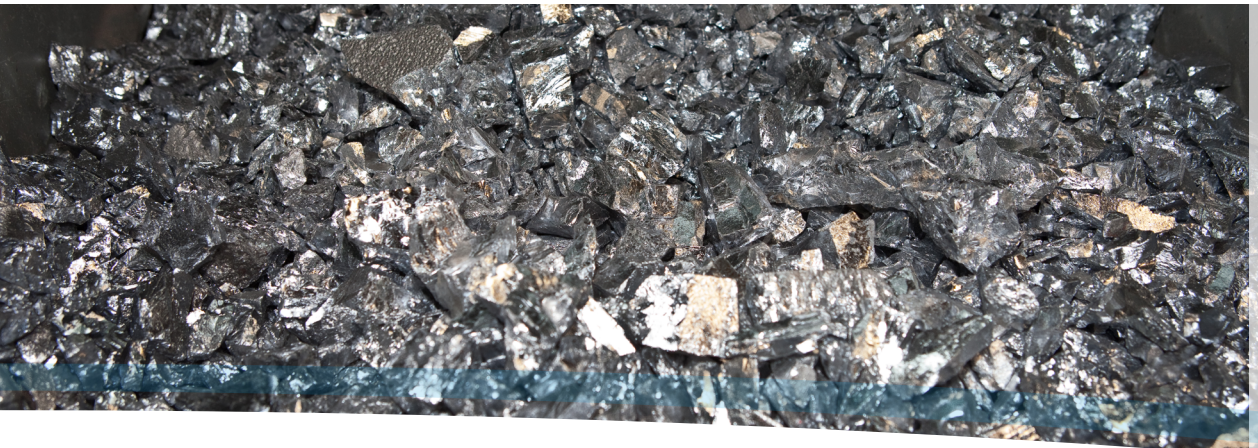


VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 4



Ressourceneffizienz durch Werkstoffsubstitution

Dezember 2013

Kurzanalyse Nr. 4: Ressourceneffizienz durch Werkstoffsubstitution

2. Auflage 2016

Diese Kurzanalyse entstand im Auftrag der VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH und wurde durch die VDI Technologiezentrum GmbH erstellt.

Autoren und fachliche Ansprechpartner:

Dr. Heinz Eickenbusch, VDI Technologiezentrum GmbH

Dr. Wolfgang Luther, VDI Technologiezentrum GmbH

Die Kurzanalyse wurde im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit erstellt.

Die Kurzanalysen des VDI ZRE geben einen Überblick über aktuelle Entwicklungen des Themas Ressourceneffizienz in Forschung und industrieller Praxis. Sie enthalten eine Zusammenstellung relevanter Forschungsergebnisse, neuer Technologien und Prozesse sowie Gute-Praxis-Beispiele. Damit verschaffen die Kurzanalysen einem breiten Publikum aus Wirtschaft, Forschung und Verwaltung einen Einstieg in ausgewählte Themenfelder der Ressourceneffizienz.

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)

Bertolt-Brecht-Platz 3

10117 Berlin

Tel. +49 30-27 59 506-0

Fax +49 30-27 59 506-30

zre-info@vdi.de

www.ressource-deutschland.de

Satz und Gestaltung: Christian Maciejewski

Titelbild (v.o.n.u.): PantherMedia / stocksnapper, VDI ZRE

Druck: LASERLINE Druckzentrum Berlin KG, Scheringstraße 1, 13355 Berlin-Mitte

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

Ressourceneffizienz durch Werkstoffsubstitution

Kurzanalyse Nr. 4

Inhaltsverzeichnis

1. ZIELE UND MOTIVATION	6
2. FORMEN DER SUBSTITUTION	7
3. ANWENDUNGSPOTENZIAL VON WERKSTOFFSUBSTITUTIONEN	11
3.1 Werkstoffsubstitutionen im Maschinen- und Anlagenbau	12
3.2 Werkstoffsubstitutionen in der Automobiltechnik	17
3.3 Werkstoffsubstitutionen im Bauwesen	22
4. AUSWIRKUNGEN DER SUBSTITUTION AUF DEN LEBENSWEG EINES PRODUKTES	28
5. FAZIT: FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSBEDARF UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN	36
6. ANHANG	40
Abbildungsverzeichnis	40
Fußnotenverzeichnis	41

1 ZIELE UND MOTIVATION

Eine ausreichende Rohstoffversorgung, die Herstellung von Werkstoffen und effiziente Werkstoffe spielen im globalen Wettbewerb eine zentrale Rolle. Allein die Nachfrage nach Rohstoffen nimmt stetig zu, auch aufgrund der fortschreitenden Industrialisierung der Schwellenländer. In den letzten 30 Jahren hat sich der Rohstoffverbrauch weltweit verdoppelt¹, was teilweise zu massiven lokalen und globalen Umweltbelastungen geführt hat. Schon heute verbraucht die Welt anderthalbmal mehr Ressourcen als sich erneuern.²

Eine zuverlässige Versorgung mit Rohstoffen wie strategischen Metallen, Edelmetallen und Seltenen Erden, ist für das Exportland Deutschland von höchster Wichtigkeit. Als rohstoffarmes Land ist die Industrie in Deutschland auf den Import fast aller für Hochtechnologien wichtigen Ausgangsstoffe angewiesen. Um die Abhängigkeiten und die sich abzeichnenden Versorgungsengpässe von Rohstoffen zu verringern und den steigenden Rohstoffkosten zu begegnen, ist es notwendig, vorhandene Wertstoffe sowohl zu recyceln als auch durch neu zu entwickelnde Werkstoffe zu ersetzen. Zudem ist es wichtig, Rohstoffe so ressourceneffizient wie möglich einzusetzen. In diesem Sinne muss auch die Verwendung von Werkstoffen in Produkten entlang der gesamten Wertschöpfungskette ressourcenschonend und effizient erfolgen. Eine vielversprechende Strategie dafür stellt die Werkstoffsubstitution dar, mit der verschiedene Ziele verfolgt werden:

- Unabhängigkeit von kritischen Rohstoffen,
- Vermeidung des Einsatzes toxischer/umweltschädigender Substanzen,
- Effizienzsteigerungen durch neue Werkstoffe,
- Anpassung an die Änderung von Kundenanforderungen (B2B, B2C).

¹ Faktor X. Umweltbundesamt, 26.06.2012, <http://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/ressourcenschonung-in-produktion-konsum/faktor-x> (aufgerufen am 18.12.2013)

² 2030 brauchen wir eine neue Erde. Tagesschau.de, 15.05.2012, <http://www.tagesschau.de/inland/wwf114.html> (aufgerufen am 18.12.2013)

2 FORMEN DER SUBSTITUTION

Generell wird zwischen den drei folgenden Formen der Werkstoffsubstitution unterschieden.

a) Technologische Substitution

Bei der technologischen Substitution werden neue Technologien und Verfahren eingesetzt, welche eine vergleichbare Funktionalität und Wirtschaftlichkeit mit geringerem Mengenbedarf an strategischen Rohstoffen realisieren, zum Beispiel durch neue Lösungen zur Einsparung kritischer Metalle und Industriemineralien. Ein Beispiel für die Substitution kritischer Metalle bildet der Einsatz von Aluminium anstelle von Kupfer in der elektrischen Energietechnik und bei Elektromotoren. Auch Aluminium ergibt einen guten elektrischen Leiter – bei ähnlichen mechanischen Eigenschaften wie Kupfer – und ist durch eine angepasste Konstruktion für die Anwendung geeignet.³

b) Funktionale Substitution

Die funktionale Substitution basiert auf Verfahren und Konzepten zur Substitution eines Produkts durch ein anderes Produkt oder eine innovative Produkt-Dienstleistung bei gleicher Funktion, aber geringerem Bedarf an strategischen Rohstoffen. Ein Beispiel dafür stellt die Organische Elektronik dar. Sie umfasst Lichtquellen, photovoltaische Zellen, Batterien und den Bereich der gedruckten Elektronik. Hierbei werden elektronische Komponenten aus organischen Materialien und Polymeren aufgebaut und ersetzen die klassischen anorganischen Elektronikmaterialien. Insbesondere die Umwandlung von Licht in elektrische Energie (Photovoltaik) sowie die Umwandlung von elektrischer Energie in Licht durch Leuchtdioden ergeben herausragende Anwendungsschwerpunkte, die grundlegende ökonomische und ökologische Vorteile in Aussicht stellen. Aber auch hinsichtlich weiterer Anwendungspotenziale im Bereich der Energiewandler oder als Designelemente, zum Beispiel als

³ Faulstich, M. et al.: „Innovative Technologien für Ressourceneffizienz“. Informationspapier TU München, November 2010, http://www.r-zwei-innovation.de/media/Informationspapier_BMBF_Foerdermassnahme_r3.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

großflächige, flexible Beleuchtungen und Displays, erweist sich diese Form der Substitution als interessant.⁴

c) Material-/Werkstoffsubstitution (Fokus dieser Kurzanalyse)

Bei der Werkstoffsubstitution handelt es sich um ein allgegenwärtiges Thema. Neue Anwendungsbereiche, innovative Produkte und höhere Anforderungen an Lebensdauer, Energieeffizienz, Umweltfreundlichkeit, Wiederverwertbarkeit oder eine preiswertere Herstellung von Bauteilen oder Werkstoffen erfordern den Ersatz von bisher verfügbaren, beziehungsweise eingesetzten konventionellen Materialien durch neue und verbesserte Werkstoffe. Da Materialien einer permanenten Weiterentwicklung unterliegen, entstehen Materialeigenschaften, die für die jeweiligen Anwendungen „maßgeschneidert“ werden können. Die stetige Weiterentwicklung von Metallen, Keramik, Glas, Kunststoffen, Textilien oder Verbundwerkstoffen bildet die Basis für vielfältige Werkstoffsubstitutionen – etwa in der Automobilindustrie, der Luftfahrt, dem Maschinenbau, der Energietechnik, aber auch der Medizintechnik oder im textilen Sektor. Dabei rücken innovative Werkstoffe, insbesondere Nanomaterialien und Hybridwerkstoffe, ins Blickfeld.

Die wachsende Informationsmenge und die komplexe Vielfalt von Materialien, Fertigungsverfahren und Kompositionsmöglichkeiten erfordern den verstärkten Einsatz von Software- und Informationstechnologien, um optimale Zusammenstellungen zu erzielen und Möglichkeiten für Substitutionen zu erschließen. Wichtige Aspekte hierbei sind unter anderem:⁵

- die Darstellung des Eigenschaftsspektrums von Werkstoffgruppen,
- der Vergleich von Werkstoffeigenschaften und -kosten,

⁴ Höcker, H. et al.: „Organische Elektronik in Deutschland“, Acatech, 2011, http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Projektberichte/acatech_Berichtet-und-Empfiehlt_organische-Elektronik_WEB.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

⁵ Werkstoffsubstitution. IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH, o. D., http://www.ima-dresden.de/index.php?ILNK=informationssysteme_loesungen_werkstoffsubstitution&iL=1 (aufgerufen am 18.12.2013)

- der Vergleich der Potenziale der Werkstoffgruppen,
- die Auswahl der Werkstoffgruppen,
- die Auswahl konkreter Werkstoffe aus den Werkstoffgruppen,
- Direktvergleich konkreter Werkstoffe.

Es wird geschätzt, dass heute etwa 40.000 metallische und ebenso viele nichtmetallische Werkstoffvarianten existieren und für technische Konstruktionen genutzt werden können.⁶ Aufgrund der unterschiedlichen massebezogenen Werkstoffkennwerte ergibt sich ein weites Feld von Möglichkeiten der Substitution spezifisch schwererer durch spezifisch leichtere Werkstoffe. Mit der steigenden Zahl von Werkstoffen und Werkstoffvarianten wird es zugleich immer schwieriger, die Übersicht über das gesamte Spektrum an Konstruktionswerkstoffen und deren Kennwerte zu behalten. Im normalen Konstruktionsprozess werden in vielen Fällen Werkstofflösungen innerhalb einer Werkstoffgruppe oder innerhalb einer Werkstofffamilie gesucht. Bei der Entwicklung von Leichtbaustrukturen werden häufig explizit werkstoffübergreifende Ansätze gefordert und der Wettbewerb unterschiedlicher Werkstoffgruppen um das beste materialtechnische Lösungskonzept verstärkt.

Die im Werkstoffleichtbau verwendeten Konzepte lassen sich hinsichtlich ihres Lösungsansatzes in Maßnahmen zur Werkstoffoptimierung und solche zur Werkstoffsubstitution unterscheiden.

Im klassischen Konstruktionsprozess setzt der Konstrukteur zur Minimierung des Produktrisikos in der Regel auf Werkstoffe, deren Eigenschaften bekannt sind und die sich in dem jeweiligen Anwendungsfall bereits bewährt haben. Impulse für Werkstoffoptimierungen erwachsen häufig aus den Anforderungslisten der Konstruktionsabteilungen und auf Basis der Lastenhefte des Kunden, zum Beispiel der Entwicklungsvorgaben der Automobilhersteller. Hierbei werden einzelne Werkstoffparameter über die Werkstoffzu-

⁶ Reuter, M.: Methodik der Werkstoffauswahl. Carl Hanser Verlag, 2006, ISBN 978-3446-40680-3; S. 13

sammensetzung oder die Beeinflussung der Struktur oder Oberfläche so angepasst, dass sie die Anforderungen des Konstrukteurs besser erfüllen als der bisher verwendete Werkstoff. Da die übrigen Eigenschaften des Werkstoffs weitgehend erhalten bleiben, ist eine erneute Erprobung nur hinsichtlich der veränderten Eigenschaften notwendig. Die eigentliche Werkstoffoptimierung findet dabei häufig in den Entwicklungslaboren der Werkstoffhersteller statt, so dass das Entwicklungsrisiko des Konstrukteurs und seines Auftraggebers verhältnismäßig gering ausfällt.

Demgegenüber steht ein wesentlich höheres Entwicklungsrisiko bei der vollständigen Substitution bewährter Konstruktionswerkstoffe durch andere und zum Teil neue Werkstoffe, die einen erheblich größeren Entwicklungsaufwand erfordern und eine umfassende Erprobung vor der Freigabe für den Serieneinsatz durchlaufen müssen. Hilfe bei der Auswahl der in Frage kommenden Substitutionswerkstoffe bieten Material-Property-Charts, Werkstoffdatenbanken und Informationen der Werkstoffhersteller. Da die Grenzen der Anwendungsbereiche von Werkstoffgruppen durch neue Werkstoffentwicklungen und -optimierungen ständig weiter ausgedehnt werden, muss der Hersteller eines Produkts eine regelmäßige Überprüfung von zur Verfügung stehenden Substitutionswerkstoffen vornehmen. Insbesondere die intensive Entwicklungstätigkeit auf dem Gebiet der Polymer- und Verbundwerkstoffe spielt dabei für den Werkstoffleichtbau eine wichtige Rolle.

Zum Werterhalt von Gütern und zum Ressourcen- und Klimaschutz im industriellen und privaten Bereich können intelligente Materiallösungen beitragen. Mittel zum Zweck sind zum einen eine gezielte Werkstoffauswahl und -bearbeitung, zum anderen eine Funktionalisierung von Produktoberflächen durch Beschichtungstechnologien. Beschichtungen umfassen inzwischen sehr verschiedene Funktionen, wie den Schutz vor Verschmutzungen, Verschleiß und Korrosion. Sie gewährleisten eine erhöhte Abrieb- und Kratzfestigkeit sowie die gezielte Veränderung der Gleitfähigkeit. Dadurch stellen sie ein Mittel zur Erfüllung von Kundeninteressen dar und verbessern die Wertschöp-

Höheres Entwicklungsrisiko bei vollständiger Substitution.

fungsmöglichkeiten. Diese Optimierung für den Einsatzzweck kann durch eine Modifikation der Werkstoffoberfläche selbst erfolgen oder durch die Aufbringung einer neuen Schicht. Bei der Modifikation ohne separaten Schichtauftrag, etwa mittels Nitrieren, Randschichthärten, Ionenimplantation oder Nanomaterialien, werden nicht nur das Reibungs- und Verschleißverhalten des Werkstoffs verbessert, sondern auch seine Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit. Grundwerkstoffe erhalten durch neu aufgebrachte Oberflächenschichten, wie durch Physical Vapour Deposition/Chemical Vapour Deposition (PVD-/CVD-Beschichtung), neuartige und auf ein bestimmtes Anforderungsprofil optimierte physikalische und chemische Eigenschaften.⁷

3 ANWENDUNGSPOTENZIAL VON WERKSTOFFSUBSTITUTIONEN

Das Anwendungsspektrum von Werkstoffsubstitutionen mittels innovativer Material- und Oberflächentechnologien, insbesondere auf Basis der Nanotechnologie, fällt sehr breit aus und reicht vom Maschinen- und Anlagenbau über die Automobilindustrie, Kunststoffverarbeitung, Stahlindustrie und Medizintechnik bis hin zur Optik.

Der Nutzen der Werkstoffsubstitutionen wird im Folgenden anhand von Anwendungs- und Produktbeispielen im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus, in der Automobiltechnik und im Bauwesen dargestellt.

⁷ Intelligente Materiallösungen zum Erhalt von Werten. Hessen Nanotech, o. D., <http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dsmid=15653> (aufgerufen am 18.12.2013)

Industrielle Anwendungsgebiete, Branchen	Anwendungs- und Produktbeispiele	Werkstoffsubstitution
Maschinen und Geräte	Bauteile (Lager, Getriebekomponenten, Hydraulik), Werkzeuge	Materialeinsparung durch tribologische Schichten, Verschleiß- und Korrosionsschutzschichten sowie Hartstoffschichten
Fahrzeuge	Karosserie, Motor, Getriebe, hochbelastete Bauteile, Werkzeuge, Reflektoren, Scheiben	Gewichtsreduktion durch Leichtbaumaterialien, tribologische Schichten, Verschleiß- und Korrosionsschutzschichten
Kunststoffe, Textilien	Consumerelektronik, Computergehäuse, Möbel, Haushaltsartikel	Biokunststoffe, Nanokomposite, Verschleißschutzschichten, nicht-toxische Materialien
Stahlindustrie	Bleche, Feinbleche	Gewichtsreduktion, Korrosionsschutz, neue Legierungen
Medizintechnik	Gelenk- und Gefäßprothetik, chirurgische Instrumente, Mikrotiterplatten	Biokompatibilität, Verschleißschutzschichten, Sterilisierbarkeit, Funktionalisierung
Optik	Filter, Linsen, Brillengläser/-fassungen, Kaltlichtspiegel, Laserspiegel	Transmission, Reflexion, Verschleißschutz
Elektrotechnik	EMV-Abschirmungen, Schalter, elektrische Kontakte, Leiterplatten, Molded Interconnect Devices	Verbesserung der Leitfähigkeit, Verschleißschutzschichten, Lötbarkeit
Verpackungsindustrie	Folien, Papier, Pappe	Verbesserung der Festigkeit, Permeation und Bedruckbarkeit durch Nanomaterialien
Konsumgüterindustrie	Armaturen, Schreibgeräte, Uhren Bestecke, Haushaltsgeräte, wie Kühlschränke, Waschmaschinen, Toaster etc.	Verschleiß- und Korrosionsschutzschichten, alternative kostengünstige Materialien wie Kunststoffe
Gebäude und Bauwerke	Architekturglas, Fassadenverkleidungen, Baubeschläge, Fensterrahmen	Verbesserung der Wärmedämmung (Transmission, Reflexion), des Korrosions- und Brandschutzes sowie des Gewichtes

Tab. 1: Anwendungs- und Produktbeispiele von Werkstoffsubstitutionen⁸

3.1 Werkstoffsubstitutionen im Maschinen- und Anlagenbau

Bei Werkzeugen haben Hartstoffschichten zum Zwecke des Verschleißschutzes in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Durch die funktionelle Ausgestaltung der Oberflächenschicht können wesentliche Eigenschaften des Bauteils durch die Hartstoffschicht anstelle des Grundwerkstoffs bestimmt werden. Das beinhaltet neben der hohen Härte bei ausreichender Zähigkeit einen großen Verschleiß-

⁸ Quelle: VDI Technologiezentrum GmbH und verändert nach Hessen Nanotech, o. D., <http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dsmid=15730> (aufgerufen am 18.12.2013)

widerstand sowie thermische und chemische Beständigkeit. Die gute Haftung auf dem Substratwerkstoff ist unabdingbar.⁹

Diese multifunktionalen Eigenschaften werden mit einem nanoskaligen Schichtaufbau umgesetzt. Etabliert sind Hartstoffschichten aus Diamant und Verbindungen von Übergangsmetallen wie Chrom, Wolfram oder Titan mit Stickstoff (zum Beispiel Titannitride), Kohlenstoff (zum Beispiel Wolframcarbide) oder Sauerstoff (zum Beispiel Zirkoniumoxide). Neuere Entwicklungen betreffen Sulfide (zum Beispiel Molybdänsulfide) und Selenide (zum Beispiel Wolframselenide) und amorphe Kohlenstoffverbindungen. Beim Bohren oder Fräsen von harten Werkstoffen, wie gehärtetem Stahl für den Automobilbau wie auch bei der Trockenzerspannung, werden aus Kosten- und Umweltschutzgründen keine Kühlmittel verwendet. Hier ersetzt kubisches Bornitrid Diamantschichten, da es mit seiner guten thermischen Leitfähigkeit die entstehende Prozesswärme effizient ableitet und zudem oxidationsbeständig und thermisch sehr stabil ist.¹⁰

⁹ Verschleißschutz durch Hartstoffschichten. Hessen Nanotech, o. D., <http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dsmid=15748> (aufgerufen am 18.12.2013)

¹⁰ Verschleißschutz durch Hartstoffschichten. Hessen Nanotech, o. D., <http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dsmid=15748> (aufgerufen am 18.12.2013)

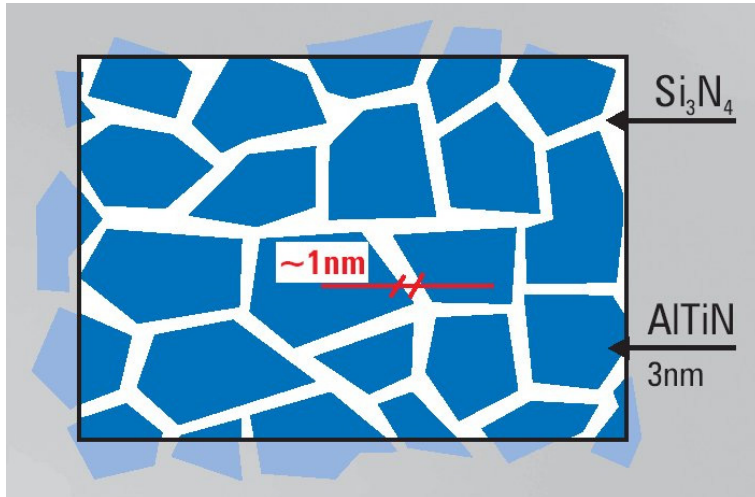


Abb. 1: Strukturaufbau von Nanokomposit-Schichten. Sie bestehen aus Aluminiumtitannitrid (AlTiN)-Körnern, die in eine Matrix aus Siliziumnitrid (Si₃N₄) eingebunden sind. Mit diesen extrem harten Schichten werden Bohrer, Fräser und andere Werkzeuge beschichtet.¹¹

Die goldfarbene Werkzeugbeschichtung aus Titannitrid mit erhöhter Standzeit hat sich – aus dem industriellen Umfeld stammend – längst bei privaten Endkunden durchgesetzt. Neu sind superharte, nur wenige Mikrometer dicke Beschichtungen auf der Basis von Nanokompositen, die nanokristalline Titannitrid- oder Titanaluminiumnitrid-Kristalle in eine amorphe Siliziumnitrid-Hartstoffmatrix einbetten. Eine solche Zweiphasenstruktur entsteht durch gleichzeitiges Abscheiden der Ausgangskomponenten in einem kombinierten PVD- und CVD-Prozess. Diese Nanokompositstruktur weist eine höhere Härte und auch geringere Temperaturleitfähigkeit auf als die kristalline Struktur der Einzelphasen, welche das Werkzeugs substrat gegen die entstehende Prozesswärme isoliert. Nanokompositstrukturen zeigen keine Baufehler wie Versetzungen, Mikrorisse oder Korngrenzen, so dass ihre Oxidationsbeständigkeit höher liegt als die von Diamant. Zudem ist bei einem Werkzeug

¹¹ Quelle: PLATIT AG, Selzach, Schweiz

mit Nanokompositbeschichtung eine bis zu fünfmalige Wiederbeschichtung möglich.¹²

Im Forschungsprojekt „Stahl-Schnecke“ wird ein neues Konzept für Schneckenradgetriebe entwickelt, bei dem die bisher als reiner Verschleißwerkstoff eingesetzte Bronze durch einen konventionellen Stahlwerkstoff substituiert wird. Mit der Substitution sollen insbesondere die wertvollen und strategischen Basismetalle Kupfer und Zinn eingespart und durch Stahl ersetzt werden. Ziel ist eine drastische Senkung der Produktionskosten bei gleichzeitiger Erhöhung der mechanischen Stabilität der Bauteile sowie der Arbeitseffizienz der Schneckengetriebe.¹³

Wie „harte Werkstoffe und Verschleißschutzschichten mit erhöhter Lebensdauer auf der Basis neuartiger und recycelter Nanomaterialien“ entstehen, untersucht das aktuelle Forschungsprojekt „nanoRec.“¹⁴ Im Rahmen dieses Projektes sollen insbesondere der Verbrauch kritischer Stoffe wie Wolfram, Kobalt und natürlichem Diamant reduziert sowie Einspar- und Substitutionsmöglichkeiten durch Ersatzmaterialien aufgezeigt werden. Dabei soll die Verschleißbeständigkeit der Bauteile und Bauteilbeschichtungen beibehalten bzw. weiter verbessert werden. Im Fokus stehen neue Verbundwerkstoffe mit eingelagerten mikroskaligen Hartstoffpartikeln. Diese Partikel weisen polykristalline Strukturen auf, die wiederum aus nanoskaligen Kristalliten bestehen. Die neuen verschleißreduzierten Werkstoffe sollen die Lebensdauern stark abrasiv beanspruchter Werkzeuge erheblich verlängern.¹⁵

¹² Verschleißschutz durch Hartstoffschichten. Hessen Nanotech, o. D., <http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dsmid=15748> (aufgerufen am 18.12.2013)

¹³ Projekt Stahl-Schnecke. BMBF MatResource, o. D., <http://www.matresource.de/projekte/stahl-schnecke/> (aufgerufen am 18.12.2013)

¹⁴ Projekt nanoRec. BMBF MatResource, o. D., <http://www.matresource.de/projekte/nanorec/> (aufgerufen am 18.12.2013)

¹⁵ Projekt nanoRec. BMBF MatResource, o. D., <http://www.matresource.de/projekte/nanorec/> (aufgerufen am 18.12.2013)

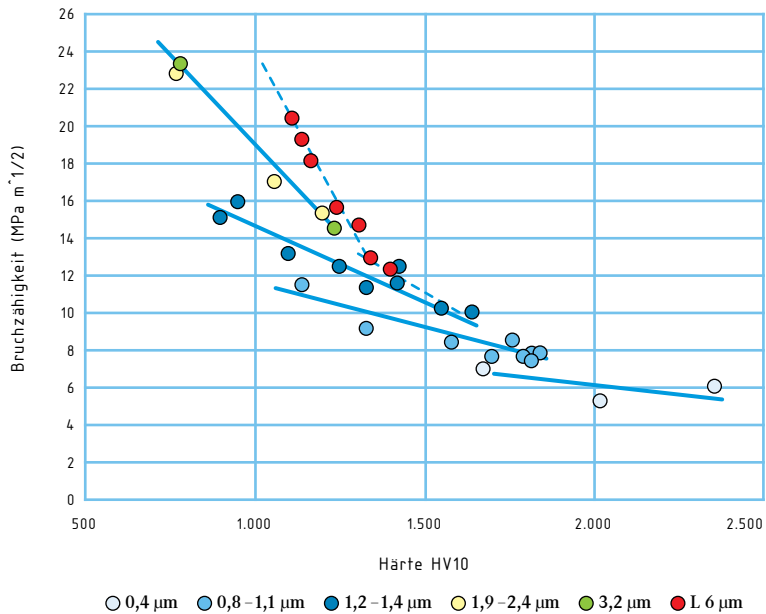


Abb. 2: Die im Projekt nanoRec angestrebten Eigenschaftsparameter¹⁶

Bei Baggern und Grabgeräten im Bergbau, bei Erdarbeiten oder generell bei der Aushebung mineralischen Materials tritt an den Grabwerkzeugen über die Nutzungszeit ein hoher Materialverschleiß auf. Hier haben sich Hartverbundschichten aus metallischen Matrixmaterialien – überwiegend auf Nickel-Basis – mit eingelagerten Wolframkarbidpartikeln bewährt. Diese Kompositwerkstoffe zeichnen sich durch geringen Verschleiß, große Bruchzähigkeit und eine lange Lebensdauer aus. Wolfram zählt jedoch zu den sogenannten kritischen Rohstoffen, die entweder selten vorkommen oder deren Versorgungssicherheit längerfristig mit Unsicherheiten versehen ist. Ziel des Projektes „Substungs“ ist die Substitution von Wolfram in Verschleißschutzschichten durch kostengünstige und ausreichend verfügbare Hartstoffe wie etwa Siliziumkarbid oder oxidische Materialien. Zusätzlich sollen die bisher verwendeten Nickel-Matrices durch solche auf Eisen-Basis ersetzt werden. Die Entwicklungsarbeit erfordert umfangreiche Analysen und Tests der Material-

¹⁶ modifiziert nach Quelle: Volkmar Richter, Fraunhofer IKTS

bindungen und geeigneter Fertigungsverfahren sowie die Übertragung der Laborergebnisse auf reale Praxisbedingungen.¹⁷

Beim Umformen hochfester Bleche treten große Drücke und Flächenbelastungen auf. Die eingesetzten Werkzeuge müssen deshalb sehr stabil sein. Die Automobilindustrie setzt zur Teilefertigung Tiefziehwerkzeuge ein, die aus Hochleistungswarmarbeitsstahl bestehen. Dennoch weist dieser Werkstoff einen erheblichen Verschleiß auf, der unter anderem zu hohen Umrüstkosten führt. Die Verschleißfestigkeit von Umformwerkzeugen lässt sich durch Material- und Oberflächentechnologien jedoch erheblich verbessern. So führt eine Kombination aus Plasmanitrieren und PVD-Beschichtungen aus Chrom(III)-nitrid zu einer optimierten Festigkeit, die die Standzeit der Werkzeuge um das Achtefache erhöht.¹⁸ Auch im Bereich der kunststoff- und elastomerverarbeitenden Industrie haben sich die PVD-Hartstoffschichten als Verschleißschutz und zur maximalen Optimierung der Standzeiten von Verarbeitungswerkzeugen bewährt.¹⁹

3.2 Werkstoffsubstitutionen in der Automobiltechnik

Ressourceneffizienz und verringerte Emissionen stellen die großen Herausforderungen dar, denen sich die Automobilbranche stellen muss. Zugleich steigen die Anforderungen an Sicherheit und Fahrkomfort. Leichtbaumaterialien und multifunktionale Werkstoffe können hier wertvolle Beiträge liefern. Die Substitution konventioneller Werkstoffe wie Stahl durch leichte Materialien wie Aluminium, Magnesium oder Polymere bzw. Verbundwerkstoffe steht im Fokus der Motoren- und Karosserieentwicklung. Neben dem geringen Gewicht und der höheren spezifischen Festigkeit müssen jedoch weitere Anforderungen, wie zum Beispiel Korrosions- und Verschleißbeständigkeit, erfüllt werden.

¹⁷ Projekt SubsTungs. BMBF MatResource, o. D., <http://www.matresource.de/projekte/substungs/> (aufgerufen am 18.12.2013)

¹⁸ Verschleißschutz in der Fertigungstechnik. Hessen Nanotech, o. D., <http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dsmid=15764> (aufgerufen am 18.12.2013)

¹⁹ Effiziente Beschichtungs-Systeme für Kunststoffverarbeitungswerkzeuge. Pressebox, 04.09.2009, <http://www.pressebox.de/inaktiv/sulzer-metaplas-gmbh/Effiziente-Beschichtungs-Systeme-fuer-Kunststoffverarbeitungswerkzeuge/boxid/286720> (aufgerufen am 18.12.2013)

Moderne Kompositwerkstoffe weisen häufig Korrosions- und Verschleißbeständigkeit auf.

Moderne Kompositwerkstoffe weisen hier häufig große Potenziale auf. Bei ihrer Fertigung werden Partikel oder Fasern wie Kohlefasern, Glasfasern, Naturfasern etc. in Keramik-, Metall- oder Polymermatritzen eingelagert. Durch die Wechselwirkung des Füllstoffes mit dem Matrixmaterial erzielt der Gesamtwerkstoff höherwertige Eigenschaften wie geringeres Gewicht, optimierte Festigkeit oder verbesserte Verschleißbeständigkeit und erfüllt damit oft mehrere verschiedene Funktionen. Faserverstärkte Werkstoffe finden bereits heute eine vielfältige Verwendung, etwa als Leichtbaumaterial für Windturbinen, in der Luft- und Raumfahrt oder in der Automobiltechnik.²⁰ Autohersteller wie BMW und VW haben damit begonnen, Kohlenstofffasern für CFK-Bauteile und vollständige Karosserien einzusetzen.²¹ Aufgrund des hohen Fertigungsaufwandes werden CFK-Materialien aber zunächst nur im hochpreisigen Fahrzeugsegment angesiedelt sein. In der Eisenbahntechnik kommen moderne keramische Faserverbundmaterialien zum Einsatz aber auch zum Beispiel als Hochleistungsbremscheiben in modernen Hochgeschwindigkeitszügen.

Sie zeichnen sich durch verbesserte Bremswirkung und hohe Verschleißfestigkeit und damit durch eine längere Lebensdauer aus. In Automobilen ließen sich Laufleistungen von 300.000 Kilometern mit einem Bremsensatz erzielen. Aufgrund der hohen Kosten ist jedoch erst längerfristig mit Einführung im automobilen Massenmarkt zu rechnen.²²

Bei einem anderen Leichtbauansatz werden konventionelle Werkstoffe durch Schaumstrukturen ersetzt. Sie sind durch hohe Biegesteifigkeiten, gute Dämpfungseigenschaften und ein großes Energieabsorptionsvermögen gekennzeichnet. Aus solchen Schäumen lassen sich sehr steife Strukturen, aber auch gute Energieabsorber herstellen. Letztere ver-

²⁰ Werkstoffe der Verkehrstechnik. Universität Erlangen-Nürnberg, Department Werkstoffwissenschaften, o. D., <http://www.wv.uni-erlangen.de/forschung.shtml> (aufgerufen am 18.12.2013)

²¹ Weltpremiere des BMW i3 – stabil, sicher und ohne B-Säulen. Springer, 30.07.2013, <http://www.springerprofessional.de/weltpremiere-des-bmw-i3-stabil-sicher-und-ohne-b-saeulen/4592144.html> (aufgerufen am 18.12.2013)

²² „Neue Dimension Material – Funktionelle Beschichtungen & keramische Verbundwerkstoffe“; Produktbroschüre Clariant International AG, 2007, [http://www.clariant.de/C12575E4001FB2B8/vwLookupDownloads/Publication_Clariant_NeueDimensionMaterial.pdf/\\$FILE/Publication_Clariant_NeueDimensionMaterial.pdf](http://www.clariant.de/C12575E4001FB2B8/vwLookupDownloads/Publication_Clariant_NeueDimensionMaterial.pdf/$FILE/Publication_Clariant_NeueDimensionMaterial.pdf) (aufgerufen am 18.12.2013)

fügen über Anwendungspotenziale als passive Fahrzeug-Sicherheitskomponenten, etwa zum Aufprallschutz für Schienenfahrzeuge oder in typischen Knautschzonen in Automobilen.²³

Der Leichtbau steht auch im Fokus des aktuellen Projektes „RADIKAL - Ressourcenschonende Werkstoffsubstitution durch additive und intelligente Eisen-Aluminium (FeAl)-Werkstoff-Konzepte für angepassten Leicht- und Funktionsbau“. Ziel ist die Substitution von Edelstählen und sogenannte „Superlegierungen“, die häufig kritische Rohstoffe wie Kobalt, Niob, Tantal oder Wolfram enthalten, durch preiswerte Eisen-Aluminium-Legierungen. Die Fe-Al-Legierungen sind inzwischen so weit fortgeschritten, dass sie sich auch bereits für „mechanisch, thermisch und korrosiv hochbelastete Bauteile und Aggregate“²⁴ eignen. Zudem sind Eisen und Aluminium in ausreichender Menge verfügbar. Perspektivisch können Fe-Al-Legierungen in vielen Anwendungen Chrom-Nickel-Stähle ersetzen. In der technischen Materialentwicklung bestehen jedoch noch verschiedene Hürden. So ist die Verformbarkeit (Duktilität) von Fe-Al-Legierungen sehr begrenzt, was vor allem auf die Grobkörnigkeit dieses Werkstoffes nach dem Gießverfahren zurückgeführt wird. Neue Fertigungsverfahren wie Selective Laser Melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM) und Laser Metal Deposition (LMD) erlauben jedoch erheblich feinere Körnungen bis hin zur Mikrostrukturebene. Diese Verfahren sollen nun ebenfalls auf Fe-Al-Legierungen angewandt werden. Es wird erwartet, dass sich auch in diesem Werkstoff kleinere Korngrößen erzielen lassen und die Duktilitätseigenschaften verbessert werden können. Mit einer anwendungsspezifischen Kombination der drei genannten Verfahren lassen sich vielfältige Materialverarbeitungs-möglichkeiten erschließen.²⁵

Beschichtungen spielen eine bedeutende Rolle bei Verbren-

Fe-Al-Legierungen können in vielen Anwendungen Chrom-Nickel-Stähle ersetzen.

²³ http://www.clariant.de/C12575E4001FB2B8/vwLookupDownloads/Publication_Clariant_NeueDimensionMaterial.pdf/SFILE/Publication_Clariant_NeueDimensionMaterial.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

²⁴ Projekt RADIKAL. BMBF MatRessource, o. D., <http://www.matressource.de/projekte/radikal/> (aufgerufen am 18.12.2013)

²⁵ Projekt RADIKAL. BMBF MatRessource, o. D., <http://www.matressource.de/projekte/radikal/> (aufgerufen am 18.12.2013)

nungsmotoren. So nutzt die Firma Mahle bei Aluminium-Zylinderlaufflächen die galvanisch aufgetragene, eisenpartikelverstärkte Beschichtung FerroTec, um einen Leichtbau durch die Kombination von Aluminiumkolben mit Motorblöcken aus Aluminium zu ermöglichen. Nanokristalline Komposit-Beschichtungen werden bei der General Motors Powertrain-Germany GmbH untersucht, um für Zylinderlaufbahnen in Leichtkurbelgehäusen aus Aluminium verbesserte Verschleißbeständigkeiten und niedrige Reibkoeffizienten zu erzielen.²⁶

Auch mit reibungsarmen und hydrophilen Kohlenstoffschichten lassen sich die tribologischen Eigenschaften von Antriebskomponenten in Fahrzeugen hinsichtlich Effizienz und Langlebigkeit verbessern. Der Einsatz reibungsarmer Kohlenstoffschichten führt ebenso zu einer Reduktion der erforderlichen Schmierstoffmenge. So zeichnen sich diamantähnliche Kohlenstoffschichten, kurz DLC (Diamond-Like Carbon), durch hohe Mikrohärtigkeit und einen äußerst niedrigen Gleitreibungskoeffizienten aus.

Das zunehmende Interesse der Automobilindustrie an Leichtbaumaterialien sowie die steigenden Sicherheitsanforderungen im Fahrzeugbau rücken warmumformbare Stahllegierungen mit Mangan und Bor in den Fokus der Werkstoffentwicklung. Sie weisen deutlich verbesserte Festigkeiten auf, erfordern allerdings auch die Entwicklung neuer Korrosionsschutzsysteme. Im Verbundvorhaben „KoWUB - Neuartige Korrosionsschutzsysteme für zukünftige Karosseriekonzepte“ werden solche Korrosionsschutzsysteme auf der Basis von Zink-Eisen-(Aluminium)-Legierungen adressiert. Die Schichtsysteme sollen zudem fertigungstechnische Vorteile wie kurze Prozesszeiten und verbesserte Umformeigenschaften ermöglichen. Untersucht werden Beschichtungsverfahren wie Schmelztauchen und Dampfspritzen sowie deren skalierbarer Herstellungsprozess in praxisorientierten Pilotanlagen.²⁷

²⁶ Beschichtungen für Antriebe. Hessen Nanotech, o. D., <http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dsmid=15762> (aufgerufen am 18.12.2013)

²⁷ Projekt KoWUB. BMBF MatResource, o. D., <http://www.matresource.de/projekte/kowub/> (aufgerufen am 18.12.2013)

Ein Beispiel für eine durch Umweltaspekte angetriebene Werkstoffsubstitution ist der Einsatz piezoelektrischer Keramiken ohne toxisches Blei. Piezoelektrische Keramiken koppeln elektrische und mechanische Größen: Wird ein mechanischer Druck auf sie ausgeübt, reagieren sie mit dem Aufbau elektrischer Spannungen.

Umgekehrt führt das Anlegen einer elektrischen Spannung zu einer mechanischen Werkstoffausdehnung. Piezokeramiken haben sich inzwischen zu kommerziell erfolgreichen Nischenwerkstoffen, insbesondere in der Aktorik, Sensorik und Signalwandlung, entwickelt. Ihr Anwendungsspektrum reicht von Präzisionsstellmotoren und effizienten Einspritzsystemen über ultrapräzise Drucksensoren oder aktive Schwingungsdämpfung bis zu Frequenzfiltern und Schallwandlern im Bereich der IKT und der medizinischen Bildgebung. Heute werden überwiegend Blei-Zirkon-Titanat (PZT)-Keramiken verwendet. Wichtige Kennwerte sind „die Curie-Temperatur des Stoffes, oberhalb derer kein Piezoeffekt mehr auftritt“²⁸, „die Piezoelektrische Ladungskonstante (Piezomodul), die das Verhältnis von erzeugter mechanischer Dehnung zur anliegenden elektrischen Spannung beschreibt“²⁹, sowie der Kopplungsfaktor, der die Effizienz der elektromechanischen Energieumwandlung wiedergibt. Während des Herstellungsprozesses, aber auch in der Anwendungsphase, setzen diese Keramiken jedoch toxische, bleihaltige Verbindungen frei. Ihre Herstellung soll in der Europäischen Union langfristig verboten werden. PZT-Keramiken gehören seit 2003 zu den offiziell zu substituierenden Stoffen. Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Entwicklung bleifreier Piezowerkstoffe wurden entsprechend intensiviert. Erfolgversprechende bleifreie Keramiken basieren vorwiegend auf Titanaten und Niobaten. Die Entwicklung geeigneter Kompositkeramiken bleibt jedoch eine Herausforderung, da die materialtechnische Optimierung eines der genannten Parameter oft mit einer

Keramiken setzen während der Herstellung toxische bleihaltige Verbindungen frei.

²⁸ Kohlhoff, J. et al.: Bleifreie piezoelektrische Keramiken. *Werkstoffe in der Fertigung*, 25.05.2012, <http://werkstoffzeitschrift.de/blogwerkstoffe/bleifreie-piezoelektrische-keramiken/> (aufgerufen am 18.12.2013)

²⁹ Kohlhoff, J. et al.: Bleifreie piezoelektrische Keramiken. *Werkstoffe in der Fertigung*, 25.05.2012, <http://werkstoffzeitschrift.de/blogwerkstoffe/bleifreie-piezoelektrische-keramiken/> (aufgerufen am 18.12.2013)

Verschlechterung eines anderen einhergeht. Dennoch konnten in den letzten Jahren schrittweise Fortschritte erzielt werden. Bleifreie piezoelektrische Keramiken eignen sich inzwischen für ausgewählte Anwendungen. Eine vollständige Substitution von PZT ist jedoch noch nicht absehbar.³⁰

3.3 Werkstoffsubstitutionen im Bauwesen

Im Bausektor werden innovative Entwicklungen von Nanomaterialien unter anderem durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Im Fokus steht auch die Erzielung von Produktverbesserungen durch Substitution konventioneller Baustoffe durch nanotechnologische Innovationen. Adressiert werden folgende Aspekte:³¹

- Erhöhung der Haltbarkeit von Gebäudeelementen (zum Beispiel Fassaden, Fenstern, Türen, Dächern),
- Reduzierung des Energiebedarfs durch nanotechnologische Effekte,
- Verbesserung von Raumklima, Wohnkomfort und Sicherheit,
- Verbesserung der Energieeffizienz und Langlebigkeit zementgebundener Werkstoffe,
- Verbesserung der Beständigkeit von Straßenbelägen.

Erfolgreich konnte zum Beispiel ein Projekt zur nanoskalierten Aktivierung von Hüttensand und Portlandzement mittels eines innovativen Mahlverfahrens abgeschlossen werden. Der dadurch erreichte Hochleistungsbeton erlaubt im Vergleich zu dem üblichen Portland-Zement (OPC) höhere Druckfestigkeiten und kürzere Abbindezeiten. Neben der Herstellung eines neuartigen und verbesserten Werkstoffes könnten damit auch Rohstoff- und CO₂-Emissionseinsparungen geleistet werden. Denn würde der gesamte Zement in der Welt auf Hüttensandzement umgestellt werden – und solcher Hüttensand ist als Abfallprodukt (zum Beispiel 25 Prozent bei der Stahlerzeugung) in großen Mengen vor-

³⁰ Kohlhoff, J. et al.: Bleifreie piezoelektrische Keramiken. *Werkstoffe in der Fertigung*, 25.05.2012, <http://werkstoffzeitschrift.de/blogwerkstoffe/bleifreie-piezoelektrische-keramiken/> (aufgerufen am 18.12.2013)

³¹ Fördermaßnahme „Nanotechnologie im Bauwesen – NanoTecture“. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2007, <http://www.bmbf.de/en/furtherance/10471.php> (aufgerufen am 18.12.2013)

handen –, so könnten etwa fünf Prozent des gesamten derzeitigen weltweiten CO₂-Ausstoßes eingespart werden. Der neue Beton wurde nach dem Projekt als Demonstrator für ein Brückenelement einer zukünftigen Geh- und Radwegbrücke eingesetzt.³²

Ebenfalls erfolgreich verlief das Projekt „HelioClean“. Dieses beinhaltete die Entwicklung nanotechnologisch funktionalisierter Baustoffoberflächen zur solarkatalytischen Luft- und Oberflächenreinigung. Durch eine katalytische Zersetzung von Luftschadstoffen mittels einer nanotechnologisch funktionalisierten Oberfläche konnte Sonnenlicht so ausgenutzt werden, dass ein Selbstreinigungseffekt erzielt und die Bildung von Biofilmen sowie die damit verbundene Biokorrosion von Baustoffen verhindert wurden. Nach Projektende wurde dazu ein Feldversuch für eine Schallschutzwandbeschichtung an der A1 bei Osnabrück zur Stickoxid-Reduzierung gemeinsam mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) gestartet.³³

In einem weiteren BMBF-Projekt³⁴ konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, eine multifunktionale Fahrbahn aus nanooptimiertem Ultra-Hochleistungsbeton zu gestalten, die deutliche Vorteile aufweist. Diese hoch tragfähige, lärmarme, ressourcenschonende und dauerhafte Betonfahrbahn aus Ultrahochfestem Beton (UHPC) könnte die Lebenszykluskosten für den Bau, die Erhaltung und Nutzung senken. Gleichzeitig lässt sich eine Lärminderung um bis zu 6 Dezibel (A) erreichen³⁵, was wirksamer als eine vier Meter hohe Lärmschutzwand ist.

Beton stellt generell einen wichtigen mineralischen Baustoff im Bauwesen dar und wird durch Mischen unter-

³² Projektseite FuturZement. Futurzement.de, 02.07.2010, <http://www.futurzement.de/FuturZement/> (aufgerufen am 18.12.2013)

³³ BASt: Test eines die Luft reinigenden Lärmschutzes. Internationales Verkehrswesen, 03.03.2011, <http://www.internationalesverkehrswesen.de/news/internationales-verkehrswesen/artikel/id/bast-test-eines-die-luft-reinigenden-laermschutzes.html> (aufgerufen am 18.12.2013)

³⁴ BMBF-Projekt Multifunktionale Fahrbahn aus nanooptimiertem Ultrahochleistungsbeton (FKZ 13N 10492-10500)

³⁵ Altreuther, B.: Multifunktionale Fahrbahn aus nanooptimiertem Ultra-Hochleistungsbeton. Präsentation auf der BMBF-Veranstaltung „Neue Werkstoffe und Nanotechnologie für die Bautechnik“ am 21.11.2013 in Frankfurt, http://www.innovationsbegleitung.de/nanotechnology/wp-content/uploads/2013/12/Altreuther__M%C3%BCllerBBM_21_11_13_Frankfurt.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

schiedlicher Typen von Zement sowie grober und feiner Gesteinskörnung und Wasser hergestellt, wobei neben diesen Hauptbestandteilen auch weitere Zusatzmittel und -stoffe zum Einsatz kommen. Neben der Verwendung von Beton direkt an der Baustelle (Einfüllen in die Schalungen) spielt auch vorgefertigter Beton (Betonfertigteile) bei der Bauwerkserstellung eine wichtige Rolle.

Unter den Betonzusatzmitteln finden sich auch Produkte, die Nanomaterialien enthalten. So hat beispielsweise der schweizerische Zementproduzent Holcim die sogenannte „Nano-T Technology“ entwickelt, die darauf abzielt, den Kontakt zwischen dem porösen Zementstein und der Gesteinskörnung zu optimieren. Durch das Additiv bilden sich zusätzliche Kristallisationskeime aus, die zu nanoskaligen Hydratphasen führen, welche die Festigkeit und Lebensdauer von Zement verbessern.³⁶ In ähnlicher Weise wirkt das Additiv X-SEED® der BASF SE. Es besteht aus nanopartikulärem Calciumsilikathydrat, das dem Beton zusätzliche Kristallisationskeime zuführt und so die Aushärtung bei sonst gleichen oder sogar verbesserten Festigkeitseigenschaften beschleunigt. Während der Bautätigkeit lassen sich signifikante Zeiteinsparungen erzielen. Hinsichtlich der Nachhaltigkeit wurde ein „X-SEED® - Betonfertigteile“ mit einem konventionellen Betonprodukt verglichen. Die beschleunigte Aushärtung ergab dabei Vorteile sowohl in der Ressourcen- als auch in der Energieeffizienz. So kann durch den optimierten Härtungsprozess der Klinkeranteil im Zement verringert werden, was im Herstellungsprozess zu geringeren Treibhausgasemissionen führt. Zudem lässt sich durch die erhöhte Härtungsgeschwindigkeit die Zufuhr von Heizenergie verringern. Für einen kontrollierten Abbindeprozess ist das Heizen bei herkömmlichem Beton, insbesondere im Winter, häufig erforderlich. In toxikologischer Hinsicht sind durch Nanoprodukte dieser Art geringe oder keine Risiken für Mensch und Umwelt zu erwarten, da keine ungebundenen Nanopartikel freigesetzt werden. So wird etwa X-SEED® als wässrige Suspension produziert und

³⁶ Schmidt, T., Lunk P.: Kurzbeitrag Holcim (Schweiz) AG: Nano-T® Technology, 2010. http://www.zement.at/Service/literatur/fileupl/koll10_schmidt.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

vertrieben und ist nach der Aushärtung chemisch fest in den Beton eingebunden.³⁷

Nanoinspirierte Sonnenschutzverglasung

In Industrieländern entfallen etwa 40 Prozent des gesamten Energiebedarfs auf Wohn- und Gewerbegebäude. Der größte Teil davon wird für Beleuchtung, Heizung und Klimatisierung und deren Anpassung an die sich im Tages- sowie im Jahresverlauf ändernden Umgebungsbedingungen aufgewendet.

Wenn Sonnenlicht als Ersatz für elektrisches Licht genutzt werden kann, sich Blendlicht mildern lässt und sich gleichzeitig der Aufwand für die Heizung und die Kühlung reduziert, kann der Energieverbrauch eines Gebäudes erheblich gesenkt werden. Entsprechend liegt in der intelligenten Nutzung des natürlichen Licht- und Wärmeeinfalls und vor allem in der Ausgestaltung von Glasflächen ein großes Einsparpotenzial.

Eine normale Gebäudeverglasung hat jedoch den Nachteil, dass sich Räume im Sommer sehr stark aufheizen. Klimaanlage müssen dann oft für Kühlung sorgen. Moderne, nano-basierte Fensterfolien können hier innovative Abhilfe schaffen. Inzwischen kommerziell angeboten werden Folien als Sonnenschutz für Gebäudeverglasungen, die vor Sonne, Lichteinstrahlung und Hitze schützen – ohne dabei die Räume zu verdunkeln. So stellt etwa die Firma 3M etwa 60 Mikrometer dicke transparente Fensterfolien her, die aus 200 übereinandergeschichteten nanoskaligen Filmen aus Acryl und Polyester bestehen. Durch die Struktur der Folien wird ein großer Teil der Wärme- und UV-Strahlung des Sonnenspektrums herausgefiltert, während sichtbares Licht kaum beeinträchtigt wird.

³⁷ Umweltbundesamt 2012: „Analyse und strategisches Management der Nachhaltigkeitspotenziale von Nanoprodukten“, ÜBA-Texte 15/2012, ISSN 1862-4804. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4276.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)

Eine elektrisch schaltbare Transparenz kann durch „elektrochromes Glas“ erreicht werden. Elektrochrome Materialien ändern ihre optische Transparenz je nach angelegter Gleichspannung. Durch das Anlegen einer geringen Spannung von 3 Volt wird eine bläuliche Färbung erreicht. Bei der Abgabe elektrischer Ladungen an mikro- oder nanoskalige Dünnschichten (zum Beispiel Wolframoxid oder Polyanilin) werden diese aktiviert und ändern ihre Farbe. Wird die Polarität der Spannung geändert, wird das Glas wieder farblos. Die Steuerung kann manuell oder automatisch erfolgen. Das Glas benötigt Strom nur während der Einfärbungsphase oder beim Herstellen vollständiger Transparenz. Ist keine Spannung angelegt, so behält das Glas seine Farbe bei, bis erneut Strom zugeführt wird.

Elektrochromes Glas kann teure und störanfällige mechanische Sonnenschutzsysteme wie automatische Lamellenvorhänge, Jalousiensysteme oder zweischalige Vorhangfassaden sinnvoll ersetzen. Mit elektrochromem Glas können die Transmission des sichtbaren Lichts und der Gesamtenergie durchlass über ein breites Spektrum abgestimmt werden. Mit einer Lichtdurchlässigkeit von nur zwei Prozent in voll getöntem Zustand lässt sich grelles Sonnenlicht blockieren. Vor allem in Gebäuden mit großen Glasfassaden können dadurch Energieverluste vermindert werden.

Einen Schritt weiter ging Anfang 2013 eine Arbeitsgruppe am Lawrence Berkeley National Laboratory (LBL) in den USA. Hier gelang die Entwicklung einer Glasscheibe auf der Basis von Nanokristallen aus Indium-Zinn-Oxid (ITO), die in eine Glasmatrix aus Niob-Oxid eingebettet wurden. Die optischen Eigenschaften des Materials können durch die Höhe der angelegten Spannung gezielt so verändert werden, dass sich die Transmission von Wärmestrahlung und sichtbarem Licht unabhängig voneinander selektiv schalten lassen. So ist es möglich, etwa Wärmestrahlung zu blockieren, während Licht weiterhin ungehindert durch das Glas hindurchtreten kann. Die Zukunft des neuen Materials wird als aussichtsreich angesehen, allerdings sind die verwendeten Materialien sehr teuer und werfen für den flächendeckenden Einsatz Sicherheitsfragen hinsichtlich ihrer

Mit Nanokristallen kann die Wärmestrahlung von Sonnenlicht blockiert werden.

chemischen Reaktivität auf. Insofern wird für eine umfangreichere Anwendung nach Alternativmaterialien gesucht.³⁸

Nanoporöse Dämmstoffe

Durch nanotechnologische Neuentwicklungen konnte im zurückliegenden Jahrzehnt das Spektrum der verfügbaren Dämmmaterialien deutlich erweitert werden. Zu erwähnen sind hier insbesondere sogenannte Aerogele. Diese entstehen durch Vernetzung von Silikat-Nanoteilchen mit organischen Molekülen im Sol-Gel-Verfahren. Nachdem im Anschluss das Lösemittel entzogen wird, bildet sich ein transluzentes Gel mit einem Durchmesser von wenigen Millimetern, welches bis zu 95 Prozent aus Luft besteht. Trotz seiner geringen Dichte verfügt das Material über eine hohe Härte. Da der Durchmesser der Poren von Aerogelen nur wenige Nanometer beträgt, werden in dem Dämmmaterial die Luftzirkulation und damit die Weiterleitung von Wärme und Schall weitgehend unterbunden.

Weiterleitung von Wärme und Schall kann weitgehend unterbunden werden.

Aufgrund seiner Lichtdurchlässigkeit eignet es sich etwa für Dachkonstruktionen, die neben einer effizienten Wärmedämmung auch Tageslicht in das Innere der Gebäude hindurchlassen sollen. Ein bedeutender Hersteller von Aerogelen ist das US-amerikanische Unternehmen Cabot, welches bereits seit 2003 Aerogele im großtechnischen Maßstab am Produktionsstandort in Frankfurt herstellt. Ursprünglich unter dem Markennamen Nanogel® kommerzialisiert, handelt es sich bei dem Produkt nach den Angaben des Herstellers um das weltweit leichteste lichtdurchlässige, feste Dämmmaterial. Mit seinem aktuellen Markennamen Lumira® zielt das Aerogel von Cabot vor allem auf den Markt von Tageslichtbeleuchtungssystemen, die gleichzeitig einen hohen Umweltstandard erreichen sollen.

Als hocheffiziente Dämmstoffe sind weiterhin Vakuumisoliationspaneele zu nennen, bei denen das gewöhnliche Kernmaterial Polyurethanschaum durch nanoporöses Silica ersetzt werden kann. Ein solches Dämmmaterial weist wegen des evakuierten, porösen Kernmaterials wesentlich gerin-

³⁸ B. A. Korgel; „Composite for smarter windows“; Nature, Vol. 500, p. 278, 15. 08. 2013

gere Materialstärken auf als konventionelle Dämmstoffe.³⁹ Sowohl bei Aerogelen auf Silikatbasis als auch bei Vakuumisulationspaneelen ist allerdings eine fachgerechte Verarbeitung unter Baustellenbedingungen nur schwierig zu gewährleisten. BASF hat daher den flexiblen Kunststoff Polyurethan mit einem neuartigen Herstellungsverfahren so aufgeschäumt, dass die hergestellten Platten mit den darin gebildeten Nanoporen direkt auf der Baustelle verarbeitet werden können. Sie können gesägt, gefräst, gebohrt und geklebt werden. Eine 15 Zentimeter dicke Hauswand mit dem neuartigen Dämmmaterial isoliert genauso gut wie eine fast 50 Zentimeter dicke Hauswand mit konventioneller Dämmung. Die nun nanoskaligen Löcher im Slentite genannten Dämmstoff sind mit 50 bis 100 Nanometern Durchmesser bis zu 1000-mal kleiner als in bisherigen Schaumstoffen und dämmen dabei fast doppelt so gut. Eine Pilotproduktionsanlage wird im Jahr 2014 im Werk Lemförde bei Osnabrück in Betrieb gehen.⁴⁰

4 AUSWIRKUNGEN DER SUBSTITUTION AUF DEN LEBENSWEG EINES PRODUKTES

Die Auswirkungen von Werkstoffsubstitutionen fallen vielfältig aus, insbesondere wenn recyclingfähige Werkstoffe betroffen sind. Werkstoffsubstitutionen können zu umfangreichen Produktverbesserungen und einer längeren Lebensdauer führen. Allerdings ziehen Substitutionswerkstoffe auch eine erhebliche Ausweitung des Güterbestandes nach sich. Diese in Gütern gebundenen Materialien stehen kurzfristig nicht als Sekundärrohstoff zur Verfügung. Somit ist jede Substitution im Hinblick auf das Recycling mit dem Aufbau neuer Werkstoffbestände verbunden, so dass die Vorteile des Recyclings erst zeitverzögert wirken. Werkstoffsubstitution und Recycling stehen in dieser Hinsicht in Konkurrenz um Ressourceneffizienz und Umweltscho-

Werkstoffsubstitutionen können den Lebensweg eines Produktes verlängern.

³⁹ Kleinhempel, A.-K.: „Innovative Dämmstoffe im Bauwesen, Forschungsstand und Marktübersicht“, Bremer Energie Institut, März 2005. http://www.energiekonsens.de/cms/upload/Downloads/Aktuelles/Innovative_Daemmstoffe_Bauwesen.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

⁴⁰ Kutter, S.: Pullover für Häuser, in: Wirtschaftswoche Nr. 38 (16.09.2013), S. 80

nung.⁴¹

Dennoch zeigen neue Materialentwicklungen erhebliche Ressourceneffizienzpotenziale. Sie ermöglichen neue Leichtbaukonzepte oder können verbesserte Verschleißfestigkeiten bewirken. So können etwa die Anwendungsbereiche verschleißfester technischer Keramiken erweitert werden, was insbesondere bei Hochtemperaturanwendungen zum Tragen kommt. In Industrieöfen oder im Motorenbau werden solche Werkstoffe bereits erfolgreich eingesetzt. Die weitere Verbesserung von Prozesswirkungsgraden erfordert jedoch stetig steigende Einsatztemperaturen und damit permanent weiter zu optimierende Werkstoffeigenschaften.⁴²

Das verwendete Material ist von entscheidender Bedeutung im Hinblick auf die Ressourceneffizienz von Produkten. Seine Auswahl geschieht nicht zufällig, sondern werkstoffkundlich fundiert, und bildet damit die Voraussetzung für korrekte Funktionalitäten und eine hohe Lebensdauer. Die Zahl möglicher Werkstoffalternativen ist jedoch meist begrenzt und Substitutionen verlangen häufig die Neugestaltung von Produkten. Zur Illustration der Werkstoffauswahl können beispielsweise Fahrradrahmen dienen: In den vergangenen 15 Jahren hat Aluminium den früher dominierenden Stahlrahmen weitgehend abgelöst. Sehr hochwertige Fahrradrahmen bestehen heute bereits aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK). Mit allen drei Werkstoffen lassen sich vergleichbare Fahrradrahmen bauen, die sich allerdings hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs sowie des Gewichts und der Menge eingesetzten Materials deutlich unterscheiden (Tabelle 2). So ist der Stahlrahmen zwar am schwersten, weist aber den geringsten Ressourcenverbrauch auf.⁴³

⁴¹ Ritthoff, M.; Liedtke, C.; Kaiser, C.: Technologien zur Ressourceneffizienzsteigerung: Hot Spots und Ansatzpunkte. Projektergebnisse „Steigerung der Ressourcenproduktivität als Kernstrategie einer nachhaltigen Entwicklung“, S. 40 ff. Wuppertal-Institut, Juni 2007. http://www.ressourcenproduktivitaet.de/download.php?datei=src/downloads/AP_23_Technologie_HotSpots.pdf. (aufgerufen am 18.12.2013)

⁴² ebd.

⁴³ ebd.

	Stahlrahmen	Aluminiumrahmen	CFK-Rahmen
Gewicht des eingesetzten Materials	1,777 kg	1,244 kg	1,323 kg
davon Verschnitt	0,146 kg	0,157 kg	0,404 kg
davon Rahmengewicht	1,631 kg	1,087 kg	0,919 kg
Ressourcenverbrauch (abiotisches Material)	25,000 kg	56,000 kg	49,000 kg

Tab. 2: Gegenüberstellung der Massen für die drei Fahrradrahmen⁴⁴

Ähnlich verhält es sich mit Roboterarmen. Werden Varianten aus Stahl und kohlefaserverstärkten Kompositen (CFK) verglichen, zeigt sich für den deutlich leichteren Verbundwerkstoff ein signifikant höherer Ressourcenverbrauch (Tabelle 3). Die Leichtbauweise allein erweist sich also noch nicht als hinreichend für gute Ressourceneffizienz. Allerdings verändert sich durch die Substitution des Stahlarmes durch das Kompositmaterial auch die Leistungsfähigkeit des Roboters. So erlaubt das geringere Gewicht eine schnellere Beschleunigung des Roboterarms bei gleicher Antriebsleistung, womit der Arbeitsdurchsatz erhöht werden kann. Damit liegt die Ressourceneffizienz der Verbundwerkstoffvariante deutlich über der Stahlvariante. Bei einer vollständigen Betrachtung nicht nur der Roboterarme, sondern des kompletten Robotersystems, kann durch den Verbundwerkstoffarm im Idealfall die Leistung verdoppelt werden.⁴⁵

	Verbundwerkstoffversion	Stahlversion
Werkstoffbedarf	4,8 kg	12,8 kg
Ressourcenverbrauch (abiotisches Material)	163,0 kg	76,0 kg

Tab. 3: Werkstoffbedarf und Ressourcenverbrauch für einen Roboterarm⁴⁶

⁴⁴ modifiziert nach Quelle: Herzog, K.; Liedtke, C.; Ritthoff, M.; Wallbaum, H.; Merten, T. (2003): Der Werkstoff Stahl im Vergleich zu Konkurrenzwerkstoffen – Verfahren, Ressourceneffizienz, Recycling, Umwelt. Forschungsbericht P 559, Düsseldorf: Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V.

⁴⁵ Ritthoff, M.; Liedtke, C.; Kaiser, C.: Technologien zur Ressourceneffizienzsteigerung: Hot Spots und Ansatzpunkte. Projektergebnisse „Steigerung der Ressourcenproduktivität als Kernstrategie einer nachhaltigen Entwicklung“, S. 40 ff. Wuppertal-Institut, Juni 2007. http://www.ressourcenproduktivitaet.de/download.php?datei=src/downloads/AP_23_Technologie_HotSpots.pdf. (aufgerufen am 18.12.2013)

⁴⁶ Quelle: Stiller, H. (1998): Materialintensitätsanalyse von Verbundwerkstoffen nach dem MIPS-Konzept. Eine Studie des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt und Energie im Auftrag des Verbundwerkstofflabors Bremen e.V., Wuppertal 1998

Lebenszyklusbetrachtungen und Ökobilanzierung für nanooptimierte Substitutionsprodukte

Als Querschnittstechnologie bietet die Nanotechnologie viele Möglichkeiten, um durch Werkstoffsubstitutionen ressourcen- und energieeffizientere Produkte und Produktionstechniken zu realisieren. So können nanooptimierte Werkstoffe dazu beitragen, beispielsweise den Energie- und Materialverbrauch zu reduzieren, toxische Chemikalien und seltene Rohstoffe zu ersetzen oder Technologien zur Erfassung und Minderung von Umweltschadstoffen zu verbessern. In den vorhergehenden Abschnitten wurden Nachhaltigkeitspotenziale von Werkstoffsubstitutionen überwiegend qualitativ beschrieben. Um belastbare Aussagen zu Chancen und möglicherweise auch Risiken bei der Werkstoffsubstitution durch den Einsatz der Nanotechnologie treffen zu können, sind allerdings eine ganzheitliche Bewertung unter Berücksichtigung sämtlicher Lebenszyklusphasen und eine möglichst weitgehende quantitative Erfassung von Umweltentlastungs- beziehungsweise Nachhaltigkeitseffekten erforderlich.

Eine international anerkannte Methode bildet in diesem Zusammenhang die Ökobilanzierung gemäß den ISO-Standards ISO 14040 und ISO 14044. Nach diesem Verfahren werden ökologische, ökonomische und soziale Aspekte von Produkten und Dienstleistungen von der Rohstoffextraktion bis zur Entsorgung beziehungsweise Wiederverwertung hinsichtlich relevanter Parameter erfasst – und sofern möglich quantifiziert und bewertet. Ein wichtiger Aspekt liegt hierbei darin, dass eine Bewertung aufgrund eines fehlenden absoluten Maßstabes für die Nachhaltigkeit eines Produktes immer nur in Bezug auf ein Vergleichsprodukt oder eine Vergleichstechnologie erfolgen kann. Im Falle einer Werkstoffsubstitution wäre als Vergleichsprodukt demnach das gleiche Produkt unter Verwendung des substituierten Werkstoffes anzusetzen. Dabei gilt die Voraussetzung, dass das nanotechnologische Produkt über einen mindestens gleich hohen Gebrauchsnutzen wie das Vergleichsprodukt verfügt. Das Verfahren der Ökobilanzierung ist für nano-

ISO-Standards unterstützen ganzheitliche Betrachtungen des Lebenszyklus.

technologische Produkte bislang nur vereinzelt angewendet worden.^{47, 48, 49} Eine der Ursachen hierfür besteht darin, dass Nanotechnologien hinsichtlich des Reifegrades oftmals eher im Prototypenstadium anzusiedeln und wesentliche Parameter in Bezug auf Herstellungsprozess und Produktperformance noch nicht bestimmbar sind. Hinzu kommt, dass Nanotechnologien oftmals nur einen Teilaspekt in der Wertschöpfungskette betreffen, was bei der Festlegung der Systemgrenzen der Bilanzierung zu berücksichtigen ist.

Um diesen Besonderheiten nachzukommen, sind weitere, an die Ökobilanz angelehnte Bewertungsverfahren und -kriterien entwickelt worden, die auch im Entwicklungsprozess neuer Produkte zumindest orientierende Aussagen hinsichtlich der Chancen und Risiken nanotechnologischer Produkte ermöglichen sollen. Zu nennen sind hier der Eco-Indicator 99 (EI99)⁵⁰, der NachhaltigkeitsCheck von Nanoprodukten⁵¹ des Öko-Institutes sowie der „Leitfaden zur Erhebung und Gegenüberstellung von Nutzen- und Risikoaspekten von Nanoprodukten.“⁵²

Die Ökobilanzierung von Nanoprodukten lässt aufgrund der begrenzten Zahl öffentlich verfügbarer quantitativer Daten oftmals keine umfassende Bewertung hinsichtlich des Umwelt- und Nachhaltigkeitsnutzens zu, sondern beschränkt sich überwiegend auf qualitative Angaben und Vergleiche. Dennoch geben die nach systematischen Kriterien durchgeführten Bewertungen zumindest einen orientierenden

⁴⁷ Steinfeldt, M.; von Gleich, A.; Petschow, U.; Pade, C.; Sprenger, R.-U.: Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Juni 2010, <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3777.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)

⁴⁸ Martens, S.; Eggers, B.; Evertz, T.: Untersuchung des Einsatzes von Nanomaterialien im Umweltschutz. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Juni 2010, <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3778.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)

⁴⁹ EP 2013: "Application of Life-Cycle Assessment to Nanoscale Technology: Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles", EPA 744-R-12-001, <http://www.epa.gov/dfe/pubs/projects/lbnp/final-li-ion-battery-lca-report.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)

⁵⁰ Martens, S.; Eggers, B.; Evertz, T.: Untersuchung des Einsatzes von Nanomaterialien im Umweltschutz. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Juni 2010, <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3778.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)

⁵¹ Möller, M.; Hermann, A.; Pistner, C. et al.: Analyse und strategisches Management der Nachhaltigkeitspotenziale von Nanoprodukten – NachhaltigkeitsCheck von Nanoprodukten. UBA-Texte 15/2012, <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4276.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)

⁵² BMU (Hrsg.): Verantwortlicher Umgang mit Nanotechnologien Bericht und Empfehlungen der NanoKommission der deutschen Bundesregierung, 2011; http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nano_schlussbericht_2011_bf.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

Aufschluss hinsichtlich möglicher Chancen und Risiken für Umwelt und Gesellschaft. Einschätzungen zu ausgewählten Nachhaltigkeitsaspekten für einige Beispiele von Nanoprodukten geben verschiedene Quellen.^{53, 54, 55}

Als Beispiele mit hohem Substitutionspotenzial sollen „Kompositwerkstoffe auf Nanocellulose-Basis“ und „Nanooptimierter Beton“ näher beschrieben werden.

Beispiel: Cellulose-Nanocomposites

Bei Nanocellulose handelt es sich um eine relativ neue Werkstoffentwicklung auf Basis nachwachsender Rohstoffe. Es existieren mehrere Varianten des Materials wie mikrofibrillierte Zellulose (microfibrillated cellulose - MFC) oder nanokristalline Drähte/Fasern, die sich aus zellstoffhaltigen Pflanzenabfällen, aber auch biotechnologisch durch bakterielle Synthese herstellen lassen. Nanocellulose zeichnet sich durch mechanische Eigenschaften wie Steifigkeit und Festigkeit aus und verbindet diese mit den Vorteilen einer hohen biologischen Verträglichkeit und steuerbaren biologischen Abbaubarkeit. Mittlerweile hat die Herstellung von Nanocellulose die Schwelle zur Kommerzialisierung überschritten und wird von einigen Unternehmen in größerem Maßstab umgesetzt, wie zum Beispiel von CelluForce (Kanada) oder Inventia (Schweden). Auch in Deutschland und der Schweiz gibt es Entwicklungsaktivitäten zu Nanocellulose wie durch das Start-up-Unternehmen Jenpolymer Materials oder das Adolphe Merkle Institute der Universität Fribourg (Schweiz), das unter anderem an der Entwicklung neuer Hochleistungskomposite aus synthetischen Kunststoffen und zellulosen Nanofasern forscht.

Nanocellulose zeichnet sich durch Steifigkeit und Festigkeit aus.

⁵³ Steinfeldt, M.; von Gleich, A.; Petschow, U.; Pade, C.; Sprenger, R.-U.: Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Juni 2010, <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3777.pdf>; Vier Fallstudien in Kap. 4 (aufgerufen am 18.12.2013)

⁵⁴ Möller, M.; Hermann, A.; Pistner, C. et al.: Analyse und strategisches Management der Nachhaltigkeitspotenziale von Nanoprodukten – NachhaltigkeitsCheck von Nanoprodukten. UBA-Texte 15/2012, <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4276.pdf>; S. 67, Abb. 7; S. 81, Abb. 11; S. 82, Abb. 12 (aufgerufen am 18.12.2013)

⁵⁵ Möller, M.; Hermann, A.; Gross, R.; Diesner, M.-O.; Küppers, P.; Luther, W.; Malanowski, N.; Haus, D.; Zweck, A.: Nanomaterialien: Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit, Zürich, vdf-Verlag, 2013, ISBN 978-3-7281-3559-9, http://www.vdf.ethz.ch/service/3559/3560_Nanomaterialien_OA.pdf; S. 110, Tab. 14. Veröffentlicht unter Creative Commons License CC BY-NC-ND 2.5 CH, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ch/> (aufgerufen am 18.12.2013)

Das Anwendungsspektrum von Nanocellulose ist sehr vielseitig und umfasst beispielsweise Anwendungen als Füllstoff zur Verstärkung von Papier oder Lebensmittelfolien, als Wundauflage und Implantatmaterial oder als Trägermaterial für pharmazeutische und kosmetische Wirkstoffe. Darüber hinaus wird Nanocellulose auch als Werkstoff zum Ersatz von Verstärkungsmaterialien entwickelt. Kurz- bis mittelfristig erscheint angesichts der mechanischen Eigenschaften unter anderem die Substitution von Glasfasern in Epoxidharzsystemen interessant.⁵⁶ In diesem Zusammenhang wurde in einer Studie der TA Swiss im Rahmen einer orientierenden Bilanzierung der CO₂-Fußabdruck im Vergleich zu herkömmlichen glasfaserverstärkten Kompositen ermittelt. Im Rahmen einer Hochrechnung wurde dabei angenommen, „dass mittel- bis langfristig durch die verschiedenen Anwendungsbereiche für Nanocellulose 25 Prozent der glasfaserverstärkten Kunststoffe durch Zellulose-Nanokomposite substituiert werden können. Ausgehend von dem spezifischen CO₂-Einsparpotenzial in Höhe von rund 1,8 kg CO₂-Äquivalente pro Kilogramm Glasfaser könnte sich so ein Gesamteinsparpotenzial von knapp einer halben Million Tonnen CO₂-Äquivalente ergeben.“⁵⁷

Beispiel: Nanooptimierter Beton

Beton ist der weltweit wichtigste Baustoff und macht aufgrund der energieintensiven Zementherstellung rund fünf Prozent der globalen CO₂-Emissionen aus.⁵⁸ Nanotechnologische Entwicklungen können erheblich dazu beitragen, den Beton umweltfreundlicher zu gestalten. So kann beispielsweise Ultrahochleistungsbeton durch nanoskalige Zementzuschläge hergestellt werden, die die Festigkeit von Beton deutlich steigern können. Dies führt zu erheblichen Potenzialen für Materialeinsparungen, da nicht nur weniger

⁵⁶ Expo Nano 2014: „Kunststoffe mit Cellulose Nanofasern verstärken“, Online-Ausstellung zur Nano-technologie, Herausgeber Life Science Communication (Zürich), 2013. <http://exponano.ch/wp-content/uploads/2014/01/A4-Nano-Cellulose.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)

⁵⁷ Möller, M.; Hermann, A.; Gross, R.; Diesner, M.-O.; Küppers, P.; Luther, W.; Malanowski, N.; Haus, D.; Zweck, A.: Nanomaterialien: Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit, S. 108, Zürich, vdf-Verlag, 2013, ISBN 978-3-7281-3559-9 veröffentlicht unter Creative Commons License CC BY-NC-ND 2.5 CH, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ch/> (aufgerufen am 18.12.2013)

⁵⁸ Beton wird Hightech. Welt.de, 31.07.2011, <http://www.welt.de/print/wams/vermishtes/article13517579/Beton-wird-Hightech.html> (aufgerufen am 18.12.2013)

Material für die erforderliche Festigkeit benötigt wird, sondern ultrahochfester Beton auch längere Nutzungsdauern von Gebäuden und Verkehrswegen ermöglicht.⁵⁹ Ein weiterer Ansatz liegt in der Verwendung nanoskaliger Calciumsilikathydrat-Partikel als Kristallisationskeime für eine beschleunigte Entwicklung der Frühfestigkeit des Betons. Im Rahmen des Projekts Nano-NachhaltigkeitsCheck des Öko-Instituts wurde das Produkt X-SEED® der Firma BASF nach Nachhaltigkeitsgesichtspunkten genauer beleuchtet.

Untersucht wurde dabei ein Betonfertigteile, das einmal ohne und einmal mit dem nanoskaligen Zusatzstoff hergestellt wurde. Beide Varianten wurden hinsichtlich der Materialeffizienz sowie der Energieeffizienz miteinander verglichen. Bei Verwendung des X-SEED®-Produktes kann aufgrund des optimierten Härtungsprozesses ein Zementtyp mit einem geringeren Klinkeranteil verwendet werden, der bei der Herstellung weniger Treibhausgasemissionen verursacht. Beim Einsatz des Beschleunigers besteht aber auch die Möglichkeit, den gleichen Zementtyp einzusetzen. Dabei kann auf die Zufuhr von Heizenergie bei ansonsten gleicher Härtungsgeschwindigkeit verzichtet und somit Energie eingespart werden. Werden die spezifischen CO₂-Einsparungen pro Kubikmeter Beton auf den europäischen Markt für Betonfertigteile hochgerechnet, so könnten mit X-SEED® jährlich bis zu rund 2,7 Millionen Tonnen CO₂ eingespart werden. Dies beruht auf der Annahme, dass bei etwa 90 Millionen Kubikmeter Fertigteilbeton rund die Hälfte davon bei Verwendung von X-SEED® auf klinkerreduzierte Zemente umgestellt werden kann.

Geht man von einem anderen Anwendungsszenario aus, bei dem X-SEED® zur Beschleunigung des Aushärtungsprozesses ohne Wärmezufuhr eingesetzt wird, beträgt das CO₂-Einsparpotenzial pro Jahr etwa 1,2 Millionen Tonnen. Diese Zahl errechnet sich unter der Annahme, dass rund 25 Prozent der Betonfertigteile in Europa zur Beschleunigung der Erhärtung wärmebehandelt werden. Vorausgesetzt

Nanooptimierte Entwicklungen können die Herstellung von Beton umweltfreundlicher machen.

⁵⁹ Juschkus, U.: „Zwerge im Beton“ Nanotechnologie und Ultra High Performance Concrete (UHPC)“, in: Informationen Bau-Rationalisierung, Magazin der RG Bau im RKW, Nr. 2, Juni 2008, 37. Jahrgang, S. 18 – 20

wird, dass tatsächlich auf die Wärmezufuhr verzichtet wird. Sollte dennoch Wärme eingesetzt werden, um den Prozess zusätzlich zu beschleunigen und dadurch Bauzeiten zu reduzieren, würden die CO₂-Einsparpotenziale egalisiert werden.⁶⁰

5 FAZIT

In den vorherigen Kapiteln der Kurzanalyse konnte an den beschriebenen Erläuterungen und ausgewählten Beispielen für Werkstoffsubstitutionen gezeigt werden, dass bereits einige dieser Ansätze in Produkte umgesetzt worden sind. Es ist aber auch offensichtlich, dass das Potenzial für Werkstoffsubstitutionen bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist. In der Entwicklung neuer Werkstoffe steckt in diesem Sinne ein erhebliches Ressourceneffizienzpotenzial. Ressourceneffizienz bildet dann einen Schlüssel für den Erfolg der deutschen Wirtschaft im globalen Wettbewerb, wenn es gelingt, das Wirtschaftswachstum vom steigenden Ressourcenverbrauch zu entkoppeln. Durch Werkstoffsubstitutionen kann ein breites Spektrum an neuen Konstruktions- und Funktionswerkstoffen erschlossen werden, die sich durch verbesserte Materialeigenschaften auszeichnen, zum Beispiel in Form von energieeffizienten Leichtbaumaterialien, verschleißfesteren Werkstoffen für Werkzeuge mit längeren Standzeiten sowie hochtemperatur- und korrosionsfesten Legierungen oder Keramiken zur Wirkungsgradsteigerung von Energieumwandlungsprozessen.

Für den Wirtschaftsstandort Deutschland ist es zunehmend wichtig, Werkstoffe in Produkten entlang der gesamten Wertschöpfungskette so ressourcenschonend und effizient wie möglich einzusetzen. Insbesondere aufgrund zukünftiger Rohstoffknappheit und aus Umwelt- und Klimaschutzgründen sind geeignete Werkstoffsubstitutionen, verbunden mit einer entsprechenden Kreislauffähigkeit, zukünftig von großem Interesse. Auch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert die Forschung und Entwicklung von Werkstoffen für Produkte und Verfahren mit

⁶⁰ Möller, M.: Nano-NachhaltigkeitsCheck – Integrierte Nachhaltigkeitsbewertung und strategische Optimierung von Nanoprodukten. Öko-Institut e.V., 2011, <http://www.oeko.de/oekodoc/1138/2011-020-de.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)

hoher Material- und Ressourceneffizienz. Direkte Beispiele dafür stellen die aktuell laufenden Fördermaßnahmen „MatRessource“ im Rahmen des Förderprogrammes „Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft - WING“ sowie r³-Innovative Technologien für Ressourceneffizienz - Strategische Metalle und Mineralien im Rahmenprogramm „Forschung für nachhaltige Entwicklungen - FONA“ dar. Diese speziellen Fördermaßnahmen tragen zu einer effizienteren Nutzung von Rohstoffen, einer Verringerung der Abhängigkeit von strategischen Metallen sowie zu Werkstoffsubstitutionen, Materialeffizienz, Recycling von Nanomaterialien und einer Verlängerung der Lebensdauer von Bauteilen und Anlagen bei. Der Schwerpunkt liegt auf der Förderung anwendungs- und wirtschaftsnaher Forschung, die besonders innovationsträchtig ist. Gefördert werden anwendungsorientierte industrielle Verbundprojekte, die ein arbeitsteiliges und multidisziplinäres Zusammenwirken von Unternehmen, insbesondere auch von kleinen und mittleren Unternehmen, mit Hochschulen und Forschungseinrichtungen erfordern. Die angestrebten Forschungs- und Entwicklungsprojekte sollen Impulse geben, um einen Beitrag zur Erhöhung der Ressourceneffizienz zu leisten.

Forschungs- und Entwicklungsprojekte geben Impulse für Ressourceneffizienz.

Die Fördermaßnahme ist auch Bestandteil der Hightechstrategie der Bundesregierung, die sich auf die Innovation und das Wachstum der Industrie in Deutschland ausrichtet. Zu dieser Zielsetzung und Förderung sollten weitere Aktivitäten im Bereich Forschung und Entwicklung und spezielle Förderprogramme zu Werkstoffsubstitutionen zukünftig vermehrt aufgelegt werden. Dabei müssten neben neuen Materialien auch die Beschichtungstechniken weiter entwickelt werden, da es mit ihnen gelingt, Funktionen vom Trägermaterial zu entkoppeln. Da die Funktionsanforderungen von der jeweiligen Beschichtung erfüllt werden und bei dem ressourcenintensiveren Träger- oder Volumenmaterial entfallen, kann sich dessen Materialauswahl und -entwicklung stärker auf umweltrelevante und nachhaltige Kriterien konzentrieren. Auch das Potenzial der Nanotechnologie sollte zukünftig für Werkstoffsubstitutionen stärker genutzt werden, um ressourcen- und energieeffizientere Produkte

sowie Produktionstechniken zu realisieren. So können nanooptimierte Werkstoffe wie beispielsweise Kohlenstoff-Nanoröhren, Graphene und (bakterielle) Nanocellulose sowie deren Komposite dazu beitragen, den Energie- und Materialverbrauch zu reduzieren, toxische Chemikalien und seltene Rohstoffe zu ersetzen oder Technologien zur Reduzierung von Umweltschadstoffen zu verbessern.

Bisher wurden Nachhaltigkeitspotenziale von Werkstoffsubstitutionen überwiegend qualitativ beschrieben. Um belastbare Aussagen zu Chancen und Wirkungen, aber auch möglicherweise Risiken bei der Werkstoffsubstitution treffen zu können, sollten zukünftig vermehrt eine ganzheitliche Bewertung unter Berücksichtigung sämtlicher Lebenszyklusphasen und eine möglichst weitgehende quantitative Erfassung von Umweltentlastungs- beziehungsweise Nachhaltigkeitseffekten vorgenommen werden. Wie bereits am Beispiel der Nanotechnologie gezeigt wurde, stellt eine international anerkannte Methode in diesem Zusammenhang die Ökobilanzierung gemäß den ISO-Standards ISO 14040 und ISO 14044 dar. Da das Verfahren der Ökobilanzierung für Werkstoffprodukte bisher nur vereinzelt angewendet wurde, besteht hier im Hinblick auf Werkstoffsubstitutionen noch ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

6 ANHANG

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Strukturaufbau von Nanokomposit-Schichten.
Seite 14

Abb. 2: Die im Projekt nanoRec angestrebten Eigenschaftsparameter
Seite 16

Tab. 1: Anwendungs- und Projektbeispiele von Werkstoffsubstitutionen
Seite 12

Tab. 2: Gegenüberstellung der Massen für die drei Fahrradrahmen
Seite 30

Tab. 3: Werkstoffbedarf und Ressourcenverbrauch für einen Roboterarm
Seite 30

Fußnotenverzeichnis

- ¹ Faktor X. Umweltbundesamt, 26.06.2012, <http://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/ressourcenschonung-in-produktion-konsum/faktor-x> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ² 2030 brauchen wir eine neue Erde. Tagesschau.de, 15.05.2012, <http://www.tagesschau.de/inland/wwf114.html> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ³ Faulstich, M. et al.: „Innovative Technologien für Ressourceneffizienz“. Informationspapier TU München, November 2010, http://www.r-zwei-innovation.de/_media/Informationspapier_BMBF_Foerdermassnahme_r3.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁴ Höcker, H. et al.: „Organische Elektronik in Deutschland“, Acatech, 2011, http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Webseite/Acatech/root/de/Publikationen/Projektberichte/acatech_Berichtet-und-Empfiehl_t_organische-Elektronik_WEB.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁵ Werkstoffsubstitution. IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH, o. D., http://www.ima-dresden.de/index.php?LLNK=informationssysteme_loesungen_werkstoffsubstitution&iL=1 (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁶ Reuter, M.: Methodik der Werkstoffauswahl. Carl Hanser Verlag, 2006, ISBN 978-3446-40680-3; S. 13
- ⁷ Intelligente Materiallösungen zum Erhalt von Werten. Hessen Nanotech, o. D., <http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dsmid=15653> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁸ Quelle: VDI Technologiezentrum GmbH und verändert nach Hessen Nanotech, o. D., <http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dsmid=15730> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁹ Verschleißschutz durch Hartstoffschichten. Hessen Nanotech, o. D., <http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dsmid=15748> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ¹⁰ Verschleißschutz durch Hartstoffschichten. Hessen Nanotech, o. D., <http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dsmid=15748> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ¹¹ Quelle: PLATIT AG, Selzach, Schweiz
- ¹² Verschleißschutz durch Hartstoffschichten. Hessen Nanotech, o. D., <http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dsmid=15748> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ¹³ Projekt Stahl-Schnecke. BMBF MatRessource, o. D., <http://www.matressource.de/projekte/stahl-schnecke/> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ¹⁴ Projekt nanoRec. BMBF MatRessource, o. D., <http://www.matressource.de/projekte/nanorec/> (aufgerufen am 18.12.2013)

- ¹⁵Projekt nanoRec. BMBF MatRessource, o. D., <http://www.matressource.de/projekte/nanorec/> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ¹⁶modifiziert nach Quelle: Volkmar Richter, Fraunhofer IKTS
- ¹⁷Projekt SubsTungs. BMBF MatRessource, o. D., <http://www.matressource.de/projekte/substungs/> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ¹⁸Verschleißschutz in der Fertigungstechnik. Hessen Nanotech, o. D., <http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dsmid=15764> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ¹⁹Effiziente Beschichtungs-Systeme für Kunststoffverarbeitungswerkzeuge. Pressebox, 04.09.2009, <http://www.pressebox.de/inaktiv/sulzer-metaplas-gmbh/Effiziente-Beschichtungs-Systeme-fuer-Kunststoffverarbeitungswerkzeuge/boxid/286720> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ²⁰Werkstoffe der Verkehrstechnik. Universität Erlangen-Nürnberg, Department Werkstoffwissenschaften, o. D., <http://www.wv.uni-erlangen.de/forschung.shtml> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ²¹Weltpremiere des BMW i3 – stabil, sicher und ohne B-Säulen. Springer, 30.07.2013, <http://www.springerprofessional.de/weltpremiere-des-bmw-i3-stabil-sicher-und-ohne-b-saeulen/4592144.html> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ²²„Neue Dimension Material – Funktionelle Beschichtungen & keramische Verbundwerkstoffe“; Produktbroschüre Clariant International AG, 2007
- ²³[http://www.clariant.de/C12575E4001FB2B8/vwLookupDownloads/Publication_Clariant_NeueDimensionMaterial.pdf/\\$FILE/Publication_Clariant_NeueDimensionMaterial.pdf](http://www.clariant.de/C12575E4001FB2B8/vwLookupDownloads/Publication_Clariant_NeueDimensionMaterial.pdf/$FILE/Publication_Clariant_NeueDimensionMaterial.pdf) (aufgerufen am 18.12.2013)
- ²⁴Projekt RADIKAL. BMBF MatRessource, o. D., <http://www.matressource.de/projekte/radikal/> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ²⁵Projekt RADIKAL. BMBF MatRessource, o. D., <http://www.matressource.de/projekte/radikal/> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ²⁶Beschichtungen für Antriebe. Hessen Nanotech, o. D., <http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dsmid=15762> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ²⁷Projekt KoWUB. BMBF MatRessource, o. D., <http://www.matressource.de/projekte/kowub/> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ²⁸Kohlhoff, J. et al.: Bleifreie piezoelektrische Keramiken. Werkstoffe in der Fertigung, 25.05.2012, <http://werkstoffzeitschrift.de/blogwerkstoffe/bleifreie-piezoelektrische-keramiken/> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ²⁹Kohlhoff, J. et al.: Bleifreie piezoelektrische Keramiken. Werkstoffe in der Fertigung, 25.05.2012, <http://werkstoffzeitschrift.de/blogwerkstoffe/bleifreie-piezoelektrische-keramiken/> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ³⁰Kohlhoff, J. et al.: Bleifreie piezoelektrische Keramiken. Werkstoffe in der Fertigung, 25.05.2012, <http://werkstoffzeitschrift.de/blogwerkstoffe/bleifreie-piezoelektrische-keramiken/> (aufgerufen am 18.12.2013)

- ³¹ Fördermaßnahme „Nanotechnologie im Bauwesen – NanoTecture“. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2007, <http://www.bmbf.de/en/furtherance/10471.php> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ³² Projektseite FuturZement. [Futurzement.de](http://www.futurzement.de/FuturZement/), 02.07.2010, <http://www.futurzement.de/FuturZement/> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ³³ BAST: Test eines die Luft reinigenden Lärmschutzes. Internationales Verkehrswesen, 03.03.2011, <http://www.internationalesverkehrswesen.de/news/internationales-verkehrswesen/artikel/id/bast-test-eines-die-luft-reinigenden-laermschutzes.html> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ³⁴ BMBF-Projekt Multifunktionale Fahrbahn aus nanooptimiertem Ultrahochleistungsbeton (FKZ 13N 10492-10500)
- ³⁵ Altreuther, B.: Multifunktionale Fahrbahn aus nanooptimiertem Ultra-Hochleistungsbeton. Präsentation auf der BMBF-Veranstaltung „Neue Werkstoffe und Nanotechnologie für die Bautechnik“ am 21.11.2013 in Frankfurt, http://www.innovationsbegleitung.de/nanotecture/wp-content/uploads/2013/12/Altreuther__M%C3%BCllerBBM_21_11_13_Frankfurt.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ³⁶ Schmidt, T., Lunk P.: Kurzbeitrag Holcim (Schweiz) AG: Nano-T® Technology, 2010. http://www.zement.at/Service/literatur/fileupl/koll10_schmidt.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)
- ³⁷ Umweltbundesamt 2012: „Analyse und strategisches Management der Nachhaltigkeitspotenziale von Nanoprodukten“, UBA-Texte 15/2012, ISSN 1862-4804. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4276.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ³⁸ B. A. Korgel; „Composite for smarter windows“; Nature, Vol. 500, p. 278, 15. 08. 2013
- ³⁹ Kleinhempel, A.-K.: „Innovative Dämmstoffe im Bauwesen, Forschungsstand und Marktübersicht“, Bremer Energie Institut, März 2005. http://www.energiekonsens.de/cms/Oupload/Downloads/Aktuelles/Innovative_Daemmstoffe_Bauwesen.pdf (aufgerufen am 01.12.2013)
- ⁴⁰ Kutter, S.: Pullover für Häuser, in: Wirtschaftswoche Nr. 38 (16.09.2013), S. 80
- ⁴¹ Ritthoff, M.; Liedtke, C.; Kaiser, C.: Technologien zur Ressourceneffizienzsteigerung: Hot Spots und Ansatzpunkte. Projektergebnisse „Steigerung der Ressourcenproduktivität als Kernstrategie einer nachhaltigen Entwicklung“, S. 40 ff. Wuppertal-Institut, Juni 2007. http://www.ressourcenproduktivitaet.de/download.php?datei=src/downloads/AP_23_Technologie_HotSpots.pdf. (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁴² ebd.
- ⁴³ ebd.

- ⁴⁴ modifiziert nach Quelle: Herzog, K.; Liedtke, C.; Ritthoff, M.; Wallbaum, H.; Merten, T. (2003): Der Werkstoff Stahl im Vergleich zu Konkurrenzwerkstoffen – Verfahren, Ressourceneffizienz, Recycling, Umwelt. Forschungsbericht P 559, Düsseldorf: Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V.
- ⁴⁵ Ritthoff, M.; Liedtke, C.; Kaiser, C.: Technologien zur Ressourceneffizienzsteigerung: Hot Spots und Ansatzpunkte. Projektergebnisse „Steigerung der Ressourcenproduktivität als Kernstrategie einer nachhaltigen Entwicklung“, S. 40 ff. Wuppertal-Institut, Juni 2007. http://www.ressourcenproduktivitaet.de/download.php?datei=src/downloads/AP_23_Technologie_HotSpots.pdf. (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁴⁶ Quelle: Stiller, H. (1998): Materialintensitätsanalyse von Verbundwerkstoffen nach dem MIPS-Konzept. Eine Studie des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt und Energie im Auftrag des Verbundwerkstofflabors Bremen e.V., Wuppertal 1998
- ⁴⁷ Steinfeldt, M.; von Gleich, A.; Petschow, U.; Pade, C.; Sprenger, R.-U.: Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Juni 2010, <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3777.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁴⁸ Martens, S.; Eggers, B.; Evertz, T.: Untersuchung des Einsatzes von Nanomaterialien im Umweltschutz. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Juni 2010, <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3778.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁴⁹ EP 2013: “Application of Life-Cycle Assessment to Nanoscale Technology: Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles”, EPA 744-R-12-001, <http://www.epa.gov/dfe/pubs/projects/lbnp/final-li-ion-battery-lca-report.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁵⁰ Martens, S.; Eggers, B.; Evertz, T.: Untersuchung des Einsatzes von Nanomaterialien im Umweltschutz. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Juni 2010, <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3778.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁵¹ Möller, M.; Hermann, A.; Pistner, C. et al.: Analyse und strategisches Management der Nachhaltigkeitspotenziale von Nanoprodukten – NachhaltigkeitsCheck von Nanoprodukten. UBA-Texte 15/2012, <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4276.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁵² BMU (Hrsg.): Verantwortlicher Umgang mit Nanotechnologien Bericht und Empfehlungen der NanoKommission der deutschen Bundesregierung, 2011; http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nano_schlussbericht_2011_bf.pdf (aufgerufen am 18.12.2013)

- ⁵³ Steinfeldt, M.; von Gleich, A.; Petschow, U.; Pade, C.; Sprenger, R.-U.: Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Juni 2010, <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3777.pdf>; Vier Fallstudien in Kap. 4 (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁵⁴ Möller, M.; Hermann, A.; Pistner, C. et al.: Analyse und strategisches Management der Nachhaltigkeitspotenziale von Nanoprodukten – NachhaltigkeitsCheck von Nanoprodukten. UBA-Texte 15/2012, <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4276.pdf>; S. 67, Abb. 7; S. 81, Abb. 11; S. 82, Abb. 12 (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁵⁵ Möller, M.; Hermann, A.; Gross, R.; Diesner, M.-O.; Küppers, P.; Luther, W.; Malanowski, N.; Haus, D.; Zweck, A.: Nanomaterialien: Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit, Zürich, vdf-Verlag, 2013, ISBN 978-3-7281-3559-9, http://www.vdf.ethz.ch/service/3559/3560_Nanomaterialien_OA.pdf; S. 110, Tab. 14. Veröffentlicht unter Creative Commons License CC BY-NC-ND 2.5 CH, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ch/> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁵⁶ Expo Nano 2014: „Kunststoffe mit Cellulose Nanofasern verstärken“, Online-Ausstellung zur Nano-technologie, Herausgeber Life Science Communication (Zürich), 2013. <http://exponano.ch/wp-content/uploads/2014/01/A4-Nano-Cellulose.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁵⁷ Möller, M.; Hermann, A.; Gross, R.; Diesner, M.-O.; Küppers, P.; Luther, W.; Malanowski, N.; Haus, D.; Zweck, A.: Nanomaterialien: Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit, Zürich, vdf-Verlag, 2013, ISBN 978-3-7281-3559-9, http://www.vdf.ethz.ch/service/3559/3560_Nanomaterialien_OA.pdf, S. 107. Veröffentlicht unter Creative Commons License CC BY-NC-ND 2.5 CH, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ch/> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁵⁸ Beton wird Hightech. Welt.de, 31.07.2011, <http://www.welt.de/print/wams/vermishtes/article13517579/Beton-wird-Hightech.html> (aufgerufen am 18.12.2013)
- ⁵⁹ Juschkus, U.: „Zwerge im Beton“ Nanotechnologie und Ultra High Performance Concrete (UHPC)“, in: Informationen Bau-Rationalisierung, Magazin der RG Bau im RKW, Nr. 2, Juni 2008, 37. Jahrgang, S. 18 – 20
- ⁶⁰ Möller, M.: Nano-NachhaltigkeitsCheck – Integrierte Nachhaltigkeitsbewertung und strategische Optimierung von Nanoprodukten. Öko-Institut e.V., 2011, <http://www.oeko.de/oekodoc/1138/2011-020-de.pdf> (aufgerufen am 18.12.2013)

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bertolt-Brecht-Platz 3
10117 Berlin
Tel. +49 30-27 59 506-0
Fax +49 30-27 59 506-30
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

Im Auftrag des



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit



NATIONALE
KLIMASCHUTZ
INITIATIVE