produkte gegenüber herkömmlichen Isoliermaterialien benachteiligt, da sie sehr empfindlich gegenüber mechanischer Beschädigung sind. Mit steigenden Produktionskapazitäten könnte der Marktpreis weiter sinken und damit die Aerogel-Isolationstechnologie auch für alltägliche Bauobjekte interessant machen.

Im Bereich Energieeffizienz sind Aerogele dem Referenzprodukt klar überlegen. Sowohl in der Produktion als auch während der Anwendung kann eine Energieeinsparung erzielt werden. Dies könnte sich in Anbetracht der europäischen wie nationalen Bemühungen um mehr Energieeffizienz im Gebäudesektor zur Triebkraft für die Umstellung auf Aerogele entwickeln.

6.6 Lösungsmittelstabile Polymermembranen für die organophile Nanofiltration

6.6.1 Anwendungsfelder

In der industriellen Produktion von Chemikalien spielen Katalysatoren eine wichtige Rolle. Sie senken den Energieverbrauch, sparen Rohstoffe und verringern die Kosten des Prozesses. Für die Herstellung von ca. 90% aller Chemieprodukte werden Katalysatoren eingesetzt. In der Chemie unterscheidet man zwischen heterogener und homogener Katalyse. Während bei der heterogenen Katalyse die reagierenden Stoffe und der Katalysator in getrennten Phasen vorliegen, z.B. als Gas und als Feststoff, befinden sie sich bei der homogenen Katalyse in derselben Phase, typischerweise in einer Lösung. Dies hat den Vorteil, dass alle reaktiven Zentren in der homogenen Katalyse für Reaktionen zur Verfügung stehen, was sie aktiver und selektiver macht.

Die Abtrennung und damit die Rückgewinnung des Homogenkatalysators aus der Reaktionsmischung stellt dabei ein großes Problem dar und ist oft ein Hindernis für den Einsatz der homogenen Katalyse, da sie mit hohem Energieaufwand und entsprechenden Kosten verbunden ist. Oftmals muss der Katalysator während des Abtrennungsprozesses Bedingungen ausgesetzt werden, die dessen Aktivität und Selektivität negativ beeinflussen und zu Katalysatorverlusten und Verunreinigungen führen können. Schätzungen gehen davon aus, dass 40 bis 70% der Produktionskosten in der homogenen Katalyse auf die Rückgewinnung des Katalysators entfallen, die überwiegend auf destillativen Prozessen beruht (Evonik Industries, 2010).

Die organophile Nanofiltration ist ein neu entwickeltes Verfahren, bei dem größere organische Moleküle mit Hilfe von Nanofiltrationsmembranen aus organischen Lösungsmitteln abgetrennt werden können. Sie wird hier als Nanoprodukt betrachtet. Die organischen Moleküle sind in dieser Anwendung die Katalysatorkomplexe. Die Anwendung zur Rückgewinnung der oftmals empfindlichen Homogenkatalysatoren wurde bereits von Forschern der Evonik AG und ihren Partnern zur industriellen Anwendungsreife entwickelt.

Weitere potenzielle Anwendungen sind die Polymerfraktionierung, die Aufarbeitung von Erdölfraktionen und Schmierölen der Petrochemie, die Behandlung von Speiseölen und Lecithin in der Lebensmittelindustrie sowie die Abtrennung von pharmazeutischen Produkten wie

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Peptiden und Antibiotika. Des Weiteren können in der Petrochemie Wertstoffe aus organischen Prozessströmen gewonnen werden, die destillativ nicht abgetrennt werden können.

6.6.2 Referenzprodukt

Als Referenz zur organophilen Filtration dient der Prozess der thermischen Abtrennung. Beide Prozesse können zur Rückgewinnung der ressourcenintensiven Katalysatormoleküle verwendet werden. Die thermische Abtrennung ist ein Destillationsprozess, bei der im Hochvakuum mit bestimmten Temperaturen versucht wird, die Bestandteile des Reaktionsgemisches voneinander zu trennen. Dabei werden viele Katalysatormoleküle unbrauchbar und müssen ersetzt werden. Im Gegensatz dazu funktioniert die Filtration mit den nanoporösen Membranen wie ein „Sieb“, das nur Moleküle bis zu einer bestimmten Größe durchlässt und so schonend die oft sehr großen Katalysatormoleküle zurückhält.

Diese Auftrennungsprozesse sind bei vielen industriell relevanten Reaktionen wichtig. Ein Beispiel dafür, an dem die Funktion der lösungsmittelstabilen Polymermembranen im Vergleich zur üblichen thermischen Abtrennung gezeigt wurde, ist die Hydroformulierung. Hier ging es darum, die Rhodiumkomplexe, die hier die Katalysatoren sind, zurück zu gewinnen.

6.6.3 Funktionalität der Nanokomponente

Durch die Entwicklung von Membransystemen, die widerstandsfähig gegenüber organischen Lösungsmitteln sind, kann die Anwendung der neuen „Siebe“ auch auf lipophile Medien ausgeweitet werden (d.h. Medien, die auf organischen Lösungsmitteln basieren).

Der Aufbau der Membranen ist dabei meist dreiteilig. Neben dem Basisvlies und einer porösen Stüttschicht besteht sie aus der eigentlich trennenden Nanofiltrationsmembran. Diese ist mikroporös aufgebaut und besitzt Hohlräume im Nanometerbereich. Diese Hohlräume können die kleineren organischen Lösungsmittelmoleküle durchdringen, während größere Moleküle zurückgehalten werden. Die Größenordnung der separierbaren Moleküle beträgt etwa 300–1000 g/mol (Beeskow & Hoting, 2008).

Für den Einsatz zur Katalysatorrückgewinnung bei der Hydroformulierung muss die Membran in Olefinen, Paraffinen, Aldehyden und Alkoholen stabil und widerstandsfähig gegenüber hohen Temperaturen sein, da das Reaktionsgemisch bei niedrigeren Temperaturen sehr viskos ist und der Stofftransport dadurch nur sehr langsam stattfinden würde. Membranen auf Silikonbasis sind hierfür besonders geeignet, da sie widerstandsfähig gegenüber den meisten organischen Lösungsmitteln sind und sich auch bei hohen Temperaturen einsetzen lassen.

6.6.4 Rohstoff- und Materialaspekte

Homogenkatalysatoren enthalten oft Metalle der Platingruppe. Dazu zählen u.a. die Edelmetalle Rhodium, Palladium und Platin. Die Kritikalität von Metallen aus der Platingruppe wurde im Kapitel ‚6.4 Organische Leuchtdioden‘ unter dem Unterpunkt „Rohstoff- und Materialaspekte“ diskutiert und gilt auch hier.

Nach Optimierung konnte die Katalysatorrückgewinnung auf über 99% gesteigert werden (Evonik Industries, 2010).

Da die Separation unter für den Katalysator günstigen Bedingungen stattfinden kann, treten kaum Verluste durch Verclustering auf. Der Rhodiumligandenkomplex bleibt stabil und kann nach einer Aufkonzentration zusammen mit frischem Ausgangsmaterial in den Reaktions-

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

reaktor rückgeführt werden. Durch eine schonende Rückgewinnung von Homogenkatalysatoren kann der Einsatz der organophilen Nanofiltration einen wertvollen Beitrag leisten, den Verbrauch an Edelmetallen in der chemischen und pharmazeutischen Industrie zu verringern.

6.6.5 Energieeffizienz

Die Nanofiltration kann bei niedrigeren Temperaturen als das Referenzsystem der thermischen Destillation betrieben werden. Zudem erfordert das Referenzverfahren in vielen Fällen die Durchführung der Stoffauftrennung in einem Hochvakuum. Dieses schützt sowohl den Katalysator als auch die Produkte vor zu hoher Hitze bei der Destillation. Ein Hochvakuum in industriellem Maßstab zu erzeugen, ist methodisch aufwendig und erfordert erhebliche Mengen an Energie, die für das gleiche Ziel bei der Nanofiltration nicht benötigt wird. Durch die fast vollständige Rückgewinnung von funktionalen Katalysatoren kann bei der Nanofiltration der Primärenergiebedarf eingespart werden. Der rückgewonnene Katalysator kann weiterverwendet werden und muss nicht neu produziert werden. Zudem werden die Produkte der katalysierten Reaktionen schonender aufgereinigt und es bedarf weniger zusätzlicher Reinigungsschritte nach der ersten Abtrennung von Komponenten des Reaktionsgemisches. Im Rahmen der Studie konnten allerdings angesichts der gewählten Schwerpunktsetzung für das vorliegende Fallbeispiel keine quantitativen Daten zu den Energieverbräuchen der einzelnen Prozessschritte ermittelt werden.

6.6.6 Exposition und Toxikologie

Anders als bei den meisten anderen nanotechnischen Verfahren liegen bei der organophilen Nanofiltration keine Partikel in Nanometerabmessung vor. Vielmehr erfolgt die Zuordnung zu den Nanotechniken aufgrund der nanoskaligen Hohlräume der verwendeten porösen Membranen. Aufgrund des Fehlens freier Nanomaterialien ist mit keinen human- oder ökotoxikologischen Expositionen durch Nanomaterialien zu rechnen. Mittelbar bewirkt die organophile Nanofiltration sogar einen positiven Effekt in Hinblick auf human- und ökotoxikologische Gesichtspunkte, weil durch ihren Einsatz der Bedarf an neuen Metallen aus der Platingruppe vermindert wird und die toxikologisch bedenklichen Prozessschritte für die Herstellung der Katalysatorkomplexe ebenfalls in geringerem Umfang erforderlich sind. Die Katalysatorkomplexe können zudem häufiger wiederverwendet werden. Die Umweltbelastungen durch Chemikalien und Schwermetalle bei der Gewinnung der kritischen Metalle und der Herstellung der Katalysatoren werden vermindert.

6.6.7 Weitere Nachhaltigkeitsaspekte

Der zunehmende Kostendruck auf dem Rohstoffmarkt zwingt Unternehmen Prozesse zu entwickeln, die diese Metalle effizienter einsetzen, indem sie die benötigte Einsatzmenge verringern oder Verluste minimieren. Neben den hohen Kosten für Edelmetalle muss auch die Belastung für Mensch und Umwelt in Betracht gezogen werden, die bei der Förderung entstehen.

Für das hier vorgestellte Einsatzgebiet in der Hydroformulierung bedeutet das, dass mit Hilfe der nanoporösen Polymermembranen die teuren Katalysatormoleküle mit Rhodiumkomplexen zurückgewonnen und erneut eingesetzt werden können und keine neuen Katalysatoren synthetisiert werden müssen.

6.6.8 Fazit

Der Einsatz von Nanofiltration für organische Lösungsmittel lässt nun auch den Einsatz dieser Technik in lipophilen Medien zu. Gerade in der chemischen und pharmazeutischen Industrie finden viele Prozesse unter homogen katalytischen Bedingungen statt. Triebkraft für die nanotechnische Neuentwicklung ist die Substitution von energieaufwendigen Destillationsprozessen und die Verringerung von Verlusten bei der Rückgewinnung von Homogenkatalysatoren. Diese haben bei ihrer Herstellung einen hohen Ressourcenaufwand, wodurch das Filtrationsverfahren sowohl aus ökologischer als auch wirtschaftlicher Sicht interessant ist. Durch den Einsatz von Nanofiltrationsverfahren kann die Katalysatorrückgewinnung auf über 99% gesteigert werden, was annähernd einer vollständigen Rückgewinnung entspricht. Gleichzeitig wird das Reaktionsprodukt geschont und kann effizienter isoliert werden.

In Hinblick auf mögliche Rebound-Effekte ist zu berücksichtigen, dass das Material der für die Nanofiltration erforderlichen Polymermembran aus Rohstoffsicht nicht kritisch zu bewerten ist. Darüber hinaus ist nicht zu erwarten, dass die Fertigung der Polymermembran mehr Energie und Rohstoffe verbraucht als die als Referenzprozess angenommene thermische Abtrennung.

6.7 NSTF-Membran-Elektroden für Wasserstoffbrennstoffzellen

6.7.1 Anwendungsfelder

Die Firma 3M hat ihre Membran-Elektroden-Technik „MEA“ (membrane electrode assembly) mit NSTF-Technik (nano structured thin film technology, englisch für nanostrukturierte Dünnschichttechnologie) effizienter gestaltet. Diese Technik kommt in Wasserstoffbrennstoffzellen zum Einsatz (Kremer, 2011). Wasserstoffbrennstoffzellen sind einerseits als Hilfsmittel zur Energiespeicherung interessant. Hier können sie eingesetzt werden, um regenerativ gewonnene elektrische Energie wie z.B. aus Windkraft, Gezeitenkraftwerken o.Ä. in chemische Energie in Form von Wasserstoff zu überführen. Als Wasserstoffverbraucher sind sie andererseits in der Lage, die freiwerdende Energie aus der kontrolliert ablaufenden Knallgasreaktion ($2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$) direkt und ohne Energieverlust in elektrische Energie für Elektromotoren umzuwandeln. Die bisherige Größe der Wasserstoffbrennstoffzellen und ihr vergleichsweise hoher Platinbedarf diktierten bisher Einsatzort und Einsatzfrequenz. Platin macht schätzungsweise 40% des Marktpreises von Brennstoffzellen mit dispersiven²⁵ Katalysatoren aus (Tang et al., 2007). Mögliche Anwendungsfelder liegen im Bereich der Elektromobilität, der mobilen Stromversorgung von Informationstechniken wie modernen Handys und Laptops.

6.7.2 Referenzprodukt

Das Referenzprodukt sind disperse Katalysatoren in Wasserstoffbrennstoffzellen. Dispersive Katalysatoren werden weitgehend in marktüblichen Brennstoffzellen eingesetzt. Das bedeutet, dass die Bildung von Wasser in einer kontrollierten Knallgasreaktion in einem Katalysator vermittelt wird, in dem Kohlenstoffnanopartikel (20–40 nm) mit anhaftenden Platinanopartikeln (2–3 nm) die reaktiven Grenzflächen für die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff

²⁵ Zur Definition des Begriffes siehe folgendes Kapitel.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

stellen. Die Kohlenstoffnanopartikel sind in einer Matrix aus Polytetrafluorethylen (PTFE; modifiziertes Teflon) eingebettet. Die Effizienz solcher Katalysatoren ist durch folgende Gesichtspunkte limitiert:

- Die Reaktionsgeschwindigkeit ist durch die Diffusionsdauer von Protonen begrenzt. In dispersiven Katalysatoren kann der Diffusionsweg zwischen den katalytischen Oberflächen bis zur Protonenaustauschmembran (PEM, englisch: proton exchange membrane) bis zu 15 µm lang sein (Tang et al., 2007),
- Durch die Entstehung von Wasserstoffperoxid wird die Protonenaustauschmembran (PEM) degradiert (Debe, 2006),
- Dispersive Katalysatoren dieser Bauart sind nur bis ca. 80°C temperaturstabil (Debe, 2006).

Durch den zweiten und dritten Punkt werden die Lebensdauer und der Einsatzbereich dieser Katalysatoren und damit der so ausgestatteten Brennstoffzellen begrenzt. Zusätzlich ist der Platinbedarf im Vergleich zum nanomodifizierten Produkt um 90% höher (Kremer, 2011).

6.7.3 Funktionalität der Nano-Komponente

Die neue NSTF-Komponente der Brennstoffzellen ist eine Membran, die mittels eines Stempelverfahrens mit Platin beschichteten Nanofasern (nanowhiskers) versehen wird. Diese Nanofasern bestehen aus dem Farbstoff PR149 (Perylen Rot) (Debe, 2006). Der verwendete mikrostrukturierte Stempel, auf dem die Nanofasern gebildet wurden, überträgt die Nanofasern zusammen mit der Topographie der Mikrostruktur auf die PEM. Die PEM wird auf diese Art von beiden Seiten modifiziert und als CCM (engl. catalyst coated membrane, deutsch: katalysatorbeschichtete Membran) bezeichnet. Die CCM hat aufgrund der geringen Dicke und der hohen chemischen Stabilität mehrere Vorteile gegenüber dem dispersiven Katalysator:

- Da kein Kohlenstoff als Trägermaterial für das Platin mehr eingesetzt wird, ist keine Oxidation des Kohlenstoffes mehr möglich.
- Die katalytischen Schichten der CCM sind 20- bis 30mal dünner als disperse Katalysatoren. Dadurch wird der Platinbedarf um ca. 90% gesenkt, die Diffusionsdistanzen nehmen stark ab und der Abtransport des produzierten Wassers als Produkt der Sauerstoffreduktion ist viel effizienter.
- Es bedarf keines Teflons mehr, welches in dispersiven Katalysatoren als Ionomer²⁶ dient.

Aus diesen Vorteilen ergibt sich eine verlängerte Lebensdauer des Produktes, ein Gewichtsverlust und eine Steigerung der Reaktionseffizienz um das ca. 5-fache (Kremer, 2011).

²⁶ Ein Ionomer ist ein Thermoplast mit zusätzlichen Ionenbindungen und dadurch vermittelte weitere Eigenschaften wie z.B. die Möglichkeit als Elektrolyt genutzt zu werden u.a.

6.7.4 Rohstoff- und Materialaspekte

Gegenüber dem herkömmlichen Produkt kann die mit NSTF-Membranen bestückte Wasserstoffbrennstoffzelle mit erhöhter Haltbarkeit, Temperaturtoleranz, vermindertem Gewicht und Rohstoffbedarf aufwarten. Auf gleichem Raum kann mehr Energie umgewandelt werden. Der um ca. 90% verminderte Platinbedarf trägt zu einer Senkung des Rohstoffverbrauchs bei. Aus ökologischer Sicht sind Metalle der Platingruppe problematisch, weil große Energiemengen bei ihrer Gewinnung und Aufreinigung nötig sind. Zudem ist die Umgebung von Raffinerien für Materialien aus der Platingruppe häufig mit Metallen und chemischen Abfällen schwer belastet (Blacksmith Institute, 2007; Hagelüken et al., 2005). Auch gelten die Platingruppenmetalle hinsichtlich der Versorgungssicherheit als kritisch und werden entsprechend auf der EU-Liste der 14 kritischen Metalle geführt (EUCOM, 2010c). Auch gelten die Platingruppenmetalle als entscheidende Stoffgruppe für viele Nachhaltigkeitstechniken (insbesondere im Bereich der Katalyse), was dem Thema der Versorgungssicherheit auch ökologische Relevanz verleiht (EUCOM, 2010c; Öko-Institut e.V., 2009).

6.7.5 Energieeffizienz

Steigerungen der Energieeffizienz sind vor allem bei einer Betrachtung des ganzen Lebensweges zu erwarten. Platin ist sehr energieaufwendig in der Gewinnung und Verarbeitung. Durch den verminderten Platinbedarf kann hier eine Steigerung der Energieeffizienz während der Produktionsphase erreicht werden bzw. eine schnellere Amortisierung während der Gebrauchsphase. Die erhöhte Haltbarkeit der mit den Membranelektroden ausgestatteten Brennstoffzellen kann sich ebenfalls positiv auf die Energieeffizienz der Brennstoffzellen auswirken, da die verlängerte Nutzungsdauer den Platinbedarf ebenfalls vermindert.

6.7.6 Human- und ökotoxikologische Faktoren

Im Vergleich zu herkömmlichen Membranen sind keine neuen spezifischen human- und ökotoxikologischen Risiken erkennbar. Der Farbstoff Perylen Rot, aus dem die Nanofasern gebildet werden, wird nach bisherigen Erkenntnissen als unbedenklich eingestuft.

Stattdessen kann auf die Verwendung von PTFE in den Katalysatoren verzichtet werden. Damit fällt die bedenkliche Verwendung von Perfluorooctansäure weg, die bei der Herstellung von PTFE verwendet wird (Lau et al., 2007). Obwohl in fester Form inert und biokompatibel, beginnt Degradation und damit verbunden Gasbildung (AssTech GmbH, n.d.) von PTFE bereits ab ca. 200°C. Die gebildeten Gase sind giftig für den Menschen und die Umwelt (Lau et al., 2007) und werden durch den Einsatz von NSTF-Membranen umgangen.

Ferner ist auch die Entsorgung der Brennstoffzellen durch den Verzicht auf PTFE in den Katalysatoren einfacher. Bei Entsorgung über Verbrennungsanlagen werden keine gefährlichen Gase aus dieser Quelle mehr freigesetzt.

6.7.7 Weitere Nachhaltigkeitsaspekte

Es ist zu erwarten, dass die neuen Wasserstoffbrennstoffzellen preisgünstiger hergestellt werden können, da der Platinpreis 40% des Marktwertes eines Katalysators ausmacht und der Produktionsprozess des Nanoprodukts weniger Schritte beinhaltet. Dies hat eine Verminderung der Kosten in der Qualitätssicherung und vermutlich eine Verringerung von Produktions-

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

ausschuss zur Folge. Beides könnte aber auch zu direkten und indirekten Rebound-Effekten führen (s. Kapitel 4.6.)

6.7.8 Fazit

Mit der Einsparung von Platin in den Wasserstoffbrennstoffzellen ist aus Ressourcensicht ein erheblicher Vorteil verbunden. Platin ist bei seiner Gewinnung und Aufbereitung energetisch aufwändig.

Damit einhergehend erhöht sich die Einsetzbarkeit von Wasserstoffbrennstoffzellen durch erhöhte Lebensdauer, vermindertes Gewicht und flexiblere Bauformen. Eine weitere Triebkraft für den Wechsel auf diese Variante von nanotechnisch modifizierten Katalysatoren ist der Verzicht auf PTFE im Katalysator, welche sowohl während der Produktionsphase als auch während der Entsorgungsphase giftige Substanzen benötigen bzw. freisetzen können. Während der Gebrauchsphase ist eine Freisetzung von toxischen Gasen im Rahmen einer Überhitzung der Brennstoffzelle denkbar, nicht aber im normalen Gebrauch, da die Brennstoffzellen ihre Effizienz und Funktion lange vor Erreichen von 200°C einbüßen.

Aus Ressourcensicht ergeben sich potenziell direkte und indirekte Rebound-Effekte. Die möglicherweise erhebliche Senkung des Marktpreises kann zu erhöhtem Einsatz und erhöhter Nachfrage nach Wasserstoffbrennstoffzellen führen. Darüber hinaus können Einsparungen bei der Anschaffung einer Wasserstoffbrennstoffzelle zum Konsum anderer Ressourcen führen. Aufgrund der bisher niedrigen Marktdurchdringung und der spezialisierten Anwendungen ist der indirekte Rebound-Effekt jedoch als gering einzustufen.

6.8 Bionanotechnische Beschichtung von keramischen Katalysatorträgermaterialien

6.8.1 Anwendungsfelder

Industrie- wie auch Fahrzeugabgase werden von unterschiedlichen Katalysatoren gereinigt, bevor sie in die Umwelt gelangen. Ziel ist es, vor allem Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Stickoxide zu entfernen oder ihren Ausstoß zu minimieren.

Um eine effektive Reduktion von Schadstoffen auch bei niedrigen Abgastemperaturen zu erreichen, werden in den unterschiedlichen Komponenten des Abgasfiltersystems Edelmetalle wie Platin oder Palladium eingesetzt. Diese katalysieren die Abbaureaktionen. Die Firma Namos hat ein „Biotemplating-Verfahren“ entwickelt, mit dem Katalysator-Trägermaterialien effizienter mit metallischen Nanopartikeln beschichtet werden können (Namos GmbH, 2012). Im Folgenden werden Fahrzeugkatalysatoren dieser Bauart mit herkömmlichen Katalysatoren verglichen.

6.8.2 Referenzprodukt

Auch bei herkömmlichen Katalysatoren werden Platin und Palladium in nanostrukturierter Form eingesetzt, um die Oberfläche der Metalle und damit ihre Effizienz bei der Katalyse zu erhöhen. Hier werden die ultrafein gekörnten Metalle entweder bei der Fertigung der jeweiligen Katalysatorkomponenten direkt dem porösen, keramischen oder metallischen Trägermaterial zugesetzt oder die Komponente des Katalysators wird gefertigt und anschließend in eine Lösung mit metallischen Nanopartikeln getaucht. Die Kombination aus porösem Trägermaterial und nanometergroßen, metallischen Partikeln erhöht die Reaktionsfläche für die Abgase stark genug, um eine effiziente Reinigung der Abgase zu ermöglichen.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Beide Verfahren zur Funktionalisierung der keramischen Trägermaterialien mit Nanopartikeln bergen Probleme. Wenn die Platin- und Palladium-Nanopartikel dem Trägermaterial bei der Produktion zugesetzt werden, dann sind viele der Partikel für die Abgase nicht zugänglich, weil sie vollständig von dem Trägermaterial umschlossen sind. Damit stehen sie nicht mehr für katalytische Reaktionen zur Verfügung. Das zweite Verfahren, bei dem der Träger in eine Lösung mit metallischen Nanopartikeln eingetaucht wird, eliminiert zwar die Wahrscheinlichkeit, dass Nanopartikel nicht für die katalytischen Reaktionen zugänglich sind, aber bei dieser Lösung besteht eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, dass Nanopartikel agglomerieren und zu Mikropartikeln werden. In dieser Form verfügen sie über eine deutlich geringere Oberfläche und büßen so katalytisches Potenzial ein.

6.8.3 Funktionalität der Nano-Komponente

Die metallischen Nanopartikel können in Suspension hergestellt werden. Aus einer breiten Palette von möglichen Metallen und deren Salzen können Nanopartikel hergestellt werden, indem ein nicht näher spezifiziertes Biopolymer einer metallischen Salzlösung zugesetzt wird. Die Biopolymere dienen als Kristallisationskerne und Nanopartikel in der Größenordnung 1–100 nm formen sich um die Biopolymere. Die so entstehenden Lösungen sind über Monate stabil und zeigen keine Sedimentationserscheinungen. Die Biopolymere verhindern die Aggregation der gebildeten Nanopartikel. Die entstandene Lösung kann auf eine Vielfalt von Trägermaterialien gesprüht werden. Hier wird für die Fahrzeugkatalysatoren ein keramisches Trägermaterial verwendet. Unter reduzierenden und dem Biopolymer nicht zuträglichen Bedingungen werden die Metallsalze, aus denen die Nanopartikel bestehen, zu elementarem Metall reduziert und das Biopolymer wird entfernt (Hofinger et al., 2010). Durch dieses Verfahren wird eine homogene Oberflächenfunktionalisierung der porösen Trägermaterialien mit den gewünschten Nanopartikeln erreicht. Die für die Katalyse zur Verfügung stehende Oberfläche wird maximiert.

6.8.4 Rohstoff- und Materialaspekte

Es wird geschätzt, dass jährlich ca. 230 Tonnen neue, nicht recycelte Edelmetalle für die Beschichtung von Abgaskatalysatoren eingesetzt werden. Dies entspricht einem Wert von etwa 8,3 Milliarden US-Dollar (Nanostart AG, 2010). Damit wird ein wichtiger Teil der kritischen Metalle Platin und Palladium in diesem Markt umgesetzt. Die neu entwickelte Methode benötigt circa 50% weniger der Metalle als in dem Referenzprodukt verwendet werden. Die Metalle der Platingruppe finden sich in der Kritikalitätsliste der EU wieder (EUCOM, 2010c). Der steigenden Nachfrage stehen keine entsprechenden Vorkommen gegenüber und die Metalle sind energetisch sehr aufwendig in der Gewinnung und Aufreinigung. Zudem ist die Umgebung von Raffinerien für Materialien aus der Platingruppe häufig mit Metallen und chemischen Abfällen schwer belastet (Blacksmith Institute, 2007; Hagelüken et al., 2005). Darüber hinaus gelten die Platingruppenmetalle als entscheidende Stoffgruppe für viele Nachhaltigkeitstechniken (insbesondere im Bereich der Katalyse), was dem Thema der Versorgungssicherheit auch ökologische Relevanz verleiht (Buchert et al., 2009; European Commission, 2010).

6.8.5 Energieeffizienz

Der Energieverbrauch bei Betrieb ist mit dem des Referenzproduktes identisch. Da die Funktionalisierung von Trägermaterialien nach den gleichen Prinzipien wie zuvor ablaufen kann, ist in

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

der Produktionsphase keine Veränderung der Energieeffizienz zu erwarten. Die für das fertige Produkt aufgewandte Primärenergie ist allerdings deutlich niedriger, da weniger Platin verwendet wird. Dadurch wird dessen energetischer Rucksack für das Produkt geringer. Der Energieeinsatz bei Herstellung der Biopolymere ist nicht bekannt.

6.8.6 Exposition und Toxikologie

Die Nanopartikel werden in Lösung produziert und später fest mit dem Trägermaterial verbunden, so dass eine Freisetzung unwahrscheinlich ist. Während der Beschichtung des Trägermaterials wird die Lösung mit den metallischen Nanopartikeln aufgesprüht. Bei diesem Arbeitsgang bis zur finalen Reduktion der Nanopartikel auf dem Trägermaterial müssen entsprechende Arbeitsschutzmaßnahmen getroffen werden, um die Inhalation von Nanopartikeln auszuschließen.

Die toxikologischen Konsequenzen einer Inhalation von Platin-Nanopartikeln können Entzündungen der Atemwege (wie bei fast jeder Staub- und Feinstaubinhalation) und Asthma sein (Buzea et al., 2007). Zu Palladium liegen keine spezifischen toxikologischen Studien vor. Experimente von (Shah & Belozerova, 2008) zeigten keine negativen Einflüsse auf Bodenbakterien in den eingesetzten Konzentrationen.

6.8.7 Weitere Nachhaltigkeitsaspekte

Kosteneinsparung bei teuren Edelmetallen führen zu einer Preisreduktion des fertigen Produktes. Dies könnte zu einem vermehrten Einsatz von Abgaskatalysatoren auch in weniger finanzstarken Regionen führen, so dass eine Verbesserung der Luftqualität erreicht werden kann.

6.8.8 Fazit

Die bionanotechnische Beschichtung von keramischen Katalysatorträgermaterialien ist eine vielversprechende Technik, die bereits Langzeittests bestanden hat. Durch die einfache Integration in bestehende Herstellungsprozesse ist eine rasche Markteinführung problemlos möglich. Die hohen Einsparungspotenziale bei teuren Edelmetallen könnten dabei helfen, die Verbreitung von Abgasfiltersystemen in Entwicklungsländern zu fördern und die oftmals gesundheitsgefährdende Luftqualität zu verbessern. Die möglichen Rebound-Effekte sind wie auch bei den Wasserstoffbrennstoffzellen direkter und indirekter Natur. Sie hängen mit der gleichen Ersparnis von platinmetallischen Materialien zusammen. Im Gegensatz zu Wasserstoffbrennstoffzellen sind Katalysatoren jedoch ubiquitär in den industrialisierten Ländern vertreten. Eine signifikante Senkung des Marktpreises durch die hier beschriebene Innovation könnte zu erhöhter Nachfrage in Schwellen- und Entwicklungsländern führen. Die Frage, ob die dort durch die Katalysatoren gewonnenen Vorteile global den erhöhten Platinmetallbedarf rechtfertigen, würde den Rahmen der vorliegenden Studie sprengen und bedarf einer separaten Untersuchung.

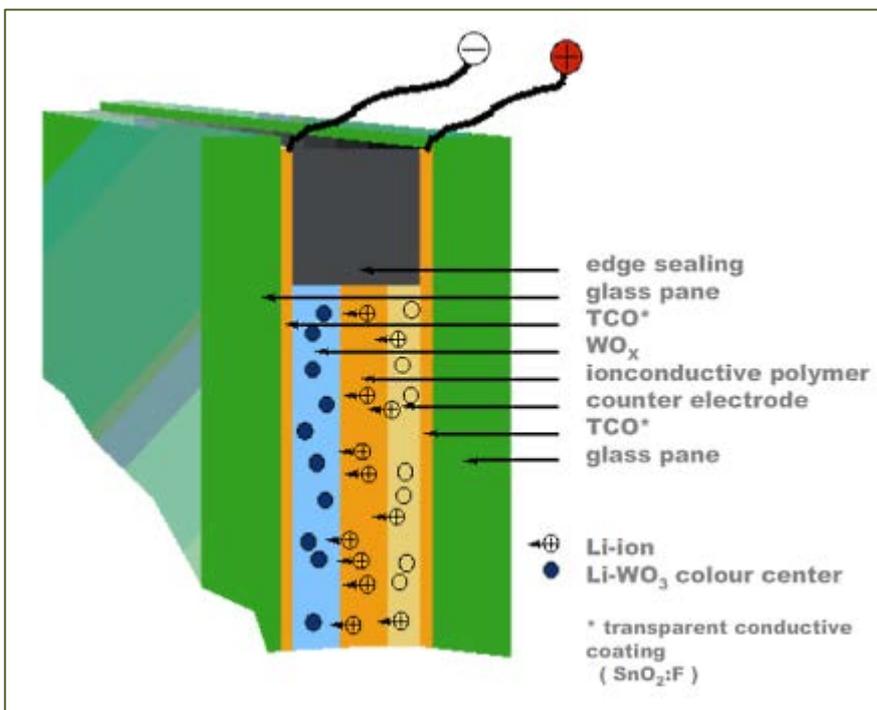
7 Ergebnisse des Fallbeispiels „EControl-Glas“

7.1 Produktbeschreibung

Bei den schaltbaren Fenstern von EControl-Glas GmbH und Co.KG handelt es sich um elektrochrome Verbundglasscheiben. Sie stellen eine Neuerung auf dem Markt von Gebäudeverglasungen, Raumtemperaturkontrolle sowie Raumbelichtungssteuerung dar und sind damit ein Schnittstellenprodukt mit Auswirkungen auf Energieverbrauch und CO₂-Footprint entlang des gesamten Produktlebenszyklus (Wittkopf & Dittmar, 2012). Diese Verglasungen sind im privaten wie auch im kommerziellen Sektor anwendbar, werden aber in diesem Bericht im Kontext des kommerziellen Sektors analysiert (z.B. Bürogebäude, Betriebs-, Konstruktions- und Lagerhallen). Sie konkurrieren auf diesem Markt mit Kombinationslösungen aus Mehrfachverglasung und einer, häufig extern am Gebäude angebrachten Verschattung in Form von Aluminiumjalousien (Referenzprodukt).

Die schaltbaren Fenster von EControl-Glas können dynamisch, automatisch oder manuell an die Lichtverhältnisse der Umgebung angepasst werden. Der elektrochrome Effekt wird mittels einer dünnen Schicht nanostrukturierten Wolframoxids erzeugt, welche sich bei Anlegen einer Spannung durch die Reaktion mit Lithium-Ionen bläulich verfärbt (s. Abbildung 1).

Abbildung 1:²⁷ Schematischer Aufbau des elektrochromen Glases von EControl-Glas. Bei Anlegen einer Spannung interagieren die Lithium-Ionen mit dem Wolframoxid und erzeugen so die Blaufärbung des Glases. Der Vorgang ist durch erneute Anlage der umgekehrten Spannung reversibel. (Bild von EControl-Glas)



²⁷ Edge sealing: Kantenversiegelung; glass pane: Glasscheibe; TCO: transparente, leitfähige Schicht; WOx: Wolframoxid; ionconductive polymer: ionenleitendes Polymer; counter electrode: Gegenelektrode.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

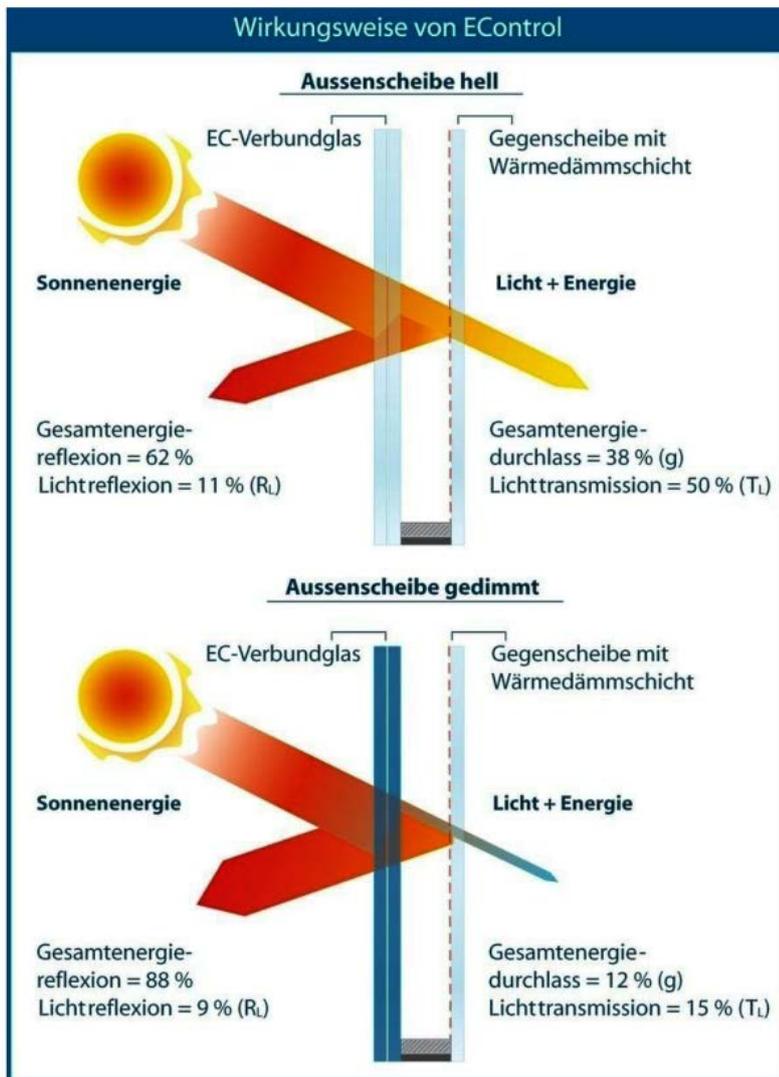
Dieser Prozess ist vollständig reversibel und es konnte bisher kein Funktionsverlust abhängig von der Menge von Schaltvorgängen festgestellt werden (Auskunft durch EControl-Glas). Mittels zentralisierter, gebäudespezifischer Sonnenstands- und Intensitätserfassung lassen sich die Fensterscheiben je nach Bedarf und Gebäudefront stufenlos in ihrer Filterwirkung regulieren. Eine genauere und energetisch besonders wünschenswerte Regulation kann mittels temperaturspezifischer Abdunkelung erreicht werden. So ist es möglich, jeden einzelnen Raum mit einem Temperatursensor auszustatten. Abhängig vom Nutzungsprofil des Raumes und der Orientierung der Fenster kann so mehr oder weniger Energie von außen die Scheibe durchdringen und so zur Temperaturregulation beitragen (Schlitzberger & Kempkes, 2012).

Obwohl theoretisch stufenlos regelbar, wird das Produkt zur besseren Handhabbarkeit mit einer Elektronik versehen, die den Abdunkelungsprozess in 5 Stufen unterteilt. Die Transmissionsspanne reicht von maximaler Transmission (Gesamtenergiedurchlass 38% ($g = 0,38$)²⁸, Lichttransmission (T_L) 50%) bis zu maximaler Abdunkelung ($g = 0,12$, $T_L = 15\%$) (Auskunft EControl-Glas, s. Abbildung 2). In einer Vergleichsstudie wurden EControl-Glas und drei konventionelle Fenstersysteme miteinander verglichen. Die Vergleichssysteme charakterisierten sich durch g -Werte zwischen 0,6 und 0,12. Das Ingenieurbüro Prof.-Dr. Hauser GmbH bescheinigte den abdunkelbaren Fenstern von EControl-Glas dabei eine vergleichbare Dämmleistung gegenüber Wärme wie die dem besten verglichenen konventionellen Fenstersystem im Sommer, ohne aber dabei den energetischen Vorteil in der Heizzeit zu verlieren, der dem modulierbaren g -Wert entspringt. In kälteren Jahresabschnitten kann die Abdunkelung ungenutzt bleiben und damit einen höheren g -Wert erlauben. Dadurch durchdringt mehr Energie die Scheibe und komplementiert damit die Heizleistung (Schlitzberger & Kempkes, 2012).

²⁸ Der g -Wert ist der Anteil des (Sonnen-)Lichts, der durch eine Verglasung (Fenster) dringt. Ein g -Wert von beispielsweise 0,6 bedeutet, dass 60% der eingestrahlten Energie (also des Lichts) ins Innere des Raumes gelangen.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Abbildung 2: Schematische Darstellung der filterabhängigen Attenuation des Energiespektrums durch Abdunkelung des EControl-Glases. Ist die Scheibe hell, werden ca. 38% der Energie transmittiert. Ist die Scheibe abgedunkelt, können ca. 12% der eingestrahlenen Energie das Glas durchdringen. (Bild von EControl-Glas)



Durch die Absorption und Reflektion großer Energiemengen aus dem Sonnenlicht durch das abgedunkelte EControl-Glas minimiert sich in gemäßigten Breitengraden wie z.B. Deutschland die Nutzung von Klimaanlage. Abhängig von dem jeweiligen Nutzungsprofil des Gebäudes kann auf Klimatisierung weitestgehend verzichtet werden und die Frischluftzufuhr ist im Sommer der einzig verbleibende Aspekt der gebäudeinternen Klimakontrolle. Modellrechnungen von EControl-Glas selber zeigen Einsparmöglichkeiten gegenüber statischen Sonnenschutzsystemen im Bereich der Raumkühlung durch Klimaanlage (s. Kapitel 7.3 ff.). Gleichzeitig ist der Lichteinfall durch die abgedunkelten Fenster hoch genug, um zusätzliche Beleuchtung unnötig zu machen. Beide Aspekte haben Einfluss auf den Energieverbrauch der ausgestatteten Gebäude während der Nutzenphase. Weitere Ressourcenaspekte hinsichtlich Rohstoff- und Materialaufwand, CO₂-Fußabdruck und Energieeffizienz werden in den folgenden Kapiteln qualitativ und quantitativ besprochen. Ein weiterer zu bewertender Aspekt ist die Modulation des Lichtspektrums in Arbeitsräumen durch diese Verglasung. Während bei indirekter Sonneneinstrahlung das sichtbare Spektrum des Lichtes im Raum hinter der Verglasung wenig beeinflusst wird, ist bei Abdunkelung der Fenster ein physiologischer Effekt durch den erhöhten Blauanteil im Raumlicht möglich (s. Kapitel 7.3 ff.).

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Längere Wellenlängen (rot und infrarot) werden herausgefiltert bzw. reflektiert. Die Fensterfronten erhitzen sich im Sommer in Deutschland nach Angaben des Herstellers auf bis zu 70°C zu Spitzenzeiten der Sonneneinstrahlung. An den Innenraum wird durch die Mehrfachverglasung jedoch nur ein sehr geringer Anteil der thermischen Energie weitergeleitet. Bei voller Dämpfung des Lichtes sind die Scheiben weiterhin transparent und das Raumgefühl wird durch ein Lichtspektrum mit leichter Dominanz der Blauanteile geprägt. Dies ist auch ein wesentlicher Unterschied zum Referenzprodukt (siehe folgendes Kapitel). Standardverglasungen mit Aluminiumjalousien verändern das Lichtspektrum im Raum nicht dynamisch, sondern konstant und bei Verschattungsbedarf werden Ausblick und Raumambiente durch das Vorhandensein von Jalousien beeinflusst.

Da es sich bei den schaltbaren Fenstern um ein Schnittstellenprodukt handelt, ist es nötig, verschiedene Marktsegmente kurz zu beschreiben, um die verschiedenen möglichen Anwendungsbereiche dieses Produktes darzustellen.

Allein innerhalb der Bundesrepublik Deutschland wurden 2011 ca. 12,9 Mio. Fenstereinheiten abgesetzt und die Hochrechnungen für 2012 prognostizieren einen Anstieg um 2,9% auf ca. 13,2 Mio. Einheiten. 61,9% des Anstieges fallen im Zuge der energetischen Sanierung des Gebäudebestandes an. Im Bereich von Neubauten steigen die Einheitenverkäufe um 4,7% auf einen Anteil von 38,1%. (GFF, 2012)

Weitere betroffene Segmente des Europäischen Marktes sind der Markt für Klimaanlage und der Markt für Sonnenschutzapplikationen – in diesem Fall handelt es sich bei dem Vergleichsprodukt um eine außen angebrachte Aluminiumjalousie. Sowohl Klimaanlage als auch Aluminiumjalousien tragen während ihrer Produktion und/oder während ihres Gebrauchs sowie am Ende ihres Lebensweges aktiv zum Energieverbrauch und dem Anfall von CO₂-Emissionen bei. Pro Jahr werden in Deutschland etwa 100.000 bis 140.000 Klimageräte verkauft. In Italien und Spanien liegt die Zahl etwa zehn Mal so hoch, wie aus einer Publikation des Umweltbundesamtes hervorgeht. In Deutschland betrug der Anteil des Gesamtstromverbrauches 2008 für Kühlung und Klimatisierung 2008 etwa 8%. In der EU lag er 2005 bei 30 Terawattstunden (TWh). Im Zuge neuer Regelungen soll der Anstieg des Energieverbrauches bis 2020 auf nur ca. 63 TWh gedrosselt werden (Umweltbundesamt, 2012b).

Aus umweltpolitischen Gründen werden in Europa und insbesondere in Deutschland Maßnahmen eingeleitet, um das Klima zu schützen. Im Zuge der europäischen Anstrengungen wurde bereits das „20% Ziel der Europäischen Union“ definiert. 2006 (und Folgende) beschloss die EU-Kommission bis 2020 20% des jährlichen Energieverbrauches an Primärenergie einzusparen (EUCOM, 2006, 2011b). 40% des Gesamtenergieverbrauches und 36% der gesamten CO₂-Emissionen in Europa entfallen auf Gebäude (EUCOM, 2008). Spezifisch im Gebäudesektor wurden die Bereiche Wärmekapazität/Isolation, Heizungsanlage und Warmwasserversorgung, Klimaanlage, eingebaute Beleuchtung und Innenraumklimabedingungen als Einsparziele definiert (EUCOM, 2010a).

Im Licht der europäischen Bemühungen, die Treibhausgasemissionen und den Stromverbrauch zu senken und der deutschen Ziele, die eine Senkung der Treibhausgasemissionen von 40% bis 2020 gegenüber den Emissionen von 1990 anstreben, sind Verbesserungen im privaten und gewerblichen Bausektor wichtige Bausteine zum Erreichen dieser Ziele (Umweltbundesamt, 2011).

7.2 Definition des Referenzprodukts

Als Referenzprodukt dient eine Standardverglasung (Doppelverglasung) mit einer extern angebrachten Verschattungseinrichtung in Form von Aluminiumjalousien oder -rollos. Da der Gesamtenergiedurchlass g bei diesen Fenstern baulich bedingt unveränderlich ist, wird im Folgenden von einem Referenzfenster mit dem Wert $g = 0,4$ ausgegangen. Prinzipiell sind Fenster mit höherem oder geringerem Energiedurchlass möglich. Beides ist jedoch nachteilig. Ist g hoch, dann führt das zu einer hohen Raumerwärmung bei Sonneneinstrahlung im Sommer. Ist g niedrig, dann wird im Sommer zwar viel thermische Energie reflektiert. Andererseits wird im Winter auch wenig von der bei Tag zur Verfügung stehenden Strahlungsenergie der Sonne genutzt, um die Heizung zu unterstützen.

Da sowohl bei Nano- als auch bei Referenzprodukt Fensterrahmen aus unterschiedlichen Materialien verwendet werden können, sind diese für die vergleichende Bilanzierung nicht relevant. Allerdings müssen die extern montierten, elektrisch verstellbaren Verschattungen bei der Modellierung des Referenzprodukts mit 2,7 kg Aluminium pro Quadratmeter berücksichtigt werden.

7.3 Ergebnisse der Anwendung des Kriterienkatalogs der TG2

Im Rahmen einer ersten qualitativen Betrachtung verschiedener Nachhaltigkeitsaspekte wurde zunächst der Kriterienkatalog der Themengruppe 2 (vgl. Kapitel 5.2) herangezogen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den folgenden Ausführungen um Einschätzungen handelt, welche die Firma EControl-Glas selbst vorgenommen hat. Auf dieser Basis ergibt sich eine Ersteinschätzung zum so genannten Nanoprodukt (das elektrisch schaltbare Glasfenster der Firma EControl-Glas), welche in der Folge herangezogen wurde, um bei der vertieften quantitativen Analyse (vgl. Kapitel 7.4) geeignete Untersuchungsschwerpunkte zu setzen.

7.3.1 Funktionalität der Nano-Komponente

Das Floatglas (Flachglas) ist vom Werk aus einseitig mit einer dünnen Schicht Fluor dotiertem Zinnoxid (FTO) beschichtet. Darauf wird im Sputterverfahren eine wenige Nanometer dicke Schicht aus Wolframoxid (WO_3) aufgebracht. Diese wird durch ein ionenleitfähiges Polymer von der Gegenelektrode aus Titan-Vanadiumoxid abgetrennt. Darauf wird wieder eine mit FTO beschichtete Floatglasscheibe gelegt und der Mehrschichtenaufbau wird zusammengefügt. Lithium-Ionen wandern beim Anlegen einer Spannung zur Wolframoxid-Schicht an der Anode und bilden dort einen $LiWO_3$ -Komplex, welcher die bläuliche Färbung vermittelt. (s. auch Abbildung 1).

Durch die sehr geringe (150–400 nm) Schichtdicke der verschiedenen Lagen verliert die Fensterscheibe nicht an Transparenz. Innerhalb dieser Schichten sind die Metalloxide gekörnt, um die reaktive Fläche zu erhöhen. Die Korngrößen liegen zwischen 20–200 nm. Gleichzeitig ermöglicht das sehr dünne Schichtsystem eine hohe Reaktivität der Komponenten, kurze Schaltzeiten, da die Diffusionswege kurz sind, und einen geringen elektrischen Widerstand. Diese nanostrukturierten Dünnschichten weisen gegenüber kompakten WO_3 eine deutlich höhere Einfärbefektivität auf.

Die metallischen Schichten sind nicht abwaschbar und fest mit dem Glas verbunden. Während der Gebrauchsphase sind sie zwischen zwei Glasscheiben im Aufbau des Fensters versiegelt.

7.3.2 Rohstoff- und Materialaspekte

EControl-Glas verwendet für sein Produkt mehrere von der EU und anderen Organisationen bzw. Studien als kritisch eingestufte Metalle. Wolfram, Vanadium, Lithium und Zinn sind sowohl von nur begrenzt verfügbarer als auch von steigender Nachfrage betroffen. Dennoch muss hier berücksichtigt werden, dass aufgrund der geringen Schichtdicken, die im Produkt eingesetzt werden, nur sehr geringe Mengen der Metalle verwendet werden (s. Kapitel 7.4.2).

Das schaltbare Fenster benötigt mehr Floatglas als ein konventionelles Fenster, sowohl um zusätzlichen Raum für die elektrochemische Reaktion und deren Komponenten zu bieten als auch um die Wärme- und Schallisolation zu ermöglichen. Letztere werden genau wie bei konventionellen Fenstern über eine Mehrfachverglasung erzeugt. Damit wird das schaltbare Glas auch schwerer als das Referenzprodukt.

Im Gegensatz dazu benötigt das Referenzprodukt mit externer Verschattung erhebliche Mengen Aluminium (s. Kapitel 7.4.1) für die Jalousien. Die Jalousien und ihr Bewegungsmechanismus sind aufgrund der mechanischen Belastung wartungsaufwändiger als die schaltbaren Fenster. Es wird angenommen, dass sich konventionelle und schaltbare Fenster bezüglich ihrer Lebenserwartung nicht unterscheiden.

Bei der Rezyklierung schneidet das schaltbare EControl-Glas besser als das Referenzprodukt ab, da bei dem Referenzprodukt der Anteil von Aluminium, der recycelt werden muss, deutlich höher ist. Durch die extrem dünnen Schichten der verwendeten Metalle und Elektrolyte ist eine produktspezifische Rezyklierung nicht notwendig (s. auch Kapitel 5.4). Die Fensterelemente von EControl-Glas können – wie auch das Referenzprodukt – als Bauschutt entsorgt werden. Das Aluminium der Verschattung des Referenzproduktes muss unter Qualitätsverlust recycelt werden.

7.3.3 Energieeffizienz

Vor allem hinsichtlich des Energiebedarfs hebt sich das schaltbare Fenster vom Referenzprodukt ab. Während der Fertigung erfordert es trotz des erhöhten Glasbedarfes geringere Energiemengen als das Referenzprodukt, weil andererseits das im Referenzprodukt verwendete Aluminium hohe spezifische Energiemengen in der Gewinnung und Fertigung benötigt (vgl. quantitative Analyse in Kapitel 7.4.3).

Während der Nutzenphase ist sowohl der Betrieb der schaltbaren Fenster als auch der mögliche Verzicht auf Klimaanlage und Beleuchtung der verschatteten Räume relevant. Beides spart in nennenswertem Maße Energie ein (vgl. hier ebenfalls die quantitative Analyse in Kapitel 7.4.3).

Die Nutzung von extern montierten Verschattungen zieht einen verstärkten Bedarf nach dem Einsatz von Klimaanlage und Innenraumbeleuchtung nach sich. Der Wert für den Gesamtenergiedurchlass g liegt bei den Referenzfenstern nicht tief genug, um einer Erwärmung im Innenraum in gleichem Maße entgegenzuwirken, wie dies bei den elektrochromen Gläsern der Fall ist. Gleichzeitig erfordert das Absenken der externen Aluminiumverschattung je nach Raumgröße den zusätzlichen Einsatz von Innenraumbeleuchtung, obwohl eigentlich ausreichend Sonnenlicht zur Verfügung stünde.

7.3.4 Exposition und Toxikologie

Es gibt bei beiden Produkten nach bisherigem Kenntnisstand keine besorgniserregenden toxikologischen Aspekte. EControl-Glas äußert die Vermutung, dass das Vanadiumoxid am Ende des Lebenszyklus auf der Mülldeponie aus den Fenstern ausgewaschen werden könnte (z.B. durch sauren Regen).

Obwohl Vanadium und Vanadiumverbindungen in Lebewesen wichtige Funktionen erfüllen (ein erwachsener Mensch ca. 0,3 mg/kg Vanadium enthält), ist Vanadium potenziell kanzerogen und als solches in der Kanzerogenitätsstufe 2 eingeordnet (DFG, 2012). Dies gilt jedoch nur für die einatembare Fraktion. Im Falle von Auswaschungen durch Witterungsbedingungen entsteht mit hoher Wahrscheinlichkeit kein einatembares Produkt, führt jedoch zu einer Umweltbelastung mit Vanadium bzw. Vanadiumverbindungen.

Durch die geringen Schichtdicken, die in diesem Produkt zum Einsatz kommen, ist das aus der Freisetzung resultierende Risiko jedoch nicht sehr hoch. Gegenüber den Vanadiumkonzentrationen im sonstigen Bauschutt und in Metallabfällen, die der Witterung ausgesetzt sind, ist das Risiko als gering einzuschätzen.

7.3.5 Weitere Nachhaltigkeitsaspekte

Aufgrund der mechanischen Betätigung der Aluminiumjalousien ist hier gegenüber dem Referenzprodukt ein erhöhter Wartungsaufwand zu erwarten. Schwerer quantifizierbar ist der Gewinn an Wohlbefinden für die Nutzer der mit den schaltbaren Fenstern ausgestatteten Räume. Zum einen verstellt die Abdunklungsfunktion nicht die Sicht aus dem Fenster. Darüber hinaus hat die Verschiebung des sichtbaren Lichtspektrums hin zu dem blauen Spektralanteil eine nachweisbare Konzentrations- und aufmerksamkeitsfördernde Wirkung (Brainard et al., 2001; Holzman, 2010).

7.4 Ergebnisse der untersuchten Schlüsselindikatoren

Im Folgenden sollen nun ausgehend von den in erster Linie qualitativen Aussagen aus der Anwendung des TG2-Kriterienkatalogs ausgewählte Aspekte vertieft und so weit wie möglich quantitativ betrachtet werden.

Dazu werden zunächst die für diese Analysen grundlegenden Modellierungsannahmen (vgl. Kapitel 7.4.1) vorgestellt. Im Anschluss daran folgt eine Zusammenstellung der Auswirkungen auf den Rohstoff- und Energieverbrauch (vgl. Kapitel 7.4.2 und 7.4.3). Diese Ergebnisse werden um die Resultate des Schlüsselindikators „CO₂-Fußabdruck“ ergänzt (vgl. Kapitel 7.4.4).

7.4.1 Grundlegende Modellierungsannahmen

Einige der für die Betrachtung der einzelnen Schlüsselindikatoren wesentlichen Parameter wurden bereits im vorhergehenden Kapitel in qualitativer Weise erwähnt. Im vorliegenden Kapitel sollen diese nochmals zusammengefasst, vervollständigt und um wichtige quantitative Angaben ergänzt werden. Übergreifend für alle Schlüsselindikatoren wird die außenliegende Jalousie des Referenzproduktes mit einem Rohstoffeinsatz von 2,7 kg Aluminium pro Quadratmeter Fenster bilanziert.

Alle Rohstoff- und Materialangaben beziehen sich auf Quadratmeter Fensterfläche (sofern nicht anders bezeichnet). Es wird von einer Lebensdauer aller Verglasungen von ca. 30 Jahren ausgegangen (Künninger & Richter, 1996).

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Für den CO₂-Fußabdruck und die Überlegungen zur Energieeffizienz wurden grundsätzlich zwei Szenarien gebildet:

- Szenario 2011, bei dem der Vergleich zwischen Nano- und Referenzprodukt mit den aktuell gültigen Annahmen zu den jeweiligen Fertigungsprozessen vorgenommen wird;
- Szenario 2020, welches eine deutliche Ausweitung der Produktion bei EControl-Glas zu Grunde legt.

Bei der Produktion von EControl-Glas ergeben sich für das Szenario 2020 erhebliche Veränderungen: Im Vergleich zu 4200 m² Produktionsvolumen für das Jahr 2011 werden für das Jahr 2020 ca. 150.000 m² Produktionsvolumen angenommen, die mit der bereits vorhandenen Anlage durchgesetzt werden können. Dadurch ist perspektivisch mit einer erheblichen Senkung des Energieaufwands und der CO₂-Emissionen pro Quadratmeter zu rechnen. Maßgeblich für die Berechnung des Energieaufwandes in der Prognose 2020 ist die Angabe der EControl-Glas GmbH, kurz- bis mittelfristig einen Quadratmeter ihres Produktes mit einem Stromeinsatz von ca. 100 kWh zu produzieren. Zuzüglich hierzu werden weiterhin anteilig Sockelverbräuche v.a. für das Produktionsgebäude (z.B. Beleuchtung) aufgeschlagen. Diese werden als unverändert angenommen, da keine weiteren Produktionsstandorte im Szenario 2020 vorgesehen sind.

Beim Referenzprodukt wird hingegen in beiden Szenarien davon ausgegangen, dass aufgrund des vergleichsweise höheren Marktalters dieses Produktes die Produktionsprozesse bereits optimiert und die zugehörigen Anlagen annähernd optimal ausgelastet sind.

Für den Transport von Nano- wie Referenzprodukt zum Kunden wird als Transportmittel ein LKW (16–32 t, EURO-5-Norm) angenommen. Unterschiede ergeben sich hier aus der flächendeckenden Existenz von Produktionseinrichtungen beim Referenzprodukt. Es wird daher in diesem Fall ein durchschnittlicher Lieferweg von 500 km zugrunde gelegt. Das EControl-Glas hingegen wird derzeit an nur einem einzigen Standort in Europa produziert. Daher wird unter Annahme eines europäischen Marktes ein mittlerer Lieferweg von 2000 km angenommen.²⁹

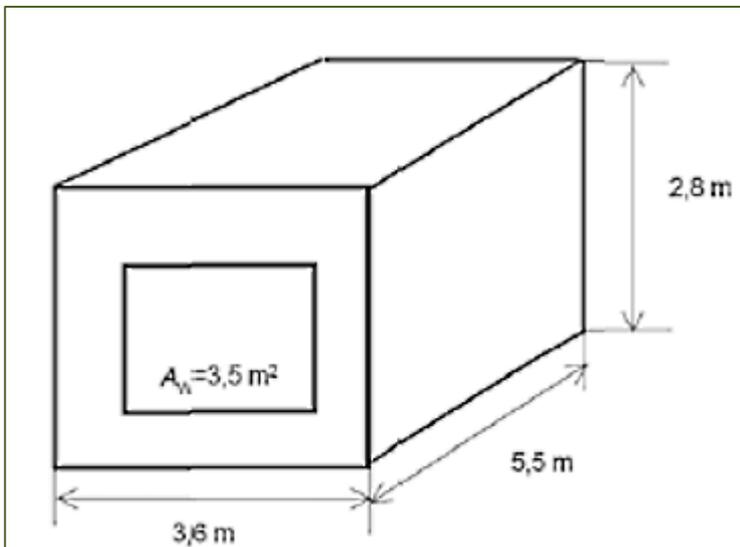
In der Gebrauchsphase müssen für beide Vergleichsobjekte entsprechend der getroffenen Annahmen zur Haltbarkeit alle relevanten Verbräuche über einen Zeitraum von 30 Jahren berücksichtigt werden. Dazu gehören zum einen die jeweiligen Stromverbräuche für die Ansteuerung der Verschattung. Hierfür werden im Falle von EControl-Glas vier Schaltzyklen pro Tag mit einem Verbrauch von 1,5 Watt angenommen, während für die elektrische Steuerung der Jalousien ein Stromverbrauch von 100 W (mit einer Betriebsdauer des Motors über 1 Minute / Tag) zugrunde gelegt werden. Darüber hinaus ist beim Referenzprodukt auch ein zusätzlicher Kühlenergiebedarf zu bilanzieren (vgl. Kapitel 7.3.3). Für die zugehörige Modellierung muss eine Beziehung zwischen der Fensterfläche (als funktioneller Einheit) und dem dahinterliegenden Raum hergestellt werden. Hierzu wird das Raummodell gemäß

²⁹ Perspektivisch kann sich dieser Lieferweg durch weitere Produktionsstellen von EControl-Glas oder durch weitere Produzenten am Markt verkürzen. Entsprechend der zu Grunde gelegten konservativen Modellierung des Nano-Produkts ist es jedoch angemessen, 2000 km als mittlere Lieferdistanz anzunehmen. Zudem ist zu beachten, dass die Transporte nur einen untergeordneten Beitrag am Gesamtergebnis haben (ca. 2%).

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

DIN EN ISO 13791 genutzt. Es handelt sich dabei um einen Raum der Abmessungen 1,3 m * 5,5 m * 2,8 m, wie er in Abbildung 3 dargestellt ist. Bei allen Überlegungen wird die maximal mögliche Fensterfläche dieses Raummodells mit 3,5 m² zugrunde gelegt.³⁰

Abbildung 3: Raummodell gemäß DIN EN ISO 13791. Dieses Raummodell wird in dieser Analyse als Basis für die Auswertungen zum CO₂-Fußabdruck und zur Energieeffizienz genutzt.



Um den Bezug zwischen der Raumfläche und der funktionellen Einheit (1 m² Fensterfläche) herzustellen, werden die Parameter dieses Raumes in folgender Gleichung einbezogen:

$$3,5 \text{ m}^2(\text{Fensterfläche}) \triangleq 3,6 \text{ m} * 5,5 \text{ m} (\text{Grundfläche des Modellraumes})$$

$$1 \text{ m}^2(\text{Fensterfläche}) \triangleq \frac{3,6 \text{ m} * 5,5 \text{ m}}{3,5} (\text{Grundfläche des Modellraumes}) = 5,66 \text{ m}^2$$

Folglich muss jede Größe (z.B. Kühlenergiemenge), welche die funktionelle Einheit in Beziehung zu dem dahinterliegenden Raum setzt, mit dem Faktor 5,66 versehen werden.

Bei der Modellierung der Nutzung von Klimaanlage wird bei dem Referenzprodukt diejenige Strommenge berücksichtigt, die im Vergleich zum Nanoprodukt zusätzlich benötigt wird, um im Raum die gleiche Temperatur zu gewährleisten. Daten zu den entsprechenden Verbräuchen wurden dem Projektbericht des Ingenieurbüros Prof. Dr. Hauser GmbH entnommen (Schlitzberger & Kempkes, 2012). Diese Studie berücksichtigt mehrere Varianten von konventionellen Verglasungen und Steuerungsszenarien für das schaltbare Fenster von EControl-Glas. Bei der konventionellen Verglasung (mit Alulalousie) werden hier Energietransmissionsraten von 60% ($g=0,6$) angenommen.

³⁰ Sowohl das EControl-Glas-Fenster als auch das Referenzprodukt mit außenliegender Verschattung wurden für diesen Raum modelliert, um die benötigten Energiemengen für Klimatisierung und Heizung zu ermitteln.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Aus der genannten Studie geht auch hervor, dass bei der elektrochromen Verglasung wegen des geringeren maximalen g -Wertes ($g=0,4$ zu $g=0,6$) während der Heizperiode ein geringfügiger höherer Heizenergiebedarf als beim Referenzprodukt erforderlich ist.

Analog zur Modellierung des Kühlenergiebedarfs wurde folglich beim Nanoprodukt die zusätzlich erforderliche Heizenergiemenge berücksichtigt, für deren Bereitstellung ein Erdgaskessel angenommen wurde.

In Hinblick auf die Modellierung der Nachgebrauchsphase wurde davon ausgegangen, dass die Fensterscheiben sowohl im Falle von Nano- wie Referenzprodukt auf einer Bauschuttdeponie entsorgt werden. Die zugehörigen CO_2 -Emissionen können aufgrund des inerten Charakters der Fensterscheiben vernachlässigt werden. In Hinblick auf die Alujalousien des Referenzprodukts wird jedoch angenommen, dass diese recycelt werden. Folglich wurden die entsprechenden Aufwendungen für den Recyclingprozess berücksichtigt und für das erzeugte Sekundäraluminium eine Gutschrift vergeben.

Alle für die Modellierung verwendeten Sachbilanzdaten sind entweder über die zugehörigen Referenzen identifizierbar oder entstammen der EcoInvent-Datenbank Ver. 2.2 (Ecoinvent, 2010).

7.4.2 Rohstoffverbrauch

EControl-Glas besteht aus industriell gefertigtem Floatglas, das im Sputterverfahren mit mehreren Schichten (Elektroden-schicht, eine Schicht aus leitfähigen Polymeren, Gegenelektroden-schicht) belegt wird. Je nach angelegter Spannung wandern Lithium-Ionen zur Elektroden-schicht (beschichtetes Glas bleibt volltransparent) oder zur Gegenelektrode aus Wolframoxid (beschichtetes Glas färbt sich blau und wird teiltransparent). Hinsichtlich der verwendeten Materialien werden neben Glas, einer Polyacrylfolie sowie Propylencarbonat auch verschiedene Metalle in geringen Konzentrationen eingesetzt. Die entsprechenden Stoffkonzentrationen bewegen sich dabei durchwegs im Bereich zwischen 5 ppm³¹ und 150 ppm bezogen auf eine funktionsfertige Scheibe (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Konzentrationsbereiche der im EControl-Glas enthaltenen Metalle

Metall	Konzentration im fertigen Produkt
Wolfram	100–150 ppm
Zinn	100–150 ppm
Kupfer	50–100 ppm
Lithium	50–100 ppm
Vanadium	5–50 ppm
Titan	5–50 ppm

³¹ 1 ppm (parts per million) = 10^{-6} = 1 Teil pro Million = 0,0001%.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Wolfram wird als eines der verwendeten Metalle von der EU als „kritisch“ hinsichtlich der Versorgungslage eingestuft (EUCOM, 2010c). Zudem werden auch die Metalle Lithium, Vanadium und Zinn von verschiedenen anderen Studien als „kritisch“ erachtet³² (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Kritikalitätsbewertung von Lithium, Vanadium, Wolfram und Zinn gemäß verschiedener relevanter Studien.³³

	EU 2010 ³⁴	Öko-Institut 2009 ³⁵	U.S. Dept. of Energy 2010 ³⁶	IZT & Adelphi 2011 ³⁷	JRC 2011 ³⁸
	x = kritisch		xxxx = kurzfristig kritisch	xxx = höchst kritisch	xxx = hohes Risiko
		xx = mittelfristig kritisch	xxx = kurzfristig annähernd kritisch	xx = hochgradig kritisch	xx = mittleres Risiko
		x = langfristig kritisch	xx = mittelfristig kritisch		x = geringes Risiko
			x = mittelfristig annähernd kritisch		
Lithium		xx	x		
Vanadium		n.b.	n.b.		xx
Wolfram	x	n.b.	n.b.	xx	
Zinn	n.b.	n.b.	n.b.	xx	xx

n.b.: In der jeweiligen Studie nicht näher betrachtet

Neben dieser ökonomischen Dimension der „Kritikalität“ sind auch mögliche negative soziale Auswirkungen relevant. Wie in Kapitel 5.4.2 dargelegt, werden hier zur Abschätzung eventueller Risiken der Anteil der Primärgewinnung der im artisanalen Bergbau³⁹ gewonnenen Erze und Metalle sowie die Einstufung als „Konfliktrohstoff“ herangezogen. Wie in Tabelle 7 dargestellt, sind hier die Metalle Kupfer, Wolfram und Zinn betroffen, wobei der Abbau von Wolfram und Zinn – aufgrund der teilweisen Gewinnung im Osten der Demokratischen Republik Kongo – auch im Verdacht steht, die dortigen bewaffneten Konflikte mitzufinanzieren.

³² Abweichende Einstufungen basieren i.d.R. auf jeweils unterschiedlichen Fragestellungen und Untersuchungsrahmen der verschiedenen Studien und dürfen nicht als wissenschaftlicher Widerspruch gewertet werden.

³³ Es werden aus Transparenzgründen für die einzelnen Studien die Ausprägungen der Kritikalität benannt, obwohl nicht alle Ausprägungen für die untersuchten Materialien erforderlich sind. Dies geschieht vor dem Hintergrund der Tatsache, dass die Skalen von Studie zu Studie unterschiedlich sind.

³⁴ European Commission (2010)

³⁵ Öko-Institut e.V. (2009)

³⁶ U.S. Department of Energy (2010)

³⁷ Erdmann et al. (2011)

³⁸ Moss et al. (2011)

³⁹ Artisanaler Bergbau ist oft auch durch soziale und Sicherheitsmängel charakterisiert, s.a. Kapitel 5.4.2.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Tabelle 7: Indikatoren zur Abschätzung der sozialen Risiken der verwendeten Metalle

	Anteil des artisanalen Kleinbergbaus	Teilweiser Abbau in der Region der Großen Seen in Afrika (insbesondere der DR Kongo)
Kupfer	0,5%	
Wolfram	6%	x
Zinn	~30%*	x

* Unter Einbezug der PT-Timah-Subunternehmen auf Banka Island, die dem Kleinbergbau zuzurechnen sind, sowie des vietnamesischen Staatsbergbaus, der artisanale Methoden anwendet (Wagner et al., 2007).

Das Referenzprodukt enthält neben dem Floatglas fast ausschließlich Aluminium (Verschattungslamellen).⁴⁰ Aluminium wird von keiner existierenden Studie als versorgungskritisch eingestuft und ist ebenso hinsichtlich der Indikatoren zur Abschätzung der sozialen Risiken bei der Primärgewinnung unauffällig.

Hinsichtlich der in den Produkten enthaltenen Mengen und bezogen auf die Gesamtprimärförderung in einem Jahr, bewegen sich alle Metalle des Produktes und des Referenzproduktes im Bereich von 0,05–100 ppt/m² (siehe Tabelle 8).⁴¹

Tabelle 8: Anteil des jährlichen Metallbedarfs von 1 m² EControl-Glas an der heutigen Weltprimärproduktion dieser Metalle.

EControl-Glas			Glas mit Aluminiumverschattung		
Metall	Weltprimärförderung (t) ⁴²	Anteil der Metalle pro FE ⁴³ an der Weltprimärförderung	Metall	Weltprimärförderung (t) ⁴⁴	Anteil der Metalle pro FE an der Weltprimärförderung
Wolfram	72.000	5–50 ppt	Aluminium	44.100.000	50-100 ppt
Zinn	252.000	5–50 ppt			
Kupfer	16.100.000	0,05–0,5 ppt			
Lithium	34.000	5–50 ppt			
Vanadium	60.000	0,5–5 ppt			
Titan	Ungenügende Datenlage	Ungenügende Datenlage			

⁴⁰ Weitere Bauteile wie Steuerungstechnik und Kabel werden in der vorliegenden Studie vernachlässigt, da solche Vorrichtungen sowohl für das Produkt (EControl-Glas) als auch das Referenzprodukt in vergleichbarem Umfang eingesetzt werden.

⁴¹ 1 ppt (parts per trillion) entspricht 1 Billionstel (10⁻¹²)

⁴² Quelle: USGS (2012)

⁴³ FE: Funktionelle Einheit = 1 m² Fensterglas

⁴⁴ Quelle: USGS (2012)

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Entsprechend der im Produkt und Referenzprodukt enthaltenen Metalle kann somit gefolgert werden, dass – im Gegensatz zu Glas mit Aluminiumverschattung – EControl Verglasung verschiedene Metalle beinhaltet, die sowohl teilweise als versorgungskritisch eingestuft werden als auch Risiken hinsichtlich der sozialen Abbaubedingungen beinhalten.

Allerdings muss bei dieser Betrachtung auch berücksichtigt werden, dass die Stoffkonzentrationen in EControl-Glas durchwegs sehr gering sind. So benötigt EControl für die derzeitige Jahresproduktion unter 10 kg Wolfram. Dies entspricht in etwa der Wolframmenge von knapp 65 Sets Metallbohrern der Größe 1–10 mm⁴⁵. Selbst für den Fall, dass die Jahresproduktion von EControl-Glas auf den überaus optimistischen Wert⁴⁶ von 500.000 m² ansteigen würde, so würde dies bei keinem der benötigten Metalle eine spürbare zusätzliche Nachfrage auf die Primärgewinnung zur Folge haben (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9: Anteil des jährlichen Gesamtmetallbedarfs von EControl-Glas an der heutigen Weltprimärproduktion bei einer angenommenen Fertigung von 500.000 m² pro Jahr

Metall	Anteil der benötigten Menge Metall für 500.000 m ² an der heutigen Weltprimärproduktion
Wolfram	0,0005 – 0,005%
Zinn	0,00005 – 0,0005%
Kupfer	0,0000005 – 0,000005%
Lithium	0,0005 – 0,005%
Vanadium	0,00005 – 0,0005%
Titan	Ungenügende Datenlage

7.4.3 Energieeffizienz

Die Analyse zur Energieeffizienz kommt vor dem Hintergrund der in Kapitel 7.4.1 getroffenen Annahmen zu dem Ergebnis, dass das EControl-Glas-Fenster im Vergleich zum Referenzprodukt zum augenblicklichen Zeitpunkt einen geringen Vorteil aufweist. Wie der folgenden Tabelle entnommen werden kann, beträgt der Kumulierte Energieaufwand (KEA) über den gesamten Lebenszyklus 3810 MJ/m² und liegt damit etwas niedriger als Ergebnis für das Referenzprodukt in Höhe von 4070 MJ/m². Angesichts des Fehlerintervalls der Eingangsgrößen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der geringere Energiebedarf des schaltbaren Glases nicht signifikant ist.

Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass sich im Falle eines möglichen Recyclings des Floatglases beim Referenzprodukt dessen Kumulierter Energieaufwand um eine Netto-Gutschrift in Höhe

⁴⁵ Annahme: Gewicht eines Bohrersets: 300g, W-Anteil: ca. 50%.

⁴⁶ Im Rahmen einer konservativen Abschätzung wurden hier 500.000 m² angenommen. Dieser Wert liegt rund dreimal so hoch wie das abgeschätzte Produktionsvolumen für 2020 (vgl. Kapitel 7.4.1) und wurde bewusst gewählt, um auch belastbare Aussagen für ein mögliches weiteres Ansteigen der Produktionsmenge generieren zu können. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass 50% des heutigen Marktvolumens des Referenzproduktes durch das Nanoprodukt substituiert werden.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

von bis zu 55 MJ/m² reduzieren und damit noch weiter an den Wert des von EControl-Glas annähern würde⁴⁷.

Allerdings zeigen die Ergebnisse für das Szenario 2020, dass sich die Situation perspektivisch zugunsten von EControl-Glas-Fenstern verschieben wird. So beträgt der KEA beim EControl-Glas-Fenster in diesem Fall nur noch 3060 MJ. Dies entspricht einer Reduktion im Vergleich zum Referenzprodukt in Höhe von 25%.

Tabelle 10: Vergleich zwischen Nano- und Referenzprodukt hinsichtlich des Schlüsselindikators „Energieeffizienz“ (Kumulierter Energieaufwand, KEA) für die beiden Szenarien 2011 und 2020

	Nanoprodukt	Referenzprodukt
KEA [MJ/m²] für das Szenario 2011	3807	4072
davon Produktion	2087	466
Transport	107	16
Gebrauchsphase	1613	3596
Nachgebrauchsphase	0	-6
KEA [MJ/m²] für das Szenario 2020	3055	4072
davon Produktion	1335	466
Transport	107	16
Gebrauchsphase	1613	3596
Nachgebrauchsphase	0	-6

Hauptursache für dieses Resultat ist der Umstand, dass die Produktion von EControl-Glas-Fenstern derzeit relativ energieaufwändig ist, da die Produktionseinrichtungen bei EControl-Glas noch nicht voll ausgelastet werden. Bei steigender Produktionsmenge wird sich dies nach Einschätzung von EControl-Glas erheblich verbessern, insbesondere da die Sockelverbräuche für Gebäude und Infrastruktur pro Quadratmeter produziertes EControl-Glas-Fenster einen geringeren Einfluss haben werden.

Allerdings wird auch perspektivisch die reine Produktion von EControl-Glas-Fenstern mit einem höheren Energieeinsatz verbunden sein als beim Referenzprodukt. Der Grund hierfür ist zum einen die Tatsache, dass pro Quadratmeter EControl-Glas-Fenster aus technischen Gründen rund doppelt so viel Floatglas benötigt wird wie beim herkömmlichen Fenster. Entscheidend ist jedoch der vergleichsweise hohe Energieaufwand zum Aufbringen der Schichten aus Wolframtrioxid und Vanadiumpentoxid. Dieser im Vergleich zum Referenzprodukt erforderliche Zusatzaufwand kann auch nicht durch die Einsparung der Aluminiumjalousie kompensiert werden. So beträgt der KEA allein für die Produktion von EControl-Glas-Fenstern im Szenario 2020 rund 1340 MJ/m³ und liegt damit deutlich über der Produktion des Referenzprodukts in Höhe

⁴⁷ Vor dem Hintergrund eines konservativen Modellierungsansatzes wird davon ausgegangen, dass aufgrund des Einsatzes von Nanomaterialien ein werkstoffliches Recycling des EControl-Glases möglicherweise nicht durchgeführt werden kann. Folglich wird im hier betrachteten Recycling-Szenario nur beim Referenzprodukt eine Gutschrift angenommen.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

von 470 MJ/m. In der Gebrauchsphase zeigen sich dann allerdings deutlich die Vorzüge des EControl-Glas-Produktes, insbesondere in Form der Einsparung von Kühlenergie in der warmen Jahreszeit. Zusammen mit dem Stromverbrauch für die Jalousiesteuerung summiert sich der KEA beim Referenzprodukt in der Gebrauchsphase auf ca. 3600 MJ/m, während das EControl-Glas-Fenster nur um die 1600 MJ/m³ verursacht. Dies ist in erster Linie auf den (geringfügigen) zusätzlichen Heizenergiebedarf während der kälteren Jahreszeit zurückzuführen (plus 3% pro Quadratmeter und Jahr gegenüber dem Referenzprodukt).

Im Vergleich zu den Beiträgen aus Produktion und Gebrauchsphase spielen die Energieverbräuche während des Transports und in der Nachgebrauchsphase nur eine untergeordnete Rolle.

7.4.4 CO₂-Fußabdruck

Grundsätzlich ein ähnliches Bild wie bei der Energieeffizienz ergibt sich auch für den Schlüsselindikator „CO₂-Fußabdruck“.

Auch hier kommt die Analyse unter Berücksichtigung der in Kapitel 7.4.1 getroffenen Annahmen zu dem Ergebnis, dass das EControl-Glas-Fenster mit dem Referenzprodukt eine leichte CO₂ Ersparnis mit sich bringt. Wie die folgende Tabelle zeigt, beträgt der CO₂-Fußabdruck (englisch: product carbon footprint, PCF) beim EControl-Glas-Fenster über den gesamten Lebenszyklus 256 kg CO₂e (CO₂-Äquivalente) und liegt damit angesichts des Fehlerintervalls der Eingangsgrößen und Annahmen nicht signifikant unter dem Ergebnis für das Referenzprodukt in Höhe von 304 kg CO₂e.

Wie auch schon bei der Energieeffizienz ergibt sich jedoch für das Szenario 2020 ein deutlich positiveres Bild zugunsten des Nanoprodukts. Demnach beträgt der PCF beim EControl-Glas-Fenster in diesem Fall nur noch 201 kg CO₂e und liegt damit mehr als ein Drittel unter dem Wert für das Referenzprodukt.

Tabelle 11: Vergleich zwischen Nano- und Referenzprodukt hinsichtlich des Schlüsselindikators „CO₂-Fußabdruck“ (Product Carbon Footprint, PCF) für die beiden Szenarien 2011 und 2020

	Nanoprodukt	Referenzprodukt
PCF [kg CO₂e/m²] für das Szenario 2011	256	304
davon Produktion	153	42
Transport	7	1
Gebrauchsphase	96	262
Nachgebrauchsphase	0	-1
PCF [kg CO₂e/m²] für das Szenario 2020	201	304
davon Produktion	99	42
Transport	7	1
Gebrauchsphase	95	262
Nachgebrauchsphase	0	-1

Die Begründung für dieses Ergebnis ist wiederum in der vergleichsweise aufwändigen und durch die Bereitstellung des benötigten Stroms auch treibhausgasrelevanten Produktion von EControl-Glas-Fenster zu suchen.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Aufgrund der bereits im vorherigen Kapitel beschriebenen Effekte wird sich bei einer zukünftig steigenden Auslastung der Produktion sowie durch die Einsparung von Kühlenergie im Sommer perspektivisch ein Vorteil für das EControl-Glas-Fenster ergeben.

Ähnlich wie bei dem Schlüsselindikator „Energieeffizienz“ haben im Vergleich zu den Beiträgen aus Produktion und Gebrauchsphase die Energieverbräuche während des Transports und in der Nachgebrauchsphase keinen großen Einfluss.

7.5 Diskussion der Ergebnisse und strategische Optimierung des Produkts

Im vorliegenden Kapitel werden die Ergebnisse aus den zuvor geschilderten qualitativen wie quantitativen Analysen diskutiert und Schlussfolgerungen in Hinblick auf die strategische Optimierung des Nanoprodukts gezogen.

Fokussiert man die Rohstofffrage zunächst auf den Einsatz von metallischen Materialien, so führt dies zu dem Ergebnis, dass EControl-Glas im Vergleich zum Referenzprodukt mehrere kritische Metalle beinhaltet. Diese werden z.T. als versorgungskritisch eingestuft und beinhalten zudem auch Risiken hinsichtlich der sozialen Abbaubedingungen. Zu nennen sind hier neben Wolfram auch Kupfer, Lithium, Titan, Vanadium und Zinn.

Wie in Kapitel 7.4.2 gezeigt werden konnte, sind die im EControl auftretenden Stoffkonzentrationen allerdings so gering, dass auch bei einer erheblichen Ausweitung der Produktion bei EControl nur sehr geringe absolute Mengen benötigt werden (z.B. rund 1100 kg Wolfram bei einer Produktionsmenge von 500.000 m²). Angesichts der derzeitigen Verbräuche für andere Einsatzbereiche (z.B. Metallbohrer) ist somit bei den untersuchten Metallen keine spürbare zusätzliche Nachfrage und daher auch keine signifikante Verschärfung der Rohstoffproblematik bei den kritischen Metallen zu befürchten.

Erweitert man den Blick auf Glas und Aluminium als weitere wesentliche Materialien bei Nano- bzw. Referenzprodukt, so muss festgehalten werden, dass die Einsparung von Aluminium beim EControl-Glas mit einem erhöhten Einsatz von Floatglas „erkauft“ werden muss. Bei den zugrundeliegenden Rohstoffen beider Materialien sind keine nennenswerten Knappheiten bekannt. Allerdings zeigt eine Analyse des Energieeinsatzes sowie der CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Floatglas und Aluminium, dass es sich bei Aluminium um einen deutlich aufwändigeren Werkstoff handelt und daher die durch EControl-Glas-Fenster ermöglichte Substitution im Rahmen einer integrierten Betrachtungsweise grundsätzlich zu begrüßen ist.

Weiterhin zeigt die Analyse des Energieeinsatzes jedoch auch, dass die Vorteile des Verzichts auf Aluminium bei den EControl-Glas-Fenstern durch den vergleichsweise hohen Energieaufwand des Sputterprozesses überkompensiert werden. Hier ist zwar davon auszugehen, dass sich der spezifische Energieeinsatz bei der Produktion durch eine Ausweitung der Produktionskapazität durch Skaleneffekte reduzieren lässt, per Saldo aber nur durch Einsparungen in der Gebrauchsphase nennenswerte Umweltentlastungen realisiert werden können. Schlüssel hierfür ist die Einsparung von Kühlenergie in der warmen Jahreszeit, da EControl-Glas-Fenster durch eine geeignete Steuerung die Sonnenstrahlung besser abschirmen kann als die Aluminiumjalousie des Referenzprodukts. Als Rebound-Effekt ist in der kalten Jahreszeit nach derzeitigem Kenntnisstand beim EControl-Glas-Fenster ein im Vergleich zum Referenzprodukt leicht erhöhter Heizenergiebedarf zu verzeichnen. Dieser gegenläufige Effekt hebt die Einsparungen bei der Kühlung jedoch nicht vollständig auf, sondern mindert diese nur geringfügig.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Bei der Interpretation der Ergebnisse für die Schlüsselindikatoren „Energieeffizienz“ und „CO₂-Fußabdruck“ ist weiterhin zu berücksichtigen, dass eine Reihe von (potenziellen) Vorzügen von EControl-Glas-Fenstern quantitativ aufgrund von Datenlücken nicht berücksichtigt werden konnten. Dazu gehören v.a. folgende Aspekte:

- Beleuchtung: Es wird davon ausgegangen, dass bei EControl-Glas-Fenstern im aktivierten Zustand weniger künstliche Beleuchtung benötigt wird, da im Vergleich zu einer Verschattung durch Jalousien mehr Tageslicht in den Raum eindringen kann. Die zugehörigen Einsparungseffekte können jedoch derzeit nicht quantifiziert werden und blieben folglich bei der Modellierung unberücksichtigt
- Leistungssteigerung und Wohlbefinden: Der Einsatz von EControl-Glas-Fenstern bewirkt, dass anteilig mehr blaue Anteile aus dem Strahlungsspektrum der Sonne den Raum erreichen. Dies führt entsprechend aktueller Studien (Brainard et al., 2001; Holzman, 2010; Redlin, 2001; Roenneberg & Merrow, 2002; Roenneberg et al., 2007; Rossbauer, 2010) zu einem gesteigertem Leistungsvermögen derjenigen Personen, die sich in diesem Raum aufhalten. Außerdem ist es denkbar, dass die geringere Verschattung und der Verzicht auf Kunstlicht zu einem besseren Wohlbefinden führen. Allerdings lassen sich diese Gesichtspunkte im Rahmen der gewählten Untersuchungsparameter nicht berücksichtigen.
- Reinigungs- und Wartungsaufwand: Da das Nanoprodukt im Vergleich zum Referenzprodukt über weniger Elemente verfügt, die verschmutzen bzw. beschädigt werden können, ist von einem geringeren spezifischen Reinigungs- und Wartungsaufwand beim EControl-Glas-Fenstern auszugehen. Auch hierzu lagen jedoch keine Daten vor, was zu einer Vernachlässigung dieses Aspekts bei der Modellierung führte.

Darüber hinaus wurden für das Referenzprodukt tendenziell konservative, d.h. optimistische Annahmen getroffen (z.B. keine Bilanzierung des Elektromotors, etc.). Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse für den Vergleich zwischen Nano- und Referenzprodukt robust sind.

Stellt man die Frage nach der Triebkraft für die nanotechnologische Innovation, so erscheinen v.a. die zuvor genannten Aspekte und insbesondere das Wohlbefinden eine besonders große Rolle zu spielen. Einer der größten Anreize für den Kauf von EControl-Glas-Fenstern dürfte das positive Lichtempfinden sowie der nach wie vor freie Blick im aktivierten Zustand sein. Im Vordergrund steht somit ein erheblicher Komfortgewinn für die Nutzer. Dieser kann sich im Falle von Bürogebäuden durchaus auch auf Arbeitsleistung und Konzentrationsfähigkeit positiv auswirken.

Ausgehend von diesen Annahmen sollte sich eine strategische Optimierung des EControl-Glas-Produkts aus ökologischer Sicht v.a. darauf fokussieren, die genannten Vorzüge beim Gebrauchsnutzen bei der Vermarktung so einzusetzen, dass die Umweltentlastungseffekte optimal genutzt werden können. Daher sollten EControl-Glas-Fenster prioritär in Gebäuden eingesetzt werden, die sich durch eine hohe Kühllast auszeichnen, bereits über eine Klimaanlage verfügen und deren Nutzer vergleichsweise hohe Komfortansprüche haben. Typische Beispiele hierfür wären Hotel- und Bürogebäude, insbesondere in südlichen Ländern. Besonders wichtig erscheint es, bei diesen Anwendungsbereichen den Zusatznutzen im Komfortbereich klar zu kommunizieren, auf die zusätzlichen ökologischen Vorzüge und finanziellen Einsparmöglich-

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

keiten während des Betriebs hinzuweisen und darüber hinaus strategische Allianzen (z.B. mit Architekten) aufzubauen.

Gleichzeitig sollte aber auch geprüft werden, ob durch entsprechende Produktmodifikationen auf den im Winter offenbar derzeit noch erforderlichen zusätzlichen Heizenergiebedarf im Vergleich zum Referenzprodukt verzichtet werden kann. Eine Verbesserung der Wintertauglichkeit der Scheibe würde dann auch den Einsatz in weniger sonnenreichen Gebieten aus ökologischer Sicht attraktiv machen.

Des Weiteren ist davon auszugehen, dass durch eine noch bessere Ausnutzung der Produktionsanlagen bei der Fa. EControl-Glas der Energieaufwand sowie die CO₂-Emissionen weiter gesenkt werden können. In diesem Zusammenhang sollten auch die vergleichsweise hohen Sockelverbräuche für Gebäude und Infrastruktur untersucht und ggf. optimiert werden.

8 Ergebnisse des Fallbeispiels „Organische Photovoltaik“

Bei organischer Photovoltaik (OPV) handelt es sich um Solarzellen, die im Wesentlichen aus Werkstoffen der organischen Chemie, d.h. insbesondere aus Kunststoffen bestehen. Dadurch unterscheiden sie sich von herkömmlichen Solarzellen, die im Wesentlichen aus anorganischem Halbleitermaterial (Silizium) aufgebaut sind. Aufgrund ihrer vergleichsweise unaufwändig zu produzierenden Basismaterialien werden organische Photovoltaik-Module als eine interessante Alternative bzw. Ergänzung zu herkömmlichen Solarzellen erachtet, insbesondere bei den Aspekten Rohstoff- und Energieeffizienz.

Im März 2012 hat daher das Öko-Institut e.V. die Firma Konarka Technologies GmbH in Nürnberg, eine 100%ige Tochter von Konarka Technologies Inc. in den USA, als einen der wichtigsten Hersteller von organischen Photovoltaikmodulen angesprochen. Die Firma Konarka Technologies GmbH sagte ihre Mitarbeit an dem vorliegenden Forschungsprojekt zu. Im Juli 2012 mussten jedoch sowohl die Firma Konarka Technologies Inc. in den USA als auch die Tochterfirma in Nürnberg Insolvenz anmelden. Im Oktober 2012 übernahm die Firma BELECTRIC die Konarka Technologies GmbH in Nürnberg. Diese firmiert nun unter dem Namen BELECTRIC OPV GmbH. Durch die Insolvenz der Firma Konarka Technologies Inc. in den USA sind viele Daten, insbesondere bezüglich des Herstellungsprozesses der OPV-Module, nicht mehr verfügbar. Seit Mitte Dezember 2012 ist dem Öko-Institut bekannt, dass Solarzellen auf Basis von organischen Photovoltaik-Modulen, also das Nanoprodukt, das im Rahmen dieses Forschungsprojekts als Fallbeispiel betrachtet werden soll, von der Fa. BELECTRIC nicht mehr hergestellt wird und es derzeit noch unklar ist, ob es in Zukunft wieder hergestellt werden soll⁴⁸. Das im Folgenden beschriebene Fallbeispiel soll daher exemplarisch für ein organisches Photovoltaikmodul betrachtet werden. Vor dem Hintergrund der geschilderten Einschränkungen können nicht alle Aspekte mit einem vergleichbaren Detaillierungsgrad wie beim Fallbeispiel „EControl-Glas“ (vgl. Kapitel 7) betrachtet werden.

8.1 Produktbeschreibung

Bei dem betrachteten Produkt „Konarka PP 540“ handelt es sich um ein flexibles, dünnschichtiges Photovoltaikmodul, dessen aktive Komponenten im Gegensatz zu herkömmlichen Solarzellen aus organischen Halbleitermaterialien bestehen. Ebenso wie die siliziumbasierten Solarzellen dient das organische Photovoltaik (OPV) -Modul zur Erzeugung regenerativer Energie aus Sonnenlicht. Das Produkt zeichnet sich durch seine besondere Fähigkeit aus, auch bei wenig Licht und einem schlechtem Einfallswinkel des Lichts (z.B. in der Tagesrandlage) noch eine relativ hohe Leistung zu erbringen (Konarka Technologies Inc., 2011).

Das Modul ist 67,6 cm breit, 112,7 cm lang (Konarka Technologies Inc., 2011) und 0,33 mm dick (Krönke, 2012). Das Modul hat eine Fläche von 0,76 m². Es besteht aus beschichtetem Polyethylenterephthalat (PET), das von einer lichtdurchlässigen Laminatverkapselung umschlos-

⁴⁸ Das erste Produkt von Belectric OPV wird sich in Details von dem hier betrachteten Modul unterscheiden, in den wesentlichen Punkten aber diesem sehr ähnlich sein.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

sen wird. Bei der Herstellung werden verschiedene Schichten (Anode, Kathode und fotoaktive Schicht) auf das PET aufgedruckt. Die Anode besteht aus transparentem Indium-Zinn-Oxid (ITO), als Kathode wird eine Silberschicht verwendet. Die fotoaktive Schicht zwischen Kathode und Anode besteht aus leitenden Polymeren und organischen Materialien (Poly-3-Hexylthiophen (P3HT), [6,6]-Phenyl-C61-Butyric-Acidmethylester (Fulleren = [60]PCBM)). Das fertig beschichtete PET wird mit elektrischen Leiterbahnen versehen. Schließlich wird das bedruckte PET mit zwei weiteren PET-Folien laminiert.

Bei der Herstellung dient ITO-beschichtetes PET als Ausgangsbasis. Auf dieses werden verschiedene Schichten im Rolle-zu-Rolle-Verfahren aufgebracht. Dieser Beschichtungsprozess findet kontinuierlich statt. Zwischen den verschiedenen Druckschritten wird das Produkt bei Temperaturen von maximal 120°C getrocknet. Anschließend wird eine Leiterbahn mit einem druckempfindlichen leitfähigen Kleber auf die Silberelektrode aufgebracht. Das Silber in der Drucktinte liegt als Silber-Flakes (Herr Henning (Heraeus) & Spieth-Achtnich, 2012) in einem Lösungsmittel (Heraeus GmbH, 2012a, 2012b, 2012c) vor. Die Größe der Silber-Partikel liegt nicht im nanoskaligen Bereich (Herr Henning (Heraeus) & Spieth-Achtnich, 2012). Die gedruckte Silberschicht auf dem Modul ist etwa 12 µm dick (Krönke, 2012). Abschließend wird der fertig bedruckte Träger mit zwei PET-Folien laminiert. Hierfür wird ein PET-Multilayer eingesetzt. Der Multilayer dient als Barriere-Schicht gegen das Eindringen von Sauerstoff und Feuchtigkeit in das Modul und soll so Alterungs- und Degradationsprozesse verhindern (Krönke, 2012). Genauere Angaben zum Herstellungsprozess des Produkts Konarka PP 540 können von der BELECTRIC OPV GmbH aus Gründen des Geheimhaltungsschutzes nicht zur Verfügung gestellt werden. Abfälle oder Reste entstehen bei der Herstellung laut Angaben des Herstellers beim ITO-beschichteten PET und beim PET-Multilayer, der zum Laminieren eingesetzt wird (Belectric OPV 2012⁴⁹). Das von BELECTRIC OPV GmbH zugekaufte ITO-beschichtete PET ist nicht gänzlich bis zum Rand beschichtet, es gibt vielmehr eine unbeschichtete Randzone auf dem PET. Diese wird beim Herstellungsprozess entfernt. Die PET-Abfälle werden derzeit dem PET-Recycling zugeführt. Auch beim Laminierungsvorgang bleiben geringe Reste des Klebers als Abfall zurück. Bei der Verarbeitung der Materialien für Kathode, Anode und fotoaktive Schicht entstehen laut Angaben des Herstellers keine Abfälle oder Rückstände (Krönke, 2012).

Tritt Licht durch die transparente Anode auf die fotoaktive Schicht, so entsteht durch die Absorption von Photonen positive und negative Ladung, die mit Hilfe des elektrischen Feldes zwischen Elektronendonator und Elektronenakzeptor getrennt werden und zur Anode bzw. zur Kathode wandern. Dadurch entsteht elektrische Spannung. Für die Stromabnahme kann das Modul entweder mit lötbaren Kabeln versehen oder es kann eine Photovoltaik-Anschlussdose mit Kabel und Standard-Solarsteckverbindern angebracht werden (Konarka Technologies Inc., 2011). Der Aufbau eines solchen Moduls wird in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

Die Leistung des Moduls liegt bei etwa 16 Wp⁵⁰ pro Quadratmeter. Ausschlaggebend beim Vergleich von Photovoltaiksystemen ist jedoch vor allem der Ertrag, welcher der gewonnenen

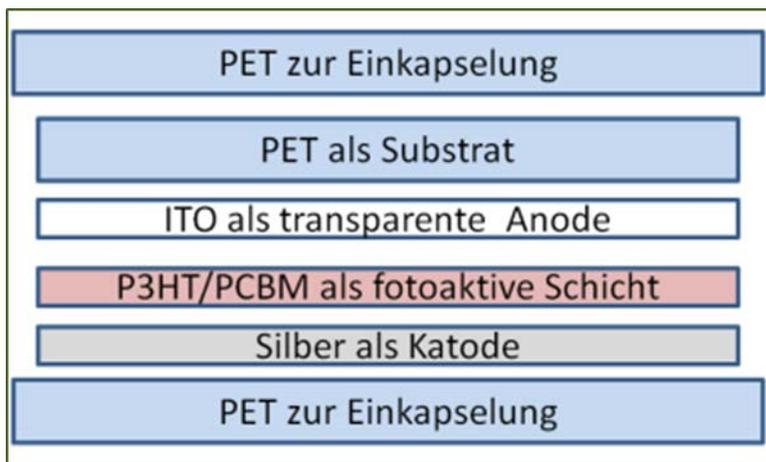
⁴⁹ Telefonische Auskunft von Herrn Krönke (Fa. BELECTRIC) an Frau Spieth-Achtnich (Öko-Institut).

⁵⁰ Die Angabe Watt Peak (Wp) bezeichnet die abgegebene elektrische Leistung unter Standard-Test-Bedingungen

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Strommenge entspricht. Der Standort und die Ausrichtung der Module haben einen wesentlichen Einfluss auf den Ertrag. Eine Messung über vier Monate am Standort Boston, USA, ergab einen durchschnittlichen täglichen Ertrag von 4,8 Wh/installiertem Watt Leistung. Der Wirkungsgrad des Konarka PP 540-Moduls beträgt 1,6% (Krönke, 2012). Das Modul kann bei Temperaturen zwischen -20°C und +65°C betrieben werden (Konarka Technologies Inc., 2011). Die Einsatzdauer eines Moduls im Freien beträgt etwa 10 Jahre. Der Preis für das Modul soll nach Angaben des Herstellers (Krönke, 2012) etwa dem Preis eines aSi⁵¹-Solarmoduls entsprechen (siehe Angaben zum Referenzprodukt in Kapitel 8.2).

Abbildung 4: Aufbau des Photovoltaik-Moduls (Öko-Institut, eigene Grafik)



In der fotoaktiven Schicht des OPV-Moduls sind Nanomaterialien enthalten. Diese besteht etwa zur Hälfte aus Fullerenen ([60]PCBM), kugelförmigen Molekülen aus Kohlenstoffatomen. Diese Fullerene dienen in der fotoaktiven Schicht als finaler Elektronenakzeptor.

Bei den Fullerenen handelt es sich um runde, etwa 0,7 nm große Moleküle mit einem Molekulargewicht von 910,9 g/Mol. Die Fullerene sind in Chlorbenzol oder alternativ in halogenfreien Lösemitteln gelöst. Das Chlorbenzol hat beim Herstellungsprozess des Photovoltaikmoduls Einfluss auf die Morphologie der fotoaktiven Schicht. Die fotoaktive Schicht im fertigen Solarmodul ist etwa 250 nm dick, sie besteht nach dem Trocknen aus ca. 50 Gewichts-% Fullerenen (Krönke, 2012). Die Herstellung von Fullerenen ist sehr energieintensiv – für 1 g werden etwa 50 kWh benötigt. Grob überschlagen benötigen Fullerene in der Produktion zwischen 2- und 100-mal so viel Energie wie Aluminium (Kushnir & Sandén, 2008). Die andere Hälfte der fotoaktiven Schicht macht das P3HT aus.

Das OPV-Modul „Konarka PP 540“ kommt beim Aufladen von Akkus für tragbare elektronische Geräte zum Einsatz. Es existieren Überlegungen, das Material auch als stromerzeugendes Fassadenelement in Gebäuden einzusetzen. Hierzu wurden bei Konarka in USA Pilotversuche vorgenommen (Konarka Technologies Inc., 2011).

⁵¹ Amorphes Silizium

Als funktionelle Einheit wird für das Fallbeispiel eine Modulgröße von einem Quadratmeter des fertigen laminierten Produkts betrachtet. Die elektrischen Anschlüsse werden nicht berücksichtigt.

8.2 Definition des Referenzprodukts

Als Referenzprodukt wurde ein Modul der Fa. Schott gewählt, welches aus Dünnschichtsolarzellen auf der Basis von amorphem Silizium (aSi) besteht. Für den Vergleich wurden Dünnschichtmodule herangezogen, da diese am ehesten mit den dünnen und flexiblen organischen Photovoltaikzellen vergleichbar sind. Konkret handelt es sich um das Schott-Modul ASI 100 eine aSi/aSi-Tandem-Solarzelle mit einer stabilen Leistung von 100 Wp unter Standard-Test-Bedingungen. Dieses entspricht einer rechnerischen Leistung von ca. 70 Wp für einen Quadratmeter. Das Modul ist 110 cm breit, 130 cm lang und 35 mm dick. Es besteht aus 72 einzelnen Solarzellen. Als Frontabdeckung dient 1,8 mm dickes wärmebehandeltes Floatglas, als hintere Abdeckung wird ein gehärtetes 3,2 mm dickes Glas verwendet. Der Rahmen ist aus Aluminium. Das Modul wiegt 20,8 kg. Die Nennleistung liegt anfänglich bei 122 Wp. Der Wirkungsgrad beträgt 6,9% (Schott Solar, 2012). Der Preis für ein Modul lag im Dezember 2012 bei verschiedenen Händlern im Internet zwischen 90 € und 215 €. Die Einsatzdauer eines Moduls im Freien beträgt etwa 30 Jahre (Krönke, 2012). Nach 26 Jahren haben die Module nach Angaben des Herstellers noch über 90% ihrer ursprünglichen Leistung (Schott Solar, 2012).

Im Gegensatz zu kristallinen Siliziumsolarzellen haben aSi-Zellen keine Gitterstruktur. Dies hat zur Folge, dass mehr Sonnenlicht absorbiert wird, die Solarzelle als Dünnschichtzelle hergestellt werden kann und weniger Material eingesetzt werden muss. Außerdem ist das Herstellungsverfahren weniger energieintensiv als bei kristallinen Solarzellen. Der Nachteil einer aSi-Zelle besteht darin, dass die bisher erreichten Wirkungsgrade deutlich kleiner sind als bei kristallinen Solarzellen.

Bei der Herstellung wird Silizium als dünne Schicht auf ein Trägermaterial aufgedampft. Hierfür gibt es verschiedene Beschichtungs- oder Abscheidemethoden. Üblicherweise wird ein Depositionsprozess im Vakuum eingesetzt. Die verwendeten Temperaturen bei der Herstellung liegen im Allgemeinen unter 250°C. Als Trägermaterial kommen Glas, Kunststoff und Metall zum Einsatz.

Als funktionelle Einheit wird für die folgenden Betrachtungen auf dieser Basis ein Quadratmeter des Schott-Modul ASI 100 festgelegt.

8.3 Ergebnisse der Anwendung des Kriterienkatalogs der TG2

Im Folgenden werden die vorhandenen Daten der überblicksartigen Darstellung der Nutzen- und Risikoaspekte des OPV-Moduls Konarka PP 540 gegenüber dem Referenzprodukt erläutert. Dazu wird zunächst auf die Nutzenaspekte und anschließend auf die Risiken eingegangen. Bei den dabei getroffenen Annahmen handelt es sich um Einschätzungen, die die Firma BELECTRIC OPV GmbH selbst vorgenommen hat.

8.3.1 Funktionalität der Nano-Komponente

Fullerene sind kugelförmige Kohlenstoffkonstrukte, die innen hohl sind. Sie werden aufgrund der durch den Kohlenstoff vermittelten geometrischen Bindungsstruktur gerne mit Fußbällen verglichen (Kroto et al., 1985; Osawa, 1970). Es sind verschiedene Kugelgrößen möglich, an

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

denen mindestens 60 und maximal 94 Kohlenstoffatome beteiligt sind. Fullenderivate sind in der organischen Photovoltaik im Einsatz. Sie dienen bei OPV-Modulen wegen ihrer niedrig liegenden angeregten Zustände (0,2–0,4 eV) als Elektronenakzeptoren. Aufgrund ihrer Charakteristika haben sie gegenüber vielen leitfähigen Polymeren eine 10fach erhöhte Ladungs-Separationsrate, wobei die Ladungsrekombination davon unbeeinflusst bleibt. Weiterhin können sie Ladung in drei Dimensionen weitergeben, während viele Polymere das nur in einer oder zwei Dimensionen können (Liu & Troisi, 2012). Dies wirkt sich positiv auf den Wirkungsgrad des OPV-Moduls aus. Der Preis dafür sind die vergleichsweise limitierte Lichtabsorptionsrate (Ross et al., 2009) und die hohen Produktionskosten für die Fullerene und ihre Derivate (Kushnir & Sandén, 2008). Eine Alternative zu dem Einsatz von Fullerenen bei OPV-Modulen besteht derzeit nicht und ist auch nicht absehbar.

8.3.2 Rohstoff- und Materialaspekte

Bezüglich der Verringerung des Rohstoffverbrauchs bewertet der Hersteller BELECTRIC OPV das Nano-Produkt deutlich besser als das Referenzprodukt. Das Nanoprodukt sei auf Grund der verwendeten Materialien wesentlich dünner und leichter als das Referenzprodukt. Aus diesem Grund besteht zunächst prinzipiell mengenmäßig ein Ressourceneinsparpotenzial.

Betrachtet man die eingesetzten Rohstoffe näher, ist festzustellen, dass die OPV-Solarzelle hauptsächlich aus PET, einem thermoplastischen Kunststoff auf Erdölbasis, hergestellt wird, während für die aSi-Solarzelle hauptsächlich Silizium zum Einsatz kommt, ein Rohstoff, der in der Natur in ausreichender Menge vorhanden ist. Außerdem enthält das Nano-Produkt Silber, welches bei der Diskussion um den Materialeinsatz berücksichtigt werden muss. Die ausführliche Bewertung dieser Aspekte und weitere Angaben zum Rohstoffverbrauch befinden sich in Kapitel 8.4.1.

8.3.3 Energieeffizienz

Bezüglich der Verringerung des Verbrauchs energetischer Ressourcen wird das Nanoprodukt in der Produktionsphase von BELECTRIC OPV effizienter als das Referenzprodukt eingeschätzt, weil für die Produktion des Nanoprodukts kein energieaufwändiger Vakuum-Depositionsprozess durchlaufen würde wie dies beim Referenzprodukt der Fall sei. Vielmehr würde das Nanoprodukt unter Umgebungsbedingungen hergestellt. Für den Trocknungsprozess der Schichten beim Rolle-zu-Rolle-Verfahren würden maximal 120°C erreicht. Die Herstellungstemperaturen für das Referenzprodukt lägen höher und erreichten maximal 250°C.

Es muss allerdings angemerkt werden, dass die Herstellung der Fullerene sehr aufwändig ist. So werden allein 6,25 kWh für die Menge an Fullerenen verbraucht, die ein Quadratmeter des OPV-Moduls enthält. Weitere Angaben und Bewertungen zur Energieeffizienz finden sich in Kapitel 8.4.2.

8.3.4 Toxikologie und Exposition

Mit den Fragen des TG2-Kriterienkatalogs soll eine erste Einschätzung gegeben werden, ob Nanopartikel (hier die Fullerene) im Lauf des gesamten Lebenszyklus in die Umwelt gelangen können. BELECTRIC OPV gibt an, dass bei der Produktion Filteranlagen für die verwendeten Lösungsmittel eingesetzt werden. Der Hersteller geht davon aus, dass die Nano-Partikel während der Produktion nicht freigesetzt werden können, da sich die Partikel in Lösung befinden. Beim fertigen Modul sind die Nanopartikel in eine Polymermatrix eingebunden und das Modul

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

ist mit PET verkapselt. Es ist insofern nicht davon auszugehen, dass in der Gebrauchsphase Nanopartikel freigesetzt werden können. Für die Entsorgung ist nach Angaben von BELECTRIC OPV bisher kein spezieller Recyclingweg für die Module etabliert. Dies bedeutet, dass ausgediente OPV-Module derzeit zusammen mit anderen Abfällen aus Haushalt und gewerblichen Quellen in die Müllverbrennung gelangen. Dort werden die Fullerene aufgrund der hohen Verbrennungstemperaturen (ca. 850 °C) zerstört, wobei jedoch andere Bestandteile des OPV-Moduls (z.B. Silber) verloren gehen.

Laut Sicherheitsdatenblatt (Solenne, 2012) sind keine umweltbezogenen Informationen für das Nanomaterial verfügbar. Der Verbraucher ist nach Einschätzung des Herstellers dem unmittelbaren Kontakt mit Nanomaterialien aus dem OPV-Modul beim normalen Gebrauch nicht ausgesetzt, da das Modul verkapselt ist. Lediglich wenn das Produkt zerstört würde (mechanisch oder durch Brand), könnte es zu einer Exposition für den Verbraucher kommen. Bei einem Brand können laut Sicherheitsdatenblatt hoch toxische Gase entstehen (Solenne, 2012).

Andere kritische Bestandteile des OPV-Moduls (z.B. ITO, Silber) wurden entsprechend des Untersuchungsrahmens des TG2-Kriterienkatalogs nicht näher beleuchtet.

8.3.5 Weitere Nachhaltigkeitsaspekte

Das Nanoprodukt besteht im Gegensatz zum Referenzprodukt aus flexiblem Material. Dadurch ergibt sich nach Einschätzung von BELECTRIC OPV für den Verbraucher die Möglichkeit, das Solarmodul auch auf unebenen Oberflächen zu montieren und so Solarstrom an Stellen zu gewinnen, an denen dies mit herkömmlichen Solarmodulen nicht möglich ist. Das Nanoprodukt könne sich auf Grund seiner Flexibilität einer Oberfläche bis zu einem gewissen Grad anpassen. Es ist darüber hinaus wesentlich leichter als das Referenzprodukt und kann somit einfacher transportiert und montiert werden. Auch ist das Nanoprodukt deutlich weniger anfällig für Bruch. Es ist in vielen Farben erhältlich und ermöglicht dadurch eine freiere Gestaltung. Diesen Aspekten steht entgegen, dass die Nutzungsdauer des Nanoprodukts gegenüber dem Referenzprodukt nur etwa ein Drittel beträgt. Außerdem ist die Leistung des OPV-Moduls mit 16 Wp pro Quadratmeter deutlich geringer als die des aSi-Moduls mit 70 Wp. Nach Angaben des Herstellers (Krönke, 2012) soll das Nanoprodukt in einem ähnlichen Preissegment liegen wie das Referenzprodukt.

8.4 Ergebnisse der untersuchten Schlüsselindikatoren

Das folgende Kapitel greift die qualitativen Aussagen aus der Anwendung des TG2-Kriterienkatalogs (Kapitel 8.3) auf und unterzieht die Ergebnisse einer vertiefenden, möglichst quantitativen Analyse. Angesichts der bereits beschriebenen Schwierigkeiten bei der Zusammenstellung von quantitativen Daten insbesondere zum Herstellungsprozess des betrachteten OPV-Moduls, mussten sich die Untersuchungen auf den Rohstoffverbrauch (vgl. Kapitel 8.4.1) sowie eine generische Betrachtung zum Thema Energieeffizienz (vgl. Kapitel 8.4.2) beschränken.

8.4.1 Rohstoffverbrauch

Die betrachteten OPV-Module (Konarka PP 540) bestehen überwiegend aus Kunststoffen (v.a. PET), in die eine fotoaktive Schicht sowie eine Lage Indiumzinnoxid (ITO) und Silber zum Abgreifen der Spannung eingebettet sind (siehe Kapitel 8.1). Hinsichtlich der verwendeten Materialien werden neben PET und Fullerenen auch verschiedene Metalle in unterschiedlichen

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Konzentrationen eingesetzt. Die entsprechenden Stoffkonzentrationen liegen im Bereich von 0,5–5% (Silber) und 0,05–0,1% (Indium) (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Konzentrationsbereiche der in Konarka PP 540 OPV enthaltenen Metalle

Metall	Konzentration im fertigen Produkt
Silber	0,5–5%
Zinn	0,1–0,5%
Kupfer	0,1–0,5%
Indium	0,05–0,1%

Eines der verwendeten Metalle (Indium) wird von der EU als „kritisch“ hinsichtlich der Versorgungslage eingestuft (EUCOM, 2010c). Zudem werden auch die Metalle Silber und Zinn von verschiedenen anderen Studien als „kritisch“ erachtet⁵² (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Kritikalitätsbewertung von Indium, Silber und Zinn gemäß verschiedener relevanter Studien.⁵³

	EU 2010 ⁵⁴	Öko-Institut 2009 ⁵⁵	U.S. Dept. of Energy 2010 ⁵⁶	IZT & Adelphi 2011 ⁵⁷	JRC 2011 ⁵⁸
	x = kritisch		xxxx = kurzfristig kritisch	xxx = höchst kritisch	xxx = hohes Risiko
		xx = mittelfristig kritisch	xxx = kurzfristig annähernd kritisch	xx = hochgradig kritisch	xx = mittleres Risiko
		x = langfristig kritisch	xx = mittelfristig kritisch		x = geringes Risiko
			x = mittelfristig annähernd kritisch		
Indium	x	xxx	xxx / x ⁵⁹	xx	xxx

⁵² Abweichende Einstufungen basieren i.d.R. auf jeweils unterschiedlichen Fragestellungen und Untersuchungsrahmen der verschiedenen Studien und dürfen nicht als wissenschaftlicher Widerspruch gewertet werden.

⁵³ Es werden aus Transparenzgründen für die einzelnen Studien die Ausprägungen der Kritikalität benannt, obwohl nicht alle Ausprägungen für die untersuchten Materialien erforderlich sind. Dies geschieht vor dem Hintergrund der Tatsache, dass die Skalen von Studie zu Studie unterschiedlich sind.

⁵⁴ European Commission (2010)

⁵⁵ Öko-Institut e.V. (2009)

⁵⁶ U.S. Department of Energy (2010)

⁵⁷ Erdmann et al. (2011)

⁵⁸ Moss et al. (2011)

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Silber		n.b.	n.b.	XX	X
Zinn	n.b.	n.b.	n.b.	XX	XX

n.b.: In der Studie nicht näher betrachtet

Neben dieser ökonomischen Dimension der „Kritikalität“ sind auch mögliche negative soziale Auswirkungen relevant. Wie in Kapitel 5.4.2 dargelegt, werden hier zur Abschätzung eventueller Risiken der Anteil der Primärgewinnung der im artisanalen Bergbau gewonnen Erze und Metalle sowie die Einstufung als „Konfliktrohstoff“ herangezogen. Tabelle 14 zeigt, dass hier die Metalle Kupfer, Silber und Zinn betroffen sind, wobei der Abbau von Zinn – aufgrund der teilweisen Gewinnung im Osten der Demokratischen Republik Kongo – auch im Verdacht steht, die dortigen bewaffneten Konflikte mitzufinanzieren.

Tabelle 14: Indikatorenwerte zur Abschätzung der sozialen Risiken der verwendeten Metalle

	Anteil des artisanalen Kleinbergbaus	Teilweiser Abbau in der Region der Großen Seen in Afrika (insbesondere der DR Kongo)
Kupfer	0,5%	
Silber	6,8%	
Zinn	~30%*	X

* Unter Einbezug der PT-Timah-Subunternehmen auf Banka Island, die dem Kleinbergbau zuzurechnen sind, sowie des vietnamesischen Staatsbergbaus, der artisanale Methoden anwendet (Wagner et al., 2007).

Entsprechende Untersuchungen zum Referenzprodukt konnten nicht vorgenommen werden, da keine vergleichbar detaillierten Materialzusammensetzungen von BELECTRIC OPV zur Verfügung gestellt werden konnten und auch aus anderen Quellen nicht in dem erforderlichen Detaillierungsgrad verfügbar waren.

Hinsichtlich der in den Produkten enthaltenen Mengen, bezogen auf die Gesamtprimärförderung in einem Jahr, bewegen sich alle Metalle des Nanoproduktes in einem breiten Spektrum mit einem sehr hohen Wert für Indium und vergleichsweise geringe Werte für Zinn und Kupfer (siehe Tabelle 15).⁶⁰

Tabelle 15: Anteil des Metallbedarfs von 1 m² Konarka PP 540 OPV an der heutigen jährlichen Weltprimärproduktion dieser Metalle

Konarka PP 540 OPV			Schott-Modul ASI 100		
Metall	Weltprimärförderung (t) ⁶¹	Anteil der Metalle pro FU an der Welt-	Metall	Weltprimärförderung (t)	Anteil der Metalle pro FU an der Weltprimär-

⁵⁹ Die Studie bewertet die Kritikalität von Rohstoffen bezogen auf den zeitlichen Horizont. In einigen Fällen – wie hier bei Indium – erwarten die Autoren sowohl kurz, als auch mittelfristig kritische Situationen in der Versorgungssituation.

⁶⁰ 1 ppt (parts per trillion) entspricht 1 Billionstel der jährlichen Primärförderung.

⁶¹ Quelle: USGS, 2012

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

		primärförderung			förderung
Silber	23.800	50–500 ppt	k.A.	k.A.	k.A.
Zinn	253.000	5–50 ppt	k.A.	k.A.	k.A.
Kupfer	16.100.000	0,05–0,5 ppt	k.A.	k.A.	k.A.
Indium	640	500–5,000 ppt	k.A.	k.A.	k.A.

Geht man von einer zukünftigen Marktdurchdringung der organischen Photovoltaik (Konarka PP 540 OPV) mit einer Jahresproduktion von 500.000 m² (Krönke, 2012) aus, so würde dies eine Rohstoffnachfrage auslösen, die bei keinem der enthaltenen Metalle den Promillebereich (als Anteil an der heutigen Primärförderung) erreichen würde (siehe Tabelle 16).⁶²

Tabelle 16: Anteil des jährlichen Gesamtmetallbedarfs von Konarka PP 540 OPV an der heutigen Weltprimärproduktion bei einer angenommenen Fertigung von 500.000m² pro Jahr

Metall	Anteil der benötigten Menge für 500.000 m ² an der heutigen Weltprimärproduktion
Silber	0,005 – 0,05%
Zinn	0,0005 – 0,005%
Kupfer	0,0000005 – 0,000005%
Indium	0,005 – 0,05%

Hier muss allerdings auch berücksichtigt werden, dass das betrachtete Produkt perspektivisch gute Recyclingeigenschaften aufweist.

Entsprechend der aktuellen Version der europäischen Richtlinie über Elektro- und Elektronik-Altgeräte⁶³ fallen Photovoltaikmodule seit dem 13. August 2012 in den Geltungsbereich dieses Regelwerks. Es sieht vor, dass die im Umlauf befindlichen Geräte / Module beim Eintritt in die End-of-life-Phase getrennt gesammelt und einer ordnungsgemäßen Behandlung zugeführt werden müssen. Dabei unterliegen sowohl Sammlung als auch Verwertung konkreten quantitativen Zielvorgaben. Es ist demnach davon auszugehen, dass sich in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union in den nächsten Monaten entsprechende Sammel- und Entsorgungssysteme etablieren werden. Da Photovoltaikmodule überwiegend in größeren Einheiten installiert sind, ist hinsichtlich der Entsorgungswege damit zu rechnen, dass diese überwiegend im Business-to-Business-Bereich abgewickelt werden (z.B. Abriss- und Entsorgungsunternehmen). Entsprechend ist hier mittelfristig mit einer hohen Rücklaufquote von deutlich über 50% zu rechnen.

Der relativ hohe Silbergehalt (im Bereich von 0,5–5%) der OPV-Module ist für die Recyclingwirtschaft wahrscheinlich attraktiv. Die in Europa etablierten Kupfer-Edelmetallhütten (z.B.

⁶² Es handelt sich bei den 500.000 m² um eine optimistische Schätzung, die ähnlich wie bei den schaltbaren Fenstergläsern, auf der geschätzten, sonnenexponierten Fassadenfläche in Deutschland beruhen. Der Wert ist eine optimistische Prognose für das Jahr 2020.

⁶³ Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (Neufassung) = WEEE-Direktive

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Umicore, Auribis, Boliden) können über 95% der Edelmetalle und 100% des Kupfers aus komplexen Schrottfractionen (z.B. aus Leiterplatten, Mobiltelefonen, Katalysatoren) zurückgewinnen. Darüber hinaus wird in diesen Recyclingprozessen noch eine Vielfalt anderer Metalle teilweise zurückgewonnen. Zwar liegen nicht für alle Metalle quantitative Rückgewinnungsraten öffentlich vor, es ist aber bekannt, dass die Firma Umicore in ihrer integrierten Kupfer-Edelmetallhütte in Hoboken (Belgien) auch Zinn und Indium zurückgewinnt (Hagelücken & Buchert, 2008). Falls Material entsprechend des Konarka PP 540 OPV-Moduls in diese Hütten eingespeist werden kann, kann mit einer teilweisen Kreislaufführung aller enthaltenen Metalle gerechnet werden. In diesem Fall würden die im Produkt enthaltenen Kunststoffe als Brennstoff sowie Reduktionsmittel verwendet werden. Allerdings wäre dann auch zu klären, wie sich die im Modul enthaltenen Nanomaterialien (d.h. die Fullerene) in diesem Verwertungsprozess verhalten.⁶⁴

Bei der Recyclingfähigkeit zeigt damit das Produkt (Konarka PP 540) weitgehend positive Eigenschaften, die sowohl durch die gesetzlichen Rahmenbedingungen, den technischen Aufbau und den intrinsischen Materialwert unterstützt werden. Aufgrund der ungeklärten Frage der Verwertung (ggf. in Kupfer-Edelmetallhütten) bleiben bei dieser Bewertung allerdings Unsicherheiten bestehen. Falls eine solche Verwertung aus technischer und wirtschaftlicher Sicht machbar ist, so wäre bei einer Marktdurchdringung der Konarka PP 540 OPV damit zu rechnen, dass ein Großteil der anfallenden Altmodule in einem sachgerechten Recycling verwertet würde, wobei die enthaltenen Metalle ganz oder teilweise im Kreislauf geführt werden könnten. Dies ist insofern relevant, da insbesondere die Kreislaufführung von Indium bislang ein weitgehend ungelöstes Problem darstellt. Denn allgemein gilt, dass zwar Kupfer-Edelmetallhütten Indium als Nebenprodukt zurückgewinnen können, dieses Verfahren aber nur dann wirtschaftlich angewendet werden kann, wenn die Konzentrationen anderer Metalle (v.a. Kupfer und Edelmetalle) ausreichend hoch sind. Da dieser Zusammenhang bei den meisten anderen Photovoltaikmodulen vermutlich nicht gegeben ist und zudem keine anderen Anlagen zur Rückgewinnung von Indium aus Post-Consumer-Material in industriellem Maßstab etabliert sind, verfügt das betrachtete Produkt hier ggf. über ein Alleinstellungsmerkmal.

8.4.2 Energieeffizienz

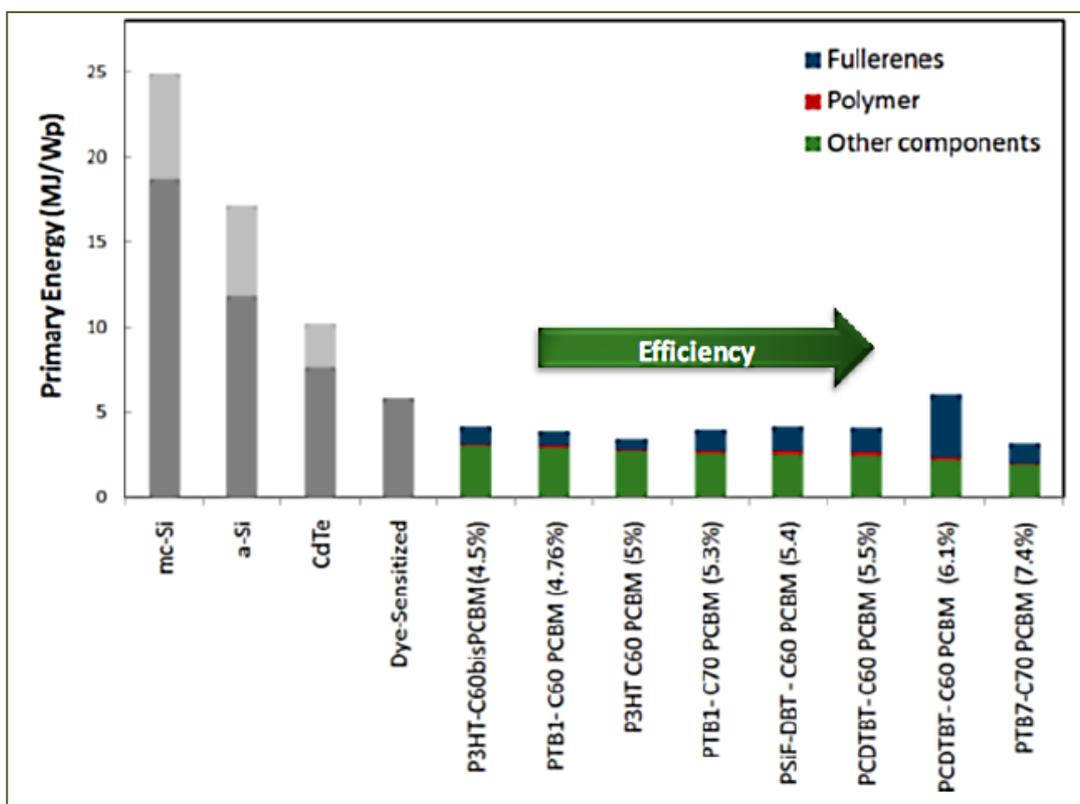
Nähere Angaben zum Produktionsprozess der Firma BELECTRIC OPV GmbH für das Nanoprodukt liegen aufgrund der in Kapitel 8 beschriebenen Randbedingungen nicht vor. Auch für das Referenzprodukt konnten solche Angaben nicht zur Verfügung gestellt werden. So müssen die folgenden Einschätzungen als erste Annäherung betrachtet werden. Mithilfe von aktuellen Publikationen lassen sich jedoch zumindest Teilbereiche einer Analyse in Hinblick auf die Energieeffizienz von Nano- und Referenzprodukt auf einer generischen Ebene abdecken.

⁶⁴ Da die verwendeten Fullerene (neben geringen Anteilen an Sauer- und Wasserstoffatomen) nahezu vollständig aus Kohlenstoffatomen bestehen, ist theoretisch davon auszugehen, dass sie in Gegenwart von Sauerstoff bei höheren Temperaturen nahezu ausschließlich in CO₂ (und H₂O) umgewandelt werden. Empirische Studien zum Verhalten in Edelmetallhütten liegen jedoch nicht vor.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Entsprechend dieser Quellen ist während der Produktion von organischen Photovoltaikmodulen im Vergleich zum Referenzprodukt weniger Energie erforderlich. Dies ist vor allem der Tatsache geschuldet, dass während des Produktionsprozesses nur sehr geringe Materialmengen zum Einsatz kommen und bei niedrigen Temperaturen prozessiert werden (García-Valverde et al., 2010). Abbildung 5 zeigt, dass der Primärenergiebedarf von OPV-Modulen um ungefähr den Faktor 3 unter dem Wert von a-Si-Modulen liegt.

Abbildung 5: Vergleich des primären Energiebedarfs bei der Produktion von Photovoltaikmodulen. Die ersten 4 Balken von links zeigen verschiedene Vertreter von anorganischen PV-Modulen. Verschiedene Produktionsformen von OPV-Modulen sind in den Balken 5 bis 12 (von links) dargestellt. Das anorganische Referenzprodukt in der vorliegenden Analyse entspricht dem 2. Balken von links (a-Si). Das Konarka-Produkt ist hier nicht explizit gelistet, entspricht aber dem Produkt P3HT C60 PCBM (siebter Balken von links.) Die Wirkungsgrade der OPV-Module sind in % hinter ihren chemischen Spezifikationen angegeben. (Grafik aus Anctil et al., 2010)



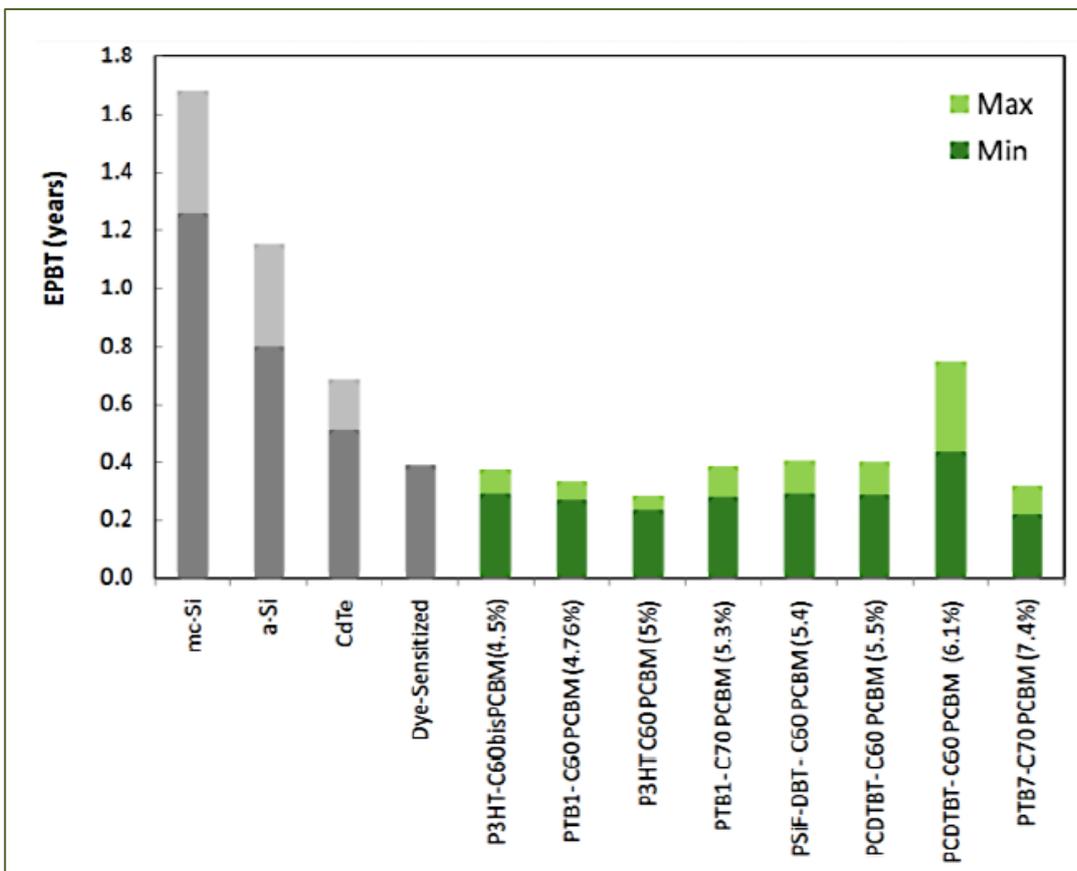
Sowohl bei den organischen Photovoltaikmodulen als auch bei den Dünnschichtmodulen muss im Tausch gegen Gewichtsminderungen und Einsparungen in der Produktionsphase auf Effizienz während des Gebrauchs verzichtet werden. Während der maximale Wirkungsgrad von monokristallinen Siliziummodulen ca. 20% erreicht, sinkt er bei amorphen Siliziummodulen auf 6–8% (6,9% für das Referenzprodukt) und auf den für Konarka spezifisch gültigen Wert von 1,6%⁶⁵ für das betrachtete OPV-Modul. Während der Gebrauchsphase amortisieren sich allerdings die OPV-Module allgemein schneller als die anorganischen Module (s. Abbildung 6). Trotz des geringeren Wirkungsgrades ist bei vielen OPV-Modulen der verminderte Einsatz von

⁶⁵ Auskunft von Konarka

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Primärenergie während der Produktionsphase ausschlaggebend und reduziert den Zeitraum bis zur energetischen Amortisation auf ca. ein Drittel der für anorganische Module notwendigen Zeit. Zum betrachteten Produkt (Konarka PP 540) liegen hier allerdings keine konkreten Daten vor. Es ist aber davon auszugehen, dass die energetische Amortisation entsprechend des Wirkungsgrades von 1,6% entsprechend länger dauert. Das in dem Graphen gelistete OPV-Modul ist mit einem Wirkungsgrad von 5% bilanziert.

Abbildung 6: Zeitraum für unterschiedliche Photovoltaikmodule bis zur energetischen Amortisation. EPBT steht für ‚energy payback time‘. Auch hier zeigt sich, dass das OPV-Modul das chemisch dem Konarka-Modul am meisten ähnelt (siebtes von links) ca. ein Drittel der Zeit eines anorganischen Modules aus amorphem Silizium benötigt. Die Wirkungsgrade der OPV-Module sind in % hinter ihren chemischen Spezifikationen angegeben. (Grafik aus Anctil et al., 2010)



Das Konarka-OPV-Modul hat gegenüber dem Referenzprodukt ferner derzeit noch eine kürzere Lebenszeit. BELECTRIC OPV gibt die Lebensdauer des Moduls mit 10 Jahren an. Schott beziffert die Lebensdauer des Referenzproduktes mit ca. 30 Jahren.

8.5 Diskussion der Ergebnisse und strategische Optimierung

Eine abschließende Schlussfolgerung kann aufgrund der bestehenden Datenlücken (v.a. wegen der fehlenden Materialzusammensetzung beim Referenzprodukt sowie nicht (mehr) verfügbarer Daten zum Produktionsprozess von Konarka) nicht vorgenommen werden. Aus diesem Grund war es auch nicht möglich, Analysen hinsichtlich des CO₂-Fußabdrucks vorzunehmen.

Dennoch können auf allgemeiner, technologischer Ebene einige wesentliche Schlussfolgerungen für OPV-Module und ihre strategische Optimierung gezogen werden.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Hierbei ist zunächst hervorzuheben, dass OPV-Module aufgrund ihrer Fähigkeit, auch bei wenig Licht und einem schlechtem Einfallswinkel des Lichts (z.B. in der Tagesrandlage), noch eine relativ hohe Leistung zu erbringen und wegen ihrer flexiblen Eigenschaften sehr gut in der Lage sind, Solarstrom an Standorten zu gewinnen, an denen dies mit herkömmlichen Solarmodulen nicht möglich wäre. Diese im Vergleich zu anderen PV-Modulen wichtigen Freiheitsgrade stellen zweifelsohne einen der bedeutendsten Treiber für die Entwicklung von OPV-Modulen dar. Angesichts zunehmend knapper werdender Flächen und der Notwendigkeit, auch in z.T. ungünstigen Situationen Solarstrom zu gewinnen, könnten so OPV-Module perspektivisch zu einem wichtigen Baustein der Energiewende werden. Da Fullerene als zentrale Elektronenakzeptoren unverzichtbar sind, wäre organische Photovoltaik ohne den Einsatz von Nanotechnik undenkbar.

Ein weiterer wichtiger Treiber für die Entwicklung von OPV-Modulen sind darüber hinaus auch die vergleichsweise einfachen und leichten Basismaterialien (wie insbesondere die PET-Folien), die einen insgesamt geringeren Energie- und Rohstoffaufwand im Vergleich zu siliziumbasierten PV-Modulen ermöglichen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass dieser Vergleich trotz der sehr energieaufwändigen Herstellung der erforderlichen Fullerene per Saldo zugunsten von OPV-Modulen ausfällt. Hinzu kommt, dass der Herstellungsprozess von OPV-Modulen in einem kontinuierlichen und effizienten Rolle-zu-Rolle-Verfahren durchgeführt werden kann, während siliziumbasierte PV-Module im Batch-Verfahren hergestellt werden müssen.

Das geringe Gewicht der OPV-Module stellt per se einen weiteren relevanten Treiber für den Einsatz von OPV-Modulen dar, insbesondere in mobilen Anwendungen. Neben Ladegeräten im Endkonsumenten-Bereich könnten hier v.a. auch der Automobil- und Luftfahrtsektor interessante Einsatzbereiche bilden.

In Hinblick auf den Einsatz von kritischen Metallen fällt bei OPV-Modulen insbesondere der hohe spezifische Verbrauch an Silber auf, der zu Kontaktierungszwecken erforderlich ist. Dies wäre dann bedenklich, wenn am Ende des Lebenszyklus Recycling und Wiedergewinnung von Silber unterbleiben würde. Angesichts des hohen Silbergehalts und des hohen intrinsischen Materialwerts (die PET-Folie dient beim Recycling als Energielieferant und als Reduktionsmittel) ist es jedoch sehr wahrscheinlich, dass es sich bei ausgedienten OPV-Modulen um attraktive Recyclingobjekte handelt. Hersteller wie BELECTRIC OPV sollten in diesem Zusammenhang proaktiv auf diese Zusammenhänge hinweisen. Darüber hinaus sollte aber auch seitens der Hersteller frühzeitig geklärt werden, wie sich die Fullerene in den Kupfer-Edelmetallhütten in Hinblick auf eine mögliche Exposition für Mensch und Umwelt verhalten.

Ein wichtiger Ansatzpunkt für die ökologische Optimierung des Produkts stellt auch die Herstellung und Einsatzmenge der benötigten Fullerene dar. Wie beschrieben sind diese in ihrer Herstellung besonders energieaufwändig. Daher sollte seitens der Hersteller von OPV-Modulen geprüft werden, ob nicht die Konzentration von Fullerenen im finalen Produkt noch weiter gesenkt bzw. eine Fullerenart verwendet werden kann, deren Herstellungsprozess mit einem geringeren Energieaufwand bei der Produktion verbunden ist. Weitere wichtige Ansatzpunkte für die Verbesserung der ökologischen Performance von OPV-Modulen wie die Steigerung des Wirkungsgrades und der Langzeitstabilität sind evident und den Herstellern bereits bewusst.

9 Schlussfolgerungen in Hinblick auf die übergeordneten Forschungsfragen

Ein zentrales Ziel der vorliegenden Studie besteht darin zu klären, ob der Einsatz von Nanotechnik durch Substitution oder Funktionalisierung etablierter Werkstoffe zu einer Verbesserung der Rohstoff- und Energieeffizienz beitragen kann. In diesem Zusammenhang ist darüber hinaus auch zu klären, ob bei einer Durchsetzung der nanotechnischen Innovation am Markt es zu Rebound-Effekten kommen kann, sei es durch Engpässe bei der für die nanotechnischen Anwendungen benötigten Rohstoffe oder infolge ggf. auftretender Belastungen für Mensch und Umwelt entlang des Lebensweges der betrachteten Anwendung.

Im Rahmen dieser Studie wurden daher zehn ausgewählte Innovationen besonders aussichtsreicher Anwendungsfelder auf diese Fragen hin untersucht. Obwohl die betrachteten Innovationen aus sehr unterschiedlichen Bereichen stammen (z.B. erneuerbare Energietechnik, Chemische Verfahrenstechnik oder Bau- und Werkstoffe, vgl. Kapitel 4.1), lassen sich dennoch grundlegende Gemeinsamkeiten hinsichtlich der jeweils dominierenden Triebkräfte herausarbeiten (siehe Kapitel 9.1). Auf Basis der identifizierten Triebkräfte sowie der qualitativen und quantitativen Aussagen zu den Rohstoffverbräuchen, Energieaufwendungen sowie darüber hinaus betrachteten Nachhaltigkeitsaspekten aus den Kapiteln 6 bis 8 kann schließlich auch eine Einschätzung zu möglichen Umwelt- und Gesundheitsrisiken bzw. Rebound-Effekten vorgenommen werden, die mit den betrachteten Neuentwicklungen einhergehen (vgl. Kapitel 9.2).

9.1 Triebkräfte für nanotechnische Innovationen

Innovationen werden oftmals getrieben durch das Bestreben von Unternehmen, Kosten einzusparen oder neue Anwendungsfelder zu erschließen. In Zusammenhang mit der Erschließung neuer Anwendungsfelder spielt u.a. auch die Intention der jeweiligen Entwicklungsabteilungen eine große Rolle, für technische Neuentwicklungen geeignete Anwendungsfelder zu identifizieren und für die neuen Lösungen zugänglich zu machen („technology-push“). Neue Funktionalitäten für ein existierendes Produkt sind in diesem Zusammenhang ebenso wichtige Triebkräfte wie konkrete Detailverbesserungen wie Gewichtsreduktion oder die Verbesserung von Sicherheitsaspekten.

Vor dem Hintergrund zunehmend knapper werdender metallischer und energetischer Rohstoffe (vgl. Kapitel 5.4) kommen zu den genannten klassischen Triebkräften zunehmend auch Überlegungen zu Materialeinsparungen oder -substitutionen sowie weitere aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten motivierte Triebkräfte hinzu.

Bei der Auswahl der besonders aussichtsreichen Anwendungsfelder der Nanotechnik wurden bereits zu Beginn der vorliegenden Studie erste Hypothesen zu den Triebkräften aufgestellt. Die Sammlung und Auswertung von Daten zu den betrachteten Anwendungsfeldern im Verlauf des Projektes diente letztlich u.a. auch dazu, diese Hypothesen entweder zu verifizieren oder zu falsifizieren. In der folgenden Tabelle werden die Ergebnisse zu den wesentlichen Triebkräften aufgeschlüsselt nach den betrachteten Anwendungsfeldern zusammenfassend dargestellt.

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Tabelle 17: Übersicht über die Triebkräfte der betrachteten besonders aussichtsreichen Anwendungsfelder sowie die relevanten Aspekte in Hinblick auf Ressourcen- und Energieverbrauch

Nr.	Anwendungsfeld	Rohstoff- und Materialaspekte	Energieaspekte	Triebkräfte
1	Neodym-Magneten	10 –30% Einsparung Seltener Erden	Geringerer Primärenergieaufwand aufgrund der Materialeinsparungen; höhere Effizienz von kleineren Magneten	Materialeinsparung; neue Anwendungsbereiche
2	Separatormembranen für Li-Ionen Batterien	länger haltbare Li-Ionen-Batterien	Energieeinsparung durch geringeren Primärenergieeinsatz für Ersatzbatterien; erhöhte Kapazität pro Batterie möglich	Sicherheitsaspekte; neue Anwendungsbereiche
3	thermoplastische Verbundwerkstoffe	Materialeinsparung (Aluminium); Treibstoffeinsparung durch Gewichtsreduktion	Aluminium erfordert viel Primärenergie in der Fertigung; CNT: Energiebedarf in der Produktion ist hoch	Gewichtsreduktion; Treibstoffeinsparung
4	OLEDs	Derzeit noch Verwendung kritischer Metalle, die aktuelle Forschung zielt jedoch auf deren Substitution	eventuell geringerer Primärenergiebedarf; mehr Energieverbrauch während der Nutzenphase	neue Anwendungsbereiche; mittelfristig Materialeinsparung
5	Aerogele	keine kritischen Rohstoffe	bessere Dämmleistung und dadurch verminderter Heizenergiebedarf	Energieeinsparung; neue Anwendungsbereiche
6	Lösungsmittelstabile Polymermembranen	Materialeinsparung durch effiziente Rückgewinnung funktionaler Katalysatormoleküle; bessere/schonendere Aufreinigung von Produkten	Primärenergieersparnis durch verminderten Bedarf an Metallen aus der Platingruppe	Materialeinsparung
7	NSTF-Membran-Elektroden für Wasserstoffbrennstoffzellen	90% verminderter Platinbedarf; erhöhte Haltbarkeit und Temperaturtoleranz	geringerer Primärenergieaufwand aufgrund der Materialeinsparung	Materialeinsparung Sicherheitsaspekte
8	bionanotechnische Beschichtungen für Katalysatoren	um 50% verminderter Platinbedarf	geringerer Primärenergieaufwand aufgrund der Materialeinsparung	Materialeinsparung
9	elektrisch dimmbare Fenster	höherer Einsatz an Floatglas, jedoch Verzicht auf Aluminium; Bedarf an kritischen Metallen sehr gering	Energieersparnis während der Nutzenphase durch verminderten Bedarf an Klimaanlage	Verbesserung des Gebrauchsnutzens; mittelfristig Energieeinsparung
10	Organische Photovoltaik	Einsatz von Silber erforderlich, welches jedoch beim Recycling rückholbar ist	höhere Energieeffizienz bei der Herstellung; indirektes Licht kann zur Stromgewinnung genutzt werden	neue Anwendungsbereiche; Energieeinsparung Kostenreduktion

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Wie die Tabelle zeigt, spielen bei den meisten Anwendungsbereichen mehrere Triebkräfte eine Rolle. Im Folgenden soll jedoch die für die einzelnen Anwendungsbereiche jeweils als wesentlich identifizierte Triebkraft beschrieben werden.

Übergreifend kann zunächst festgestellt werden, dass in vier von den acht qualitativ betrachteten Anwendungsfeldern **Materialeinsparungen** die Haupttriebkraft darstellen. Neodym-Magneten, lösungsmittelstabile Polymermembranen, NSTF-Membran-Elektroden für Wasserstoffbrennstoffzellen und die bionanotechnischen Beschichtungen für Katalysatoren sind gute Beispiele für diese Triebkraft. In all diesen Fällen können durch die spezifischen Vorzüge der nanotechnischen Neuentwicklung kritische Metalle eingespart werden.

Drei der betrachteten Innovationen zielen hingegen im Wesentlichen auf die **Erschließung neuer Anwendungsbereiche**. Beispielsweise erlauben die neuen Separatormembranen für Lithium-Ionen-Akkus die Konstruktion von leistungsstärkeren bzw. kleineren Produkteinheiten. Dies eröffnet ihnen aufgrund der Gewichts- und Volumeneinsparungen letztlich neue Anwendungsbereiche. Ähnlich verhält es sich bei den OLEDs. Diese zielen zwar derzeit primär auf das Marktsegment, welches derzeit von LED-Lampen eingenommen wird. Perspektivisch können aber weitere Marktsegmente erschlossen werden, da die neuen Bauformen und die Biegsamkeit der OLED-Paneele sie sehr flexibel und raumsparend einsetzbar macht. Sie sind zudem flach und benötigen im Gegensatz zu LED-Lampen keine Kühlung. OPV-Module wie sie z.B. in dem quantitativen Fallbeispiel von Konarka beschrieben werden, erschließen ebenfalls neue Anwendungsbereiche gegenüber ihrem Referenzprodukt. Ursachen hierfür sind ihre Fähigkeit, indirektes bzw. schräg einfallendes Licht effizient zu nutzen und ihre ebenfalls sehr flache und ressourcensparende Bauform. So können Flächen für die Nutzung von Solarzellen erschlossen werden, die bislang hierfür als nicht geeignet eingestuft waren.

Bei den thermoplastischen CNT-Verbundwerkstoffen für die Autoindustrie steht vor allem eine weitere mögliche **Gewichtsreduktion** gegenüber Komponenten aus Aluminium im Vordergrund. Gewichtsreduktion stellt in der Branche angesichts zunehmend komplexer und damit tendenziell auch immer schwerer werdender Fahrzeuge ein wichtiges primäres Entwicklungsziel dar, bewirkt aber mittelbar auch die Einsparung von Kraftstoffen während der Gebrauchsphase der Fahrzeuge.

Die Triebkraft hinter den Aerogelen im Bausektor ist die mit dieser Innovation verbundene Erwartung in Hinblick auf **Energieeinsparung**. Aerogele haben eine rund halb so hohe Wärmeleitfähigkeit wie klassische Dämmmaterialien und können, insbesondere bei großflächigem Einsatz, signifikant zur Senkung des Energieeinsatzes im Gebäudesektor beitragen.

Elektrisch dimmbare Fensterverglasungen schließlich stellen zum jetzigen Zeitpunkt eine deutliche **Verbesserung des Gebrauchsnutzens** gegenüber herkömmlichen Verglasungen mit außenliegender Verschattung dar. Sie gewähren selbst bei direkter Sonnenbestrahlung freie Sicht und modulieren das Lichtspektrum im Raum, da sie v.a. für die Transmission blauen Lichts sorgen und andererseits die rötlichen Anteile sowie das infrarote Licht reflektieren. Nachweislich erhöhen blaue Lichtkomponenten während des Tages die Konzentrationsfähigkeit von Menschen, welches einen zusätzlichen Gebrauchsnutzen im Vergleich zu herkömmlichen Verschattungslösungen am Markt darstellt.

Neben den beschriebenen fünf Haupttriebkräften (Materialeinsparung, Erschließung neuer Anwendungsbereiche, Gewichtsreduktion, Energieeinsparung, Verbesserung des Gebrauchsnutzens) existieren oftmals noch weitere Triebkräfte. Sie sind meist Nebeneffekte der Haupt-

triebkräfte. Ein Beispiel hierfür ist die erhöhte Sicherheit in der Gebrauchsphase bei Lithium-Ionen-Akkus mit keramischen Separatoren. Diese sind gegenüber dem Referenzprodukt stabiler und erlauben kleinere Batterieformate bei ähnlicher Leistung. Gleichzeitig müssen weniger Brandschutzmaßnahmen getroffen werden. Zu den neuartigen Einsatzgebieten als Haupttriebkraft kommt als weiteres innovationstreibendes Element daher die erwartete erhöhte Sicherheit hinzu.

Ähnliches gilt auch für die NSTF-Membranen, die nicht nur Materialien einsparen können, sondern darüber hinaus im Vergleich zu ihrem Referenzprodukt auch als stabiler gelten. OLEDs als ein weiteres Beispiel erschließen nicht nur neuartige Anwendungsbereiche, sondern können kurz- bis mittelfristig auch auf kritische Metalle verzichten. Hinter diesem Entwicklungsziel steht wiederum die Triebkraft der Materialeinsparung. Die primäre Triebkraft hinter den elektrisch dimmbaren Fenstern ist derzeit der erhöhte Gebrauchsnutzen. Auch wenn gegenwärtig aufgrund der noch nicht optimalen Auslastung der Anlagen noch keine signifikante Energieersparnis gegenüber dem Referenzprodukt realisiert werden, besteht doch perspektivisch bei diesem Punkt ein bedeutendes Potenzial, welches zu einer weiteren innovationstreibenden Kraft werden konnte.

Durch die Analyse der betrachteten zehn Anwendungsfelder zeigt sich jedoch auch, dass nanotechnische Innovationen keinen grundsätzlich neuen Triebkräften folgen. Nanotechniken zeichnen sich vor allem durch ihren interdisziplinären Charakter aus: Physik, Chemie, Biologie und deren Schnittstellen spielen bei zahlreichen nanotechnischen Anwendungen eine wichtige Rolle. Ähnlich wie bei modernen Smartphones steigern Nanoprodukte ihren Gebrauchsnutzen durch die Integration vielfältiger, vormals über mehrere einzelne Produkte verteilte Nutzenaspekte aus diesen naturwissenschaftlichen Disziplinen. Aufgrund der vielfältigen nun nutzbar gewordenen Schnittstellen lassen sich Erkenntnisse aus der Nanotechnik sehr konkret auf komplexe Probleme in den unter Kapitel 1 beschriebenen Herausforderungen wie Klimaveränderungen, Ernährung, Kommunikation und Sicherheit anwenden. Folglich können ehemals klar voneinander differenzierte Eigenschaften in einem Produkt zusammengefasst werden. Schaltbare Fenster, biegsame Lichtquellen und rohstoffschonende Katalysatoren sind wichtige Beispiele dafür. Die Nanotechnik folgt damit dem Trend, die Natur als Vorbild für Problemlösungen zu verwenden. Die Nutzung von CNTs, um leichtere und festere Baustoffe zu produzieren, ist dafür ebenso ein Beispiel wie die Nutzung von aufgeschäumten oder wabenartig strukturierten Metallen aus der Bionik.

9.2 Rebound-Effekte durch nanotechnische Innovationen

Die Rebound-Effekte einer Innovation lassen sich – wie auch ihre Vorteile und Potenziale zum Zeitpunkt der Markteinführung – oftmals nur schwer abschätzen. Dies hat mehrere Ursachen: So ist beispielsweise das Verhalten der Konsument/innen maßgeblich an dem Eintreten von direkten und indirekten Rebound-Effekten beteiligt. Außerdem ist zu einem frühen Zeitpunkt der Innovation in vielen Fällen noch nicht absehbar, in welchen Marktsegmenten und in welchem Umfang das neue Produkt Erfolg haben wird. Ferner spielen Rohstoff- und Energiepreisentwicklungen sowie ökonomische Faktoren wie Veränderungen der Einkommenssituationen, Marktsättigungen usw. eine Rolle (vgl. Kapitel 4.6 sowie Maxwell et al. (2011)).

Dennoch lassen sich mittels Abschätzungen und Szenarien Hypothesen für die möglichen Rebound-Effekte ableiten. Dabei sollte im Rahmen einer integrierten Bewertung für den Fall, dass die Innovation neue Anwendungsfelder eröffnet, insbesondere auch die Auswirkungen auf

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

den Einsatz kritischer Rohstoffe betrachtet werden. Dies ist erforderlich, da eine Anwendung bei erfolgreicher Marktdurchdringung eine zusätzliche Nachfrage für bereits heute absehbar kritischer Rohstoffe induzieren kann. Darüber hinaus besteht auch die Gefahr der Dissipation. Ein gutes Beispiel dafür ist das Anwendungsfeld der Neodym-Magneten. Diese Innovation zieht eine Verringerung des Bedarfs an kritischen Metallen in Höhe von 10–30% pro Magnet nach sich. In Anbetracht der Rohstoffknappheit ist das zunächst positiv zu bewerten. Gleichzeitig erlaubt der Bau kleinerer Magneten mit der gleichen Leistung wie vormals bei größeren Magneten die Konstruktion und Anwendung von kleineren Elektromotoren. Wenn sich dadurch der Markt vergrößert, weil kleine Elektromotoren attraktiv für z.B. mehr Spielzeuge werden, dann kann das per Saldo zu einer Verschärfung der Rohstoffknappheit führen. Zudem werden die Funktionsmaterialien in den diversen Gütergruppen weiträumiger und kleinteiliger im Markt verteilt. Das kann eine effiziente Erfassung und Rückholung trotz vorhandener Rezyklierungstechniken unmöglich oder zumindest vorübergehend unrentabel machen. Es besteht die Gefahr, dass die Materialdissipation damit langfristig verstärkt wird. Im Rahmen einer integrierten Bewertung ist es jedoch auch wichtig, den jeweilig konkreten Anwendungsfall zu betrachten. Ein Produkt, dessen Herstellung vergleichsweise material- bzw. energieaufwändig ist, kann in der einen Anwendung diese Aufwendungen in der Gebrauchsphase kompensieren, während dies bei einer anderen Anwendung nicht der Fall sein muss. Rebound-Effekte können daher anwendungsspezifisch sein.

Die in Tabelle 18 gelisteten Rebound-Effekte haben nicht immer das Potenzial so schwerwiegender Effekte, wie dies an dem Beispiel der Neodym-Magneten aufgezeigt wurde. Für sechs der zehn Anwendungsfelder sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt sogar keine relevanten Rebound-Effekte erkennbar. Allerdings lassen sich einige Fallbeispiele mit den verfügbaren Informationen nur schwer abschätzen. Beispielsweise lässt sich der erhöhte Energiebedarf für den Mahlprozess während der Produktion der nanotechnisch optimierten Neodym-Magneten nicht quantifizieren. Es ist aber nicht zu erwarten, dass die im Mahlprozess anfallenden Energieaufwendungen gegenüber den mittelbaren Energieeinsparungen aufgrund der spezifisch geringeren Rohstoffinanspruchnahme überwiegen. Ähnliches gilt auch für Kohlenstoffnanoröhren in thermoplastischen Verbundstoffen oder die Fullerene in organischen Photovoltaik-Modulen, die in der Produktion jeweils vergleichsweise energieaufwändig sind. Wie viel Energie hier letztlich aufgewendet werden muss, hängt vom Herstellungsprozess, dem Produktionsvolumen und der Konzentration der Nanomaterialien im Endprodukt ab. Auch hier ist es aber wahrscheinlich, dass gegenüber dem Referenzprodukt per Saldo eine Energieersparnis vorliegt.

Am Fallbeispiel der organischen Photovoltaik-Module wird ersichtlich, dass der Einsatz der Nanomaterialien selbst nicht zu einem Rebound-Effekt führt. Weitaus bedeutsamer sind die vergleichsweise großen Mengen an Silber, die bei diesem Produkt benötigt werden. Sie schaffen zwar am Ende der Produktlebensdauer monetäre Anreize für eine Rezyklierung des Produkts, führen aber in einem Szenario mit hoher Marktdurchdringung zu einer relativ großen Menge an Silber, die in den organischen Photovoltaik-Modulen gebunden wären.

Für die elektrisch dimmbaren Fenster sind als Rebound-Effekte der erhöhte Heizwärmebedarf im Winter und die Nutzung von Wolfram als kritisches Metall zu nennen. Hier jedoch wird der erhöhte Bedarf an Heizwärme im Winter durch den verminderten Bedarf an Klimatisierung im Sommer mehr als kompensiert. Die Verwendung von Wolfram ist für sich genommen zunächst kritisch zu bewerten, verliert aber im Kontext der Einsatzmengen von Wolfram in anderen

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Anwendungsbereichen (z.B. bei Hartmetallwerkzeugen wie Bohrern oder Baggerschaufeln) erheblich an Bedeutung: Der für elektrisch dimmbare Fenster verwendete Anteil wird auch bei einer hohen Marktdurchdringung im Vergleich zu den genannten Einsatzbereichen voraussichtlich verschwindend gering sein und dadurch nur zu einem marginalen Rebound-Effekt führen.

Weiterhin sind in Tabelle 18 für die zehn untersuchten Anwendungsfelder die jeweils relevanten Gesichtspunkte in Hinblick auf Exposition und Toxikologie aufgelistet. In acht der zehn Anwendungsfelder bestehen hier im Vergleich zu den Referenzprodukten entweder keine (zusätzlichen) toxikologischen Bedenken (für den Fall, dass gültige Arbeitsschutzmaßnahmen eingehalten werden) oder die Sicherheit wird gegenüber dem Referenzprodukt verbessert. Lediglich bei den thermoplastischen Verbundwerkstoffen und bei den OPVs müssen gerade End-of-Life Aspekte mit besonderer Sorgfalt betrachtet werden (siehe entsprechende Einträge in Tabelle 18).

Tabelle 18: Übersicht über die möglichen Rebound-Effekte sowie Überlegungen in Hinblick auf Exposition und Toxikologie.

Nr.	Anwendungsfeld	Rebound-Effekte	Exposition und Toxikologie
1	Neodym-Magneten	erhöhter Energiebedarf während der Produktion durch den Mahlprozess; neue Anwendungsfelder führen in der Summe eventuell zu einem höheren Bedarf an kritischen Rohstoffen	keine zusätzlichen Effekte gegenüber dem Referenzprodukt
2	Separatormembranen für Lithium-Ionen-Akkus	keine erkennbar	
3	thermoplastische Verbundwerkstoffe	End-of-Life-Verhalten für CNTs ist oft unklar; CNTs erfordern viel Energie in der Produktion	Exposition von Arbeitern, Nutzern und der Umwelt muss entlang des gesamten Lebenszyklus verhindert werden
4	OLEDs	keine erkennbar	Verzicht auf arsenhaltige Verbindungen
5	Aerogele	keine erkennbar	keine zusätzlichen Effekte gegenüber dem Referenzprodukt
6	lösungsmittelsstabile Polymermembranen	keine erkennbar	keine erkennbar
7	NSTF-Membran-Elektroden für Wasserstoffbrennstoffzellen	eventuell erhöhte Nachfrage aufgrund von Preissenkungen	Verzicht auf PTFE eliminiert Risiken während der Produktions- und Entsorgungsphase
8	bionanotechnische Beschichtungen für Katalysatoren	eventuell erhöhte Nachfrage aufgrund von Preissenkungen	keine erkennbar, wenn die Aufbringung der biopolymergebundenen Nanomaterialien in einem nach außen abgeschlossenen System oder unter Einhaltung von Atemschutzmaßnahmen durchgeführt wird.
9	Elektrisch dimmbare Fenster	leicht erhöhter Heizbedarf im Winter; Einsatz kritischer Metalle (z.B. Wolfram), der jedoch auch bei hoher Marktdurchdringung zu keiner signifikanten Verschärfung der Nachfrage führt	keine zusätzlichen Effekte gegenüber dem Referenzprodukt

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

10	Organische Photovoltaik	bei flächendeckender Einführung würde viel Silber in den OPV-Paneele gebunden werden, welches erst 10–20 Jahre später wieder rezykliert werden kann	Gefahr von toxischen Verbrennungsprodukten im Brandfall
----	-------------------------	---	---

Aus den betrachteten Beispielsanwendungen kann übergreifend auch festgehalten werden, dass Entwickler und Hersteller von Nanoprodukten ein verstärktes Augenmerk auf das Verhalten und den Verbleib am Ende des Lebensweges ihrer Produkte legen sollten. Die organischen Photovoltaik-Module, aber auch die CNT-Verbundwerkstoffe machen deutlich, dass bei der Verwendung von Nanomaterialien mit einem relevanten Gefährdungspotenzial für Mensch und Umwelt seitens der Hersteller frühzeitig Analysen durchgeführt und ggf. geeignete Risikomanagementmaßnahmen ergriffen werden sollten. Das Beispiel der OLEDs und der elektrisch dimmbaren Fenster hat ferner gezeigt, dass nanotechnische Innovationen existieren, die gegenwärtig nicht voll ihr Energie- und Materialeinsparpotenzial entlang des Lebensweges ausschöpfen. Daher sind sie gegenwärtig bezüglich ihres Rohstoffverbrauchs und der Energieeffizienz mit den jeweiligen Referenzprodukten nicht vergleichbar. Im Falle der elektrisch dimmbaren Fenster gelingt dies auch nur, weil der zusätzliche Aufwand zu ihrer Herstellung durch Einsparungen während der Gebrauchsphase kompensiert wird. Dies führt zu der These, dass mit großer Wahrscheinlichkeit nanotechnische Innovationen existieren, bei denen diese Kompensation während der Gebrauchsphase nicht vorliegt. Diese schneiden dann in ihrer Gesamtbewertung folglich schlechter als das jeweilige Referenzprodukt ab. Daraus leitet sich die These ab, dass der Einsatz von Nanomaterialien nicht von Vorneherein zu Einsparungen bei dem Rohstoffverbrauch führen muss.

Liegen darüber hinaus erhebliche Rebound-Effekte vor, so kann das dazu führen, dass eine Innovation insgesamt negativ zu bewerten ist, selbst wenn in der Betrachtung von Einzelaspekten klare Vorteile gegenüber dem Referenzprodukt vorliegen. Es ist daher die Aufgabe des Staates, unter Anwendung des Vorsorgeprinzips gegebenenfalls spezifische Verwendungseinschränkungen für besonders kritische Anwendungsbereiche herbeizuführen. Dazu könnten beispielsweise Anwendungen gehören, die nur über einen begrenzten individuellen bzw. gesellschaftlichen Nutzen verfügen, andererseits jedoch in erheblichem Umfang zu einer Dissipation von Materialien aus kritischen Rohstoffen beitragen. Ein Beispiel hierfür sind Neodym-Magneten im Hausgebrauch (z.B. für Spielzeuge, als Notizzettelbefestigungen, etc.). Die Nutzung der begrenzten Rohstoffe in diesen Sektoren ist unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten bedenklich. Die knapper werdenden Rohstoffe werden derzeit aufgrund der relativ geringen spezifischen Massen und der großen Verteilung in diesen Anwendungen nicht zurückgewonnen.

Im Vergleich dazu ist der gesellschaftliche Nutzen von Neodym-Magneten in den Anwendungsbereichen z.B. erneuerbare Energien und alternative Antriebstechniken deutlich größer. In diesen Anwendungen ist auch die Rezyklierung der verwendeten Materialien besser organisierbar.

Anhand des vorliegenden Beispiels lassen sich grundsätzlich unterschiedliche Handlungsmöglichkeiten seitens des Staates diskutieren, um die Verwendung von knappen Rohstoffen in Anwendungsbereiche mit möglichst großem gesellschaftlichem Nutzen zu lenken.

Eine Möglichkeit würde zunächst darin bestehen, nicht einzugreifen und auf die Selbstregulation auf dem Markt zu vertrauen. Aufgrund der in Kapitel 6.1.4 beschriebenen Marktlage und

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

der erwarteten Rohstoffengpässe würde ein Nicht-Eingriff des Staates möglicherweise zu einer Selbstregulation am Markt durch Preissteigerungen führen. Die zunehmende Rohstoffverknappung würde individuelle Anwendungen wie z.B. in Spielzeug durch steigende Preise unattraktiv machen. Dadurch würde die Verwendung solcher Rohstoffe in kleinteiligen Anwendungen eventuell begrenzt werden. Allerdings würde durch eine solche Maßnahme auch der Preis für Elektromotoren und Anlagen zur Gewinnung von erneuerbarer Energie steigen.

Eine zweite Handlungsoption könnte darin bestehen, mittels einer selektiven Besteuerung auf das Wirtschaftsgeschehen einzugreifen. In diesem Kontext könnten Anwendungen, bei denen eine starke Dissipation knapper Rohstoffe stattfindet oder befürchtet werden muss, mit einer Produktsteuer oder einem Pfand versehen werden. Diese Instrumente würden die Verwendung bedenklicher Anwendungsbereiche weniger attraktiv machen bzw. im Falle eines Pfandsystems die Rückgabe von Altprodukten fördern und so die Dissipation knapper Rohstoffe reduzieren. Eine dritte Eingriffsmöglichkeit des Staates wäre eine Intensivierung von Verbraucherinformationen zum Thema Einsatz knapper Rohstoffe. Im Rahmen einer allgemeinen Debatte in Deutschland und den industrialisierten Ländern zum Thema Suffizienz (Stengel, 2011) könnten demzufolge auch die prioritären Verwendungszwecke von knappen Rohstoffen stärker thematisiert werden.

10 Gesamtfazit

Mittlerweile existieren in mehreren Technologiebereichen nanotechnische Produkte bzw. Forschungs- und Entwicklungsansätze, die neben einem Beitrag zu mehr Klimaschutz auch zu mehr Energieeffizienz und zu einer Steigerung der Rohstoffeffizienz beitragen können. Damit werden verschiedenen Aspekte der Ressourceneffizienz verfolgt.

Vor diesem Hintergrund besteht das übergeordnete Ziel der Studie darin, für besonders aussichtsreiche nanotechnische Anwendungen und Produkte die in der Zukunft zu erwartenden Rohstoff- und Energieaufwendungen qualitativ und so weit wie möglich quantitativ zu beschreiben, um auf diese Weise die Effizienz und ggf. vorhandene Rebound-Effekte der Rohstoffnutzung zu analysieren. Dazu sollen auch die jeweils zu Grunde liegenden nanoaktiven Komponenten charakterisiert und die spezifischen Triebkräfte für eine nanotechnische Funktionalisierung oder Substitution etablierter Materialien ermittelt werden.

Um diese Fragestellungen zu beantworten, wurden im Rahmen einer Vorstudie zunächst besonders aussichtsreiche Anwendungsfelder identifiziert. Dazu gehören die Bereiche Energietechnik, Energiespeicher, industrielle Produktionsprozesse, Wärmedämmung, Werk- und Baustoffe sowie Oberflächenfunktionalisierungen. Aus diesen Anwendungsbereichen wurden insgesamt zehn Applikationen herausgegriffen, die einer näheren qualitativen sowie im Falle von elektrisch dimmbaren Fenstern und organischen Photovoltaik-Modulen einer möglichst quantitativen Analyse unterzogen wurden. Bei den zwei letztgenannten Fallbeispielen wurden für die Untersuchungen von den Firmen EControl-Glas GmbH & Co. KG bzw. BELECTRIC OPV GmbH spezifische Daten zu der Materialzusammensetzung sowie den Rohstoff- und Energieverbräuchen während des gesamten Lebensweges zur Verfügung gestellt.

Die Ergebnisse aus diesen beiden Fallbeispielen zeigen, dass Innovationen im Bereich der Nanotechnik grundsätzlich signifikante Einsparungen im Bereich der Rohstoff- und Energieaufwendungen haben können. So ergeben sich beispielsweise bei den elektrisch dimmbaren Fenstern Einsparungen hinsichtlich des Energieaufwands und den damit verbundenen CO₂-Emissionen in Höhe von rund 30% im Vergleich zu herkömmlichen Fenstern mit einer Jalousieverschattung. Hauptgrund dafür ist, dass während der Gebrauchsphase die mit diesen Fenstern ausgestatteten Räume weniger klimatisiert, d.h. gekühlt werden müssen und dadurch auch der erhöhte Energieeinsatz für die Produktion kompensiert werden kann.⁶⁶ Auch bei organischen Photovoltaik-Modulen sind bei der Herstellung signifikante Energieeinsparungen im Vergleich zu Solarmodulen auf Basis von amorphem Silizium möglich.

Die hier genannten Potenziale sind jedoch z.T. an Randbedingungen geknüpft, deren Eintreten in der Praxis sich noch bewahrheiten muss. Bei den elektrisch dimmbaren Fenstern wird z.B. davon ausgegangen, dass die derzeit noch nicht voll ausgelasteten Produktionskapazitäten zukünftig im Großserienbetrieb effizienter betrieben werden können.

⁶⁶ Dies gilt allerdings nur, falls sich diese Räume in Gebäuden befinden, bei denen tatsächlich eine Klimatisierung vorhanden bzw. vorgesehen ist (z.B. in Bürogebäuden).

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Insbesondere anhand der auf qualitativer Ebene untersuchten Anwendungsfelder konnten auch die Auswirkungen nanotechnischer Neuentwicklungen auf den Verbrauch kritischer metallischer Rohstoffe und möglicher Rebound-Effekte herausgearbeitet werden. Ein gutes Beispiel dafür sind gesinterte Magneten aus Neodym, bei denen durch den Einsatz nanogekörnter Metallpulver eine Verringerung des Bedarfs an kritischen Metallen in Höhe von 10–30% erzielt werden kann. In Anbetracht der Rohstoffknappheit von Neodym ist das zunächst positiv zu bewerten. Gleichzeitig erlaubt der Bau kleinerer Magneten mit der gleichen Leistung wie vormals bei größeren Magneten jedoch auch die Konstruktion und Anwendung von kleineren Elektromotoren. Wenn sich dadurch der Markt vergrößert, weil kleine Elektromotoren attraktiv für z.B. mehr Spielzeuge werden, dann kann das per Saldo sogar zu einer Verschärfung von Rohstoffknappheit und Funktionsmaterialdissipation entlang des Lebensweges führen.

In Hinblick auf die Triebkräfte für die betrachteten besonders aussichtsreichen Anwendungen der Nanotechnik kann festgehalten werden, dass neben klassischen Treibern wie Kosteneinsparung und der Erschließung neuartiger Anwendungsfelder inzwischen insbesondere auch die Aspekte Materialeinsparung und Energieeffizienz zu primär wichtigen Treibern für nanotechnische Neuentwicklungen geworden sind. Dies lässt sich zum einen anhand der bereits erwähnten Neodym-Magneten nachweisen, zeigt sich darüber hinaus aber auch in den Bereichen Energietechnik, industrielle Produktionsprozesse, sowie bei Werk- und Baustoffen. Vor dem Hintergrund dieser Studie wird besonders deutlich, dass eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus essentiell ist und darüber hinaus Rebound-Effekte (direkte wie auch indirekte) mit einbezogen werden müssen.

11 Quellenverzeichnis

- Abdolahad, M., Janmaleki, M., Taghinejad, M., Taghnejad, H., Salehi, F. & Mohajerzadeh, S. (2013). *Single-cell resolution diagnosis of cancer cells by carbon nanotube electrical spectroscopy*. *Nanoscale*, 5(8), 3421–7. The Royal Society of Chemistry. doi:10.1039/c3nr33430a
- Adams, L. K., Lyon, D. Y. & Alvarez, P. J. J. (2006). *Comparative eco-toxicity of nanoscale TiO₂, SiO₂, and ZnO water suspensions*. *Water research*, 40(19), 3527–32. doi:10.1016/j.watres.2006.08.004
- Ancil, A., Babbitt, C., Landi, B. & Raffaele, R. P. (2010). *Life-cycle assessment of organic solar cell technologies*. *2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (pp. 000742–000747). IEEE. doi:10.1109/PVSC.2010.5617085
- Angerer, G., Erdmann, L., Marscheider-Weidemann, F., Scharp, M., Lüllmann, A., Handke, V. & Marwede, M. (2009). *Rohstoffe für Zukunftstechnologien – Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage*. Stuttgart. Online verfügbar unter: <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/isi-publ/2009/ISI-B-5-09.pdf?WSESSIONID=5712ff2ca5ffc0d9590afc8ef7e1486>
- Anik, U., Cubukçu, M. & Yavuz, Y. (2013). *Nanomaterial-based composite biosensor for glucose detection in alcoholic beverages*. *Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology (Print)*, 41(1), 8–12. Informa Healthcare New York. doi:10.3109/10731199.2012.696071
- Arora, P. & Zhang, Z. J. (2004). *Battery Separators*. *Chemical Reviews*, 104(10), 4419–4462. doi:10.1021/cr020738u
- Aschenbrenner, N. (2010). *OLED-Flächenlicht für die Allgemeinbeleuchtung*. *Innovations Report*. Zugriff am 4. Dezember 2012, online verfügbar unter: http://www.innovations-report.de/html/berichte/energie_elektrotechnik/oled_flaechenlicht_allgemeinbeleuchtung_146100.html
- AssTech GmbH. (n.d.). *Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC)*. *Newsletter*. Online verfügbar unter: http://www.asstech.com/de/downloads/newsletter_PFC.pdf
- Bachmann, G., Grimm, V., Hoffknecht, A., Luther, W., Plötz, C., Reuscher, G., Teichert, O. & Zweck, A. (2007). *Nanotechnologien für den Umweltschutz*. Zukünftige Technologien Nr. 71, Dezember 2007, online verfügbar unter: http://www.vditz.de/fileadmin/media/publications/pdf/Band_71.pdf
- Baetens, R., Jelle, B. P. & Gustavsen, A. (2011). *Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review*. *Energy and Buildings*, 43(4), 761–769. doi:10.1016/j.enbuild.2010.12.012
- Beeskow, T. & Hoting, B. (2008). *Nanofiltration comes to organic solvents*. *Achema Worldwide News*. Zugriff am 21. Januar 2013, online verfügbar unter: http://www.dechema.de/achema2009_media/-p-764.pdf?rewrite_engine=id
- Berge, A. & Johansson, P. Ä. R. (2012). *Literature Review of High Performance Thermal Insulation*. *Building Physics*. Gothenburg, Sweden. Online verfügbar unter: <http://publications.lib.chalmers.se/publication/159807-literature-review-of-high-performance-thermal-insulation>
- Blacksmith Institute. (2007). *The World's Worst Polluted Places The Top Ten of (of The Dirty Thirty)*. Online verfügbar unter: www.blacksmithinstitute.org

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

- BMBF. (2006). *Nano-Initiative – Aktionsplan 2010*. Bonn. Online verfügbar unter: http://www.bmbf.de/pub/nano_initiative_aktionsplan_2010.pdf
- BMBF. (2007). *Hightech-Strategie der Bundesregierung*. Zugriff am 4. Januar 2013, online verfügbar unter: <http://www.hightech-strategie.de/>
- BMBF. (2011). *Aktionsplan Nanotechnologie 2015*. Bonn. Online verfügbar unter: http://www.bmbf.de/pub/aktionsplan_nanotechnologie.pdf
- BMBF. (2012). *BMBF – Hightech-Strategie – Innovationsallianz „Lithium Ionen Batterie LIB 2015.“* Zugriff am 15. Oktober 2012, online verfügbar unter: <http://www.bmbf.de/de/11828.php>
- BMU. (2011). *Ergebnisse aus der zweiten NanoDialog-Phase 2009-2011*. Online verfügbar unter: [http://www.bmu.de/service/publikationen/downloads/details/artikel/ergebnisse-aus-der-zweiten-nanodialog-phase-2009-2011/?tx_ttnews\[backPid\]=918](http://www.bmu.de/service/publikationen/downloads/details/artikel/ergebnisse-aus-der-zweiten-nanodialog-phase-2009-2011/?tx_ttnews[backPid]=918)
- Bourzac, K. (2011). *New magnets to preserve rare-earth metals – News – Institute of Nanotechnology. MIT Technology Review*. Zugriff am 21. September 2012, online verfügbar unter: <http://www.nano.org.uk/news/1205/>
- Brainard, G. C., Hanifin, J. P., Greeson, J. M., Byrne, B., Glickman, G., Gerner, E. & Rollag, M. D. (2001). *Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, 21(16), 6405–12. Online verfügbar unter: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11487664>
- BSI. (2008). *PAS 2050*. Online verfügbar unter: <http://www.bsigroup.com/en/Standards-and-Publications/Industry-Sectors/Energy/PAS-2050/>
- Buzea, C., Pacheco, I. I. & Robbie, K. (2007). *Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity. Biointerphases*, 2(4), MR17. Online verfügbar unter: <http://www.springerlink.com/content/p8348w158q22713h/>
- Choi, S.-H., Kang, H.-J., Ryu, E.-N. & Lee, K.-P. (2001). *Electrochemical properties of polyolefin nonwoven fabric modified with carboxylic acid group for battery separator. Radiation Physics and Chemistry*, 60(4-5), 495–502. doi:10.1016/S0969-806X(00)00396-0
- Cientifica Ltd. (2007). *Nanotech: Cleantech Quantifying The Effect Of Nanotechnologies On CO2 Emissions*. London. Online verfügbar unter: http://www.cientifica.com/WhitePapers/052_CO2QuantificationWhitePaper.pdf
- Cluzel, C. & Douglas, C. (2012). *Cost and performance of EV batteries Final report for The Committee on Executive summary*. United Kingdom: The Committee on Climate Change. Online verfügbar unter: http://hmccc.s3.amazonaws.com/IA&S/CCC_battery_cost_Element_Energy_report_March2012_Public.pdf
- Debe, M. K. (2006). *NSTF Catalyst Electrodes. Northern Nano Workshop University of Minnesota*. Online verfügbar unter: http://thor.ece.umn.edu/nano/northernnano/Northern_Nano_Talk_Nov06_Debe.pdf
- Ecobine. (2012). *Mineralfaserprodukte Mineralfaserprodukte* (pp. 1–7). Online verfügbar unter: <http://www.ecobine.de/>
- Ecoinvent. (2010). *Ecoinvent Database V 2.2*. Zugriff am 15. Januar 2013, online verfügbar unter: <http://www.ecoinvent.ch/>

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

- Elsner, H. (2010). *Heavy Minerals of economic importance*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Online verfügbar unter: http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/heavy-minerals-economic-importance.pdf?__blob=publicationFile
- Environmental Energy Technologies Division. (2004). *Pore Structure : Silica Aerogels*. Zugriff am 30. November 2012, online verfügbar unter: <http://energy.lbl.gov/ecs/aerogels/sa-pore.html>
- Erdmann, L., Behrendt, S. & Feil, M. (2011). *Kritische Rohstoffe für Deutschland*. Berlin: KfW Bankengruppe. Online verfügbar unter: <http://www.izt.de/fileadmin/downloads/pdf/54416.pdf>
- EUCOM. (2006). *Action Plan for Energy Efficiency: Realising the Potential*. EU: European Commission. Online verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2006:0545:FIN:EN:HTML>
- EUCOM. (2008). *Communication from the Commission – Energy efficiency: delivering the 20% target*. European Commission. Online verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0772:FIN:EN:HTML>
- EUCOM. (2010a). *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings*. European Commission. Online verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:01:EN:HTML>
- EUCOM. (2010b). *Europeans and Biotechnology in 2010 – Winds of change ?* Online verfügbar unter: http://ec.europa.eu/public_opinion/archives/ebs/ebs_341_winds_en.pdf
- EUCOM. (2010c). *Critical raw materials for the EU* (pp. 1–84). European Commission: European Commission. Online verfügbar unter: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf
- EUCOM. (2011a). *EMPFEHLUNG DER KOMMISSION vom 18. Oktober 2011 zur Definition von Nanomaterialien*. EU-Kommission. Online verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:275:0038:0040:DE:PDF>
- EUCOM. (2011b). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions*. EU: European Commission. Online verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52011DC0109:DE:NOT>
- Evonik. (2006). *Separion®*. Zugriff am 15. Oktober 2012, online verfügbar unter: <http://nano.evonik.com/sites/nanotechnology/de/technologie/anwendung/separion/pages/default.aspx>
- Evonik Industries. (2010). *Elements30 Newsletter*. Online verfügbar unter: <http://corporate.evonik.de/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Global/de/Magazine/elements/elements-30.pdf>
- Fischer, M. (2010). *Analyse des mechanischen Verhaltens von Miniaturprüfkörpern aus Polyethylen-Kohlenstoffnanoröhrchen-Compositen unter Zugbelastung*. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- García-Valverde, R., Cherni, J. a. & Urbina, A. (2010). *Life cycle analysis of organic photovoltaic technologies. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 18(7)*, 535–558. doi:10.1002/pip.967

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

- GFF. (2012). *Fenster- und Türenbranche wächst auch 2012 – Branche – GFF Magazin. GFF Das Praxismagazin für Produktion und Montage*. Online verfügbar unter: <http://www.gff-magazin.de/fenster-und-tuerenbranche-waechst-auch-2012/150/4616/158821/>
- Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B. K., Sibley, S. F., et al. (2011). *Recycling Rates of Metals*. Paris, France. Online verfügbar unter: http://www.unep.org/publications/contents/pub_details_search.asp?ID=6197
- Grainger, D. W. & Castner, D. G. (2008). *Nanobiomaterials and Nanoanalysis: Opportunities for Improving the Science to Benefit Biomedical Technologies. Advanced Materials*, 20(5), 867–877. Online verfügbar unter: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.200701760>
- Greßler, S. (2010). *Nanotechnologie in der Beschaffung Wiens – Erste Abschätzung von Chancen und Risiken*. Wien, Österreich. Online verfügbar unter: <http://www.wien.gv.at/umweltschutz/oekokauf/pdf/nanotech-studie.pdf>
- Griethammer, R. & Hochfeld, C. (2009). *Memorandum Product Carbon Footprint*. Bundesministerium for Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Umweltbundesamt. Online verfügbar unter: http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/memorandum_pcf_lang_bf.pdf
- Gutfleisch, O., Willard, M. A., Brück, E., Chen, C. H., Sankar, S. G. & Liu, J. P. (2011). *Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient. Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 23(7), 821–42. doi:10.1002/adma.201002180
- Gutsch, A., Hörpel, G. & Roth, P. (2007). *Nanoschicht mit Megaleistung – Flexibler Keramikseparator ermöglicht Durchbruch bei großen Lithium-Ionen-Energiespeichern | Deutscher Zukunftspreis. Deutscher Zukunftspreis*. Zugriff am 30. Oktober 2012, online verfügbar unter: <http://www.deutscher-zukunftspreis.de/nominierter/nanoschicht-mit-megaleistung-flexibler-keramikseparator-ermoeglicht-durchbruch-bei-groessen?sec=2>
- Hagelüken, C. & Buchert, M. (2008). *The mine above ground – opportunities & challenges to recover scarce and valuable metals from EOL electronic devices*. Salzburg; Umicore Precious Metals Refining & Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter: http://www.resourcefever.org/publications/presentations/Buchert_Hageluecken.pdf
- Hagelüken, C., Buchert, M. & Stahl. (2005). *Stoffströme der Platingruppenmetalle: Systemanalyse und Massnahmen für eine nachhaltige Optimierung der Stoffströme der Platingruppenmetalle [Taschenbuch]*. GDMB; Auflage: 1., Aufl. Online verfügbar unter: <http://www.amazon.de/Stoffströme-Platingruppenmetalle-Systemanalyse-nachhaltige-Optimierung/dp/3935797206>
- Healy, M. L., Dahlben, L. J. & Isaacs, J. A. (2008). *Environmental Assessment of Single-Walled Carbon Nanotube Processes. Journal of Industrial Ecology*, 12(3), 376–393. doi:10.1111/j.1530-9290.2008.00058.x
- Heraeus GmbH. (2012a). *Sicherheitsdatenblatt SOL 530 (CL 80-9433)*.
- Heraeus GmbH. (2012b). *Sicherheitsdatenblatt SOL 540 (CL80-9434)*.
- Heraeus GmbH. (2012c). *Safety data sheet SOL 550 (CL 80-9435)*.
- Herbst, J., Croat, J., Pinkerton, F. & Yelon, W. (1984). *Relationships between crystal structure and magnetic properties in Nd₂Fe₁₄B. Physical Review B*, 29(7), 4176–4178. doi:10.1103/PhysRevB.29.4176

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

- Herr Henning (Heraeus GmbH) & Spieth-Achtnich, A. (Öko-Institut) (2012). *Telefonisches Interview*.
- Hitachi. (2010). *News Releases, December 6, 2010, Hitachi Global*. Zugriff am 26. September 2012, online verfügbar unter: <http://www.hitachi.com/New/cnews/101206.html>
- Hofinger, J., Keck, D., Roos, S. & Zirpel, K. (2010). *Process for Producing Finely Divided, High-Surface-Area Materials Coated with Inorganic Nanoparticles, and also Use Thereof*. Germany: USA. Online verfügbar unter: <http://www.google.de/patents?hl=de&lr=&vid=USPATAPP12671221&id=bNrbAAAAEBAJ&oi=fnd&dq=nanos+biotemplating&printsec=abstract#v=onepage&q&f=false>
- Holzman, D. C. (2010). *What's in a color? The unique human health effect of blue light. Environmental health perspectives, 118*(1), A22–7. doi:10.1289/ehp.118-a22
- IEC. (2009). *IEC 60034-30 (2008-10) Ed. 1.0. IEC-Normen*. Zugriff am 4. Juli 2013, online verfügbar unter: <http://www.iec-normen.de/215929/iec-60034-30-2008-10-ed-1-0-zweisprachig.html>
- Inno CNT. (2011). *Innovationsallianz CNT – Kohlenstoffnanomaterialien erobern Märkte*. Berlin. Online verfügbar unter: http://www.inno-cnt.de/download/Imagebroschuere_Inno_CNT_Januar_2011_D.pdf
- JRC, Oakdene Hollins Ltd & The Haque Centre for Strategic Studies. (2011). *Critical Metals in Strategic Energy Technologies*. (R. L. Moss, E. Tzimas, H. Kara, P. Willis, & J. Kooroshy, Hrsg.). European Commission: European Commission – Joint Research Council. doi:10.2790/35600
- Kaewamatawong, T., Kawamura, N., Okajima, M., Sawada, M., Morita, T. & Shimada, A. (2005). *Acute pulmonary toxicity caused by exposure to colloidal silica: particle size dependent pathological changes in mice. Toxicologic pathology, 33*(7), 743–9. doi:10.1080/01926230500416302
- Kistler, S. S. (1931a). *Coherent Expanded Aerogels and Jellies. Nature, 127*(3211), 741. doi:10.1038/127741a0
- Kistler, S. S. (1931b). *Coherent Expanded-Aerogels. J. Phys. Chem., 36*(1), 52–64. American Chemical Society. doi:10.1021/j150331a003
- Koebel, M. (2008). *Neue Wärmedämmsysteme im Altbau*. Forum Energie Zürich. Online verfügbar unter: http://www.forumenergie.ch/pub/events/docs/Referat_Koebel_000.pdf
- Konarka Technologies Inc. (2011). *Konarka Power Plastic® 40 Series Product Specifications*. Produktbroschüre.
- Kremer, M. (2011). *Optimierte MEA für die Brennstoffzelle mit NSTF Technologie von 3M. 3M*. Zugriff am 11. Oktober 2012, online verfügbar unter: http://solutions.3mdeutschland.de/wps/portal/3M/de_DE/EU-Auto/Home/News/LatestNews/?PC_7_RJH9U5230OIF702LB5OER428Q1000000_assetId=1273658518694
- Krönke. (2012). *Telefonische Auskunft von Herrn Krönke, Firma Belectric (vormals Konarka)*.
- Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S. C., Curl, R. F. & Smalley, R. E. (1985). *C60: Buckminsterfullerene. Nature, 318*(6042), 162–163. doi:10.1038/318162a0
- Künninger, T. & Richter, D. K. (1996). *VFF / Ökologische Bewertung von Fensterkonstruktionen*. Zugriff am 15. Januar 2013, online verfügbar unter: <http://www.window.de/86.html>
- Kushnir, D. & Sandén, B. A. (2008). *Energy Requirements of Carbon Nanoparticle Production. Journal of Industrial Ecology, 12*(3), 360–375. doi:10.1111/j.1530-9290.2008.00057.x

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

- Lambauer, J., Kolb, S., Kessler, A., Fahl, U. & Voß, A. (2008). *Nanotechnology and its Impact on the German Energy Sector. Advanced Engineering Materials*, 10(5), 423–427.
doi:10.1002/adem.200700326
- Landsiedel, R., Fabian, E., Ma-Hock, L., Wohlleben, W., Wiench, K., Oesch, F. & van Ravenzwaay, B. (2012). *Toxico-/biokinetics of nanomaterials. Archives of toxicology*. doi:10.1007/s00204-012-0858-7
- Lau, C., Anitole, K., Hodes, C., Lai, D., Pfahles-Hutchens, A. & Seed, J. (2007). *Perfluoroalkyl acids: a review of monitoring and toxicological findings. Toxicological sciences: an official journal of the Society of Toxicology*, 99(2), 366–94. doi:10.1093/toxsci/kfm128
- Lawrence Berkeley Laboratories: Microstructured Materials Group. (2004). *Silica Aerogels* (pp. 1–41).
Online verfügbar unter: http://www.sps.aero/Key_ComSpace_Articles/TSA-009_White_Paper_Silica_Aerogels.pdf
- Lerner, M. B., Dailey, J., Goldsmith, B. R., Brisson, D. & Johnson, A. T. C. (2013). *Detecting Lyme disease using antibody-functionalized single-walled carbon nanotube transistors. Biosensors & bioelectronics*, 45(null), 163–7. doi:10.1016/j.bios.2013.01.035
- Liu, T. & Troisi, A. (2012). *What Makes Fullerene Acceptors Special as Electron Acceptors in Organic Solar Cells and How to Replace Them. Advanced Materials*, n/a–n/a. doi:10.1002/adma.201203486
- Madani, S. Y., Shabani, F., Dwek, M. V & Seifalian, A. M. (2013). *Conjugation of quantum dots on carbon nanotubes for medical diagnosis and treatment. International journal of nanomedicine*, 8, 941–50.
doi:10.2147/IJN.S36416
- Maxwell, D., Owen, P., McAndrew, L., Muehmel, K. & Neubauer, A. (2011). *Addressing the Rebound Effect, a report for the European Commission DG Environment*. Online verfügbar unter:
<http://rebound.eu-smr.eu>
- Möller, M., Hermann, A., Groß, R., Diesner, M.-O., Küppers, P., Luther, W., Malanowski, N., et al. (2013). *Nanomaterialien: Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit [Broschiert]*. Vdf Hochschulverlag; Auflage: 1., Auflage. doi:10.3218/3560-5
- Morley, N. & Eatherley, D. (2008). *Material Security – Ensuring resource availability for the UK economy*. (Environment Agency, Department for Business Enterprise & Regulatory Reform, & K. T. Network, Hrsg.). Chester, United Kingdom: C-Tech Innovation Ltd.
- Murphy & Spitz. (2011). *Position zu Neodym und Windkraftanlagen* (pp. 1–7). Online verfügbar unter:
http://www.murphyandspitz.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Murphy%26SpitzResearchNeodym062011.pdf
- Namos GmbH. (2012). *Namos: Einsparung von Edelmetall bei Katalysatoren / Biotemplating für Katalysatoren / Nanotechnologie / biotemplating for catalysts*. Zugriff am 3. Dezember 2012, online verfügbar unter:
<http://www.namos.de/catalysis/index.php?doc=technologie&lang=de&type=technologie>
- Nanostart AG. (2010). *Nanostart erhöht Anteil an Dresdner Cleantech-Beteiligung Namos GmbH*. Zugriff am 25. Januar 2013, online verfügbar unter: <http://www.nanostart.de/index.php/de/pr-archiv-2010/276-nanostart-erhoeht-anteil-an-dresdner-cleantech-beteiligung-namos-gmbh>
- NASA. (2005). *Stardust / JPL / NASA*. Zugriff am 30. November 2012, online verfügbar unter:
<http://stardust.jpl.nasa.gov/tech/aerogel.html>

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

- Nassar, N. T., Barr, R., Browning, M., Diao, Z., Friedlander, E., Harper, E. M., Henly, C., et al. (2012). *Criticality of the geological copper family*. *Environmental science & technology*, 46(2), 1071–8. American Chemical Society. doi:10.1021/es203535w
- Öko-Institut e.V. (2009). *Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential*. (M. Buchert, D. Schüler, D. Bleher, N. Neurohr, & L. Hagelüken). United Nations Environment Programme – UNEP. Online verfügbar unter: <http://www.oeko.de/publikationen/forschungsberichte/studien/dok/657.php?id=&dokid=1070&anzeige=det&ITitel1=&IAutor1=&ISchlagw1=&sortieren=&dokid=1070>
- Öko-Institut e.V. (2011). *Study on Rare Earths and Their Recycling*. (D. Schüler, M. Buchert, R. Liu, S. Dittrich, & C. Merz). Öko-Institut e.V. Darmstadt, Germany: The Greens/EFA Group in the European Parliament.
- Öko-Institut e.V. (2012a). *Analyse und strategisches Management der Nachhaltigkeitspotenziale von Nanoprodukten*. (M. Möller, R. Groß, K. Moch, S. Prakash, C. Pistner, P. Küppers, A. Spieth-Achtnich, et al.). TEXTE 15/2012, Umweltbundesamt Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter: <http://www.uba.de/uba-info-medien/4276.html>
- Öko-Institut e.V. (2012b). *Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten*. (M. Buchert, A. Manhart, D. Bleher, D. Pingel, K.-D. Koß, & M. Oberdörfer). Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW).
- Öko-Institut e.V. & Prognos AG. (2009). *Modell Deutschland*. WWF Deutschland. Online verfügbar unter: <http://www.oeko.de/oekodoc/971/2009-003-de.pdf>
- Osawa, E. (1970). *Superaromaticity*. *Kagaku*, 25, 854–863.
- Poole, R. (2012). *Rare earth metals in short supply? Engineering and Technology Magazine*, 7(4), 2. Online verfügbar unter: <http://eandt.theiet.org/magazine/2012/04/releasing-the-rare-earths.cfm>
- Redlin, U. (2001). *Neural basis and biological function of masking by light in mammals: suppression of melatonin and locomotor activity*. *Chronobiology international*, 18(5), 737–58. Online verfügbar unter: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11763983>
- Rehahn, M., Wäber, R. & Wunderlich, W. (2009). *Nanotechnologie in Kunststoff*. (J. Satorius & S. Hummel, Hrsg.). Online verfügbar unter: http://www.hessen-nanotech.de/mm/NanoKunststoff_Nanotechnologie_Kunststoff_Innovationsmotor_Verarbeitung_Anwendung.pdf
- Ren, Z., Lan, Y. & Wang, Y. (2013). *Aligned Carbon Nanotubes*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-30490-3
- Rim, K. T., Koo, K. H. & Park, J. S. (2013). *Toxicological evaluations of rare earths and their health impacts to workers: a literature review*. *Safety and health at work*, 4(1), 12–26. doi:10.5491/SHAW.2013.4.1.12
- Robichaud, C. O., Tanzil, D., Weilenmann, U. & Wiesner, M. R. (2005). *Relative Risk Analysis of Several Manufactured Nanomaterials: An Insurance Industry Context*. *Environmental Science & Technology*, 39(22), 8985–8994. American Chemical Society. Online verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1021/es0506509>
- Roenneberg, T., Kuehne, T., Juda, M., Kantermann, T., Allebrandt, K., Gordijn, M. & Merrow, M. (2007). *Epidemiology of the human circadian clock*. *Sleep medicine reviews*, 11(6), 429–38. doi:10.1016/j.smr.2007.07.005

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

- Roenneberg, T. & Merrow, M. (2002). *Light reception: discovering the clock-eye in mammals. Current biology: CB*, 12(5), R163–5. Online verfügbar unter: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11882303>
- Ross, R. B., Cardona, C. M., Guldi, D. M., Sankaranarayanan, S. G., Reese, M. O., Kopidakis, N., Peet, J., et al. (2009). *Endohedral fullerenes for organic photovoltaic devices. Nature materials*, 8(3), 208–12. Nature Publishing Group. doi:10.1038/nmat2379
- Rossbauer, M. (2010). *Chronobiologie: Aufstehen! Die Zeit*. Online verfügbar unter: <http://www.zeit.de/2010/44/Schlafforschung-Chronobiologie>
- Schlaak, A. (2012). *OLEDs – effizient, preiswert und umweltverträglich. Innovations Report*. Zugriff am 4. Dezember 2012, online verfügbar unter: http://www.innovations-report.de/html/berichte/materialwissenschaften/oleds_effizient_preiswert_umweltvertraeglich_203645.html
- Schlitzberger, S. & Kempkes, C. (2012). *Durchführung von Simulationsrechnungen zur vergleichenden Bewertung von EControl*. Kassel.
- Schott Solar. (2012). *Solarmodul SCHOTT PROTECT® ASI 100-107 von SCHOTT Solar – SCHOTT PROTECT®. Homepage*. Zugriff am 8. Januar 2013, online verfügbar unter: <http://www.schott.com/photovoltaic/german/schott-protect-asi.html>
- Schweizer Akademie der Technischen Wissenschaften. (2010). *Seltene Metalle – Rohstoffe für Zukunftstechnologien*. Zürich, Schweiz. Online verfügbar unter: <http://www.satw.ch/publikationen/schriften/SelteneMetalle.pdf>
- Senatkommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. (2012). *MAK- und BAT-Werte-Liste 2012*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Online verfügbar unter: <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9783527666027>
- Shah, V. & Belozherova, I. (2008). *Influence of Metal Nanoparticles on the Soil Microbial Community and Germination of Lettuce Seeds. Water, Air, and Soil Pollution*, 197(1-4), 143–148. doi:10.1007/s11270-008-9797-6
- So, F., Kido, J. & Burrows, P. (2008). *Organic Light-Emitting Devices for Solid-State Lighting. MRS Bulletin*, 33(07), 663–669. Online verfügbar unter: http://journals.cambridge.org/abstract_S0883769400005492
- Solenne. (2012). *MSDS [60]PCBM_jan2012.pdf (application/pdf-Objekt)*. Online verfügbar unter: [http://www.solennebv.com/index_htm_files/MSDS \[60\]PCBM_jan2012.pdf](http://www.solennebv.com/index_htm_files/MSDS [60]PCBM_jan2012.pdf)
- SRU. (2011). *Vorsorgestrategien für Nanomaterialien – Sondergutachten* (pp. 1–643). Berlin, Bundesrepublik Deutschland. Online verfügbar unter: http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2011_09_SG_Vorsorgestrategien_f%C3%BCr+Nanomaterialien.html;jsessionid=B1128788AA09A72F81F77B998B74E1ED.1_cid137
- Stadur-Sued. (2009). *Spaceloft MSDS GERMAN.pdf*. Online verfügbar unter: http://www.stadur-sued.de/uploads/images/PDFs/Spaceloft_MSDS_GERMAN.pdf
- Stengel, O. (2011). *Suffizienz – Die Konsumgesellschaft in der Ökologischen Krise*. oekom. Online verfügbar unter: http://epub.wupperinst.org/files/3822/WSFN1_Stengel.pdf
- Tang, J. M., Jensen, K., Waje, M., Li, W., Larsen, P., Pauley, K., Chen, Z., et al. (2007). *High Performance Hydrogen Fuel Cells with Ultralow Pt Loading Carbon Nanotube Thin Film Catalysts. Journal of Physical Chemistry C*, 111(48), 17901–17904. American Chemical Society. doi:10.1021/jp071469k

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

- Tsurukawa, N., Prakash, S. & Manhart, A. (2011). *Social impacts of artisanal cobalt mining in Katanga , Democratic Republic of Congo Authors :* (Vol. 49, pp. 30–40). Online verfügbar unter: <http://www.oeko.de/oekodoc/1294/2011-419-en.pdf>
- U.S. Department of Energy. (2010). *Critical Materials Strategy*. Online verfügbar unter: <http://energy.gov/pi/office-policy-and-international-affairs/downloads/2010-critical-materials-strategy>
- Umweltbundesamt. (2011). *Presse-Information 21/2011: Die Energiewende braucht mehr Energieeffizienz*. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2011/pd11-021_die_energiewende_braucht_mehr_energieeffizienz.htm
- Umweltbundesamt. (2012a). *Glossar zum Ressourcenschutz*. (J. Kosmol, J. Kanthak, F. Herrmann, M. Golde, C. Alsleben, G. Penn-Bressel, S. Schmitz, et al., Hrsg.). Umweltbundesamt. Online verfügbar unter: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4242.pdf>
- Umweltbundesamt. (2012b). *Presse-Information 22/2012: EU verbietet Klimageräte – Ineffiziente Klimageräte verschwinden ab 2013 vom Markt*. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2012/pdf/pd12-022_eu_verbannt_klimasuender.pdf
- UNSC. (2003). *Security Council S/2003/1027*. United Nations Security Council. Online verfügbar unter: <http://daccess-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N03/567/36/IMG/N0356736.pdf?OpenElement>
- USGS. (2012). *United States Geological Survey: Commodity Statistics and Information*. Zugriff am 9. Januar 2013, online verfügbar unter: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>
- Voetz, M. (2012). *Methoden zum Nachweis einer möglichen Freisetzung von CNT*. Online verfügbar unter: http://inno-cnt.de/jahreskongress2012/downloads/Voetz_Voetz_Methoden_zum_Nachweis_einer_moeglichen_Freisetzung_von_CNT_waehrend_der_Produktion_und_Verarbeitung.pdf
- Wagner, M., Franken, G., Martin, N., Melcher, F., Vasters, J. & Westphale, E. (2007). *Zertifizierte Handelsketten im Bereich mineralischer Rohstoffe*. BGR, Hannover. Online verfügbar unter: http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/Studie_Zertifizierte_Handelsketten.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Waters, K. M., Masiello, L. M., Zangar, R. C., Tarasevich, B. J., Karin, N. J., Quesenberry, R. D., Bandyopadhyay, S., et al. (2009). *Macrophage responses to silica nanoparticles are highly conserved across particle sizes*. *Toxicological sciences : an official journal of the Society of Toxicology*, 107(2), 553–69. doi:10.1093/toxsci/kfn250
- Wecker, J., Schnitzke, K., Cerva, H. & Grogger, W. (1995). *Nanostructured Nd-Fe-B magnets with enhanced remanence*. *Applied Physics Letters*, 67(4), 563. doi:10.1063/1.115170
- WECOBIS. (2011a). *Aerogele*. Zugriff am 30. November 2012, online verfügbar unter: <http://ww2.wecobis.de/bauproduktgruppen/daemmstoffe/aus-mineralischen-rohstoffen/daemmstoffe-mit-aerogelen.html>
- WECOBIS. (2011b). *Mineralwolle-Dämmstoffe*. Zugriff am 30. November 2012, online verfügbar unter: http://www.wecobis.de/jahia/jahia/cache/offonce/Home/Bauproduktgruppen/Daemmstoffe/aus_mineralischen_Rohstoffen/Mineralwolle-Daemmstoffe;sessionid=9C7FEFB6F4BEF539E328DF35237FDFFA
- Wittkopf, H. & Dittmar, M. (2012). *Variable Sonnenschutzgläser – von den Grundlagen zur Praxis*. *Stahlbau*, 81(S1), 279–290. doi:10.1002/stab.201290071

Auswirkung der Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf

Yersin, H., Czerwieniec, R. & Monkowius, U. (2010). *Singulett-Harvesting mit löslichen Kupfer(I)-Komplexen für opto-elektronische Vorrichtungen*. Online verfügbar unter:
<http://www.freepatentsonline.com/DE102010031831.html>

Yokel, R. A. & MacPhail, R. C. (2011). *Engineered nanomaterials: exposures, hazards, and risk prevention*. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 6(1), 7. doi:10.1186/1745-6673-6-7

Zhang, S. S. (2007). *A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries*. *Journal of Power Sources*, 164(1), 351–364. doi:10.1016/j.jpowsour.2006.10.065