

Stand: 01. September 2016

Einsatz von Nanomaterialien in der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

1 Einleitung

Erneuerbare Energien sind ein elementarer Bestandteil der Energiewende und werden weiter an Bedeutung gewinnen. Sowohl die Umstellung der Versorgung auf erneuerbar erzeugten Strom, als auch die Verbesserung der Effizienz in der Nutzung sollte dem Grundsatz der Nachhaltigkeit folgen.

Laut Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) lag der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch in Deutschland im Jahr 2015 bei 32,6 % und damit fünf Prozentpunkte über dem Wert des Vorjahres. Die verschiedenen Quellen erneuerbarer Energien tragen in unterschiedlichen Anteilen zu diesem Wert bei: Der Windenergieanteil an der regenerativen Stromerzeugung beträgt dabei 44,9 %, Biomasseverbrennung 22,6 %, Photovoltaik 19,6 %, Wasserkraft 9,9 % und die Verbrennung von Siedlungsabfällen 3,0 % (Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik, AGEE-Stat., Stand Juni 2016).

Zur Effizienzsteigerung der Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen können Nanomaterialien einen wichtigen Beitrag leisten. Dieses Datenblatt will hierzu einen Überblick geben. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auf diesem Gebiet sehr viel geforscht wird, Anwendungen aber erst vereinzelt auf den Markt kommen. Die aussichtsreichsten nanotechnischen Anwendungen entstehen hierbei im Solar-, Wind- und Brennstoffzellenbereich als auch bei der Entwicklung thermoelektrischer Elemente.

2 Anwendungen mit Nanomaterialien

2.1 Solarzellen

Die globale Marktrelevanz der Photovoltaik (PV) wird als sehr hoch eingeschätzt und wird in naher Zukunft noch weiter steigen. Experten rechnen damit, dass die Photovoltaik bis 2030, 9 % des weltweiten Strombedarfs decken wird (Seitz et al. 2013). Die global installierte PV-Leistung betrug im Jahr 2015, 227 GW (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century; Netzwerk für erneuerbare Energien des 21. Jahrhunderts; REN21, 2016); 40 GW davon sind in Deutschland installiert (Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat, Stand Juni 2016). Der effizienteren Umwandlung von Sonnenenergie in elektrischen Strom kommt in Zukunft eine immer wichtigere Rolle zu.

Um die Herstellung von Solarstrom wirtschaftlich und konkurrenzfähig gegenüber konventionellen Energien zu betreiben, zielt die Forschung auf eine Optimierung des Wirkungsgrades, des Materialeinsatzes und der Kosten. Durch eine effiziente Nutzung des

gesamten Wellenlängenspektrums des Sonnenlichts kann der Wirkungsgrad der Module erhöht werden.

Nanomaterialien sind bereits heute aufgrund ihrer optischen und elektrischen Eigenschaften aus der modernen Photovoltaiktechnik nicht mehr wegzudenken (Schüler 2011). So werden Nanomaterialien als Antireflexbeschichtung, als Isoliermaterial oder als Elektrodenmaterial eingesetzt.

Durch den Einsatz nanoporöser Siliziumschichten, die antireflektierend wirken, lässt sich der Wirkungsgrad von PV- Modulen um ca. 3 - 5 % erhöhen (Han et al. 2011).

Dabei werden in einem Plasmaätzverfahren Nanoporen in den Siliziumwafer¹ geätzt. Die Vertiefungen sind in etwa so groß wie die Wellenlänge des Lichts. Diese Vertiefungen führen zu einer Verringerung der Reflexion des einstrahlenden Lichts (Fraunhofer, 2015). Auch an schmutz- und sandabweisenden Schichten auf Nanobasis für Wüstenregionen wird bereits geforscht. Durch diese kann der Reinigungsaufwand und somit der Wasserverbrauch verringert und gleichzeitig der Wirkungsgrad der Module um mehr als 5 % erhöht werden (Fraunhofer-ISE et al. 2013; Schwarzburger et al. 2013).

Tabelle 1: Vergleich der Wirkungsgrade von Solarzellen, hergestellt aus unterschiedlichen Materialien (Dieckmann und Rosenthal, 2014)

Material	Industrieller Wirkungsgrad ²	Laborwirkungsgrad ³
Monokristallines Silizium	15 bis 18 %	25 %
Polykristallines Silizium	13 bis 16 %	20 %
Dünnschicht PV Module CdTe/ GaInP/ GaInAs	5 bis 12 %	16 %
Dünnschichtsolarzellen (CIGS ⁴)	11 bis 15 %	20,3 %
Farbstoffsolarzellen	8,6 %	10 bis 12 %

Im Folgenden werden Einsatzbeispiele für nanotechnikbasierte Photovoltaiktechniken beschrieben:

- Dünnschichtsolarzellen
- Farbstoffsolarzellen
- Quantenpunktsolarzellen
- Organische Solarzellen

2.1.1 Dünnschichtsolarzellen

Dünnschichtsolarzellen bestehen aus Verbindungshalbleitern der III. und V. Hauptgruppe

¹ Halbleiterrohlinge, die als Grundplatte für elektronische Bauelemente, unter anderem für integrierte Schaltkreise dienen

² Wirkungsgrad der bei der Herstellung größerer Module erreicht werden kann

³ Wirkungsgrad der unter Laborbedingungen erreicht werden kann

⁴ Kupfer- Indium- Gallium- Diselenid

des chemischen Periodensystems z.B. Galliumarsenid (GaAs), Indiumphosphid (InP) oder aus Elementen der II. und VI. Hauptgruppe wie Cadmiumtellurid (CdTe) oder Zinkselenid (ZnS) (Dieckmann und Rosenthal 2014). Aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Kosten haben Dünnschichtsolarmodule bereits einen Weltmarktanteil an der PV-Produktion von 20 %, mit steigender Tendenz (Powalla et al. 2010). Durch einen schichtweisen Aufbau der Module lassen sich mehrere Dünnschichtsolarmodule übereinander anordnen mit einer entsprechenden Steigerung des Gesamtwirkungsgrades (Dieckmann und Rosenthal 2014). So erzielte eine Mehrfachsolarzelle aus III-V Halbleitern⁵ den derzeit höchsten gemessenen Wirkungsgrad einer Solarzelle im Labor mit einem Wirkungsgrad von über 40 % (Fraunhofer 2014).

Aufgrund der automatisierten, großflächigen Herstellungsverfahren und des geringeren Materialeinsatzes eignen sie sich besonders als Freiflächenanlagen. Dünnschichtsolarmodule (Solarzellen der 2. Generation) haben Schichtdicken von wenigen Mikrometern und darunter (ca. 500 nm) im Vergleich zu herkömmlichen Solarzellen, die Schichtdicken von ca. 300 µm aufweisen (Ctortocka 2009). Sie fallen somit nicht direkt unter die Empfehlung der EU Kommission zu Nanomaterialien, sollen hier aber vollständigheitshalber erwähnt werden. Aufgrund der geringeren Schichtdicken im Vergleich zu herkömmlichen Si- Solarzellen können die Elektronen einen extrem schnellen Transfer der Ladungsträger zwischen den Elektroden gewährleisten. Die geringeren Schichtdicken führen allerdings zu einer schlechteren Lichtabsorption (Verein der Ingenieure - VDI 2010). Auf Zellebene konnten bereits Wirkungsgrade von über 20 % (Green et al. 2014) erreicht werden. Eines der derzeit größten PV-Freiflächenkraftwerke der Welt und das größte PV-Kraftwerk, das auf Basis von CdTe-Modulen errichtet ist, ist die Topaz- Solar- Farm in Kalifornien mit einer Leistung von 550 MW. Damit kann sie 160.000 Haushalte mit Strom versorgen (United States Department of Energy - US-DOE 2011).

Ein weiterer Vorteil der Dünnschichttechnologie ist die Möglichkeit der direkten Verschaltung zu Modulen im Herstellungsprozess der Solarzellen (Powalla et al. 2010). Durch die geringen Schichtdicken können bei entsprechender Substratwahl auch leichtere und flexiblere Solarmodule für Anwendungen in verschiedenen Bereichen, wie der Gebäudeintegration oder zur Versorgung elektronischer Geräte mit geringem Stromverbrauch entwickelt werden. Dadurch kommt es zu ökonomischen und ökologischen Vorteilen die durch die Materialeinsparung angetrieben werden.

Durch möglichst dünne CIGS-Schichten soll der Verbrauch an Indium minimiert werden (Lare et al. 2015). Darüber hinaus wird daran geforscht, Indium durch andere Stoffe, wie CuZnSnS (Fraunhofer 2012) (gehört zu den Kesteriten) oder Kesterit Nanostäbchen, (Seitz et al. 2013) zu ersetzen. Dabei gehören sowohl Indium als auch Zinn zu den kritischen Rohstoffen (Institut für Zukunftsforschung und Technologiebewertung – IZT 2011).

2.1.2 Farbstoffsolarmodule

Bei Farbstoffsolarmodulen⁶ (DSSC), die auch als Solarzellen der 3. Generation bezeichnet

⁵ Mehrfachsolarzelle bestehend aus GaInP/GaInAs/Ge

⁶ Die gebräuchlichsten Namen für die Zelle sind DSC, DSSC (Dye Sensitization Solar Cell), DYSC oder Grätzelzelle (nach ihrem Erfinder)

werden, findet die Lichtabsorption in organischen Farbstoffen wie organischen Ruthenium basierten Farbstoffen oder im Blattfarbstoff Chlorophyll statt (Dieckmann und Rosenthal 2014). Die Farbmoleküle sind auf einem Trägermaterial angelagert. Das Trägermaterial setzt sich aus unterschiedlichen Nanomaterialien und -strukturen wie Titandioxid (TiO_2), Zinkoxid (ZnO) oder Zinndioxid (SnO_2) zusammen (Berger et al. 2011). Das Trägermaterial erhöht die effektive Oberfläche zur Lichtabsorption und den Lichtabsorptionskoeffizienten stark. Darüber hinaus werden Beschichtungen aus nanoskaligen Materialien (Aluminium/Titan-Nanokeramik, Wolframcarbid, Chromoxid und mit Yttrium stabilisiertes Zirkonium) als Schutz vor Abnutzung, Erosion und Korrosion eingesetzt (Seitz et al. 2013).

Auch wird versucht die TiO_2 -Elektroden durch SnO_2 - und ZnO -Elektroden zu ersetzen, um den Wirkungsgrad der DSSC zu erhöhen. Durch nanokristalline SnO_2/ZnO -Kombinationen in der Elektrode können Wirkungsgrade von 8 % erreicht werden (Berger et al. 2011).

Darüber hinaus können Farbstoffzellen im Vergleich zu herkömmlichen Solarzellen diffuses Licht gut nutzen. Im Labormaßstab konnten Wirkungsgrade von 12 % (Grätzel et al. 2010; Yella et al. 2011) nachgewiesen werden, während er bei Modulen bei rund 8 % liegt (Grätzel et al. 2010). Kommerziell erhältliche Module weisen bisher aber nur Wirkungsgrade zwischen 2 und 3 % auf (Cai et al. 2015), wobei Wirkungsgrade von bis zu 30 % möglich sind (Grätzel et al. 2010).

Eine der Herausforderungen für Farbstoffzellen liegt in der Stabilität über eine längere Betriebszeit. Das gilt insbesondere bei hohen Temperaturen ohne Lichteinfall. Die Haltbarkeit derzeitiger Farbstoffsolarzellen beträgt ca. 12 Jahre (Hariksin et al. 2011) und ist somit weit geringer als die Lebensdauer anorganischer Siliziumsolarzellen. Ein Vorteil der Farbstoffsolarzellen liegt in der einfachen Herstellungstechnik, sowie ihrer hohen mechanischen Flexibilität, was sie für verschiedene Anwendungen attraktiv macht.

2.1.3 Quantenpunktsolarzellen

Quantenpunktsolarzellen können aufgrund ihres theoretisch hohen Wirkungsgrades die Photovoltaikbranche revolutionieren. Quantenpunkte⁷ (QD) bestehen aus verschiedenen Halbleitermaterialien in nanoskaliger Form wie Indiumgalliumarsenid (InGaAs), Cadmiumselenid (CdSe), Cadmiumtellurid (CdTe), Indiumphosphid (InP), Zinkselenid (ZnSe) oder Kupferindiumsulfid (CuInS_2). Durch ihre größenabhängigen optischen und elektronischen Eigenschaften lassen sich ihre Eigenschaften maßgeschneidert einstellen. Es gibt verschiedene Herstellungsverfahren von QDPV Zellen. Ein mögliches Verfahren zielt darauf ab, die Quantenpunkte mit Siliziumdioxid zu beschichten und anschließend per Flüssigkeitsabscheidung auf einem herkömmlichen Siliziumwafer abzuscheiden. Im Vergleich zu herkömmlichen Solarzellen, die nur Licht einer bestimmten Wellenlänge umwandeln können, sind Quantenpunktsolarzellen (QDSC) so aufgebaut, dass sie verschiedene Wellenlängen gleichzeitig nutzen können. Dadurch lässt sich ein größerer Bereich des Wellenspektrums nutzen (Gräfe 2015).

⁷ Ein Quantenpunkt (engl. Quantum dot) ist eine meist aus Halbleitermaterial bestehende nanoskopische Materialstruktur

Das Potenzial von QDSC wird derzeit in einer Reihe von Projekten erforscht. Der Forschungsstand ist allerdings noch weit davon entfernt in gegenwärtigen Techniken eingesetzt zu werden. Obwohl QDSC gute Voraussetzungen mitbringen, um höhere Effizienzen zu erzielen, liegen die bisher realisierten Wirkungsgrade bei maximal 9 % (Chuang et al. 2014; Johnson D. 2014). Durch die Erzeugung mehrerer Schichten aus QD sind theoretische Wirkungsgrade von 31 %, 42 % und sogar über 80 % (als theoretischer Maximalwirkungsgrad) für ein-, zwei-, und bis unendlich viele Schichten möglich (SPIE, 2014; Brown et al., 2002).

2.1.4 Organische Solarzellen

Auch organische Solarzellen (OPV) gehören zu den Solarzellen der 3. Generation. Als Halbleitermaterialien werden organische Moleküle eingesetzt. Dabei werden konjugierte Polymere (Polymere mit Doppelbindungen) wie CN-PPV⁸, P3HT⁹ oder MEH-PPV¹⁰ (Sun et al. 2005) oder auch Farbpigmente¹¹ eingesetzt (Liu et al., 2012). Die Solarzellen bestehen aus einer dünnen Schicht dieser Polymere oder Pigmente, auf das eine weitere dünne Schicht von Fulleren¹² (C60, C70) oder Fullerenderivaten¹³ (PCBM¹⁴[C60]; PCBM[C70]) aufgebracht wird. Die Polymere dienen als Elektronendonatoren oder Pigmente, die Fullerene als Elektronenakzeptoren (Spechler et al. 2015). Durch Fulleren und Fullerenderivate wird eine schnelle Ladungsübertragung ermöglicht (Berger et al. 2011; Tamura et al. 2012). Dabei sind die Entfernungen in organischen Photovoltaikzellen für die Ladungsträger sehr kurz, in der Regel nur 10 nm (Berger et al. 2011). Die Solarzellen sind mit 0,1 µm sehr dünn (Dyakonov 2003; Glatthaar 2007) und führen zu geringeren Materialverbräuchen als anorganische Siliziumsolarzellen und damit einhergehend zu geringeren Produktionskosten. Indiumzinnoxid¹⁵ (ITO) bzw. Aluminium dient als Elektrodenmaterial auf der Vorder- bzw. Rückseite.

Silbernanomaterialien, die zusätzlich in einer ultradünnen Polymerschicht eingelagert sind, erweitern den nutzbaren Anteil des Wellenlängenspektrums und können so den Wirkungsgrad erhöhen (Spechler et al. 2015). Aufgrund der hohen Kosten wird versucht, ITO durch andere Stoffe zu ersetzen. Dadurch kann die energetische Amortisationszeit¹⁶ gesenkt und die Kosten reduziert werden (Emmotta et al. 2012). Zu den aussichtsreichsten Kandidaten zählen nanostrukturierte Zinkoxid (ZnO)-Schichten oder Kohlenstoffnanoröhren (CNT) (Emmotta et al. 2012; Garcí a-Valverde et al. 2010).

Erste organische Solarzellen (OPV) finden bereits in Nischenmärkten Anwendung. Aufgrund der kostengünstigen Rohmaterialien (Kunststoff) und Herstellungsverfahren (durch

⁸ Cyano-Polyphenylene vinylene

⁹ Poly(3-hexylthiophen-2,5-diyl)

¹⁰ Poly(p-phenylen-vinylen)

¹¹ Wie z.B. Kupferphthalocyanin

¹² Sphärische symetrische **Modifikationen** des Kohlenstoff (C60 bekannt als Buckyball das am besten erforschte Fulleren)

¹³ Modifizierung von Fulleren durch Anlagerung von Seitenketten um gewünschte Eigenschaften zu erreichen

¹⁴ PCBM: [6,6]-Phenyl-C61Buttersäuremethylester) ist eine chemische Verbindung aus der Gruppe der Fullerene und ein organischer n- leitender Halbleiter

¹⁵ Wird als Anodenmaterial in OPV eingesetzt aber auch in OLED, LCD und Touchscreens

¹⁶ Die energetische Amortisation definiert den Zeitpunkt, ab dem z.B. eine Photovoltaik oder Windenergieanlage mehr Energie produziert als an Primärenergie für ihre Fertigung verbraucht wurde.

Druckverfahren) sowie der flexiblen Formgebung haben sie ein hohes Potenzial, nicht nur bei der Versorgung mobiler Elektronikgeräte. Weitere Anwendungspotenziale bieten sich für autarke und mobile sowie produktintegrierte Applikationen in der Verkehrsleit-, Sicherheits- und Telekommunikationstechnik an (Luther W. 2008). OPV Module, die bei wenig Licht und niedrigem Einfallswinkel noch in der Lage sind, relativ hohe Leistung zu erzielen, werden bereits vereinzelt im Fassadenbereich von Gebäuden eingesetzt. Anwendungen im Automobilbereich befinden sich derzeit noch in der Forschung und Entwicklung.

Aufgrund des geringen Wirkungsgrades von 2 bis 4 % sowie der geringen Lebensdauer (3 bis 5 Jahre) konnte sich die OPV noch nicht flächendeckend auf dem Markt durchsetzen (Darling et al. 2013; PV-Magazin 2014).

2.2 Windenergieanlagen

Für den Windenergiemarkt wird in den nächsten Jahren weltweit mit Wachstumsraten im zwei-stelligen Bereich gerechnet. Die Windenergie deckte im Jahr 2015 bereits 11,4 % des europäischen Strombedarfs (The European Wind Energy Association – EWEA 2016); Für das Jahr 2020 werden 12 % prognostiziert (Joint Research Center – JRC 2015). Die installierte Leistung lag im Jahr 2015 weltweit bei 433 GW (REN21 2016). Die Stromgestehungskosten¹⁷ von Windenergieanlagen (WEA) an Land liegen in Deutschland bei etwa 0,04 bis 0,11 Euro/kWh und sind damit an geeigneten Standorten bereits wettbewerbsfähig im Vergleich zu Strom aus fossil befeuerten Kraftwerken (Fraunhofer-ISE 2013). Gemäß Prognosen des Fraunhofer ISE werden die Stromgestehungskosten von Windenergieanlagen ab 2020 unter denen von Braunkohlekraftwerken liegen (Fraunhofer-ISE 2013).

Einsatz von Nanomaterialien in Rotorblättern

Durch den Einsatz von Kohlenstoffnanoröhren¹⁸ (CNT) in Kompositmaterialien kann das Gewicht der Rotorblätter verringert und gleichzeitig die Stabilität erhöht werden. Dadurch wird der Einsatz größerer Rotorblätter ermöglicht und die Energieausbeute begünstigt. Außerdem kann durch die elektrische Leitfähigkeit von CNT die Gefahr der Beschädigung durch Blitzeinschläge reduziert werden (Villy et al. 2013). Der Einsatz von CNT in Kompositmaterialien für Anwendungen in WEA befindet sich noch im Stadium der Forschung und Entwicklung.

An Oberflächenbeschichtungen mit CNT oder Graphen¹⁹, die eine Eisbildung und Verschmutzung auf den Rotorblättern reduzieren, wird derzeit geforscht (Fraunhofer 2014; Raji et al. 2016). Hierdurch vermindert sich während der Nutzung eine Gewichtszunahme der Rotorblätter und die aerodynamischen Eigenschaften der Rotorblätter bleiben durch die Vermeidung von Luftwirbeln erhalten.

CNT eignen sich auch als Sensoren zur Messung der mechanischen Belastung auf den Rotorblättern: Ist die mechanische Belastung durch Sturm o.ä. zu hoch, kann der Betrieb eingestellt und so Schäden vermieden werden (Virginia Tech 2010).

¹⁷ Stromgestehungskosten bezeichnen die Kosten, die für die Energieumwandlung von einer Energieform in elektrischen Strom notwendig ist.

¹⁸ Kohlenstoffnanoröhren, auch CNT (engl.: carbon nanotubes), sind wenige Nanometer große röhrenförmige Strukturen aus Kohlenstoff.

¹⁹ Graphen ist eine Modifikation des Kohlenstoffs mit einlagiger Kohlenstoffschicht und somit einer zweidimensionalen Struktur.

Einsatz von Nanomaterialien im Getriebe

WEA bestehen aus vielen beweglichen Bauteilen, wie Getriebe und Triebstrang, bei denen es aufgrund von Reibung zu einem Wirkungsgradverlust kommt. Durch nanotechnische Beschichtungen von Zahnrädern, Lagern und Kugellagern können diese widerstandsfähiger und langlebiger gestaltet werden (Luther W. 2008). Die Anwendung von Schmierstoffen, die Nanomaterialien wie Graphen oder nanoskaliges SiO₂ enthalten kann der Reibungswiderstand verringert werden (Lia et al. 2006; Kim et al. 2011). Durch den Einsatz von Graphen in Kombination mit Nanodiamantpartikeln und diamantähnlichem Kohlenstoff ist es sogar möglich, eine Supraschmierfähigkeit zu erreichen, bei der fast keine Reibung auftritt (Berman et al. 2015). Supraschmierstoffe, die aus nanoskaligen Stoffen wie Graphen bestehen, sind derzeit noch in der Forschung und Entwicklung. So kann durch den Einsatz von Graphen als Additiv die Reibung im Vergleich zu Öl ohne Additive um 20 % verringert werden (Berman et al. 2015).

Einsatz von Nanomaterialien im Generator

Im Generator von WEA kommen je nach Anlagentyp starke Permanentmagnete zur Erzeugung des erforderlichen Magnetfeldes zum Einsatz. Dabei werden große Erwartungen in die Verwendung von nanoskaligen Metallen gesetzt. Der Einsatz von nanoskaligem Neodym (Nd) und Eisen ermöglicht die Produktion von Magneten mit verringertem Materialeinsatz (Wecker et al. 1995; Möller et al. 2013).

Neodym- Magnete basieren auf einer Neodym- Eisen- Bor Legierung (Nd₂Fe₁₄B) mit einem Neodymgehalt von etwa 27 %. Um die Eigenschaften gezielt anzupassen werden auch andere Elemente der seltenen Erden in der Legierung eingesetzt wie Praseodym, Dysprosium oder Kobalt (Buchert et al. 2012). 2008 wurden ca. 70 % der weltweiten Nd-Produktion für Nd-Magnete aufgewendet, das entspricht ca. 18.200 Tonnen, mit steigender Tendenz (Schüler et al. 2011; Möller et al. 2013).

2.3 Brennstoffzellen und Wasserstoffherstellung

Brennstoffzellen weisen eine hohe Energiedichte auf und können geräusch- und emissionsarm betrieben werden. Daraus resultieren ihre Vorteile für den Einsatz in der Schiff-, Raum-, und Luftfahrt, sowie im Schienen- und Automobilverkehr als auch im Heizungs- und Kraftwerksbereich. Eine Brennstoffzelle wandelt chemische Energie direkt in elektrische Energie um. Dabei dissoziiert der Energieträger, vor allem Wasserstoff, an der Anode in Protonen und Elektronen. Durch die Reaktion von Protonen, Elektronen und Sauerstoff an der Kathode bildet sich Wasser und es fließt Strom. Derzeit haben Brennstoffzellen praktisch keine oder nur eine sehr geringe Bedeutung.

Zur Herstellung des chemischen Energieträgers Wasserstoff gibt es drei Methoden

- die Elektrolyse
- die Photolyse
- die Katalyse.

In den ersten beiden Verfahren spielen Nanomaterialien zur Effizienzsteigerung eine Rolle. Die Katalyse nutzen Heizungs- Brennstoffzellen, um Erdgas zu Wasserstoff katalytisch zu reformieren, v.a. PEM- Brennstoffzellen.

Bei der Elektrolyse werden bisher Platinelektroden eingesetzt. Durch den Einsatz von Nanomaterialien auf den Oberflächen der Elektrodenplatten können die Effizienz und die Geschwindigkeit des Prozesses erhöht und die Kosten durch den Ersatz von Platin durch neuartige Werkstoffe gesenkt werden. So kann z.B. Molybdänsulfid als Elektrodenmaterial eingesetzt werden. Die Kosten liegen bei einem Bruchteil von Platin. Allerdings muss das Material in Nanometer-dicken Schichten zum Einsatz kommen, um seine Aktivität zu steigern und den Wirkungsgrad zu erhöhen (Chou et al. 2015).

Um den Wirkungsgrad der Brennstoffzellen zu erhöhen, kann neben der Optimierung der Elektroden auch die selektive Diffusion durch die Membran verbessert werden. Dies kann zum Beispiel erreicht werden, wenn nur Protonen die Membran passieren können (Achtly et al. 2015). So kann durch Graphen, das keine perfekte Bienenwabenstruktur aufweist, sondern bei dem Kohlenstoffatome in der Gitterstruktur fehlen, der Anteil an Wasserstoffprotonen, die durch die Membran diffundieren, durch eine bessere Selektivität erhöht werden (Achtly et al. 2015).

Bei der Photolyse wird unter Einwirkung von Licht eine chemische Bindung (hier: $2 \text{H}_2\text{O}$ zu 2H_2 und O_2) gespalten, wobei für die Spaltung neben dem Licht keine zusätzliche elektrische Energie benötigt wird. Das Anwendungspotenzial für Nanomaterialien in der Photolyse ist aufgrund ihrer hohen spezifischen Oberfläche groß. Photokatalytische Systeme mit nanoskaligem TiO_2 können Sonnenlicht als Energiequelle nutzen (Serrano et al. 2009). Den höchsten Wirkungsgrad mit fast 7 % zeigen TiO_2 -Nanoröhren (Erickson et al., 2011). Der Wirkungsgrad ist dabei abhängig von der Temperatur und der Länge und Form der Röhren. Dabei steigt die Wasserstoffausbeute proportional mit der Länge der Nanoröhren (Cebulla, 2010) und sinkt mit zunehmender Temperatur (Erickson et al. 2011).

Forschungsanstrengungen werden auch in die Entwicklung geeigneter Katalysatoren und Verbesserung der Durchführung vorhandener Systeme mit Hilfe zusätzlicher Co-Katalysatoren gesteckt. Bisher ist die Effizienz der rein photokatalytischen Systeme noch zu gering, um kommerziell umgesetzt zu werden.

Derzeit ist regenerativer Wasserstoff weder eine ökonomische noch ökologische Alternative zu erneuerbaren Energien (Nitsch 2002; Pehnt und Höpfner 2009). Ein Grund dafür ist u.a. Platin als Elektrodenmaterial, das sehr teuer und selten ist. Bei einer flächendeckenden Marktdurchdringung von Brennstoffzellen wären die weltweiten Platinressourcen innerhalb weniger Jahrzehnte aufgebraucht (Illuminato et al. 2010).

Zum Einsatz von Platin als Katalysator gibt es derzeit noch keine wirtschaftlichen Alternativen. Aus ökonomischen Gründen wird versucht, Platin durch andere Stoffe zu ersetzen, da ein Großteil der Kosten der Brennstoffzelle durch den Einsatz von Platin als Elektrodenmaterial entsteht.

Aufgrund ihrer geringen Größe und ihrer dadurch bedingten hohen Oberfläche eignen sich Nanomaterialien und nanostrukturierte Materialien im Besonderen als Elektroden und Membranmaterial. Dies macht sie auch für die Brennstoffzellenforschung interessant. Durch ihren Einsatz kann die Leistung der Brennstoffzellen verbessert und der Einsatz von seltenen Metallen wie Platin reduziert werden. Beispiele hierfür sind Nanomaterialien wie CNT, Graphen (Berger 2013) oder der Einsatz von stickstoffmodifiziertem Graphen als

Kathodenmaterial (Bai et al. 2013). Graphen, das an den äußeren „Kanten“ mit Iod modifiziert ist, liefert einen 33 % höheren Wirkungsgrad als herkömmliche Platinkathoden bei einer 20 % längeren Haltbarkeit (Jeon et al., 2013). Auch können nanoskalige Fäden aus Platin verwendet werden, die eine hohe Aktivität haben (Sun et al., 2008).

Eine weitere Möglichkeit, den Wirkungsgrad von Platinelektroden zu erhöhen, ist es, hohle nanoporöse Strukturen zu erzeugen. Aufgrund der durch die Porosität deutlich vergrößerten Oberfläche kann die katalytische Aktivität bis zu siebenmal höher als bei herkömmlichen Platinelektroden sein (Zhang et al. 2015).

3 Umweltaspekte

3.1 Umweltentlastungspotenzial

Die Emissionen, die bei der Herstellung, Nutzung und Entsorgung von erneuerbaren Energien, entstehen, basieren zum größten Teil auf indirekten Emissionsquellen, z.B. durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe, um die benötigte Energie für die Herstellung bereitzustellen (Umweltbundesamt - UBA 2014). Die Energierücklaufzeit (EPBT – energy payback time) oder energetische Amortisationszeit ist ein wesentlicher Faktor für die Lebenszyklusbetrachtung von Anlagen zur Nutzung von erneuerbaren Energien. Je geringer der Wert im Vergleich zur Lebensdauer ist, desto energetisch „günstiger“ ist es. Das Verhältnis der energetischen Amortisationszeit zur Lebensdauer ist der Erntefaktor (EROEI²⁰), der das Verhältnis der eingesetzten zur erzeugten Energie beschreibt. Je größer dieser Faktor ist, desto höher ist die energetische Amortisation. Das Treibhausgaspotenzial ist eine Maßzahl für den relativen Effekt des Beitrags zum Treibhauseffekt. Sie gibt also an, wie viel eine festgelegte Masse eines Treibhausgases zur globalen Erwärmung beiträgt. Als Vergleichswert dient Kohlenstoffdioxid; die Abkürzung lautet CO₂eq. Je geringer dieser Wert ist, desto geringer ist das Treibhausgaspotenzial der Energieerzeugung. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe trägt unterschiedlich stark zum Treibhauseffekt bei. Die Verbrennung von Kohle hat ein Treibhausgaspotenzial von über 1000 g CO₂-eq/kWh (Braunkohle 1.070,1, Steinkohle 919,0 g CO₂-eq/kWh), bei der Verbrennung von Erdgas werden 429,7 g CO₂-eq/kWh frei (Fthenakis et al. 2010; UBA 2013). Durch den Einsatz erneuerbarer Energieträger werden zunehmend treibhausgasintensive Stromerzeugungsarten verdrängt – die daraus resultierende Treibhausgasreduzierung steigt kontinuierlich an (UBA 2014).

Triebkräfte für den Einsatz von Nanomaterialien bei der Stromerzeugung in PV-Modulen, WEA und bei Brennstoffzellen sind im Allgemeinen neben der Kosteneinsparung die Steigerung des Wirkungsgrades und die Einsparung von Material und Energie. Häufig ist jedoch der Energieaufwand zur Herstellung von Nanomaterialien höher als von nicht-nanoskaligen Materialien. Neben einem höheren Energieaufwand kommt es zu einem höheren Verbrauch an Wasser und Lösemitteln und damit einhergehend steigt die Menge an potenziell gefährlichen Nebenprodukten (Illuminato and Miller 2010; UBA 2014). Dadurch haben Nanomaterialien häufig auch ein höheres Treibhausgaspotenzial als eine äquivalente Menge des gleichen Materials mit größeren Partikeln. Im Bereich der WEA sowie der Brennstoffzellentechnik befinden sich nanotechnische Anwendungen noch im Bereich der Forschung und Entwicklung und bisher sind wenige aussagekräftige Lebenszyklusanalysen

²⁰ Energy Returned on Energy Invested- Ist eine Kennziffer zur Beschreibung der Effizienz eines Kraftwerks

(LCA) zu diesen Anwendungen bekannt, sodass zu den Umweltentlastungen keine belastbaren Aussagen getroffen werden können. Im Bereich der Photovoltaik gibt es bereits einige Anwendungen, die Nanomaterialien oder Nanostrukturen enthalten, allerdings nur wenige LCA für nanomaterialhaltige Produkte. Einige sollen hier beispielhaft dargestellt werden.

Organische Photovoltaik

OPV-Module bestehen aus einfachen und leichten Basismaterialien wie PET Folien, die einen geringeren Energie- und Rohstoffaufwand im Vergleich zu siliziumbasierten PV-Modulen benötigen. Eines der größten Vorteile der organischen Photovoltaik ist die Möglichkeit, im Druckverfahren große Mengen preisgünstig und schnell zu produzieren. Allerdings ist der Einsatz von gefährlichen Lösemitteln wie Toluol, Chloroform und Dichlorbenzol sehr hoch, so dass sich Konflikte mit einer sauberen und nachhaltigen Energie ergeben. Allerdings wird an Möglichkeiten geforscht, weniger gefährliche Chemikalien sowie wasserlösliche Stoffe einzusetzen und den Energieaufwand zu reduzieren (Anctil 2011).

Obwohl Fullerene nur 0,3 % der Masse in organischen Solarzellen ausmachen, benötigen sie fast 20 % der eingesetzten Energie (Anctil 2011). Trotz des erhöhten Energieaufwands zur Fullerenherstellung ist der Gesamtenergieverbrauch zur Herstellung der OPV-Module niedriger als bei Herstellung herkömmlicher PV-Module. Das liegt zum einen an den geringen Materialeinsatzmengen und zum anderen an den niedrigen Temperaturen bei der Verarbeitung (Möller et al. 2013).

Derzeitig sind die CO₂-Emissionen im Lebenszyklus von OPV mit 80 gCO₂-eq/kWh fast doppelt so hoch wie von Siliziumsolarzellen (55,19 gCO₂-eq/kWh) (Darling et al. 2013; UBA 2013). Bei einer Weiterentwicklung der Technik wird davon ausgegangen, dass die Emissionen langfristig auf weniger als 2 g CO₂-eq/kWh sinken und damit geringer sein werden als bei jeder anderen Photovoltaiktechnik (Darling et al. 2013). Bei einem Wirkungsgrad von 10 % wie er im Labormaßstab bereits erreicht wurde, liegt die energetische Amortisationszeit bei wenigen Wochen (Lizin et al. 2013). Die eingesparte jährliche Primärenergie, bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 10 %, liegt bei fast 1400 MJ/m² (García-Valverde et al. 2010). Aufgrund ihrer flexiblen Eigenschaften kann Solarstrom auch an Standorten gewonnen werden, an denen es mit herkömmlichen Solarmodulen nicht möglich ist (Möller et al. 2014; Spechler et al. 2015).

Dünnschichtphotovoltaik

Dünnschichttechnologien haben aufgrund des geringen Halbleitermaterialverbrauchs ökologische Vorteile bei der Umweltverträglichkeit: Ihre energetische Amortisation liegt bei ca. 1 Jahr (Wild-Scholten 2010) und ist somit wesentlich kürzer als bei herkömmlichen Siliziumsolarzellen mit ca. 2 Jahren (Powalla 2010). In der LCA haben CdTe-PV-Module ein geringes Treibhausgaspotenzial, einen geringen Wasserverbrauch und haben die kürzeste energetische Amortisationszeit aller PV-Technologien mit einer energetischen Amortisationszeit von unter einem Jahr (Peng et al. 2013; Wild-Scholten 2013). Das Treibhausgaspotenzial von CdTe Dünnschicht solarzellen über den gesamten Lebenszyklus betrachtet ist halb so hoch wie bei herkömmlichen Siliziumsolarzellen und liegt bei weniger als 20 g CO₂-eq/kWh (Fthenakis et al. 2010). Die Emissionen von NO_x und SO₂ sind im

Lebenszyklus betrachtet mit 30 bzw. 60 mg/kWh etwa halb so hoch wie die Emissionen herkömmlicher PV Module (International Energy Agency - IEA 2011).

Es gilt zu bedenken, dass das Cadmium, das in vielen Dünnschichtmodulen eingesetzt wird, krebserzeugend und daher in vielen Anwendungen bereits verboten ist (Fthenakis 2004). Die Beschränkungen von gefährlichen Stoffen in Elektrogeräten wird in der RoHS-RL²¹ geregelt. Cadmium ist von diesen Regelungen bei Anwendungen in PV- Modulen ausgenommen (RoHS-RL 2011).

Quantenpunktsolarzellen

Noch sind die Wirkungsgrade von Quantenpunktsolarzellen gering und die Herstellung teuer. Ein entscheidender Nachteil von QDPV sind die toxischen Halbleitermaterialien aus denen die Module gefertigt werden. Da sich kommerziell erhältliche Quantenpunktsolarzellen mit hohen Wirkungsgraden noch im Forschungsstadium befinden, beruht das Umweltentlastungspotenzial auf Annahmen. So könnten die Module bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 14 % eine energetische Amortisationszeit von weniger als einem Jahr erreichen und damit weniger als herkömmliche siliziumbasierte PV Module. Das Treibhausgaspotenzial läge bei ca. 5 g CO₂-eq/kWh erzeugter elektrischer Leistung und somit bei einem Drittel von CdTe-Dünnschicht PV Modulen (Sengül et al., 2010). Die NO_x und SO₂ Emissionen über den kompletten Lebenszyklus betrachtet lägen mit 10 mg/kWh bzw. 20 mg/kWh unter den Emissionen anderer PV Techniken und weit unter den NO_x-Emissionen herkömmlicher Brennstoffe wie Kohle, Holz oder Öl mit 700 – 1400 mg NO_x/kWh (Sengül et al. 2010). Mögliche Schwermetallemissionen von QDPV fallen in der Herstellungs- und in der Entsorgungsphase im Lebenszyklus an. Die freiwerdenden Mengen wären mit weniger als 0,1 mg/kWh höher als die Schwermetallemissionen anderer PV Techniken, aber weit geringer als die Schwermetallemissionen, durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Dones et al. 2005; Sengül et al. 2010)

Farbstoffsolarzellen

Farbstoff-Solarzellen schneiden ökobilanziell – bezüglich der Energie-Amortisierung - besser ab als herkömmliche siliziumbasierte Solarzellen. So liegt die energetische Amortisationszeit von Farbstoffsolarzellen bei ca. 1,4 Jahren und wäre somit geringer als die herkömmlicher Solarzellen (Wild-Scholten et al. 2007), jedoch höher als die von QDPV und CdTe Dünnschichtmodulen. Das Treibhausgaspotenzial ist mit 60 g CO₂eq/kWh jedoch höher als bei anderen PV-Techniken (Sengül et al. 2010). Das liegt u.a. am hohen Energieverbrauch für das Glas und für die Modulherstellung. Durch den Einsatz von Folie oder dünnen Gläsern als Beschichtungsmaterial könnte das Treibhausgaspotenzial verringert werden (Wild-Scholten et al. 2007). Die SO_x- und NO_x-Emissionen im Lebenszyklus wären mit 200 bzw. 120 mg/kWh erzeugten Stroms vier Mal höher als bei herkömmlichen Siliziumsolarzellen oder Dünnschichtsolarzellen (Sengül et al. 2010).

Windenergieanlagen

Zum Einsatz von Nanomaterialien in WEA gibt es bislang nur sehr wenige Lebenszyklusanalysen (LCA). Die bisher existierenden beziehen sich auf den Einsatz von Kohlenstoffnanofasern (CNF) in der Kunststoffmatrix für die Rotorenherstellung. Durch den

²¹ Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten

Gehalt an CNF werden die mechanischen Eigenschaften verbessert, der Materialverbrauch verringert und die Lebensdauer erhöht. Dabei steigt jedoch der Energiebedarf für die Rotorenherstellung mit steigendem CNF-Gehalt an. Der Energie- und Lösemittelbedarf für CNF ist dabei höher als für die Herstellung von Aluminium oder Kunststoffen (PP²²). Allerdings kann durch eine innovative Verfahrensführung (Kreislaufführung) der Acetoneinsatz bei der CNF Herstellung verringert werden. Dabei beschränkt sich der Anteil von CNF in der Kunststoffmatrix auf 1 – 5 % , da diese in höheren Konzentrationen agglomerieren (Movva et al. 2009). Durch CNF-Kunststoff modifizierte Rotorblätter kann unter optimalen Bedingungen (Erhöhung der Lebensdauer, Verringerung des Materialeinsatzes) eine Erhöhung des Erntefaktors von 20 auf 35 erreicht werden (Gao 2012). Das bedeutet, dass sich unter Voraussetzung einer optimalen Prozessführung die Energieeffizienz der WEA über den Lebenszyklus leicht verbessern kann (Jungbluth et al. 2005; Merugula et al. 2012).

3.2 Auswirkungen auf die Umwelt

In den oben aufgeführten Techniken zur Energieerzeugung können verschiedenste Nanomaterialien eingesetzt werden, wie kohlenstoffbasierte Nanomaterialien wie CNT oder Graphen, verschiedene Quantendots (QD), sowie Metalle und Metalloxide. Für QD (vor allem für CdSe/ZnS) liegen erste Daten zu Wirkung in der Umwelt vor. Danach wird die Toxizität zum einen über die Freisetzung toxischer Metallionen hervorgerufen. Dabei wird die Freisetzung der Ionen durch mögliche Oberflächenmodifikationen beeinflusst (King-Heiden et al. 2009). Zum anderen wird aber auch die toxische Wirkung über andere, von der Ionentoxizität unabhängigen Mechanismen diskutiert (Pace et al. 2010). Studien, die toxische Wirkungen von QD auf Umweltorganismen zeigen, liegen vor allem für Mikroorganismen (Pereira et al. 2011) und aquatische Organismen wie Flohkrebse (Kim et al. 2010; Pace et al. 2010) und Embryonen des Zebrafisches (King-Heiden et al. 2009) vor. Unzureichendes Wissen besteht zu chronischer Toxizität und Toxizität auf terrestrische Lebewesen. Die Weitergabe von QD über die Nahrungskette wurde für einfache Nahrungsketten-Versuche mit aquatischen Organismen nachgewiesen (Lee and An 2014). Transfer von Pflanzen auf Raupen wurden ebenso gefunden (Koo et al. 2015).

Das Verhalten und Schicksal von Fullerenen in der Umwelt ist bisher wenig untersucht. Es ist allerdings bekannt, dass sie in der aquatischen Umwelt einem lichtabhängigen Abbau unterliegen. Eine limitierte Anzahl von ökotoxikologischen Studien mit Fullerenen weist auf ein eher geringes toxisches Potenzial hin (Petersen und Henry 2011), welches allerdings deutlich von den individuellen Modifikationen der Fullerene abhängt, die deren Wasserlöslichkeit und damit die Verfügbarkeit für Umweltorganismen verändern. Studien zur ökotoxischen Wirkung auf terrestrische oder sedimentbewohnende Organismen liegen kaum vor.

CNT und Graphen sind in den letzten Jahren verstärkt hinsichtlich ihrer (öko-)toxischen Wirkung untersucht worden. CNT wie auch andere kohlenstoffbasierte Nanomaterialien sind unter normalen Umweltbedingungen nur schwer abbaubar (Flores-Cervantes et al. 2014). Aus den Untersuchungen zu Schadwirkungen auf Umweltorganismen wird deutlich, dass die ökotoxische Wirkung von z.B. CNT deutlich von Art, Länge, Durchmesser und

²² Polypropylen

Funktionalisierung abhängig ist. Auch mögliche Verunreinigungen beeinflussen die Ökotoxizität (z.B. Mwangi et al. 2012). Von hoher Umweltrelevanz ist die Fähigkeit vieler kohlenstoffbasierter Nanomaterialien mit vorhandenen Umweltschadstoffen zu interagieren und so deren Mobilität in der Umwelt zu beeinflussen (Farre et al. 2009, Apul et al. 2013, Qi et al. 2014), was zu einer veränderten Verfügbarkeit der Umweltschadstoffe gegenüber Umweltorganismen führen kann.

Detaillierte Angaben zur Umweltrelevanz von CNTs und Graphen finden sich im UBA-Datenblatt zum Einsatz von Nanomaterialien in der Energiespeicherung (UBA, 2015). Die Toxizität von Silber beziehungsweise seiner Ionen ist eingehend untersucht (Ratte 1999). Silber wirkt toxisch auf Wasserorganismen. Silber (als Pulver und auch als Nanomaterial) wird im Rahmen der CLP-VO²³, abhängig von der Form als gewässergefährdend Kategorie Akut 1 und Chronisch 1 eingestuft²⁴. Zahlreiche Studien beschreiben die toxische Wirkung von Nanosilber auf aquatische Organismen (z.B. zusammengefasst in Fabrega et al. 2011). Auch schädigende Wirkungen auf Bodenorganismen sind beschrieben (Schlich et al. 2013). Neben der toxischen Wirkung der Ionen können zusätzliche Effekte durch die Partikel nicht ausgeschlossen werden (Notter et al., 2014; Gil-Allué, 2015; Li et al., 2015).

Die akute toxische Wirkung von ZnO Nanomaterialien auf aquatische und terrestrische Organismen ist beschrieben (zusammengefasst von Ma et al. 2013). Ähnlich wie bei Silber wird angenommen, dass die Toxizität v.a. über die Abgabe toxischer Zn²⁺ Ionen vermittelt wird. Als weiterer partikelinduzierter Mechanismus der toxischen Wirkung wird die Bildung von Sauerstoffradikalen diskutiert, die Zellschäden hervorrufen. Darüber hinaus verfügen viele ZnO Nanomaterialien aber auch über fotokatalytische Eigenschaften und könnten so unter Einwirkung von Sonnenlicht lichtinduzierte Toxizität auslösen.

TiO₂ Nanomaterialien wurden in den letzten Jahren intensiv untersucht. Das Verhalten in der Umwelt und die ökotoxische Wirkung von TiO₂ Nanomaterialien werden in komplexer Weise von Eigenschaften wie Partikelgröße, Kristallstruktur, Oberflächeneigenschaften und Fotoaktivität beeinflusst. Ökotoxische Wirkungen von nanoskaligem TiO₂ konnten in verschiedenen Tests mit etablierten Testorganismen nachgewiesen werden, zumeist allerdings erst bei hohen Konzentrationen, die in der Umwelt derzeit nicht zu erwarten sind. Studien zeigen, dass UV-Bestrahlung im Wellenlängenbereich des natürlichen Sonnenlichts die schädigende Wirkung von fotoaktivem Nano TiO₂ deutlich verstärkt (Ma et al., 2012). Dies ist vor allem für die Betrachtung einer schädigenden Wirkung auf aquatische Organismen relevant.

Zu möglichen schädigenden Umweltauswirkungen von nanoskaligem Neodym, nanoskaligem Platin oder nanoskaligem Molybdänsulfid liegen derzeit noch keine Daten vor.

Auf Grund des eingeschränkten Freisetzungspotenzials wird das Umweltrisiko durch Nanomaterialien, die in den oben beschriebenen Systemen zur Energieumwandlung eingebunden sind, trotz der gefundenen ökotoxikologischen Wirkung, während der

²³ Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen: CLP-Verordnung (Classification, Labelling and Packaging)

²⁴ Einstufungen von Inverkehrbringern finden sich im Einstufungs- und Kennzeichnungsverzeichnis der ECHA <http://echa.europa.eu/information-on-chemicals/cl-inventory-database/-/discli/details/99642>

Gebrauchsphase als gering eingeschätzt. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass die Nanomaterialien, die in PV - Modulen, WEA und Brennstoffzellen zum Einsatz kommen, während der Produktion, durch unsachgemäßen Gebrauch und während der Entsorgung sowie damit verbundene Verwitterungs- oder Abnutzungsvorgänge freigesetzt werden könnten. Die Einschätzung des potenziellen Risikos für die Umwelt gilt es in Anbetracht der steigenden Einsatzbereiche und -mengen und im Einklang mit neu generiertem Wissen zur Exposition und zu Effekten periodisch zu aktualisieren.

4 Rechtliche Rahmenbedingung

REACH/ CLP

Die für die Herstellung von Solarzellen oder Elementen von Windenergieanlagen innerhalb der EU eingesetzten Stoffe unterliegen den Vorgaben der REACH-VO (EG) Nr. 1907/2006²⁵ und der CLP-VO (EG) Nr. 1272/2008²⁶. Soweit Solarzellen oder Elemente von Windenergieanlagen in die EU importiert werden, greifen nur die vergleichsweise geringen REACH-Pflichten für Erzeugnisse.

Nanomaterialien werden grundsätzlich zwar im Rahmen der Europäischen Chemikalienverordnung REACH mit erfasst, es bestehen aber bisher keine spezifischen Anforderungen, die die Besonderheiten von Nanomaterialien hinsichtlich der Datenbasis und Risikobewertung berücksichtigen (Schwirn et al. 2014). Auf europäischer Ebene werden zurzeit verschiedene Anpassungsoptionen diskutiert. Auch die Bundesoberbehörden (BAuA, BfR und UBA)²⁷ haben dazu ein gemeinsames Konzept entwickelt (UBA et al. 2013).

PV – Recycling

Die Verwertung von Elektroaltgeräten ist im Elektroggesetz [ElektroG] geregelt, welches die europäische WEEE-Richtlinie²⁸ zur Regelung des Inverkehrbringens, der Rücknahme und der Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (EAG) in deutsches Recht umsetzt. Gemäß dem novellierten ElektroG vom 20.10.2015 fallen PV-Module seit dem 01.02.2016 in den Anwendungsbereich des ElektroG (nach § 2 Abs. 1 Nr. 4 i.V.m. § 46 Abs. 9). Seit diesem Stichtag müssen Besitzer Alt-PV-Module einer separaten Abfallerfassung zuführen. Aus privaten Haushalten stammende PV-Module aller Hersteller werden an kommunalen Sammelstellen für Elektro- und Elektronikaltgeräte gemeinsam in einer separaten Sammelgruppe erfasst und im Rahmen der im ElektroG vorgesehenen, von der Stiftung ear²⁹ als beliehene Stelle koordinierten Abholkoordination einem Hersteller zur ordnungsgemäßen Entsorgung zugewiesen. Daneben kann die Erfassung auch durch Händler oder Eigenrücknahme der Hersteller erfolgen.

²⁵ Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH)

²⁶ Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen

²⁷ BAuA – Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin; BfR – Bundesinstitut für Risikobewertung; UBA - Umweltbundesamt

²⁸ WEEE - Waste of Electrical and Electronic Equipment; deutsch: Elektro- und Elektronikgeräte-Abfall

²⁹ Elektro- Altgeräte- Register

Für die Rücknahme von nicht aus privaten Haushalten stammenden Alt-PV-Modulen ist entscheidend, ob das Inverkehrbringen vor oder nach dem o.g. Stichtag erfolgte. Wurden diese EAG nach dem Stichtag in Verkehr gebracht, ist der jeweilige Hersteller für die Rücknahme verantwortlich, solange kein anderer freiwillig oder aufgrund vertraglicher Vereinbarung die Entsorgungsverantwortung übernommen hat. Bei Altgeräten, die vor dem 01.02.2016 in Verkehr gebracht wurden, treffen die Pflichten nach ElektroG den Letztbesitzer (§ 19 Abs. 1 Satz 2). Der jeweilige Entsorgungspflichtige ist für die ordnungsgemäße und fachgerechte Behandlung (inkl. Prüfung auf Vorbereitung zur Wiederverwendung, § 20) und Verwertung (§ 22) der Geräte verantwortlich. Dabei ist für Altgeräte der Gerätekategorie 4 eine Verwertungsquote von mindestens 75 % und eine Recyclingquote von mindestens 65 % zu erreichen.

Nanospezifische Regulierungen hinsichtlich technischer Anforderungen an die Behandlung existieren bislang nicht

Windenergieanlagen-Rückbau

Als bauplanungsrechtliche Zulässigkeitsvoraussetzung muss vor der Genehmigung von WEA im baurechtlichen Außenbereich eine Verpflichtungserklärung zum Rückbau der Anlagen nach dauerhafter Nutzungsaufgabe abgegeben werden (§ 35 Abs. 5 S. 2 BauGB). Dies gilt allerdings nicht für WEA, die im Geltungsbereich eines Bebauungsplans errichtet werden. Hier kann die planende Kommune gemäß § 9 Abs. 2 S. 1 Nr. 2 BauGB im Bebauungsplan entsprechende Festsetzungen zu Umfang und Zeitpunkt des Rückbaus von Altanlagen an anderer Stelle (auch außerhalb des B-Plangebietes) treffen. Im Ergebnis ist somit die Rückbauerklärung Teil der Zulassungsvoraussetzungen für WEA im Außenbereich.

5 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Um die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (EE) nachhaltig und zuverlässig zu gestalten, müssen die Systemwirkungsgrade erhöht, der Einsatz an kritischen Rohstoffen verringert und die Systemkosten reduziert werden (UBA 2014). Dafür ist es wichtig die eingesetzten Materialien und Techniken hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit und Verfügbarkeit kritisch zu begleiten.

Um die Ziele der Energiewende zu erreichen ist ein weiterer Ausbau der erneuerbaren Energien notwendig. Insbesondere der Stromerzeugung durch Windenergieanlagen und Photovoltaik kommt hierbei eine herausragende Rolle zu. Um die fluktuierende Stromerzeugung aus Wind und Sonne bedarfsabhängig bereit zu stellen, werden sich vor allem ab sehr hohen EE-Anteilen am Bruttostromverbrauch- verschiedene Speicher und Umwandlungstechnik etablieren (UBA 2014). Eine mögliche Umwandlungstechnik ist die Wasserstoffkonversion mit anschließender Nutzung durch die Brennstoffzelle. Obwohl diese Technik schon seit längerem erforscht wird, ermöglicht die Nanotechnik in diesem Bereich neue Möglichkeiten.

Zur Bereitstellung erneuerbarer Energien aus Sonnenlicht an lichtschwachen Standorten oder für herkömmliche PV- Techniken ungeeigneten Standorten, werden sich voraussichtlich neuartige Photovoltaikmodule durchsetzen. Das Ziel muss es sein, die Techniken der Energieumwandlung sicher zu gestalten, um eine mögliche Gefahr für Mensch und Umwelt im Lebenszyklus auszuschließen.

Das Umweltverhalten von Nanomaterialien in den verschiedenen Anlagen zur Stromerzeugung und ihre Auswirkungen auf Mensch und Umwelt sind noch nicht abschließend geklärt. Es besteht weiterer Forschungsbedarf in folgenden Bereichen (UBA 2014):

- Überprüfung des Einsatzes und Substitutionsmöglichkeiten von knappen & kritischen Rohstoffen und damit einhergehender Umweltbe- und -entlastungseffekte
- Untersuchung der möglichen Freisetzung von Nanomaterialien sowie deren Verhalten in der Umwelt und die Wirkung auf Mensch und Umwelt im gesamten Lebenszyklus, einschließlich der Entsorgung
- Überprüfung und Förderung der Recyclingmöglichkeiten zur Rückgewinnung der eingesetzten Rohstoffe um geschlossene Kreisläufe zu schaffen

6 Fazit

Das Umweltbundesamt hält die Nutzung von Nanomaterialien und Nanostrukturen bei der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien für eine technisch gangbare Zukunftsentwicklung um eine nachhaltige Energieversorgung durch den verstärkten Einsatz von erneuerbaren Energien zu erreichen. Für das Umweltbundesamt ist die frühzeitige Prüfung der Umweltverträglichkeit neuer Techniken vor deren breiter Einführung ein wichtiges Anliegen. Dies gilt insbesondere dann, wenn neuartige Stoffe wie Nanomaterialien zum Einsatz kommen und auf ihrem Lebensweg in die Umwelt gelangen können. Nicht zuletzt ist die Erforschung neuer Speicher- und Umwandlungstechniken wichtig, die das fluktuierende Stromangebot der erneuerbaren Energien bedarfsgerecht bereitstellen können. Bei geschlossenen Produktionsverfahren, bestimmungsgemäßem Gebrauch und sachgerechter Entsorgung geht nach derzeitigem Kenntnisstand kein Umweltrisiko von Nanomaterialien in Brennstoffzellen, PV Modulen, WEA und thermoelektrischen Materialien aus. Diese Rahmenbedingungen sind allerdings bisher nur teilweise implementiert. Daher gilt es die Einschätzung des potenziellen Umweltrisikos in Anbetracht der steigenden Einsatzbereiche und –mengen und im Einklang mit neu generiertem Wissen zu Umweltexposition und –Effekten fortlaufend zu aktualisieren. Offene Fragen bestehen hinsichtlich der Bedeutung für den Rohstoffverbrauch und der Möglichkeiten der Rückgewinnung, insbesondere von seltenen Rohstoffen. Hierfür liegen bisher nur unzureichende Daten vor. Das Umweltbundesamt empfiehlt daher, diese Themenfelder weiter zu untersuchen.

7 Literaturverzeichnis

Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien - AGEE-Stat. 2016. Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2015. Berlin: BMWi, 2016

Anctil, A (2011) Fabrication and life cycle assessment of organic photovoltaics. Rochester : Rochester Institute of Technology, 2011

Apul, OG; Wang, Q; Zhou Y; Karanfil T (2013): Adsorption of aromatic organic contaminants by graphene nanosheets: comparison with carbon nanotubes and activated carbon. *Water Research* 47 (4), S. 1648-1654

Achtyl, JL; Raymond, R; Unocic, LX; Yu, C; Muralikrishna, R; Weiwei, Z; Robert, LS; Ivan, VV; Pasquale, FF; Panchapakesan, G; David, JW; Sheng, D; Adri, CT; Matthew, N; Franz, M (2015): Geiger Aqueous Proton Transfer Across Single Layer Graphene, Cornell University Library.

Bai, J; Qianqian, Z; Lv, Z; Donga L; Hongzhou, D; Jianhua, Y (2013): Nitrogen-doped graphene as catalysts and catalyst supports for oxygen reduction in both acidic and alkaline solutions. *International Journal of Hydrogen Energy* 38 (6); Februar 2013, S. 1413-1418

Berger, M (2013): Fuel cells from gelatin. 2013, Nanowerk

Berger, S; Crawley, T (2011). *Energy Organic Photovoltaics*. Observatory Nano. März 2011, 12

Berman, D; Deshmukh, SA; Sankaranarayanan, SKRS; Erdemir, A; Sumant, AV (2015): Macroscale superlubricity enabled by graphene nanoscroll formation. *Science* S. 1118-1122

Brown, A; Green, M (2002): Detailed balance limit for the series constrained two terminal tandem solar cell. *Physica E* 14, S. 96–100

Buchert, M; Manhart, A; Bleher, D; Pingel, D (2012): Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten. LANUV-Fachbericht 38

Cai, J; Chen, Z; Li, J; Wang, Y; Xiang, D; Zhang, J; Li, H (2015): Enhanced conversion efficiency of dye-sensitized solar cells using a CNT-incorporated TiO₂ slurry-based photoanode. *AIP Advances* 5

Cebulla, E (2010): *Meta-Roadmap Nanomaterialien . Zukünftige Entwicklungen und Anwendungen*. s.l. :VDI, 2010

Chou, S; Sai, N; Lu, P; Coker, EN; Liu, S; Artyushkova, K; Luk, TS; KB; Brinker C (2015): Understanding catalysis in a multiphasic two-dimensional transition metal dichalcogenide. *Nature Communications* 8311

Chuang, CHM; Brown, PR; Bulović, V; Bawendi, MG (2014) Improved performance and stability in quantum dot solar cells through band alignment engineering. *Nature Materials* 13 (8), S. 796–801

Ctortecka, B (2009): *Max-Planck-Innovation*. [Online] 09. November 2009. [Zitat vom: 11. November 2015.] <http://www.max-planck-innovation.de/de/aktuelles/pressemitteilungen/news.php?Max-Planck-Innovation%20vergibt%20an%20Solexel%20Lizenz%20f%26uuml%3Br%20innovative%20D%26uuml%3Bnnschicht-Solarzellen-Technologie&id=1503>.

Darling, SB; Youc, F (2013): The case for organic photovoltaics. RSC Advanced 3, S. 17633-17648

Dieckmann, B; Rosenthal, E (2014): Energie - Physikalische Grundlagen ihrer Erzeugung, Umwandlung und Nutzung. Bonn: Springer, 2014

Dones R, Heck T, Bauer C, Hirschberg S, Bickel P, Preiss P, Panis LI, De Vlieger I (2005): Externalities of energy: extension of accounting framework and Policy applications. 2005

Dyakonov, V (2003): Organische Solarzellen. FVS • PV-UNI-NETZ. 2003

Emmotta, CJM; Urbinaa, A; Nelsona, J (2012): Environmental and economic assessment of ITO-free electrodes for organic solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells. 97, S. 14–21

Erickson, D; Sinton, D; Psaltis, D (2011): Optofluidics for energy applications. Nature Photonics. 11, S. 583–590

European Wind Energy Association - EWEA (2016): Wind in Power - 2015 European Statistics. s.l. : The European Wind Energy Association, 2016

Fabrega, J; Luoma, SN; Tyler, CR; Galloway, TS; Lead, JR (2011): Silver nanoparticles: behaviour and effects in the aquatic environment. Environ Int. 37 (2), S. 517-31

Farré, M; Gajda-Schranz, K; Kantiani, L; Barceló, D, (2009): Ecotoxicity and analysis of nano-materials in the aquatic environment. Analytical and Bioanalytical Chemistry . 393 (1), S. 81-95

Flores-Cervantes, DX; Maes, HM; Schaffer, A; Hollender, J; Kohler, HP (2014): Slow biotransformation of carbon nanotubes by horseradish peroxidase. Environmental Science & Technology. 48 (9), S. 4826-4834

Fraunhofer-ISE (2016): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg : s.n., 2016

Fraunhofer (2012) Fraunhofer ISE. Inhouse Workshop. Dezember 2012

—. (2014): Fraunhofer Institut. [Online] 01. 12. 2014.

<https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2014/Dezember/smarteres-anti-eissystem-fuer-rotorblaetter.html>

—. (2015): Hintergrundinformation. 2015

Fraunhofer-IFAM (2014): Energie aus Abwärme - Thermoelektrische Materialien für industrielle Anwendungen. Dresden: 2014

Fraunhofer-ISE (2013): Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien. s.l. : Fraunhofer ISE, 2013

Fraunhofer-ISE, Klimm, E. und Lorenz, T. (2013) Can anti soiling coating on solar glass influence the degree of performance loss of time of pv modells drastically? 2013

Fthenakis, VM; Kim, HC (2010): Photovoltaics: Life-cycle analyses. Solar Energy. 85, S. 1609–1628

Fthenakis, VM (2004): Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 8 (4), S. 303–334

Gao, F (2012): Advances in Polymer Nanocomposites - Types and Applications. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. 978-1-84569-940-6

García-Valverde, R; Cherni, JA; Urbina, A (2010): PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS. Life cycle analysis of organic photovoltaic technologies. 18, S. 535–558

Gil-Allué, C; Schirmer, K; Tlili, A; Gessner, MO; Behra, R (2015): Silver Nanoparticle Effects on Stream Periphyton During Short-Term Exposure. Environ Sci Technol. 49, S. 1165-1172

Glatthaar, M (2007): Zur Funktionsweise organischer Solarzellen auf der Basis interpenetrierender Donator/Akzeptor-Netzwerke. 2007

Gräfe, A (2015) Untersuchungen zu alternativen Herstellungsprozessen von Quantenpunkt-Solarzellen. Hamburg : s.n., 2015

Grätzel, M; Schwan, B (2010) Heise. 31 % Wirkungsgrad sind mit intensiver Forschung drin. [Online] 23. Juni 2010. [Zitat vom: 01. Oktober 2015.] <http://www.heise.de/tr/artikel/31-Prozent-Wirkungsgrad-sind-mit-intensiver-Forschung-drin-1027456.html>

Green, MA; Emery, K; Hishikawa, Y; Warta, W; Dunlop, DE (2014): Solar cell efficiency tables. Progress in Photovoltaics: Research and applications. 23, S. 1-9

Han, KS; Shin, JH; Yoon, WY; Heon LH (2011) Enhanced performance of solar cells with anti-reflection layer fabricated by nano-imprint lithography. Solar Energy Materials and Solar

Cells. 95 (1), S. 288–291

Hariksin, R; Desilvestro, H (2011) Long-term stability of dye solar cells. Solar Energy Nr. 85. 2011, S. 1179- 1188

Hu, G; Nitze, F; Gracia-Espino, E; Ma, J; Barzegar, HR; Sharifi, T; Jia, X; Shchukarev, A; Lu,

Lu; Ma, C; Yang, G; Wågberg, T (2014): Small palladium islands embedded in palladium–tungsten bimetallic nanoparticles form catalytic hotspots for oxygen reduction. Nature Communication 5. Oktober 2014

International Energy Agency - IEA (2011) Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems. New York : s.n., 2011. Report IEA-PVPS T12-02:2011

Illuminato, I; Miller, G (2010); Nanotechnology, climate and energy: over-heated promises and hot air? s.l. : Friends of the earth, 2010

IZT, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung -. 2011. Kritische Rohstoffe für Deutschland. 2011

Jeon, IY; Choi, HJ; Choi, M; Seo, JM; Jung, SM; Kim, MJ; Zhang, S; Zhang, L; Xia, Z; Dai, L;

Park, N; Baek, JBJ (2013): Facile, scalable synthesis of edge-halogenated graphene nanoplatelets as efficient metal-free electrocatalysts for oxygen reduction reactio. Scientific Reports 3. Juni 2013, S. 1810

Johnson, D (2014): IEEE Spectrum. [Online] 30. Mai 2014.
<http://spectrum.ieee.org/nanoclast/green-tech/solar/quantum-dot-solar-cells-break-conversion-efficiency-record>

Johnson, RC (2008): ee times. MIT claims 24/7 solar power. [Online] 7. Juli 2008. [Zitat vom: 1. Oktober 2015.] http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1271665

Jungbluth, N; Bauer, C; Dones, R; Rolf, F (2005): Life cycle assessment for emerging technologies: Case studies for photovoltaic and wind power. International Journal of Life Cycle Assessment. 10, S. 24–34

Kim, KS; Lee, HJ; Lee, C; Lee, SK; Jang, H; Ahn, JH; Kim, JH; Lee, HJ (2011): Chemical Vapor Deposition-Grown Graphene: The Thinnest Solid Lubricant. ACS Nano. 5(6), S. 5107–5114

Kim, J; Park, Y; Yoon, TH; Yoon, CS; Choi, K (2010): Phototoxicity of CdSe/ZnSe quantum dots with surface coatings of 3-mercaptopropionic acid or tri-n-octylphosphine oxide/gum arabic in *Daphnia magna* under environmentally relevant UV-B light. Aquat Toxicol. 97(2): S. 116-24.

King-Heiden, TC; Wiecinski, PN; Mangham AN, Peterson RE (2009): Quantum dot nanotoxicity assessment using the zebrafish embryo. Environ Sci Technol. 43(5): S. 1605-11.

Koo, Y; Wang, J; Zhang, Q; Zhu, H; Chehab, EW; Colvin, VL; Alvarez, PJ; Braam, J. (2015) Fluorescence reports intact quantum dot uptake into roots and translocation to leaves of *Arabidopsis thaliana* and subsequent ingestion by insect herbivores. Environ Sci Technol, 49(1): S. 626-32.

Krebs, FC; Tromholt, T; Jørgensen, M (2010): Upscaling of polymer solar cell fabrication using full roll-to-roll processing. Nanoscale. 2, S. 873–886

Lare, C; Yin, G; Polman, A; Schmid, M (2015): Light Coupling and Trapping in Ultrathin

Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells Using Dielectric Scattering Patterns. ACS Nano. 8. September 2015

Lee, WM; An, YJ (2015): Evidence of three-level trophic transfer of quantum dots in an aquatic food chain by using bioimaging. Nanotoxicology, 9, S. 407-12.

- Li, L; Wu, H; Peijnenburg, WJ; Gestel, CA (2015): Both released silver ions and particulate Ag contribute to the toxicity of AgNP to earthworm *Eisenia fetida*. *Nanotox.* 9, S. 792-801.
- Lia, X; Caob, Z; Zhangb, Z; Danga, H (2006): Surface-modification in situ of nano-SiO₂ and its structure and tribological properties. 252 (22), S. 7856–7861
- LiuLiu, W; Mu, W; Liu, M; Zhang, X; Cai, H; Deng, Y (2014): Solar-induced direct biomass-to-electricity hybrid fuel cell using polyoxometalates as photocatalyst and charge carrier. *Nature Communications.* 5
- Liu, Y; Ren, Q; Su, Z; Chu, B; Li, W; Wu, S; Jin, F; Zhao, B; Yan, X; Wang, J; Fan, D; Zhang, F (2012): The working mechanism of organic photovoltaic cell by using copper phthalocyanine as exciton blocking layer. *Science Direct.* 13 (10)
- Lizin, S; Passela, S; Scheppera, E; Maesb, W; Lutsenb, L; Mancab, J; Vanderzandeb, D (2013): Life cycle analyses of organic photovoltaics: a review. *Energy Environmental Science.* 6, S. 3136-3149
- Luther, W (2008): Einsatz von Nanotechnologien im Energiesektor. [Hrsg.] HA Hessen Agentur. Wiesbaden. 9
- Ma, H; Bennan, A; Diamond, S (2012): Phototoxicity of TiO₂ nanoparticles under solar radiation to two aquatic species: *Daphnia magna* and Japanese medaka. *Environ Toxicol Chem.* 31 (7), S. 1621 – 1629
- Ma, H; Williams, PL; Diamond, SA; (2013): Ecotoxicity of manufactured ZnO nanoparticles--a review. *Environ Pollut.* 172: S. 76-85.
- Merugula, L; Khanna, V; Bakshi, BR (2012): Reinforced Wind Turbine Blades - An Environmental Life Cycle Evaluation. *Environ. Sci. Technol.* 46, S. 9785–9792
- Miller, RJ; Bennett, S; Keller, AA. Pease, S; Lenihan, HS (2012): TiO₂ nanoparticles are phototoxic to marine phytoplankton. *PLoS One.* 7 (1)
- Möller, M; Diesner, MO; Manhart, A; Küppers, P; Spieth-Achtnich, A; Pistner, C (2013): Untersuchung der Auswirkungen ausgewählter nanotechnischer Produkte auf den Rohstoff- und Energiebedarf. Dessau : s.n., 2013
- Movva, S; Zhou, G; Guerra, D; Lee, LJ (2009): Effect of Carbon Nanofibers on Mold Filling in a Vacuum Assisted Resin Transfer Molding System. *Journal of Composite Materials.* 43, S. 611–620
- Mwangi, JN; Wang, N; Ingersoll, Hardesty, Brunson, EL; Li, H; Deng, B (2012): Toxicity of carbon nanotubes to freshwater aquatic invertebrates. *Environ Toxicol Chem.* 31 (8), S. 1823-30

Nitsch, J (2002): Potenziale der Wasserstoffwirtschaft- Gutachten für den wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU). Stuttgart : WBGU, 2002

Notter, DA; Mitrano, DM; Nowack, B (2014): Are nanosized or dissolved metals more toxic in the environment? A Meta-Analysis. *Environ Tox Chem.* 33, S. 2733-2739

Pace, HE; Leshner, EK; Ranville, JF (2009): Influence of stability on the acute toxicity of CdSe/ZnS nanocrystals to *Daphnia magna*. *Environ Toxicol Chem.* 29(6): S. 1338-44.

Pehnt, M; Höpfner, U (2009): Wasserstoff- und Stromspeicher in einem Energiesystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien: Analyse der kurz- und mittelfristigen Perspektive. Heidelberg : IFEU, 2009

Pereira, R; Rocha-Santos, TA; Antunes, FE; Rasteiro, MG; Ribeiro, R; Gonçalves, F; Soares, AM; Lopes, I (2011): Screening evaluation of the ecotoxicity and genotoxicity of soils contaminated with organic and inorganic nanoparticles: the role of ageing. *J Hazard Mater.* 194, S. 345-54.

Peng, J; Lu, Lin; Yang, H (2013): Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 19, S. 255–274

Petersen, EJ; Henry, TB (2011): Ecotoxicity of Fullerenes and Carbon Nanotubes: A Critical Review of Evidence for Nano-Size Effects. 1079, S. 103-119

Powalla, M; Schock, HW; Rau, U (2010): Dünnschichtsolarzellen – Technologie der Zukunft? s.l. : FVEE Themen 2010, 2010

PV-Magazin (2014): Organische Photovoltaik mit 8,4 Prozent Wirkungsgrad . [Online] 11. März 2014. [Zitat vom: 01. Oktober 2015.] http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/organische-photovoltaik-mit-8-4-prozent-wirkungsgrad_100014473

Qi, Z; Hou, L; Zhu, D; Ji, R; Chen, W (2014): Enhanced transport of phenanthrene and 1-naphthol by colloidal graphene oxide nanoparticles in saturated soil. *Environmental Science & Technology.* 48 (17), S. 10136-10144

Raji, ARO; Varadhachary, T; Nan, K; Wang, T; Lin, J; Ji, Y; Genorio, B; Zhu, Y; Kittrell, C; Tour, James, M (2016): Composites of Graphene Nanoribbon Stacks and Epoxy for Joule Heating and Deicing of Surfaces. *ACS Applied Material & Interfaces*

Ratte, HT (1999): Bioaccumulation and toxicity of silver compounds. A review . *Environmental Toxicology and Chemistry.* 18 (1), S. 89-108

Renewable Energy Policy Network for the 21st Century - Netzwerk für erneuerbare Energien des 21. Jahrhunderts- REN21, 2016: Renewables 2016 – Global Status report; (Paris: REN21 Secretariat); ISBN 978-3-9818107-0-7 (<http://www.ren21.net/>)

JRC – Joint Research Center; Lcal Arantegui R; Serrano Gonzales; J; 2015. 2014 JRC wind status report. European Commission : Publications Office of the European Union, 2015

RoHS-RL (2011): RICHTLINIE 2011/65/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten. Amtsblatt der EU. 2011

Schlich, K; Klawonn, T; Terytze K; Hund-Rinke K (2013): Hazard assessment of a silver nanoparticle in soil applied via sewage sludge. Environmental Sciences Europe. 25 (1), S. 17

Schüler, A (2011): Nanocomposite coatings for solar energy conversion: Large opportunities for small structures. s.l. : Swiss Federal Institute of Technology EPFL, 2011

Schüler, D; Buchert, M; Liu, R; Dittrich, S; Merz, C (2011): Study on Rare Earths and Their Recycling. [Hrsg.] The Greens/EFA Group in the European Parliament. Darmstadt : Öko-Institut e.V., 2011

Schwarzburger, H; Ullrich, S (2013): Erneuerbare Energien. PV-Extremstandorte: Strom aus der Wüste. [Online] 13. Juni 2013. [Zitat vom: 12. Dezember 2015.]
<http://www.erneuerbareenergien.de/strom-aus-der-wueste/150/479/68368/2>

Schwirn, K; Tietjen L; Beer, I (2014): Are nanomaterials different and how can they be appropriately regulated under REACH? Environmental Sciences Europe, 2014. 26(1): S. 4.

Seitz, R; Moller, BP.; Thielmann, A; Sauer, A; Meister, M; Pero, M; Kleine, O; Rohde, C;

Bierwisch, A (2013): Nanotechnology in the sectors of solar energy and energy storage.

Geneva : IEC, 2013

Sengül, H; Theis, TL (2010): An environmental impact assessment of quantum dot photovoltaics (QDPV) from raw material acquisition through use. Journal of Cleaner Production. 21, S. 21- 31

Serrano, E; Rus, G; Garcia-Martinez, J (2009): Nanotechnology for sustainable energy. [Hrsg.]

Elsevier. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, S. 2373–2384

Spechler, JA; Nagamatsu, KA; Sturm, JC; Arnold, CB (2015): Improved Efficiency of Hybrid Organic Photovoltaics by Pulsed Laser Sintering of Silver Nanowire Network Transparent Electrode. Applied Material Interfaces. 7, S. 10556–10562

SPIE, Europe (2014): Spire pushes solar cell record to 42.3%. Optics.org. Retrieved. 22. Juni 2014

Sun, SS; Sariciftci, NS (2005): Organic Photovoltaics - Mechanisms, Materials and Devices.

Boca Raton: Taylor and Francis, 2005. DOI: 0-8247-5963-x

Sun, S; Jaouen, F; Dodelet JP (2008): Controlled Growth of Pt Nanowires on Carbon Nanospheres and Their Enhanced Performance as Electrocatalysts in PEM Fuel Cells. Advanced Materials. S. 3900–3904

Tamura, H; Martinazzo, R; Ruckebauer, M; Burghardt, I (2012): Quantum dynamics of ultrafast charge transfer at an oligothiophene-fullerene heterojunction. AIP The Journal of chemical physics. 137

Tarkhanyan, RH; Niarchos, DG (2014): Reduction of thermal conductivity in porous “gray” materials. APL Materials 2.

Tisheva, Plamena. 2016. GTM Research Global PV Demand 2004 - 2020. s.l. : GTM, 2016.

UBA Umweltbundesamt (2014): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Dessau: Umweltbundesamt;
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energetraeger>

UBA Umweltbundesamt (2015): Einsatz von Nanomaterialien in der Energiespeicherung. Dessau: Umweltbundesamt
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/einsatz-von-nanomaterialien-in-der>

UBA, BfR, BAuA (2013): Nanomaterialien und REACH - Hintergrundpapier zur Position der deutschen Bundesoberbehörden.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/nanomaterialien-reach>

US-DOE- United States Department of Energy (2011): Department of Energy Loan Guarantee to Royal Bank of Scotland for Construction and Startup of the Topaz Solar Farm.

VDI – Verein der Ingenieure (2010): Metaroadmap Nanomaterials. s.l. : VDI, 2010.

Villy, M; Jensen, RS; Erichsen, HV (2013): Wind turbine blade with lightning receptors comprising carbon nanotubes. EP2227633 B1 Deutschland, 23. Januar 2013

Wecker, J; Schnitzke, K; Cerva, H; Grogger, W (1995): Nanostructured Nd–Fe–B magnets with enhanced remanence. Applied Physics Letters. 67 (4), S. 563

Wild-Scholten, MJ; Veltkamp, AC (2007): Environmental Life Cycle Analysis of Dye sensitized solar devices; Status and Outlook, Petten : ECN Solar Energy, 2007

Wild-Scholten, MJ (2010): 1st International Conference on PV Module Recycling. Life Cycle Assessment of Photovoltaics: from cradle to cradle. Berlin : s.n., 2010

Wild-Scholten MJ (2013): Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. Solar Energy Materials and Solar Cells. 119, S. 296–305.

Worldwatch (2013): Growth of global solar and wind energy continues to outpace other technologies. Nanowerk. 31. Juli 2013

Yella, A; Lee, HW; Tsao, HN; Yi, C; Chandiran, AK; Nazeeruddin, K; Diau, EWG; Yeh, CY; Zakeeruddin, SM; Grätzel, M (2011): Porphyrin-Sensitized Solar Cells with Cobalt (II/III) Based Redox Electrolyte Exceed 12 Percent Efficiency. Science. 334(6056), S. 629-634

Zhang, L; Roling, LT; Wang, X; Vara, M; Chi, M; Liu, J; Choi, S; Park, J; Herron, JA; Xie, Z; Mavrikakis, M; Xia, Y (2015): Platinum-based nanocages with subnanometer-thick walls and well-defined, controllable facets. Science 349 (25), S. 412-416

Autoren:

Das Datenblatt wurde von Mitgliedern des Arbeitskreises „Nanotechnik“ des Umweltbundesamtes erstellt. Insbesondere haben daran mitgewirkt:

Christian Liesegang (III 2.1 – Übergreifende Angelegenheiten, Chemische Industrie, Feuerungsanlagen)

Dr. Wolfgang Dubbert (III 2.1 – Übergreifende Angelegenheiten, Chemische Industrie, Feuerungsanlagen)

Dr. Kathrin Schwirn (IV 2.2 – Arzneimittel, Wasch- und Reinigungsmittel, Nanomaterialien)

Dr. Doris Völker (IV 2.2 – Arzneimittel, Wasch- und Reinigungsmittel, Nanomaterialien)

Weitere Zuarbeiten erfolgten von:

Hanno Saleka (I 2.3 – Erneuerbare Energien)

Max Werlein (I 2.3 - Erneuerbare Energien)

Elisabeth Nunweiler (III 1.6 – Produktverantwortung)

