

## VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 12



# Systemische Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Bauwesen

Kurzanalyse Nr. 12: Systemische Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Bauwesen

Autoren:

Oliver S. Kaiser, VDI Technologiezentrum GmbH  
Dr. Oliver Krauss, VDI Technologiezentrum GmbH

Wir bedanken uns bei Frank Jansen, VDI e. V., für seine fachliche Unterstützung bei der Entstehung dieser Kurzanalyse.

Fachliche Ansprechpartnerin:

Dr. Nicole Becker, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

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: Benjamin Röbig

Titelbild: © PantherMedia / Tatjana Balzer

Druck: Sprintout Digitaldruck GmbH, Grunewaldstraße 18, 10823 Berlin

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

# Systemische Ansätze zur Steigerung der Ressourcen- effizienz im Bauwesen

Kurzanalyse Nr. 12  
und Dokumentation des Fachgesprächs



# INHALTSVERZEICHNIS

## TEIL 1: KURZANALYSE

1	EINLEITUNG	7
2	PLANUNGSPHASE	10
2.1	Hochbau	10
2.2	Straßen- und Brückenbau	14
3	BAUSTOFFHERSTELLUNG	16
3.1	Zementherstellung	18
3.2	Beton	21
3.3	Nachwachsende Rohstoffe	25
3.4	Straßen- und Brückenbau	27
4	BAUAUSFÜHRUNG	30
4.1	Hochbau	30
4.2	Straßen- und Brückenbau	34
5	RECYCLING AM LEBENSWEGENDE	38
5.1	Elektrodynamische Fragmentierung	39
5.2	Molecular Sorting	40
5.3	Straßen- und Brückenbau	42
6	FAZIT	44

## TEIL 2: DOKUMENTATION DES FACHGESPRÄCHS

1	PROGRAMM DES FACHGESPRÄCHS „SYSTEMISCHE ANSÄTZE ZUR STEIGERUNG DER RESSOURCENEFFIZIENZ IM BAUWESEN“	47
2	DOKUMENTATION DES FACHGESPRÄCHS „SYSTEMISCHE ANSÄTZE ZUR STEIGERUNG DER RESSOURCENEFFIZIENZ IM BAUWESEN“	48



TEIL 1

KURZANALYSE





## 1 EINLEITUNG

Im Hinblick auf eine Reduktion des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen ist das Thema Energieeffizienz in der Nutzungsphase von Gebäuden bereits etabliert. Dagegen wird dem Thema Materialeffizienz, bezogen auf den gesamten Lebensweg von Gebäuden und Infrastrukturen, noch wenig Beachtung geschenkt. Aufgrund der großen Materialströme im Bauwesen ist es jedoch von Bedeutung, die hier vorhandenen Potenziale zur Steigerung der Ressourceneffizienz zu identifizieren und zu realisieren. Dabei wird Ressourceneffizienz nach den Definitionen des Umweltbundesamtes<sup>1</sup> und der VDI-Richtlinie VDI 4800 Blatt 1<sup>2</sup> als Verhältnis eines gewissen Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Einsatz an natürlichen Ressourcen definiert.

Als Zielvorgabe für eine effizientere Ressourcennutzung dient die Nationale Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung, die eine Verdoppelung der Rohstoffproduktivität bis zum Jahr 2020, bezogen auf das Referenzjahr 1994, vorsieht.<sup>3</sup> Dazu kann entweder das monetäre Bruttoinlandsprodukt bei konstantem Rohstoffeinsatz steigen oder der Rohstoffeinsatz sinkt bei gleichbleibender oder gar steigender Wirtschaftsleistung. Entsprechend muss der Rohstoffbedarf, etwa für Sand, Kies und Natursteine, reduziert werden. Den großen Masseströmen im Bauwesen kommt hier eine bedeutende Rolle zu.<sup>4</sup> In Deutschland werden jährlich 550 Millionen Tonnen mineralischer Rohstoffe verbaut; mit über 190 Millionen Tonnen Bau- und Abbruchabfällen stammt die Hälfte des deutschen Abfallaufkommens aus dem Bauwesen.<sup>5</sup> Zum Vergleich: Im Jahr 2011 fielen 5,45 Millionen Tonnen Kunststoff-

<sup>1</sup> Glossar zum Ressourcenschutz. Umweltbundesamt, Januar 2012, <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4242.pdf> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>2</sup> VDI-Richtlinie: VDI 4800 Blatt 1 Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Verein Deutscher Ingenieure e. V., [https://www.vdi.de/richtlinie/entwurf\\_vdi\\_4800\\_blatt\\_1-ressourceneffizienz\\_methodische\\_grundlagen\\_prinzipien\\_und\\_strategien/](https://www.vdi.de/richtlinie/entwurf_vdi_4800_blatt_1-ressourceneffizienz_methodische_grundlagen_prinzipien_und_strategien/) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>3</sup> Rohstoffproduktivität. Umweltbundesamt, 07.10.2014, <http://www.umweltbundesamt.de/daten/rohstoffe-als-ressource/rohstoffproduktivitaet> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>4</sup> Recyclingbeton. VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 07.11.2014, <http://www.ressource-deutschland.de/themen/bauwesen/recyclingbeton/> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>5</sup> Nicole Becker: Ressourceneffizienz der Tragwerke. VDI Zentrum Ressourceneffizienz, Januar 2013, [http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/studien/Bau-5\\_08012013-Web.pdf](http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/Bau-5_08012013-Web.pdf), S. 6 (aufgerufen am 21.01.2015)

abfälle bei Endverbrauchern und Gewerbebetrieben an.<sup>6</sup> Im Jahr 2012 betrug die Menge der beim Schreddern von Altfahrzeugen anfallenden nichteisenhaltigen Werkstoffe 49.000 Tonnen und die des eisenhaltigen Stahlschrotts 300.000 Tonnen.<sup>7</sup>

Die zunehmende Bedeutung von Ressourceneffizienzaspekten spiegelt sich auch in der Novellierung von Standards wider. So weist beispielsweise die am 1. Juli 2013 eingeführte, novellierte Bauprodukte-Verordnung (BauPVO) in ihren „Grundforderungen an Bauwerke“ nun eine eigenständige Anforderung zur nachhaltigen Nutzung von natürlichen Ressourcen aus. Demnach sollen Bauwerke so entworfen werden, dass die eingesetzten Ressourcen am Lebenswegende wieder verwendet oder recycelt werden können.<sup>8</sup>

Auch die Europäische Kommission strebt Veränderungen an, die auf die Materialeffizienz im Hochbau abzielen. In einer Mitteilung vom Sommer 2014 nennt sie Vorschläge, wie der Ressourcenverbrauch reduziert werden kann. Dazu gehören die Berücksichtigung von Szenarien für den Rückbau, eine Projektplanung, die die Nutzung ressourceneffizienter Produkte berücksichtigt, die Verwendung wiederverwerteter Stoffe bei der Herstellung von Bauprodukten sowie die Verringerung von Abfällen, die auf Deponien gelagert werden müssen, durch Wiederverwendung und Recycling.<sup>9</sup> Der Rahmen für eine verbesserte Ressourceneffizienz ist also gesetzt.

Die vorliegende Kurzanalyse betrachtet das Themenfeld Ressourceneffizienz im Bauwesen unter dem Aspekt aktueller technischer Entwicklungen. Dabei werden sowohl bereits eingeführte, aber noch wenig verbreitete Innovationen

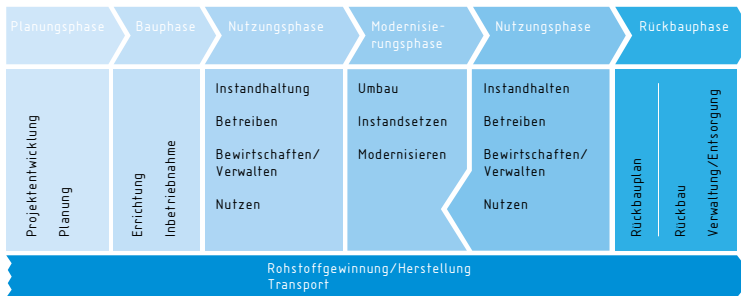
<sup>6</sup> Kunststoffabfälle in Deutschland. Umweltbundesamt, 07.05.2013, <http://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/kunststoffe> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>7</sup> Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2012. Umweltbundesamt, 27.06.2014, [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Abfallwirtschaft/jahresbericht\\_alfahrzeug\\_2012\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/jahresbericht_alfahrzeug_2012_bf.pdf), S. 6 (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>8</sup> Die neue Bauprodukte-Verordnung. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V., 2012, [http://www.baustoffindustrie.de/root/img/pool/downloads\\_2012/nov1112/bauprodukteverordnung.pdf](http://www.baustoffindustrie.de/root/img/pool/downloads_2012/nov1112/bauprodukteverordnung.pdf)

<sup>9</sup> Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen zum effizienten Ressourceneinsatz im Gebäudesektor. Europäische Kommission, 01.07.2014, COM(2014) 445 final, <http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2014/DE/1-2014-445-DE-F1-1.Pdf> (aufgerufen am 21.01.2015)

beschrieben (Best-Practice-Beispiele) als auch solche, die sich im Entwicklungsstadium befinden und gegebenenfalls in Zukunft auf den Markt kommen werden. Das Hauptaugenmerk liegt auf dem Hochbau, also Wohngebäuden und gewerblichen Hochbauten. Ergänzend werden Aspekte aus dem Tiefbau, konkret dem Straßen- und Brückenbau<sup>10</sup>, behandelt. Die Betrachtungen beziehen sich auf den Lebenszyklus von Gebäuden, wie er in Abb. 1 dargestellt ist. Die Nutzungsphasen sind hier ausgespart worden, da die bei ihnen vorrangigen, energetischen Fragestellungen bereits breit diskutiert werden. Stattdessen liegt der Fokus auf Materialeffizienz, da diese den Schlüssel zur Reduktion der großen Stoffströme im Bauwesen darstellt.



**Abb. 1: Vereinfachte Darstellung des Lebenszyklus<sup>11</sup>**

Ergänzt wird die vorliegende Publikation durch die Dokumentation eines Fachgesprächs, das zum gleichen Thema wie die Kurzanalyse durchgeführt wurde. Dieses fand im Dezember 2014 in Berlin mit Vertretern aus Forschung, Industrie, Politik, Verbänden und fachlichen Netzwerken statt. Hierbei wurden aus der Sicht von Unternehmen und Wissenschaft Herausforderungen und Hemmnisse für ein ressourceneffizientes Bauwesen entlang der Wertschöpfungskette identifiziert und mögliche Handlungsempfehlungen diskutiert.

<sup>10</sup> Der Brückenbau, bei dem es sich im eigentlichen Sinne um Hochbauten handelt, wurde hier dem Tiefbau zugeordnet, da er wie auch Straßen und Schienenwege zu den Infrastrukturanlagen gehört. In der Literatur sind beide Zuordnungen zu finden.

<sup>11</sup> Quelle: <http://www.nachhaltigesbauen.de/leitfaeden-und-arbeitshilfen-veroeffentlichungen/leitfaden-nachhaltiges-bauen-2013.html>, S. 26, Abb. A4

## 2 PLANUNGSPHASE

Ein systemischer Ansatz zur Steigerung der Ressourceneffizienz muss idealerweise bereits in der Entwurfs- und Planungsphase angelegt sein. Hier werden die Weichen für das nachhaltige Bauen gestellt, die den gesamten Lebenszyklus betreffen.

Während der Vorbereitung (Bedarfsplanung, Konzeptphase) und Planung sind die Einwirkungsmöglichkeiten auf die Kosten einer Maßnahme am größten. Anders gesagt: In diesem frühen Stadium können die Kosten am besten gesteuert werden.<sup>12</sup>

### 2.1 Hochbau

Ein Beispiel für ein bis zum Lebenswende gedachtes Konzept ist das „Zukunftshaus B10“ im Bruckmannweg 10 in Stuttgart, ein Forschungsprototyp aus dem Jahr 2014, gefertigt vom Fertighaushersteller Johannes Schwörer. Bauherr ist das Unternehmen E-Lab Projekt, eine Tochtergesellschaft des Stuttgart Institute of Sustainability, die Auswertung der Forschungsergebnisse übernimmt das Institut für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren (ILEK) der Universität Stuttgart. Das Stuttgarter Büro Werner Sobek (Sobek Engineering & Design) ist für Architektur und Koordination verantwortlich. Das Haus befindet sich in der Weißenhofsiedlung, die in den 1920er Jahren ein berühmtes Testfeld für das Wohnen der Zukunft darstellte, gestaltet von 17 namhaften Architekten, unter anderem Walter Gropius, Le Corbusier und Mies van der Rohe.

Das B10 ist ein Plusenergiehaus mit einer Grundfläche von 80 Quadratmetern, das von 2015 bis 2018 bewohnt wird. Anschließend wird es abgebaut, wobei alle im B10 verwendeten Materialien sortenrein getrennt und wiederverwertet werden sollen. Ausgerichtet ist das Konzept vor allem auf die Steuerung mit Smartphones und die Integration von

<sup>12</sup> Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), April 2013, <http://www.nachhaltigesbauen.de/leitfaeden-und-arbeitshilfen-veroeffentlichungen/leitfaden-nachhaltiges-bauen-2013.html>

Elektrofahrzeugen.<sup>13</sup>

Einen radikalen, integralen Planungsansatz über den gesamten Lebensweg verfolgt Prof. Wolfram Jäger vom Lehrstuhl für Tragwerksplanung an der TU Dresden. Er konzipiert ein Modellhaus wie aus einem Baukastensystem, das sich zusammensetzen lässt und später zur Wiederverwertung wieder demontiert werden kann. Das gilt vom aus Kalksandstein bestehenden Mauerziegel bis zur Elektroleitung. Trockenfüugung mittels Klipsen, Kletten oder Vorspannung ersetzt die Fugenverbindung durch Mörtel. Ein gemeinsames Maßsystem für den Rohbau und Innenausbau schafft Gemeinsamkeiten, die das modulare Konzept unterstützen.<sup>14</sup>

Auch bei einer eher klassischen Bauplanung gibt es eine Möglichkeit, die spätere Wiederverwertbarkeit von Komponenten eines Gebäudes zu fördern. Der Schlüssel dazu liegt im Building Information Modeling (BIM). Es setzt auf die klassischen CAD-Systeme auf und bildet alle relevanten Gebäudedaten in einem virtuellen Gebäudemodell digital ab. Jede Änderung durch Architekten oder Fachplaner wird registriert, was sowohl die Bauplanung als auch Bauausführung und das Facility Management unterstützt.

Eine Erweiterung des BIM in der „realen Welt“ plant Prof. Peter Jehle vom Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik der TU Dresden. Dazu wird in jedes Bauteil ein RFID (radio-frequency identification)-Transponder implementiert. Auf diesen Transpondern werden Informationen zu Konstruktion, verwendeten Materialien und Akteuren gespeichert, die jederzeit ausgelesen und geändert werden können. Das Einspeichern und Auslesen geschieht über ein Handlesegerät, das per Funkverbindung zum RFID-Transponder Kontakt aufnimmt. Da RFID-Transponder (manchmal auch als RFID-Tag bezeichnet) jahrzehntelang funktionieren müssen, werden sie in Bauanwendungen passiv ohne eigene

<sup>13</sup> Rüdiger Abele: Experimentalkapsel für das Wohnen von morgen, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 31.08.2014, <http://www.schwoererhaus.de/storage/files/Schwörer%20in%20den%20Medien/Frankfurter-Allgemeine-31.08.2014.pdf>, Seite V 5 und <http://www.faz.net/aktuell/stil/drinnen-draussen/zukunftshaus-b10-experimentalkapsel-fuer-das-wohnen-13126855.html> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>14</sup> Dogma oder Dosenpfand? Expertengespräch zur Recyclingfähigkeit von Gebäuden. DETAIL - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 06.03.2014, <http://www.detail.de/research/forschung-entwicklung/dogma-oder-dosenpfand-expertengespraech-zur-recyclingfaehigkeit-von-gebaeuden-022806.html> (aufgerufen am 21.01.2015)

Batterie betrieben, was bedeutet, dass das Lesegerät auch die notwendige Energie zum Senden einer Antwort drahtlos überträgt. Da die Reichweite in der Größenordnung von einem Meter liegen kann, sorgt eine Pulk-Erkennung in der Kommunikation dafür, dass mehrere RFID-Transponder im Umkreis geordnet nacheinander auf eine Anfrage des Lesegeräts antworten. Ein möglicher Schreibvorgang richtet sich danach gezielt an einen einzelnen Transponder.<sup>15</sup>

Der Vorteil der RFID-Technik gegenüber anderen Inventarisierungsverfahren, wie etwa der Kennzeichnung mit Strich- oder 2D-Codes, liegt in der Möglichkeit, RFID-Tags im wahrsten Sinne des Wortes zu „verbauen“, da kein Sichtkontakt zum Auslesen erforderlich ist. Die Informationen zum Bauteil können vielfältig sein und etwa Alter, Materialzusammensetzung, Standort, Funktion, vorhandene Mängel und vorgenommene Änderungen umfassen. Synchronisiert mit dem Datenmodell im Building Information Modeling, könnten Informationsverluste generell minimiert werden und durch die Identifikation von Materialien deren spätere Trennung und Rückverfolgung ermöglicht werden.<sup>16</sup> Es müssten allerdings geeignete Standards geschaffen werden, da der Speicherplatz eines RFID-Transponders begrenzt ist und jegliche Information in irgendeiner Weise codiert werden muss. Diese Codierung könnte zu Insellösungen führen, bei denen die Verwertbarkeit der Daten eben nicht über Jahrzehnte garantiert werden könnte.

Im Planungsprozess können auch alternative tragende und nichttragende Bauweisen avisiert werden, etwa der Lehm- oder Zementbau. Lehm ist vollständig recycelbar und substituiert Zement, etwa zwei Milliarden Menschen leben in Häusern aus Lehm- oder Zementbaustoffen. In industrialisierten Regionen wird er allerdings kaum angewandt, von Ausnahmen wie der in Stampflehm- oder Zementbauweise errichteten Berliner Kapelle der Versöhnung abgesehen.<sup>17</sup> Inzwischen gibt es einen punktuellen Einsatz von Lehm als Baustoff, meist zusammen mit Holz,

<sup>15</sup> RFID. Wikipedia – Die freie Enzyklopädie, 13.01.2015, <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=RFID&oldid=137743920> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>16</sup> Dogma oder Dosenpfand? Expertengespräch zur Recyclingfähigkeit von Gebäuden. DETAIL – Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 06.03.2014, <http://www.detail.de/research/forschung-entwicklung/dogma-oder-dosenpfand-expertengespraech-zur-recyclingfaehigkeit-von-gebaeuden-022806.html> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>17</sup> Horst Schroeder: Lehm- oder Zementbau. Wiesbaden, 2010, ISBN 978-3-8348-0214-9

auch im Neubaubereich<sup>18</sup> und bei Sanierungsprojekten.<sup>19</sup> Seit dem Jahr 2013 sind drei DIN-Normen für industriell hergestellte Lehmbaumstoffe in Kraft.<sup>20, 21</sup> Für nicht genormte und auf der Baustelle hergestellte Lehmbaumstoffe gelten weiterhin die 1998 erstmals erschienenen und inzwischen bauaufsichtlich eingeführten „Lehmbau-Regeln“.<sup>22, 23</sup>

Die Rahmenbedingungen für Beschaffungen der öffentlichen Hand auf Bundes- und Landesebene sowie vergaberechtliche Rahmenbedingungen in Hinsicht auf rezyklierte Baustoffe beschreibt der „Leitfaden ressourceneffiziente Beschaffung“, erstellt von der Expertengruppe Ressourceneffizienz in der Allianz für nachhaltige Beschaffung. Teil 1 befasst sich mit rezyklierten Baustoffen (Beton, Schottertragschicht, Erdbauarbeiten, Verwertung von Asphalt).<sup>24</sup> Ein vergleichbarer Leitfaden mit Gültigkeit auf Bundesebene befasst sich mit technischen Gebäudekomponenten (etwa Wärmedämmung, Fenstern, Heizsystempumpen, Pelletheizsystemen, Gebäudeklimatisierung).<sup>25</sup>

<sup>18</sup> Beispielhafte Neubauten: Westend Grün, Weißes Lehmhaus, Berlin Westend 2007 und Haus Ihlow, Märkische Schweiz 2004, <http://www.baunetz.de/talk/crystal/index.php?cat=Interview&nr=21>; Kirche und Gemeindezentrum in Karlsruhe, [http://www.baunetzwissen.de/objektartikel/Gesund-Bauen-Kirche-und-Gemeindezentrum-in-Karlsruhe\\_2963659.html](http://www.baunetzwissen.de/objektartikel/Gesund-Bauen-Kirche-und-Gemeindezentrum-in-Karlsruhe_2963659.html); Einfamilienhaus im Bregenzer Wald, [http://www.100haeuser.at/files/311\\_2118\\_/100haeuser\\_preview\\_140505.pdf](http://diepresse.com/home/leben/wohnen/1416146/Architektur_Laerchenholz-Stroh-Lehm-Design;Villa%20nahe%20Graz%20(S.%2010%20f.)%20und%20Wohnhaus%20nahe%20Schlins%20(S.%2030%20f.),%20in:%20Manuela%20Hötzl%20(Hrsg.),%20100%20österreichische%20Häuser,%20Ausgabe%202014/2015,%20http://www.100haeuser.at/files/311_2118_/100haeuser_preview_140505.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>19</sup> Dieter Mai: Innovative Lehm-Bau-Architektur für den Waldorf-Kindergarten. Blog der Firma Claytec, 03.07.2014, <http://www.clayblog.de/2014/07/waldorf-kiga-viersen/> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>20</sup> DIN 18945 für Lehmsteine, DIN 18946 für Lehmputzmörtel und DIN 18947 für Lehmputzmörtel

<sup>21</sup> Verbindliche Normen im Lehm-Bau. Springer Professional, 28.08.2013, <http://www.springerprofessional.de/verbindliche-normen-im-lehmbau/4696758.html> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>22</sup> Ein Meilenstein für den Baustoff Lehm: DIN-Normen zum Lehm-Bau treten in Kraft. Firmenwebsite Claytec e. K. Viersen, o. D., <http://www.claytec.de/service/aktuelles/din-normen-lehm-2013.html> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>23</sup> Mit Lehm „geregelt“ bauen. Springer Professional, 18.03.2013, <http://www.springerprofessional.de/mit-lehm-geregelt-bauen/4696766.html> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>24</sup> Leitfaden ressourceneffiziente Beschaffung, Teil 1. Januar 2014, [http://www.nachhaltige-beschaffung.info/SharedDocs/DokumenteNB/LF\\_Ressourceneffizienz\\_02\\_2014.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](http://www.nachhaltige-beschaffung.info/SharedDocs/DokumenteNB/LF_Ressourceneffizienz_02_2014.pdf?__blob=publicationFile&v=5) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>25</sup> Berliner Energieagentur GmbH (Hrsg.): BuySmart Leitfaden Gebäude. Juni 2012, <http://www.nachhaltige-beschaffung.info/DE/DokumentAnzeigen/dokument-anzeigen.html?idDocument=104&view=knbdownload> (aufgerufen am 21.01.2015)

## 2.2 Straßen- und Brückenbau

Auch für den Straßenbau enthält der oben genannte Leitfaden ressourceneffiziente Beschaffung Hinweise, etwa für die hochwertige Verwertung und den Einsatz von Asphalt und den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau.<sup>26</sup>

Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) hat in ihrer mittelfristigen Forschungsplanung von 2011 bis 2015<sup>27</sup> neunzehn Forschungslinien definiert, von denen eine mit „Die postfossile Gesellschaft: Verbesserte Nutzung endlicher Ressourcen im Straßenbau“ betitelt ist. Die Ergebnisse dieser Forschungsaktivitäten werden in Zukunft veröffentlicht.<sup>28</sup>

Das Wuppertal Institut sieht nicht nur bei den Antriebssystemen und der Verkehrstelematik, sondern besonders in der Verkehrsinfrastruktur Potenziale zur Steigerung der Ressourceneffizienz, etwa indem bereits bei der Planung eine verringerte Straßenbreite angesetzt wird. Solche Betrachtungen der Ressourceneffizienz der Infrastruktur werden bisher vernachlässigt, obwohl beispielsweise der größte Ressourcenverbrauch im Güterverkehr durch den Bau und die Instandhaltung der Infrastruktur der verschiedenen Verkehrsträger entsteht.<sup>29</sup>

Das Potenzial von Sekundärrohstoffen wird bei kleineren Straßenbau- und Sanierungsmaßnahmen in Städten und Kreisen noch nicht ausgeschöpft. Im Gegensatz zu Autobahnen kommen im kommunalen Straßenbau RC-Baustoffe und industrielle Nebenprodukte kaum zum Einsatz. Um dies zu ändern, wurde im Rahmen einer Diplomarbeit an der Fachhochschule Münster in Zusammenarbeit mit der Stadt Münster ein geobasiertes Verwertungskonzept hinsichtlich alternativer Baustoffe für den kommunalen Stra-

<sup>26</sup> Leitfaden ressourceneffiziente Beschaffung, Teil 1. Januar 2014, [http://www.nachhaltige-beschaffung.info/SharedDocs/DokumenteNB/LF\\_Ressourceneffizienz\\_02\\_2014.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](http://www.nachhaltige-beschaffung.info/SharedDocs/DokumenteNB/LF_Ressourceneffizienz_02_2014.pdf?__blob=publicationFile&v=5) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>27</sup> Mittelfristige Forschungsplanung 2011/2015 – Revision 2012. Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Juli 2013, [http://www.bast.de/DE/Publikationen/Medien/Dokumente/forschungsplanung-2011-2015.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bast.de/DE/Publikationen/Medien/Dokumente/forschungsplanung-2011-2015.pdf?__blob=publicationFile) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>28</sup> ELBA: Das elektronische BASt-Archiv, OPUS – Datenbankabfrage mit Suchwörtern „Ressourcen“ und „postfossil“ am 21.01.2015; [http://bast.opus.hbz-nrw.de/abfrage\\_suchen.php?la=de](http://bast.opus.hbz-nrw.de/abfrage_suchen.php?la=de) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>29</sup> Holger Rohn et al.: Ressourceneffizienz von ausgewählten Technologien, Produkten und Strategien. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, September 2010, ISSN 1867-0237, [http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRess\\_AP1\\_6\\_Zusammenfassg.pdf](http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRess_AP1_6_Zusammenfassg.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)



Benbau entwickelt. In einer Matrix wurden alle Alternativbaustoffe mit ihren Anwendungsmöglichkeiten erfasst, die für die Verwertung im Straßenbau im Stadtgebiet Münster potenziell in Frage kommen. Anhand dieser Verwertungsmatrix können nun für jedes Bauprojekt der Stadt die einsetzbaren RC-Baustoffe identifiziert werden.<sup>30</sup>

<sup>30</sup> Elena Traut: Früher Brücke, heute Straße. *focus*, Ausgabe 17, Wintersemester 2010/2011, <https://www.fh-muenster.de/hochschule/downloads/publikationen/FHocus/fhocus-12-2010/fhocus-12-2010.pdf>, S. 24-25 (aufgerufen am 21.01.2015)

### 3 BAUSTOFFHERSTELLUNG

Am Beginn der Wertschöpfungskette der Bauwirtschaft steht die Baustoff- und Steine-und-Erden-Industrie. In dieser Branche werden nichtenergetische mineralische Rohstoffe, vor allem Kies, Sand, Naturstein, Kalk und Ton, gewonnen und zu Baustoffen wie Zement, Beton, Mauerwerksprodukten, Dachziegeln, Baukeramik, Branntkalk, Dämm- und Gipsbaustoffen verarbeitet. Während Deutschland bei einem Großteil der Energierohstoffe und bei Metallen weitgehend auf Importe angewiesen ist, wird die Versorgung der deutschen Bauindustrie mit mineralischen Rohstoffen nahezu vollständig aus heimischen Vorkommen gedeckt. Neben den aus natürlichen Lagerstätten entnommenen Primärrohstoffen spielen dabei auch Sekundärrohstoffe aus recycelten Bauabfällen und aus industriellen Prozessen eine Rolle.<sup>31</sup>

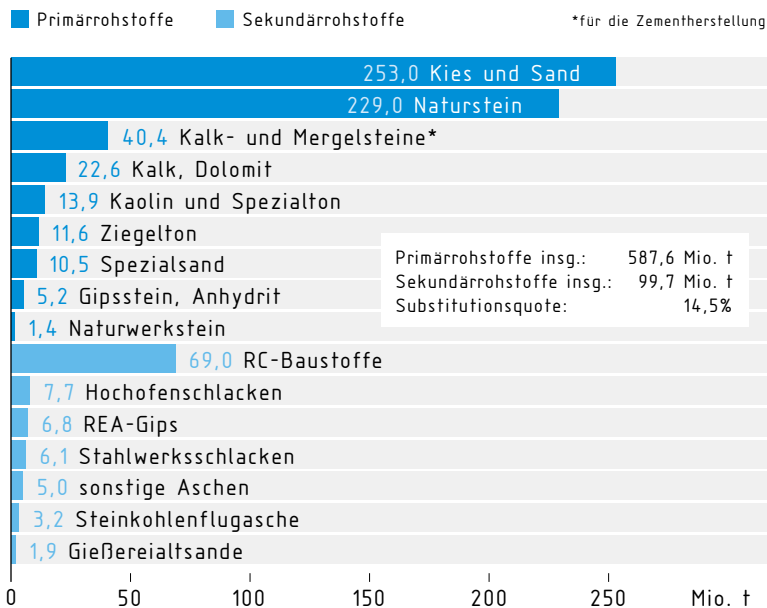
Im Jahr 2011 wurden 587,6 Mio. Tonnen Primärrohstoffe und 99,7 Mio. Tonnen Sekundärrohstoffe in der Baustoff- und Steine-und-Erden-Industrie verarbeitet, was einer Substitutionsquote von 14,5% entspricht (Abb. 2). Die mengenmäßig bedeutendsten Primärrohstoffe sind Kies und Sand mit jährlich 253 Mio. Tonnen und Naturstein mit 229 Mio. Tonnen. Bei den Sekundärrohstoffen dominieren RC-Baustoffe, vorwiegend aus dem Recycling von Bauschutt, Straßenaufbruch und Bodenaushub, mit 69 Mio. Tonnen, gefolgt von industriellen Nebenprodukten wie Schlacken, Aschen und REA-Gips.<sup>32</sup>

Der Bedarf an Steine- und Erden-Rohstoffen ist in den letzten zwei Jahrzehnten deutlich zurückgegangen. Noch in den 1990er-Jahren betrug die Gesamtmenge an Primärrohstoffen der Baustoff- und Steine-und-Erden-Industrie in Deutschland deutlich über 700 Mio. Tonnen pro Jahr. Eine Studie des Bundesverbands Baustoffe – Steine und Erden e. V. ergab, dass sich der Rohstoffbedarf in den nächsten

<sup>31</sup> Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2030 in Deutschland. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V., August 2013, [http://www.baustoffindustrie.de/root/img/pool/downloads\\_2013/210813/rohstoffstudie\\_08\\_2013.pdf](http://www.baustoffindustrie.de/root/img/pool/downloads_2013/210813/rohstoffstudie_08_2013.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>32</sup> Aufgaben, Themen und Ziele 2014/2015. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V., 2014, [http://www.baustoffindustrie.de/root/img/pool/downloads\\_2014/250614/Jahresbericht2014.pdf](http://www.baustoffindustrie.de/root/img/pool/downloads_2014/250614/Jahresbericht2014.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

Jahren nur geringfügig verändern wird. Abhängig von der wirtschaftlichen Dynamik wird für das Jahr 2030 ein Gesamtbedarf von 544 Mio. Tonnen an Primärrohstoffen (bei einem BIP-Wachstum von +0,9% pro Jahr) bzw. 631 Mio. Tonnen (BIP: +1,9% pro Jahr) prognostiziert. Die Substitutionsquote wird nach dieser Studie leicht von 14,5% auf 13,9% bzw. 13,4% abnehmen. Ursache hierfür ist, dass durch die Energiewende bis 2030 weniger Kraftwerksnebenprodukte anfallen, während bei den anderen industriellen Nebenprodukten und den RC-Baustoffen kein großer Anstieg der verfügbaren Mengen erwartet wird.<sup>33</sup>



**Abb. 2: Primär- und Sekundärrohstoffe der Baustoff-, Steine-und-Erden-Industrie in Deutschland<sup>34</sup>**

<sup>33</sup> Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2030 in Deutschland. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V., August 2013, [http://www.baustoffindustrie.de/root/img/pool/downloads\\_2013/210813/rohstoffstudie\\_08\\_2013.pdf](http://www.baustoffindustrie.de/root/img/pool/downloads_2013/210813/rohstoffstudie_08_2013.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>34</sup> Quelle: [http://www.baustoffindustrie.de/root/img/pool/downloads\\_2014/250614/Jahresbericht2014.pdf](http://www.baustoffindustrie.de/root/img/pool/downloads_2014/250614/Jahresbericht2014.pdf)

Die Verwertung des anfallenden Bauschutts liegt bereits heute bei über 95 %. Dabei gehen rund 78 % in das Recycling.<sup>35</sup> Die Menge an verfügbaren Bauabfällen ist begrenzt, denn es werden nicht mehr Bauten abgerissen, nur um mehr Sekundärrohstoffe zu erhalten. Zudem ist ein wirtschaftliches Recycling nur möglich, wenn die Abfälle dort anfallen, wo sie als Sekundärrohstoffe benötigt werden.

Weitere Begrenzungen ergeben sich durch Schadstoffe in den Ersatzbaustoffen sowie durch Vorgaben zum Boden- und Grundwasserschutz.<sup>36</sup>

### 3.1 Zementherstellung

Bei der Herstellung in großen Mengen genutzter mineralischer Baustoffe, insbesondere Zement, sind große Potenziale zur Einsparung von Rohstoffen und auch von Energie sowie den damit verbundenen klimaschädlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu sehen. Insgesamt werden bei der Herstellung von jährlich 30 Mio. Tonnen Zement in Deutschland etwa 3 % des Gesamtausstoßes an Kohlendioxid in der Bundesrepublik frei.<sup>37</sup> Ein Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen entsteht bei der Zementproduktion auch direkt als chemisches Reaktionsprodukt aus der Umwandlung der eingesetzten Rohstoffe und nicht als Verbrennungsprodukt aus der Bereitstellung thermischer Energie für den Prozess. So war die Produktion jeder Tonne Zement in Deutschland im Jahr 2011 mit rund 0,556 t (2004: 0,675 t) CO<sub>2</sub> verbunden. Davon sind 69 % (2004: 60 %) rohstoffbedingte Emissionen, da beim Calcinieren des Kalks (CaCO<sub>3</sub>) zu Calciumoxid Kohlendioxid freigesetzt wird.<sup>38, 39</sup> Der spezifische Brennstoffeinsatz ist seit

<sup>35</sup> Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2012. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V., 2015, [http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/KWB\\_9.pdf](http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/KWB_9.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>36</sup> Bernd Susset, Thomas Beißwenger: Ressourceneffizienz in der Steine- und Erdenindustrie – Beiträge und Grenzen. Vortrag, Ressourceneffizienzkongress Baden-Württemberg, Karlsruhe, September 2012. [http://www.ressourceneffizienzkongress.de/files/f\\_13\\_susset.pdf](http://www.ressourceneffizienzkongress.de/files/f_13_susset.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>37</sup> Jürgen Siebenlist: Abfallstoffe senken CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Zementproduktion, in: VDI nachrichten, 28.08.2009, <http://www.ingenieur.de/Branchen/Bauwirtschaft/Abfallstoffe-senken-CO2-Ausstoss-Zementproduktion> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>38</sup> Günter Dehoust et al.: Ermittlung von relevanten Stoffen bzw. Materialien für eine stoffstromorientierte Ressourcen schonende Abfallwirtschaft. Öko-Institut e. V., 10.05.2006, [http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/stoffstrom\\_kurz.pdf](http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/stoffstrom_kurz.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>39</sup> Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2011. Verein Deutscher Zementwerke e. V., August 2012, [http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Umweltdaten/Umweltdaten\\_2011.pdf](http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Umweltdaten/Umweltdaten_2011.pdf), S. 17 (aufgerufen am 21.01.2015)

den 1950er Jahren in der Zementproduktion in Deutschland um über die Hälfte reduziert worden. Der Einsatz von Sekundärbrennstoffen ist im Zeitraum 1994 bis 2004 auf einen Anteil von 42 % mehr als vervierfacht worden<sup>40</sup>, im Jahr 2011 lag der Anteil an Sekundärbrennstoffen bei über 61%.<sup>41</sup> Der spezifische elektrische Energieeinsatz lag bei 110 kWh pro Tonne produzierten Zements.<sup>42</sup>

Einen Lösungsansatz zur weiteren Verringerung der Kohlendioxidemission bietet die energetische Optimierung der Zementherstellung. Das Südbayerische Portlandzementwerk der Gebrüder Wiesböck im oberbayerischen Rohrdorf spart ein Drittel seines externen Strombedarfs ein, indem es die ungenutzte Wärme des Abgases aus dem Drehrohr-ofen verstromt. Seit Juni 2012 befindet sich das Abhitze-kraftwerk zur Verstromung dieser Restwärme im Probebe-trieb.<sup>43</sup>

Ein weiterer Lösungsansatz ist die hundertprozentige Weiterverwertung von Rotorblättern ausgemusterter Wind-energieanlagen, von denen sowohl der Energiegehalt des Harzes als auch die im Calcinator entstehende Asche ge-nutzt werden können. Der Geschäftsbereich Geocycle des Zementproduzenten Holcim Deutschland AG, Hamburg, hat von 2010 bis 2012 rund 600 Rotoren mit bis zu 60 Metern Länge von Anlagen aus Deutschland verwertet, darunter Prototypen und Testbauteile. Im Jahr 2019 sollen es über 15.000 Tonnen sein. In einer Aufbereitungsanlage nahe Lüneburg wird der faserverstärkte Kunststoff schrittweise zerkleinert und Metall abgeschieden. Das verbleibende Ma-terial – Fasern, Harze und Füllstoffe – wird homogenisiert und gelangt zur Weiterverarbeitung in das Zementwerk Lägerdorf, Schleswig-Holstein. Zunächst wird im Calcinator

<sup>40</sup> Günter Dehoust et al.: Ermittlung von relevanten Stoffen bzw. Materialien für eine stoffstromorientierte Ressourcen schonende Abfallwirtschaft. Öko-Institut e. V., 10.05.2006, [http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/stoffstrom\\_kurz.pdf](http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/stoffstrom_kurz.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>41</sup> Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2011. Verein Deutscher Zementwerke e. V., August 2012, [http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Umweltdaten/Umweltdaten\\_2011.pdf](http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Umweltdaten/Umweltdaten_2011.pdf), S. 10 f. (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>42</sup> Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2011. Verein Deutscher Zementwerke e. V., August 2012, [http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Umweltdaten/Umweltdaten\\_2011.pdf](http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Umweltdaten/Umweltdaten_2011.pdf), S. 13 (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>43</sup> Ralph H. Ahrens: Zementwerk will Stromkosten um 30 % senken, in: VDI nachrichten, 26.10.2012, <http://www.ingenieur.de/Themen/Energieeffizienz/Abhitze-kraftwerk-Stromkosten-um-30-Prozent-senken> (aufgerufen am 21.01.2015)

der Energiegehalt der Harze genutzt, um das im Kalk enthaltene  $\text{CO}_2$  vom Calciumoxid zu trennen. Die Asche, die über 50% der Masse des Rotorblattes ausmacht, wird im Calcinator mit dem restlichen Rohmaterial vermengt. So wird das gesamte Blatt verwertet. Der Asche kommt dabei besondere Bedeutung zu, weil im Werk Kreide als Rohmaterial verwendet wird, deren Calciumoxidanteil für die Zementproduktion zu rein ist. Daher ist die Korrektur mittels der Aschen von Glas- als auch Kohlefaser notwendig.<sup>44</sup>

Im BMBF-geförderten Verbundprojekt „Celitement“ wird ein Zement entwickelt, der mit deutlich geringerem Ressourceneinsatz produziert wird als herkömmlicher Zement. Das Verfahren wurde von Forschern am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und der SCHWENK Zement KG aus Ulm entwickelt. Zur kommerziellen Umsetzung wurde die Celitement GmbH gegründet. 2015 soll dort eine erste industrielle Referenzanlage mit einer Jahresproduktion von etwa 50.000 Tonnen in Betrieb gehen. Die Verwendung bestimmter Calcium-Hydrosilikate für die Herstellung von Celitement führt dazu, dass nur ein Drittel der für herkömmlichen Zement benötigten Menge an Kalkstein verarbeitet wird und auf Gips als Rohstoff völlig verzichtet werden kann. Für den Produktionsprozess reichen Temperaturen von 200 bis 300 °C aus – im Gegensatz zu 1.450 °C bei der Herstellung von klassischem Portlandzement. Energiebedarf und  $\text{CO}_2$ -Emissionen können rohstoff- und temperaturbedingt um 50% reduziert werden. Das fertige Produkt ist ein trockenes, lagerfähiges Pulver und wird wie herkömmlicher Zement verarbeitet. Dabei ist Celitement sogar noch weniger säureanfällig und beständiger als Portlandzement.<sup>45</sup>

### 3.2 Beton

Durch eine Erhöhung der Festigkeit von Beton können der Materialverbrauch und die Emission von Kohlendioxid reduziert werden. Hierfür werden dem Zement Additive zuge-

<sup>44</sup> Iestyn Hartbrich: Abgelegte Rotorblätter befeuern Zementwerk, in: VDI nachrichten, 06.01.2012, <http://www.ingenieur.de/Themen/Rohstoffe/Abgelegte-Rotorblaetter-befeuern-Zementwerk> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>45</sup> Celitement – Entwicklung eines nachhaltigen Zementes, <http://www.r-zwei-innovation.de/de/726.php> (aufgerufen am 21.01.2015)

setzt, mit denen das Kristallisationsverhalten des Zements besser gesteuert werden kann. Diesen Ansatz erforscht seit dem Jahr 2013 Prof. Witzleben an der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg in Sankt Augustin in einem vierjährigen BMBF-geförderten Projekt.<sup>46</sup>

Bereits auf dem Markt ist das Additiv X-SEED der Firma BASF, das die Frühfestigkeit des Betons beschleunigt. Das Additiv enthält anorganische Nanomaterialien aus Calciumsilikathydrat, die dem Beton als Kristallisationskeime zugegeben werden. Dadurch kann ein Zementtyp mit einem geringeren Klinkeranteil verwendet werden, der bei der Herstellung weniger Treibhausgasemissionen verursacht. Die schnellere Betonhärtung ermöglicht es, in den kalten Jahreszeiten auf der Baustelle beim kontrollierten Abbindeprozess des Betons auf externe Heizenergie zu verzichten, was Energie einspart.<sup>47</sup>

Als Alternative zu Stahlbeton wird Textil- oder auch Carbonbeton entwickelt. Dabei handelt es sich um einen innovativen Verbundwerkstoff, bei dem für die Bewehrung statt Stahl Hochleistungsfaserstoffe aus Carbon oder alkaliresistentem Glas zum Einsatz kommen. Mit diesen Bewehrungsmaterialien können sehr dünne und leichte Bauteile mit hoher Tragfähigkeit hergestellt werden. Ein großer Vorteil der Carbonbewehrung besteht darin, dass sie nicht korrodieren kann. Schon aus Gründen des Korrosionsschutzes ist bei herkömmlichem Stahlbeton eine größere Mindestdicke der Bauteile notwendig. Daraus ergeben sich Einsparungseffekte beim Materialbedarf, Energieaufwand und bei CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die deutsche Zement- und Betonindustrie strebt an, bis zum Jahr 2030 bei Neubauten mindestens 20% der Stahlbewehrung durch Carbonbewehrung zu ersetzen.

Textilbeton ist aber nicht nur für neuartige schlanke und damit ressourceneffiziente Konstruktionen, sondern auch für die Instandsetzung durch das Aufbringen dünner Verstärkungsschichten auf bestehende Bauwerke geeignet. Zur

<sup>46</sup> Eva Tritschler: Mehr Klimaschutz beim Bau. Informationsdienst Wissenschaft, 11.10.2013, <http://idw-online.de/de/news556138> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>47</sup> 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, [http://www.vdf.ethz.ch/service/3559/3560\\_Nanomaterialien\\_OA.pdf](http://www.vdf.ethz.ch/service/3559/3560_Nanomaterialien_OA.pdf), S. 86 f. (aufgerufen am 21.01.2015)

Herstellung von Textilbetonbauteilen werden zunächst Endlofilamente des Fasermaterials zu sogenannten Rovings verarbeitet, aus denen dann mit Nähwirkmaschinen textile Gelege entsprechend der gewünschten Bauform erzeugt werden. Diese werden anschließend in einer Schalung in die Matrix aus Feinbeton eingebettet. Je nach Bauteilgeometrie und Anordnung können hier unterschiedliche Verfahren wie Laminieren, Gießen oder Spritzen genutzt werden.<sup>48</sup>

Im Juni 2014 wurde Textilbeton der Marke Tudalit erstmals vom Deutschen Institut für Bautechnik zur Anwendung freigegeben. Bisher kam der Baustoff nur im Labor und an einzelnen Bauwerken mit Einzelgenehmigung in der Praxis zum Einsatz. Die Zulassung gilt für den Innenbereich und erlaubt extrem schlanke Verstärkungen, etwa bei schwierigen räumlichen Verhältnissen oder im Denkmalschutz. Weitere Zulassungen für andere Anwendungsbereiche sind geplant.<sup>49</sup> Bei Tudalit sind keine Fremdfasern wie Polypropylen oder Polyester enthalten, die Verbindungs- und Pölfäden werden sortenrein aus demselben Ursprungsmaterial wie in den Bewehrungslagen eingebracht, was das Recycling vereinfacht.<sup>50</sup>

In Deutschland wird die Entwicklung von Textilbeton im BMBF-geförderten Projekt „C<sup>3</sup> - Carbon Concrete Composite“ von einem Zusammenschluss von 110 Partnern aus Industrie, Forschung und Verbänden vorangetrieben. Zu den zentralen Themen, die dort ab 2015 bearbeitet werden, gehören:

- Weiterentwicklung der textilen Gelege und Neuentwicklung von dickeren, stabförmigen Carbonbewehrungen
- Weiterentwicklung der Betone und Entwicklung vollkommen neuer Matrixkombinationen mit neuartigen Bindemittelzusammensetzungen

<sup>48</sup> Textilbeton - leicht, tragfähig und nachhaltig. BetonMarketing Deutschland, o. D., <http://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/textilbeton-leicht-tragfaehig-nachhaltig/> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>49</sup> TUDALIT e. V.: Die schlanke Verstärkung im Betonbau. Info-Flyer, 2014, [http://tudalit.de/uploads/images/TUDALIT\\_Flyer2014.pdf](http://tudalit.de/uploads/images/TUDALIT_Flyer2014.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>50</sup> Bettina Sigmund: Sortenreine 3D Textilien zur Betonarmierung. Detail - Das Architekturportal, 11.09.2014, <http://www.detail.de/architektur/news/sortenreine-3d-textilien-zur-betonarmierung-023674.html> (aufgerufen am 21.01.2015)



- Verbesserung des Verbundbereichs zwischen Beton und textiler Bewehrung
- Optimierung der Herstellungsprozesse für Beton, Bewehrung und Bauteile (Fertigteile und Ort betonbauteile)
- Erschließung neuer Anwendungsgebiete und Produktfelder für Textilbeton
- Integration von Zusatzfunktionen wie Komponenten für Monitoring, Heizen, Energiespeicherung, Energiegewinnung und Beleuchtung

Begleitend dazu werden Themen der Standardisierung und Normung, des Arbeits- und Umweltschutzes sowie der Aus- und Weiterbildung bearbeitet.<sup>51</sup>

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Tragfähigkeit von Stahlbeton, um so mit schlankeren Konstruktionen Material einzusparen, besteht in der Erhöhung der verwendeten Stahlgüten für die Bewehrung. Die Anwendbarkeit und Wirtschaftlichkeit hochfester Bewehrungen etwa mit der Stahlsorte S 670 wurden bislang nur in einzelnen Bauprojekten wie dem Opernturm in Frankfurt, den Tanzenden Türmen in Hamburg oder dem neuen World Trade Center in New York für hochbelastete druckbeanspruchte Bauteile gezeigt. In einem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Projekt wurden nun die Grundlagen für die Nutzung höher- und hochfester Stähle als Bewehrungsstahl entwickelt, um eine wissenschaftliche Basis für die baupraktische Anwendung zu gewinnen. Es besteht aber noch weiterer Forschungsbedarf, vor allem hinsichtlich der Parameter für Übergreifungsstöße und des Verhaltens als Schubbewehrung sowie bei Rahmenecken.<sup>52</sup>

Die Integration zusätzlicher Funktionen in Betonbauteile ergibt einen weiteren Ansatz zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Hochbau, insbesondere bei neuartigen Fassaden, Wand- oder Bodensystemen. Dazu ist es erforderlich,

<sup>51</sup> Carbon Concrete Composite e. V.: Konkrete Arbeitsthemen, o. D., <http://www.bauen-neu-denken.de/neues-bauen/themen/> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>52</sup> Matthias Scheibe et al.: Hochfeste Bewehrung im Stahlbetonbau – Identifizierung von Anwendungsmöglichkeiten, Entwicklung von Bemessungsgrundlagen und Ermittlung des wirtschaftlichen Einsparpotentials. Fraunhofer IRB Verlag, 2013, <http://www.irbnet.de/daten/rswb/14049002181.pdf> (aufgerufen am 21.01.2015)

dass die eingesetzten Baustoffe mit zusätzlichen Funktionalitäten ausgestattet werden. Beispielsweise kann Beton durch leitfähige Zugabestoffe elektrisch leitend gemacht werden. Ein Forschungsteam an der Universität Kassel hat gemeinsam mit Industriepartnern einen solchen leitfähigen Beton durch Aufbringen verschiedener Schichten mit der Funktion einer sogenannten Farbstoff-Solarzelle versehen. Das Schichtsystem besteht aus Lagen aus Titandioxid, einem organischen Farbstoff, einem Elektrolyt, Graphit und einer transparenten Deckschicht. Der leitfähige Beton selbst dient als Elektrode. Der neuartige „DysCrete“ genannte Baustoff soll für Fassadenbauteile eingesetzt werden, die Solarstrom erzeugen.<sup>53</sup>

### 3.3 Nachwachsende Rohstoffe

Eine grundlegende Möglichkeit zur Ressourceneinsparung im Baubereich besteht in der Substitution von ressourcenintensiven durch ressourcenschonendere Baustoffe oder auch durch nachwachsende Rohstoffe. Ein Beispiel hierfür ist die Nutzung von Holz anstatt mineralischer Baustoffe im Hochbau. So wurden im Jahr 2012 15,2% der neu errichteten Wohngebäude und 18,6% der Nichtwohngebäude in Deutschland aus Holz gebaut.<sup>54</sup> Im internationalen Vergleich fällt die deutsche Holzbauquote eher niedrig aus. So werden beispielsweise in den USA und Kanada 90% der Einfamilienhäuser aus Holz gebaut, in Schweden 50% und in Österreich 33%. Auch wenn sich die Dominanz der historisch begründeten Ziegelbauweise in Deutschland nicht kurzfristig ändern lässt, besteht hierzulande noch Potenzial für eine maßvolle Steigerung der Holzbauquote.<sup>55</sup>

Auch in anderen Baubereichen kann sich die Substitution mit biobasierten Werkstoffen positiv auf die Ressourceneffizienz auswirken. Das ist etwa der Fall, wenn Fassaden aus Biokompositen hergestellt werden, wie es im EU-Pro-

<sup>53</sup> Beton liefert Strom. Chemie.de, 16.01.2015, [http://www.chemie.de/news/151230/beton-liefert-sonnenstrom.html?WT.mc\\_id=ca0259](http://www.chemie.de/news/151230/beton-liefert-sonnenstrom.html?WT.mc_id=ca0259) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>54</sup> Holzbau Deutschland - Bund Deutscher Zimmermeister: Statistiken 2014. [http://www.holzbau-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/eingebundene\\_Downloads/Statistiken\\_2014.pdf](http://www.holzbau-deutschland.de/fileadmin/user_upload/eingebundene_Downloads/Statistiken_2014.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>55</sup> Karl Moser: Waldzukünfte. Berlin, 2007, [http://www.ioew.net/downloads/downloaddateien/Waldzukuenfte\\_Basispapier\\_Stoffliche\\_Verwertung.pdf](http://www.ioew.net/downloads/downloaddateien/Waldzukuenfte_Basispapier_Stoffliche_Verwertung.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

jekt BioBuild der Fall ist. Hier soll bei der Herstellung der CO<sub>2</sub>-Ausstoß um bis zu 50% im Vergleich zu mit hohem Energieaufwand produzierten Ziegeln oder faserverstärkten Kunststoffen reduziert werden. Das BioBuild-Projekt („High performance, economical and sustainable biocomposite building materials“) hat Biokomposite zum Ziel, die nicht durch Feuchtigkeitsaufnahme und mikrobielle Einflüsse abgebaut werden und Lebensdauern von 40 Jahren erreichen. In der ersten BioBuild-Projektphase wurden Haltbarkeit und Brandverhalten imprägnierter Gewebe aus Flachs, Jute und Hanf getestet. Auch Fügetechniken von Biokompositlaminanten untereinander sowie mit Edelstahlbefestigungen wurden entwickelt.<sup>56, 57</sup>

In einem von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) geförderten Verbundprojekt wurde eine Bioschaumplatte aus Celluloseacetat (CA) für die Gebäudedämmung entwickelt. CA verfügt über vergleichbare mechanische Eigenschaften wie das weitverbreitete Dämmmaterial Polystyrol (PS), zeigt aber Unterschiede beim Erstarren und bei der Schmelzelastizität. Um ein biobasiertes Alternativmaterial zu Polystyrol bereitzustellen, wurde zunächst eine Grundrezeptur von CA mit geeigneten Weichmachern, Füllstoffen und Nukleierungsmittel entwickelt. In einem eigens aufgebauten Extruder wurden die grundsätzliche Schaumfähigkeit von CA nachgewiesen und die Verfahrensparameter optimiert. Anschließend wurden Tests auf immer größeren Extrusionsanlagen und erste Versuche zur Konfektionierung durchgeführt.<sup>58</sup>

Am Innovations- und Bildungszentrum Hohen Luckow e. V. (IBZ) wurde eine brandfeste Faserplatte für verschiedene Bauanwendungen aus Schilf entwickelt. In dem Teilvorhaben des BMBF-geförderten Forschungsprojekts „Vorpommern Initiative Paludikultur – VIP“ konnten die Forscher

<sup>56</sup> In Europa mit Biofassaden bauen. CORDIS-Pressemitteilung, 03.10.2013, [http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:aQm6v0IA10cl:http://cordis.europa.eu/result/rcn/91789\\_de.html%2BBioBuild+Europ%C3%A4ische+projekt&client=opera&hs=xY5&rls=d e&tbs=lr:lang\\_1de&lr=lang\\_de&hl=de&&ct=clnk](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:aQm6v0IA10cl:http://cordis.europa.eu/result/rcn/91789_de.html%2BBioBuild+Europ%C3%A4ische+projekt&client=opera&hs=xY5&rls=d e&tbs=lr:lang_1de&lr=lang_de&hl=de&&ct=clnk) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>57</sup> Projekthomepage: <http://www.biobuildproject.eu/> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>58</sup> Thomas Wodke: Bioschaumplatten aus biobasierten, thermoplastischen Kunststoffen, in: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hrsg.): Bauen mit nachwachsenden Rohstoffen 2014. Gülzower Fachgespräche, Band 47, [http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/g/f/gfg\\_band\\_47\\_bauen\\_mit\\_nachwachsenden\\_rohstoffen\\_v04.pdf](http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/g/f/gfg_band_47_bauen_mit_nachwachsenden_rohstoffen_v04.pdf), S. 91 – 105 (aufgerufen am 21.01.2015)

nachweisen, dass der nachwachsende Rohstoff Schilf als Füll- und Faserstoff in solchen Platten einsetzbar ist. In einer Reihe von Versuchen und Tests, angelehnt an die Vorschriften des Deutschen Instituts für Normung e. V. (DIN), wurden die Produkteigenschaften bestimmt. Neben einer hohen Biegefestigkeit und der Nichtbrennbarkeit weist das Material vor allem ein besonders positives Feuchteverhalten auf. Das Plattenmaterial zeigt eine hohe Schimmelresistenz, keine Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung und keine irreversiblen Schäden nach Wässerung mit anschließender Trocknung. Insgesamt ermöglichen die Schilf-Brandschutzplatten ein gutes Handling und sind leicht zu verarbeiten. Die Erkenntnisse aus dem Projekt fließen auch in die Optimierung eines entsprechenden Fertigungsverfahrens bei der Firma Strohlos Produktentwicklung GmbH ein.<sup>59</sup>

### 3.4 Straßen- und Brückenbau

Im Straßen- und Brückenbau ergeben sich weitere Ansätze, die Rohstoffbasis ressourceneffizienter zu gestalten, die über die in diesem Kapitel bisher beschriebenen Themen hinausgehen. Um etwa die Recyclingquote von Asphalt zu erhöhen, ist es notwendig, möglichst hohe Anteile recycelten Asphalts in neuen Deckschichten einzusetzen. Am Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen des KIT wird ein Zugabeprodukt entwickelt, mit dem ein Asphaltmischgut mit hohem Anteil Ausbauasphalt die Eigenschaften von Neuasphalt erreichen kann. Das „Reaktivio-Bit“ genannte Produkt besteht aus Ölen aus nachwachsenden Rohstoffen sowie Additiven und soll die gealterten Eigenschaften des Ausbauasphalts reaktivieren bzw. verbessern. In einem iterativen Verfahren werden die Rezepturen durch verschiedene Tests wie Abkühl-, Zug- und Druck-Schwellversuche optimiert. Ziel ist es, dass der Reaktivator in großen Misch-

<sup>59</sup> Anne Wollert: Aus dem Moor in den Bau – Brandfeste Faserplatten aus Schilf, in: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hrsg.): Bauen mit nachwachsenden Rohstoffen 2014. Gülzower Fachgespräche, Band 47, [http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/g/f/gfg\\_band\\_47\\_bauen\\_mit\\_nachwachsenden\\_rohstoffen\\_v04.pdf](http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/g/f/gfg_band_47_bauen_mit_nachwachsenden_rohstoffen_v04.pdf), S. 106 – 119 (aufgerufen am 21.01.2015)

anlagen kalt zugegeben werden kann.<sup>60</sup>

In einem von der Stadt Hamburg geförderten Forschungsprojekt wurde von der STRABAG AG der Anteil recycelten Asphaltgranulats in einer Asphaltmischung für die Straßensanierung maximiert. Durch die Zugabe einer speziellen Additivkombination zur Regenerierung konnte ein Mischgut mit 90% aufbereitetem Ausbauasphaltgranulat hergestellt werden. Beim Einbau auf einer Teststrecke wurden gute Verdichtungsgrade erzielt. In einem nachfolgenden Projekt soll die Dauerhaftigkeit der so gefertigten Deckschicht untersucht werden.<sup>61</sup>

Auch Sekundärrohstoffe, die aus anderen Industriebereichen stammen, sind für einen ressourceneffizienten Straßen- und Brückenbau von Bedeutung. In einem Forschungsprojekt am Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen am KIT wurden beispielsweise das Langzeitverhalten und die bautechnische Eignung von Müllverbrennungsschlacken (MV-Schlacken) für Tragschichten im Straßenbau bewertet. Die aus unterschiedlichen Müllverbrennungsanlagen stammenden Schlacken setzen sich aus Silikaten, Oxiden und Carbonaten einer Reihe von Nebenphasen zusammen. Es konnte gezeigt werden, dass solche MV-Schlacken als ungebundener Baustoff im Straßenbau geeignet sind und keine Gefahr für die Umwelt darstellen, wenn sie ausreichend abgelagert sind. Bedingt durch ihre mineralogische Zusammensetzung zeigen MV-Schlacken aber eine geringere Resistenz bei mechanischer Beanspruchung und Frost-Tau-Wechseln als natürliche Mineralstoffe.<sup>62</sup>

Durch die Zugabe von Altkunststoffen, etwa aus Verpackungsfällen, kann der Bedarf an primären mineralischen Baustoffen und frischem Bitumen beim Bau von Asphaltdecken reduziert werden. Bei bisher bekannten Verfahren

<sup>60</sup> Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen, Karlsruher Institut für Technologie: Entwicklung eines Reaktivators für die Verwertung von sehr hohen Anteilen an Recycling-Asphalt in Neuasphalt (ReAsphalt). [https://www.ise.kit.edu/Forschung\\_1471.php](https://www.ise.kit.edu/Forschung_1471.php) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>61</sup> STRABAG AG: Maximale Zugabemenge von Asphaltgranulat im Asphaltmischgut – Maximalrecycling, in: Research, Development – Innovation 2013/14, [http://www.strabag.se/databases/internet/\\_public/files.nsf/SearchView/85E707A46A0C1F34C1257D5600446841/\\$File/FuEul%20Projekte%202013\\_14.pdf](http://www.strabag.se/databases/internet/_public/files.nsf/SearchView/85E707A46A0C1F34C1257D5600446841/$File/FuEul%20Projekte%202013_14.pdf), S. 38 – 39 (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>62</sup> Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen, Karlsruher Institut für Technologie: Langzeitverhalten und bautechnische Eignung von Müllverbrennungsschlacken. [https://www.ise.kit.edu/Forschung\\_311.php](https://www.ise.kit.edu/Forschung_311.php) (aufgerufen am 21.01.2015)

wurden die Altkunststoffe vorab in das Bitumen eingebracht und dann das modifizierte Bindemittel dem Mischgut zugegeben. In einem BMBF-geförderten Forschungsverbund des Fraunhofer Instituts für Chemische Technologie und der Asphaltmischwerke Rheinhessen-Pfalz GmbH & Co. KG (ARP) wurde die Technologie so weiterentwickelt, dass die Altkunststoffe auch direkt in den Mischer gegeben werden können. Damit entfällt der zusätzliche Verfahrensschritt der Bitumenmodifikation. Die Tragfähigkeit und weitere Eigenschaften derart modifizierter Asphalte wurden in Musterflächen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die untersuchten Mischgüter für die Baupraxis geeignet sind. Die höhere Standfestigkeit der mit Altkunststoffen modifizierten Mischgüter führt zu einer längeren Lebensdauer der Asphaltdeckschichten und trägt damit zur Ressourcenschonung bei.<sup>63</sup>

<sup>63</sup> ARP Asphaltmischwerke Rheinhessen-Pfalz GmbH u. Co. KG, Fraunhofer ICT: Ressourcen- und energieoptimierte Baustoffe am Beispiel von Asphaltprodukten – „Recycling-Asphalt“. Schlussbericht, 2011, [http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/0330870A\\_-\\_Abschlussbericht.pdf](http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/0330870A_-_Abschlussbericht.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

## 4 BAUAUSFÜHRUNG

Unabhängig von Art und Größe eines Bauvorhabens kann eine gut strukturierte Bauablaufplanung die Ressourceneffizienz der Bauausführung steigern. Als systemischer Ansatz bieten Entwicklungen im Bereich des Building Information Modeling (BIM) die Möglichkeit, geeignete Bauverfahren auszuwählen und sinnvolle Ausführungsreihenfolgen festzulegen, um so die Abläufe hinsichtlich Zeitaufwand, Kosten und natürlichen Ressourcen zu optimieren. Voraussetzung ist, dass die erforderlichen Informationen verfügbar sind und als Eingangsdaten in das Modell übernommen werden können.<sup>64</sup>

Der VDI hat einen Koordinierungskreis zu diesem Thema gegründet (KK-BIM), der die Umsetzung von BIM in Deutschland unterstützend begleitet. Ein zentrales Element ist dabei die Erarbeitung der Richtlinienreihe VDI 2552, die zu verschiedenen Teilaspekten von BIM den Stand der Technik beschreiben und zur Standardisierung der Prozesse und Abläufe beitragen wird. Erste Richtlinienentwürfe sollen 2016 durch die entsprechenden Gremien verabschiedet werden.<sup>65</sup>

### 4.1 Hochbau

Beim Neubau von Wohn- und Gewerbegebäuden besteht Potenzial zur Steigerung der Ressourceneffizienz durch innovative Bautechniken, die in etablierte Bauweisen und Verfahren integriert werden können oder diese ergänzen.

Eine sehr anschauliche Methode zur Materialeinsparung in Gebäudedecken besteht zum Beispiel im gezielten Einbringen von Hohlräumen in Stahlbetondecken. Bei dieser Technologie wird durch den Einbau von Hohlkörpern aus Kunststoff in die Deckenkonstruktion der Bedarf an Beton und Bewehrungsstahl reduziert. Da sich auf diese Weise auch

<sup>64</sup> Katharina Kohls et al.: BIM-basierte Bauablaufsimulation von Hochbauten. [https://www.inf.bi.rub.de/intern/aigaion/documents/BIM-basierte\\_Bauablaufsimulation\\_von\\_Hochbauten.pdf-4aa0ca18e9126deb7f4ab7acc306c6d0.pdf](https://www.inf.bi.rub.de/intern/aigaion/documents/BIM-basierte_Bauablaufsimulation_von_Hochbauten.pdf-4aa0ca18e9126deb7f4ab7acc306c6d0.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>65</sup> Agenda Building Information Modeling – VDI-Richtlinien zur Zielerreichung. Verein Deutscher Ingenieure e. V., September 2014, [http://www.vdi.de/fileadmin/vdi\\_de/redakteur\\_dateien/gbg\\_dateien/VDI\\_Agenda\\_BIM.pdf](http://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gbg_dateien/VDI_Agenda_BIM.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015); persönliche Information Frank Jansen, VDI e. V., 14.04.2015

das Deckeneigengewicht verringert, ergeben sich weitere Ressourceneinsparungen bei der Gesamtkonstruktion. So sind Hohlkörperdecken bis zu 35 % leichter als Vollmassivdecken, benötigen bis zu 40 % weniger Stützen und erlauben Deckenspannweiten von bis zu 25 Metern.<sup>66</sup>

Die Hohlkörper selbst werden aus rezykliertem Kunststoff hergestellt und als Module in Haltekörben aus Betonstahl an die Baustelle geliefert, wo sie direkt zwischen der unteren und der oberen Bewehrungslage von Hand eingebaut werden können. Eine Kombination mit Deckenkühlsystemen oder anderen integrierten Installationen ist problemlos möglich. Die Technologie eignet sich sowohl für die Ort beton- als auch Fertigteilbauweise. Die Firma Cobiax hat die erste Hohlkörper-Produktlinie bereits im Jahr 2005 auf den Markt gebracht. Jedoch waren die einzelnen Hohlkörper dieses bisher einzigen bauaufsichtlich zugelassenen Hohlkörperdeckensystems kugelförmig und damit nur für Deckenstärken von 35 bis 60 Zentimetern geeignet. Im Rahmen eines AiF-ZIM-Projektes (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V., Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand) konnte in einer Kooperation der Cobiax Technologies GmbH mit der TU Kaiserslautern und der Hochschule Bochum der Anwendungsbereich für die Hohlkörpertechnologie deutlich erweitert werden. Durch die Entwicklung von Hohlkörpern mit einer abgeflachten Halbschalen-Geometrie können nun auch Betondecken ab einer Dicke von 20 Zentimetern in dieser Bauweise hergestellt werden (Abb. 5). Dies entspricht einer erheblichen Erweiterung des Einsatzpotenzials dieser ressourceneffizienten Technologie, da 80 % der gebauten Decken Stärken von unter 35 Zentimetern aufweisen. In dem Projekt wurden nicht nur die Hohlkörper selbst, sondern auch entsprechende Bemessungskonzepte für die bautechnische Anwendung entwickelt.<sup>67, 68</sup>

<sup>66</sup> Homepage der Firma Cobiax, <http://www.cobiax.com/technologie> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>67</sup> Ressourcenschonendes Leichtbauverfahren für cobiax-Betondecken. Technische Universität Kaiserslautern, 25.11.2013, <http://www.bauing.uni-kl.de/massivbau/forschung/akt-forschung/ressourcenschonendes-leichtbauverfahren-fuer-cobiax-betondecken/> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>68</sup> C. Albrecht et al.: Bemessung und Konstruktion von zweiachsig gespannten Stahlbetondecken mit abgeflachten rotationssymmetrischen Hohlkörpern. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 9, S. 590 – 600



Eine Steigerung der Ressourceneffizienz kann auch durch den Einsatz von Fertigbauteilen aus materialsparendem Gradientenbeton erreicht werden. Bei dieser Technologie wird die Dichte im Bauteil gezielt in Abhängigkeit von der jeweiligen statischen oder bauphysikalischen Belastung variiert. Die gradierte Dichteverteilung wird durch das Einbringen von Poren realisiert. In Bereichen mit geringer Belastung kann die Porosität solcher Bauteile so weit erhöht werden, dass im Vergleich zu einem vollmassiven Bauteil Materialeinsparungen von bis zu 60% möglich sind. Zur Herstellung von Gradientenbeton werden poröse Leichtzuschläge und zusätzliche Luftporen in die Zementmatrix eingebracht. Problematisch ist bei dieser Technologie jedoch, dass der Gradientenbeton durch den enthaltenen Zuschlagstoff nicht mehr vollwertig zu recyceln ist.<sup>69, 70</sup> Ein Schwerpunkt bisheriger und aktueller Forschungsarbeiten in diesem Bereich liegt auf der Entwicklung automatisierter Verfahren zur zielgenauen und reproduzierbaren Herstellung von Porositätsverläufen. Hierzu werden Applikationssysteme entwickelt, in denen verschiedene Verfahren zum gesteuerten Mischen, Trocken- und Nassspritzen oder schichtweisen Aufbringen des Materials eingesetzt werden, um Betonbauteile mit komplexem Gradientenlayout nach einem digitalen Bauplan herzustellen.<sup>71</sup>

Ein innovativer Ansatz mit noch erheblichem Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht in der Nutzung von Verfahren des 3D-Drucks im Baubereich. Die aktuell rasante Entwicklung von 3D-Druck-Verfahren beschränkt sich bislang jedoch weitestgehend auf andere Industriebereiche, Materialien und Produktabmessungen. Im Rahmen eines Forschungsprojekts an der TU Dresden wird nun erstmals die Machbarkeit eines 3D-Drucks von Gebäuden auf Beton-

<sup>69</sup> Pascal Heinz, Michael Herrmann, Werner Sobek: Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen. Abschlussbericht, Februar 2011, [http://www.irbnet.de/daten/baufo/20128035526/F\\_2811\\_Abschlussbericht.pdf](http://www.irbnet.de/daten/baufo/20128035526/F_2811_Abschlussbericht.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>70</sup> Peter Jehle in: Dogma oder Dosenpfand? Expertengespräch zur Recyclingfähigkeit von Gebäuden. DETAIL – Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 06.03.2014, <http://www.detail.de/research/forschung-entwicklung/dogma-oder-dosenpfand-expertengespraech-zur-recyclingfaehigkeit-von-gebaeuden-022806.html> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>71</sup> Michael Herrmann et al.: Fertigteile aus funktional gradiertem Beton. BetonWerk International, 6/2013, [http://www.knecht.de/fileadmin/user\\_upload/knecht.de/Bilder/Inhalte/Gradientenbeton/bwi-Gradientenbeton-6-13.pdf](http://www.knecht.de/fileadmin/user_upload/knecht.de/Bilder/Inhalte/Gradientenbeton/bwi-Gradientenbeton-6-13.pdf), S. 64 – 68 (aufgerufen am 21.01.2015)

basis untersucht. Dabei soll im baustellentauglichen Maßstab mit Hilfe eines Großraumroboters ein Spezialbeton schichtweise aus einem Druckkopf ausgetragen werden. Schwerpunkte der Forschungsarbeit sind die Entwicklung einer für dieses Verfahren geeigneten Betonzusammensetzung, die Entwicklung der Apparatur, Untersuchungen zur Großraumrobotik sowie zur baubetrieblichen Umsetzung in der Praxis. Potenziell könnten mit dieser Technologie Zeit und Kosten eingespart werden, u. a. weil keine Schalung mehr erforderlich wäre.<sup>72</sup>

## 4.2 Straßen- und Brückenbau

Das deutsche Bundesfernstraßennetz enthält über 38.000 Brücken. Der Bestand an Straßenbrücken insgesamt wird für Deutschland auf über 120.000 Bauwerke geschätzt. Ein Großteil dieser Brücken ist inzwischen 30 bis 50 Jahre alt. Aufgrund des in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gewachsenen Verkehrsaufkommens mit einer überproportionalen Zunahme des Güterverkehrs befinden sich viele dieser Brücken in einem schlechten Zustand. Immer häufiger müssen Verkehrsbeschränkungen aufgrund von Brückenschäden vorgenommen werden, die zu Engpässen auf den betroffenen Strecken führen. Aber auch umfängliche Sanierungsarbeiten oder langwierige Neubauten ziehen empfindliche Störungen des Verkehrsflusses nach sich und sind zudem teuer und ressourcenaufwendig.<sup>73</sup>

Besondere Bedeutung für den Brückenbau könnten zukünftig ressourceneffiziente Leichtbauweisen erlangen, mit denen nicht nur Material eingespart wird, sondern auch nach Möglichkeit längere Sanierungsintervalle und Lebensdauern erreicht werden können. Weiterhin würden diese aufgrund der geringeren verbauten Massen und werkstoffbedingten Konstruktionen vergleichsweise kurze Bauzeiten zulassen, wie die folgenden Beispiele verdeutlichen.

<sup>72</sup> Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton, <http://www.forschungsinitiative.de/forschung/projekte/1008187-1407/> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>73</sup> Joachim Naumann: Brückenerfüchtigung jetzt – Ein wichtiger Beitrag zur Sicherung der Mobilität auf Bundesfernstraßen. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V. (Hrsg.), DBV-Heft 22, 2011, [http://www.bdi.eu/download\\_content/InfrastrukturUndLogistik/Brueckenstudie\\_endg..pdf](http://www.bdi.eu/download_content/InfrastrukturUndLogistik/Brueckenstudie_endg..pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

Großes Potenzial für leichte Konstruktionen und kurze Bauzeiten im Brückenbau bietet ultrahochfester Beton (kurz: UHPC für Ultra High Performance Concrete). Durch eine optimierte Korngrößenverteilung mit sehr kleinen Partikelgrößen und zusätzlich eingebrachten Stahlfasern können mit diesem Werkstoff besonders hohe Dichten und somit Druckfestigkeiten erreicht werden, die mit Stahl vergleichbar sind. Dies ermöglicht ressourceneffiziente Bauweisen, die mit herkömmlichem Beton nicht möglich sind. Insbesondere können deutlich schlankere Konstruktionen ohne Stahlbewehrung realisiert werden. Eines der ersten Beispiele für den Einsatz von UHPC im Brückenbau ist die Gärtnerplatzbrücke für Fußgänger und Radfahrer in Kassel. Dort wurden die Fahrbahnplatte und die Obergurte aus UHPC hergestellt und auf eine Stahlrohrfachwerkstruktur aufgesetzt. Zur Verbindung der UHPC-Bauteile kam hier auch eine innovative Klebtechnik zum Einsatz.<sup>74</sup>

Eine andere Möglichkeit, UHPC als Leichtbaumaterial im Brückenbau einzusetzen, wurde an der „WILD“-Brücke in Kärnten, Österreich, demonstriert. Dort besteht die Tragkonstruktion aus zwei parallel geführten UHPC-Bögen mit einer Spannweite von fast 70 Metern, die aus sechs geraden, hohlen Stäben mit einem Kastenquerschnitt von 1,2 x 1,2 Quadratmetern und einer Wandstärke von 60 Millimetern zusammengesetzt sind. Das geringe Gewicht der Bogenbauteile ermöglichte eine zeit- und kosteneffiziente Montage der Brücke. Die Elemente wurden zunächst zu zwei Bogenhälften vormontiert, die am Bogenfundament auf jeder Seite mit einem Gelenk verankert wurden. Anschließend wurden die Bogenhälften eingeklappt, bis sie sich in der Mitte trafen und somit der Bogen geschlossen war. Für dieses Tragwerk wird eine Lebensdauer von über 200 Jahren erwartet.<sup>75</sup>

Eine wichtige Gruppe von Leichtbauwerkstoffen, die auch im innovativen Brückenbau immer mehr an Bedeutung ge-

<sup>74</sup> Ute Juschkus: „Zwerg im Beton“ – Nanotechnologie und Ultra High Performance Concrete (UHPC). *ibr Informationen Bau-Rationalisierung*, Nr. 2, Juni 2008, [http://www.rkw-kompetenzzentrum.de/fileadmin/media/Dokumente/Mitarbeiter/2008\\_MA\\_Nanotechnologie-und-UHPC.pdf](http://www.rkw-kompetenzzentrum.de/fileadmin/media/Dokumente/Mitarbeiter/2008_MA_Nanotechnologie-und-UHPC.pdf), S. 18 – 20 (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>75</sup> Lutz Sparowitz: *Der Bogenbau zu Völkermarkt*. 2. Auflage, Dezember 2010, [www.ktn.gv.at/287003\\_DE](http://www.ktn.gv.at/287003_DE) (aufgerufen am 21.01.2015)

winnen, sind Faserverbundkunststoffe. Der Einsatz solcher Composite-Materialien hat sich bereits in ersten Bauwerken bewährt und erschließt immer größere Dimensionen, meist in Kombination mit anderen Werkstoffen in sogenannter Hybridbauweise. Die erste Straßenbrücke dieser Art im europäischen Raum wurde 2008 im hessischen Friedberg errichtet. Die Brücke mit einer Länge von 27 Metern und einer Breite von fünf Metern besteht aus einem Überbau aus zwei Stahlträgern und einer darauf aufgeklebten Fahrbahnplatte aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK). Als Fahrbahndecke dient eine vier Zentimeter dicke Schicht aus Polymerbeton, einer Mischung aus Silikatstreuung und Epoxidharz. Auf Stahlbeton und Asphalt konnte bei dieser Entwicklung des Instituts für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE) der Universität Stuttgart und des Hessischen Landesamtes für Straßen- und Verkehrswesen vollständig verzichtet werden. Die GFK-Bauteile wurden im Pultrusionsverfahren vorgefertigt und wie der Stahlüberbau in einer Montagehalle vormontiert. Auf der Baustelle konnte das Brückenteil dann mit einem Schwerlastkran eingehoben werden und war nach nur wenigen Stunden Verkehrssperrung betriebsbereit. Um Erkenntnisse über das Langzeitverhalten einer solchen Konstruktion unter realen Bedingungen zu erhalten, wurden 137 Sensoren in die Brücke eingebaut, die Dehnungen, Temperatur und Feuchtigkeit messen.<sup>76</sup>

Die längste Hybrid-Composite-Brücke der Welt ist derzeit eine 140 Meter lange Straßenbrücke über die Autobahn A 27 in den Niederlanden. Sie wurde von den Firmen Fiber Core Europe und DSM Composites Resins geplant und gebaut und besteht ebenfalls aus einer Stahlkonstruktion mit einer Fahrbahnplatte aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Das Bauwerk wiegt ein Drittel einer vergleichbaren Brücke in Stahl-Beton-Bauweise. Die Leichtbaukonstruktion wurde in weniger als 48 Stunden in einem Stück installiert, mit einem deutlich reduzierten Einsatz an Baumaschinen.<sup>77</sup>

<sup>76</sup> Uni Stuttgart: Europas erste Straßenbrücke aus glasfaserversärktem Kunststoff. *plasticker*, 31.07.2008, <http://plasticker.de/news/shownews.php?nr=5936&div=&start=20&anzeige=51&begriff=faserverst%20Kunststoffe&PHPSESSID=a1207379b8c3d0cfe691f746e9365044&PHPSESSID=a1207379b8c3d0cfe691f746e9365044> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>77</sup> Leichtbau-Brücken der Zukunft. *K-Zeitung Online*, 20.11.2012, <http://www.k-zeitung.de/leichtbau-bruecken-der-zukunft/150/1195/58752/> (aufgerufen am 21.01.2015)

Ein weiterer innovativer Ansatz für Leichtbaubrücken besteht in der Nutzung pneumatischer Tragelemente, wie sie vorwiegend bei nicht permanenten Bauwerken, zum Beispiel demontablen Brücken, Überdachungen oder großen Zelten, zum Einsatz kommen. Bereits 2006 wurden erstmals sogenannte Tensairity-Strukturen vorgestellt, bei denen die Hüllen der luftgefüllten Tragelemente zusätzlich mit einem starren Druckelement verbunden sind und von zwei Kabeln spiralförmig umlaufen werden. Solche Tragelemente weisen eine im Vergleich zum Eigengewicht hohe Tragkraft auf und eignen sich auch für den Einsatz in permanenten Bauwerken. Der Vorteil der schnellen Montage bleibt dabei erhalten. Ein Anwendungsbeispiel dieser Technologie zeigt sich in einer Skibrücke mit 52 Metern Spannweite im französischen Lanslevillard. Das Tragwerk besteht aus zwei asymmetrisch spindelförmigen Tensairity-Trägern mit einem Gewicht von 60 Tonnen und einem Überdruck von 200 mbar. Brückenüberbau, Belag und Geländer sind aus Holz gefertigt. Anders als bei sogenannten Airbeams hat die Luftfüllung keine tragende Funktion, sondern verhindert lediglich das Einknicken des Trägers. Maßgeblich für die Tragfähigkeit ist die Werkstofffestigkeit des Hüllmaterials. Zur Erhöhung der Sicherheit können die Membrankörper in mehrere Kammern unterteilt werden.<sup>78</sup>

<sup>78</sup> Jakob David Szczugiel: Tragverhalten von Tensairity-Strukturen. Bachelorarbeit, Universität Stuttgart, 2014, [http://www.ibb.uni-stuttgart.de/publikationen/fulltext/2014/2014\\_Szczugiel.pdf](http://www.ibb.uni-stuttgart.de/publikationen/fulltext/2014/2014_Szczugiel.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

## 5 RECYCLING AM LEBENSWEGENDE

Sowohl im Hoch- als auch im Tiefbau sind die verarbeiteten Rohstoffe während der Nutzungszeit viele Jahrzehnte lang gebunden. Der Lebensweg umfasst mehrere Generationen von Architekten, Fachplanern, Bauausführenden und Nutzern, im Zusammenhang mit technischem Fortschritt und veränderten Rahmenbedingungen. Dementsprechend ist es schwierig, geschlossene Kreisläufe zu realisieren, wie sie bei Konsumgütern (ohne Wohngebäude) längst etabliert sind. Nichtsdestotrotz ist ein Recycling von Bauabfällen möglich und notwendig, um mit den daraus gewonnenen Sekundärrohstoffen die Ressourcenentnahme und die hiermit verbundenen Umweltfolgen zu reduzieren.

Den politischen Hintergrund für das Recycling von Bauabfällen bestimmt die Neufassung der EU-Abfallrahmenrichtlinie aus dem Jahr 2008. Demnach sollen bis zum Jahr 2020 70 Gewichtsprozent der Bau- und Abbruchabfälle wiederverwendet oder stofflich recycelt werden. Zugrunde liegt eine fünfstufige Hierarchie für den Umgang mit Abfällen: Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung, zum Beispiel energetische Verwertung, Beseitigung.<sup>79</sup>

Hinweise auf offene Fragen im Bereich des Baurecyclings gibt die Ausschreibung „Zukunft Bau – Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Kreislaufwirtschaft Bau“ des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).<sup>80</sup> Dazu gehören „Lösungen zur Vermeidung von Bauabfall, Analyse und Sortierung von Baustellenabfall nach Abfallkategorien, Verbesserung der Rezyklierbarkeit, Substitution knapper Rohstoffe“ im Bereich nachhaltiges Bauen und Bauqualität sowie „Materialkombinationen, die zu höherer Effizienz und Recyclingfähigkeit führen“, als auch „Material- und Energie sparende

<sup>79</sup> Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19.11.2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. Amtsblatt der Europäischen Union, L 312/3, 22.11.2008, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:DE:PDF> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>80</sup> Ausschreibungen Forschungsprojekte: Zukunft Bau, BBSR, Bekanntmachung vom 28. Juli 2014, [http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Antragsforschung/ausschreibung\\_2014.html?nn=436756](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Antragsforschung/ausschreibung_2014.html?nn=436756) (aufgerufen am 21.01.2015)

Bauweisen“ im Forschungsschwerpunkt neue Materialien und Techniken.<sup>81</sup>

Die Verwendung von Sekundärrohstoffen wird in Kapitel 3 im Rahmen der Baustoffherstellung behandelt. Einen Überblick über die aktuellen Verwertungs- und Entsorgungswege sowie die Potenziale eines hochwertigen Recyclings der im Bauwesen verwendeten Materialien gibt die Kurzanalyse Nr. 8, Potenziale eines hochwertigen Recyclings im Baubereich, des VDI Zentrums Ressourceneffizienz.<sup>82</sup> Nachfolgend werden Forschungsprojekte zur sortenreinen Materialtrennung beschrieben, die hochwertiges Recycling von Abbruchmaterialien - zusätzlich zu selektiven Rückbaukonzepten - unterstützen.

## 5.1 Elektrodynamische Fragmentierung

Beim Beton-Recycling gibt es derzeit kein Verfahren, das eine effiziente Trennung der Gesteinskörnung von der eigentlichen Zementsteinmasse und die Separierung von weiteren Bestandteilen wie Stahlfasern bei Stahlbeton ermöglicht. Hier setzt das vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP durchgeführte Projekt ELDYNTON mittels elektrodynamischer Fragmentierung an. Hierbei laufen die durch ultrakurze Blitzenladungen im Nanosekundenbereich erzeugten elektrischen Hochspannungsdurchschläge bevorzugt entlang den Phasengrenzen von Festkörpern. Dadurch werden Verbundmaterialien in ihre Grundstoffe zerlegt. Großtechnisch eingesetzt wird dies bereits sowohl zur Zerkleinerung von hochreinem Silizium in der Wafer-Industrie als auch zum Herauslösen von Lithium-Mineralien aus der umgebenden Gesteinsmatrix.<sup>83</sup>

<sup>81</sup> Förderrichtlinie des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) über die Vergabe von Zuwendungen für Forschungsvorhaben im Rahmen der „Forschungsinitiative Zukunft Bau“ im Jahre 2014 vom 28. Juli 2014, [http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Antragsforschung/bekanntmachung\\_2014.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=12](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Antragsforschung/bekanntmachung_2014.pdf?__blob=publicationFile&v=12) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>82</sup> Oliver Krauß, Thomas Werner: Potenziale eines hochwertigen Recyclings im Baubereich. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Juni 2014, [http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-08-Recycling-im-Baubereich.pdf](http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-08-Recycling-im-Baubereich.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>83</sup> Elektrodynamische Fragmentierung. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Dezember 2013, [http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Informationsmaterial/Abteilungen/BBH/Produktblaetter/IBP\\_087\\_PB\\_Bauchemie\\_Fragmentierung\\_03\\_web\\_de.pdf](http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Informationsmaterial/Abteilungen/BBH/Produktblaetter/IBP_087_PB_Bauchemie_Fragmentierung_03_web_de.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

Hierzu wird der Verbundstoff in Prozesswasser gelagert, da es angesichts der ultrakurzen Blitze eher zu einem Blitzdurchschlag durch den Festkörper als durch das Wasser kommt. Im Gegensatz zu einer mechanischen Bearbeitung gewährleistet dies auch eine staub- und kontaminationsfreie Zerkleinerung. In einer Laboranlage konnte bereits eine Tonne Altbeton pro Stunde aufbereitet werden. Für einen wirtschaftlichen Betrieb ist ein Durchsatz von über 20 Tonnen pro Stunde erforderlich, eine solche Anlage ist in Arbeit.<sup>84</sup>

Das Projekt „Recycling von Altbeton“ erhielt am 27. Januar 2014 im bundesweiten Innovationswettbewerb „Deutschland – Land der Ideen“ die Auszeichnung als Bundessieger in der Kategorie „Wissenschaft“.<sup>85</sup>

## 5.2 Molecular Sorting

Die elektrodynamische Fragmentierung stellt einen Aspekt im Fraunhofer-Forschungsprojekt „Molecular Sorting“ dar. Dieses möchte die „Kreislaufwirtschaft der nächsten Generation“ forcieren und betrachtet dazu zum einen technische Verfahren der sortenreinen Trennung für verschiedene Grundstoffe wie Holz und Glas, zum anderen wurden Zukunftsszenarien zur Ressourceneffizienz im Jahr 2030 entwickelt. Sieben Fraunhofer-Institute untersuchten Trenn- und Recyclingprozesse bis auf die molekulare Ebene, um Methoden und Verfahren zu entwickeln, die die sortenreine Trennung auch ohne vorangegangene planerische Maßnahmen möglich machen.

In einem der sechs Projekte wurde das Recycling von konventionellem Flachglas bearbeitet, wie es etwa als Fenster- und Architekturglas verwendet wird. Hier geschieht derzeit ein Downcycling zu Behälterglas oder Mineralwolle, obwohl es einen großen Bedarf an hochtransparentem Glas gibt, etwa für die Solarthermie und Photovoltaik. Das Recy-

<sup>84</sup> Blitz, schlag' ein! Fraunhofer-Gesellschaft Presseinformation, 01.10.2012, <http://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2012/oktober/blitz-schlag-ein.html> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>85</sup> Das Forschungsprojekt „Recycling von Altbeton“ ist Bundessieger in der Kategorie Wissenschaft beim Innovationswettbewerb „Land der Ideen“. Forschung für Nachhaltige Entwicklungen, 30.01.2014, <http://www.fona.de/de/17097> (aufgerufen am 21.01.2015)



clingglas ist jedoch durch Eisen verunreinigt, das schon in geringsten Mengen die Transparenz reduziert. Beim Molecular Sorting werden in einer Glasschmelze bei 1.500 °C Eisen auf molekularer Ebene vom Glas getrennt und verbleibende geringste Eisengehalte umgewandelt, so dass die Transmission nicht mehr beeinträchtigt ist. Da für eisenarme, hochtransparente Gläser kaum noch eisenfreie Rohstoffe verfügbar sind, sichert das Recycling von günstigem Flachglas sowohl eine gute Verfügbarkeit als auch geringere Kosten.<sup>86</sup>

Neben den beschriebenen hochinnovativen Technologien können aber auch weniger komplexe und bekannte Techniken zur Trennung von Bauschuttbestandteilen zur Anwendung kommen. Beispiele für das stoffspezifische Recycling im Hochbau sind Ziegelbruch und Sanitärkeramik. Hier kommen opto-elektronische Sortierverfahren zum Einsatz, um Fremdstoffe wie nichtmagnetische Schrauben, Dübel oder Plastikteilchen auszusondern. Eine gleichbleibend hohe Qualität der Recyclingprodukte aus Ziegel- und Sanitärkeramik ist möglich.<sup>87</sup> Es wurde ein Demonstrator realisiert, der aus einer Flächenkamera im Nahinfrarot-Bereich mit hoher Bildwiederholfrequenz und einer dazugehörigen Erkennungssoftware besteht. Die einzelnen Baustoffarten lassen sich anhand ihrer chemisch-mineralogischen Eigenschaften erkennen, die Fremdstoffe werden mittels Einzelkornsor-tiermaschinen aussortiert.<sup>88</sup> Damit lässt sich eine Sortenreinheit von etwa 98,5% erzielen, was mit der Sortierleistung von Altbehälterglas vergleichbar ist.<sup>89</sup>

<sup>86</sup> Molecular Sorting – Methoden für die Kreislaufwirtschaft der nächsten Generation. Fraunhofer Gesellschaft, Juli 2014, [http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/v/de/Molecular\\_Sorting\\_V01.1\\_2014\\_de.pdf](http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/v/de/Molecular_Sorting_V01.1_2014_de.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>87</sup> Stoffspezifisches Recycling von Hochbauabfällen. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, o. D., [https://www.dbu.de/123artikel1984\\_341.html](https://www.dbu.de/123artikel1984_341.html) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>88</sup> Elske Linß et al.: Sensorgestützte Sortierung mineralischer Bau- und Abbruchabfälle mit hyperspektraler Nahinfrarot-Sensorik, in: Tagungsband „Aufbereitung und Recycling“ 2014, <http://www.uvr-fia.de/download/kurzfassungen/kurzfassung14.pdf> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>89</sup> Gesellschaft für Innovationsforschung und Beratung mbH (Hrsg.): Die wirtschaftliche Bedeutung der Recycling- und Entsorgungsbranche in Deutschland. Endbericht, 2009, [http://www.argus-statistik.de/dokumente/Recycling\\_und\\_Entsorgungsbranche\\_lang.pdf](http://www.argus-statistik.de/dokumente/Recycling_und_Entsorgungsbranche_lang.pdf), S. 113 (aufgerufen am 21.01.2015)

### 5.3 Straßen- und Brückenbau

RC-Baustoffe müssen eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen, die den gütegesicherten Primärbaustoffen entsprechen. Speziell für RC-Baustoffe sind auch Vorgaben an die stoffliche Zusammensetzung gegeben, etwa eine Begrenzung des zulässigen Anteils von Mauerwerksbruch aus dem Hochbau auf unter 30 Massenprozent, laut TL SoB-StB (Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau). Der Anteil rötlich gefärbten Mauerwerksbruchs fällt in der Praxis jedoch wesentlich geringer aus, weil Bauherren die farbliche Auffälligkeit bei erhöhter Zugabe missfällt.<sup>90</sup> Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) hat daher in Brandenburg eine Erprobungsstrecke aus ziegelreichen RC-Baustoffen errichtet und kommt in einem Forschungsprojekt zu dem Schluss, dass selbst ein Ziegelanteil im RC-Baustoffgemisch von 40 Massenprozent ein Tragfähigkeitsniveau zeigt, das die gestellten Anforderungen erfüllt. Die Tragfähigkeit lag sogar höher als bei der Referenzbauweise mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen. Hebungen und Senkungen waren sehr gering. Frosthebungen gab es auf dem gesamten Streckenabschnitt keine. Der nach TL SoB-StB zulässige Ziegelanteil in RC-Baustoffen von 30 Massenprozent wird von der BASt daher als unkritisch bezeichnet.<sup>91</sup>

Im Gegensatz zu den Baustoffen Stahl und Beton existiert bisher kein Konzept für ein hochwertiges Recycling von Faserverbundstoffen, die bei Brücken in Leichtbauweise zum Einsatz kommen. Diese Situation erinnert an Rotorblätter von Windenergieanlagen, die derzeit nicht stofflich verwertet werden. Es bestehen jedoch technische Ansätze, diese Problematik für Rotorblätter zu lösen, die in Zukunft auch auf den Ingenieurbau und Hochbau übertragen werden könnten. So gibt es im Projektverbund „ForCycle - Roh-

<sup>90</sup> Der Einsatz von Recyclingbaustoffen. Informationsbroschüre für Verwaltung und Planer im Straßenbau. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, August 2013, [http://mvi.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/dateien/Broschueren/BW\\_RecyBaustoffe\\_210114.pdf](http://mvi.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/dateien/Broschueren/BW_RecyBaustoffe_210114.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>91</sup> Dirk Jansen, Kirsten Kunz: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen, in: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S. 70, Juli 2011, <http://bast.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2012/385/pdf/S70.pdf> (aufgerufen am 21.01.2015)

stoffwende Bayern“, gefördert vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz<sup>92</sup>, das Projekt „Recycling von Kompositbauteilen aus Kunststoffen als Matrixmaterial“. Im Projekt soll eine Demontagetechnik für großformatige Bauteile entwickelt werden, um dem Produktionsprozess die Materialverbünde durch eine spezifische Aufbereitung wieder als Sekundärmaterial zur Verfügung stellen zu können.<sup>93</sup> Als Demontagetechnik stellt das vorangehend erwähnte Molecular Sorting eine Option dar, das bei der Größe der Objekte jedoch erst nach vorheriger Zerkleinerung möglich wird.

In einer Machbarkeitsstudie des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie ICT in Pfinztal wurde gezeigt, dass die sogenannte energetische Demontage prinzipiell funktioniert. Dabei werden an den gewünschten Trennstellen Sprengschnüre angebracht, was eine gute Trennung der Materialbereiche ermöglicht.<sup>94</sup> Neben den technischen Fragestellungen muss allerdings angemerkt werden, dass das stoffliche Recycling von Glasfasern wegen des niedrigen Materialpreises aktuell nicht wirtschaftlich wäre.

<sup>92</sup> Projektverbund „ForCycle – Rohstoffwende Bayern“, Einzelprojekte im Überblick. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, o. D., <http://www.stmu.bayern.de/umwelt/abfallwirtschaft/ressourcenschutz/> (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>93</sup> Recycling von Kompositbauteilen aus Kunststoffen als Matrixmaterial. Universität Augsburg, 13.02.2014, [http://www.wzu.uni-augsburg.de/projekte/projekte\\_laufend/forcycle/Kompositbauteile.html](http://www.wzu.uni-augsburg.de/projekte/projekte_laufend/forcycle/Kompositbauteile.html) (aufgerufen am 21.01.2015)

<sup>94</sup> Jörg Woidasky, Elisa Seiler: Recycling von Windkraftanlagen. Vortrag, Hamburg, 06.02.2013, [http://hamburgtrend.info/fileadmin/user\\_upload/pdf/Vortraege\\_2013/Woidasky\\_Recycling\\_von\\_Windkraftanlagen.pdf](http://hamburgtrend.info/fileadmin/user_upload/pdf/Vortraege_2013/Woidasky_Recycling_von_Windkraftanlagen.pdf) (aufgerufen am 21.01.2015)

## 6 FAZIT

Die wichtigsten Entscheidungen für die Ressourceneffizienz eines Gebäudes oder eines Infrastrukturbauwerkes werden in der Konzeptions- und Planungsphase getroffen. Eine ganzheitliche Betrachtungsweise über den gesamten Lebenszyklus im Zusammenspiel mit einer integralen Planung erlaubt hier die Realisierung großer Ressourcenschonungspotenziale. Diese Kurzanalyse zeigt dazu einige technische Möglichkeiten auf.

Die Nutzung des Building Information Modeling (BIM) bietet sicher die konsequenteste Basis, die verbauten Materialien und ihre Verbindungen sowie bauliche Veränderungen während der Nutzungsphase zu dokumentieren. Hierdurch lägen am Lebenswegende alle relevanten Informationen für einen effizienten Rückbau und ein hochwertiges Recycling möglichst vieler Rohstoffe vor. Aufgrund der langen Lebensdauern im Hochbau ist eine Standardisierung des BIM unerlässlich. Die Erarbeitung nationaler Richtlinien hierfür steht am Anfang.<sup>95</sup> Eine mögliche physische Erweiterung des BIM-Konzepts könnte die Implementierung von RFID-Transpondern in die Gebäudekomponenten darstellen. Dieser Ansatz existiert derzeit als Idee und bedarf zunächst der technologischen Weiterentwicklung.

Die großen Stoffströme im Bauwesen manifestieren sich insbesondere in der Verwendung von Beton. Bei der Herstellung des Bindemittels Zement entstehen große Mengen Kohlendioxid, sowohl durch die chemische Reaktion der Rohstoffe als auch durch den Energiebedarf des Ofens, der allerdings schon größtenteils auf Sekundärbrennstoffe umgestellt ist. Es existieren Forschungsvorhaben, Zement und Beton umweltfreundlicher herzustellen. Sie beruhen auf verringertem Brennstoffeinsatz, neuen Sekundärbrennstoffquellen und auf Rohstoffsubstitution. In der Praxis bietet die Anwendung weiterer Optimierungen das Potenzial, den Mengenbedarf zu senken, etwa durch Textil-/Carbonbeton, ultrahochfesten Beton oder gezielte makroskopische

<sup>95</sup> VDI-Koordinierungskreis „Building Information Modeling“ (KK-BIM), <http://www.vdi.de/technik/fachthemen/bauen-und-gebaeudetechnik/querschnittsthemen-der-vdi-gbg/koordinierungskreis-bim/> (aufgerufen am 21.01.2015)

Hohlräume, durch die die Gesamtkonstruktion schlanker wird.

Auch die Werkstoffsubstitution ist ein Thema im Bauwesen, hier stehen vor allem Faserverbundwerkstoffe im Fokus, die meist durch Klebeverbindungen gefügt werden. Erste Erfahrungen gibt es – neben punktueller Verwendung im Hochbau – bereits im Brückenbau, wo sie in Hybridbauweise oder alleinig angewandt werden. Faserverbundkunststoffe ermöglichen Leichtbaukonstruktionen, die sich durch ihre vereinfachte Bauausführung auszeichnen. Kritisch ist allerdings ihr stoffliches Recycling am Lebenswegende zu sehen, das – wie die Windenergiebranche zeigt – noch entwickelt werden muss.

Es gibt allerdings erste Forschungsansätze, auch Faserverbundwerkstoffe sortenrein zu trennen. Das sogenannte „Molecular Sorting“ hat bereits im Labormaßstab gezeigt, dass das Entfernen von Fremdstoffen in Glas oder die Trennung von Holzfraktionen möglich und auch auf Faserverbundwerkstoffe übertragbar ist. Wie immer bei neuen technischen Verfahren wird sich nach Prototypen und Pilotprojekten zeigen, unter welchen Rahmenbedingungen sich das Molecular Sorting und die daraus gewonnenen Sekundärrohstoffe als wirtschaftlich erweisen.

## TEIL 2

# DOKUMENTATION DES FACHGESPRÄCHS

# 1 PROGRAMM DES FACHGESPRÄCHS „SYSTEMISCHE ANSÄTZE ZUR STEIGERUNG DER RESSOURCENEFFIZIENZ IM BAUWESEN“

Berlin, 02.12.2014

Moderation: Dr. Martin Vogt (Geschäftsführer VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH)

- Top 1:** Begrüßung und Vorstellungsrunde
- Top 2:** Vortrag (ausgefallen): Indikatoren zur Messung der Ressourceneffizienz im Bauwesen, Sebastian Eberl (TU München, Lehrstuhl für Bauphysik)
- Top 3:** Vortrag: Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Bauwesen - Ergebnisse einer Kurzanalyse des VDI ZRE, Oliver S. Kaiser (VDI Technologiezentrum GmbH)
- Top 4:** Moderierte Diskussion zum Themenbereich
- Top 5:** Vortrag: Ressourceneffizienz und Zertifizierung, Prof. Alexander Rudolphi (Präsident der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, DGNB)
- Top 6:** Moderierte Diskussion zum Themenbereich
- Top 7:** Vortrag: Ressourcenschonung im Hochbau, Prof. Clemens Deilmann (Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V.)
- Top 8:** Moderierte Diskussion zum Themenbereich
- Top 9:** Abschlussdiskussion
- Top 10:** Zusammenfassung und Ausblick

## 2 DOKUMENTATION DES FACHGESPRÄCHS „SYSTEMISCHE ANSÄTZE ZUR STEIGERUNG DER RESSOURCENEFFIZIENZ IM BAUWESEN“

Am 2. Dezember 2014 fand in Berlin ein Fachgespräch zum Thema „Systemische Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Bauwesen“ mit 17 Teilnehmern aus Forschung, Industrie, Politik, Verbänden und fachlichen Netzwerken statt. In den drei Diskussionsblöcken des Fachgesprächs, zu dem das VDI Zentrum Ressourceneffizienz eingeladen hatte, wurden Ressourceneffizienzpotenziale bei einer ganzheitlichen Betrachtungsweise im Bereich des Hochbaus, Straßen- und Brückenbaus sowie bei Recyclingprozessen am Lebenswegende der Bauwerke betrachtet.

### Bedeutung der Ressourceneffizienz für das Bauwesen

Von allen produzierenden Branchen ist der Bedarf an Rohstoffen im Bauwesen am größten. Beispielsweise fließen rund 550 Millionen Tonnen jährlich in das Bauwesen, davon ca. 300 in den Tiefbau. Potenziale für eine Steigerung der Ressourceneffizienz im Hochbau wurden in einer vom Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR) durchgeführten und vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) beauftragten Studie untersucht. Dabei wurden soweit möglich neu errichtete Gebäude (Wohn- und Nichtwohnbau), Industriegebäude, Bau-Sanierung, nicht gemeldeter Zubau, Baustellenverschnitt, Versiegelungsgrade, Verfüllung von Gebäuden, nicht gemeldeter Abgang, Abriss und Zusammenlegungen betrachtet. Sonderbauten wie Kraftwerke, Bahnhöfe und Flughäfen flossen nicht mit ein.

Auch wenn es zukünftig - im Ausblick bis 2050 - einen Rückgang der Bautätigkeit geben wird, weil nicht mehr im bisherigen Maße neue Bauten entstehen, weist das Bauwesen weiterhin umfangreiche Stoffströme auf, für die Potenziale zur Steigerung der Ressourceneffizienz identifiziert werden können. Die Potenziale liegen in allen Bereichen des Lebenswegs der Bauwerke, angefangen von der Planung über das Errichten und die Nutzung bis hin zu dem Recycling und der Entsorgung am Ende der Nutzungsphase.



Für die Bauwirtschaft bedeutet ein Rückgang der Neubauproduktivitäten allerdings, dass der Bestandserhalt mehr noch als heute das Haupthandlungsfeld für die Bauwirtschaft sein wird.

Für die Errichtung von Bauten gibt es in Deutschland noch keine Verknappung an Massenrohstoffen bzw. mineralischen Rohstoffen. Aber auch hier müssen Angebot und Bedarf an mineralischen Rohstoffen – aufgrund der üblichen Transportdistanzen von 25 bis 30 km – regional betrachtet werden, da Regionen und Länder vollständig unterschiedlichen Rahmenbedingungen unterliegen (lokale Vorkommen, Transportwege, Bautätigkeit etc.). Metallische Rohstoffe werden überwiegend importiert und zum Großteil recycelt.

Bei etwa der Hälfte der produzierten mineralischen Baustoffe (vor allem Schüttgut, Beton) sind die Massenströme nicht exakt nachvollziehbar, weil sie etwa in Bagatellbauten, Stützmauern oder im Wegebau verbaut werden, die nicht in der Bautätigkeitsstatistik erfasst sind.

### Bewertungssysteme und Ökobilanzierung

Anforderungen an nachhaltiges Bauen sind in vielen Leitfäden (z. B. des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) in europäischen und internationalen Standards beschrieben. Deren Anwendung kann auch entsprechend bewertet werden. Die Frage, ob die eingesetzten Indikatoren für eine Bewertung von Ressourceneffizienz sinnvoll und ausreichend sind und ob es sich um die richtigen Indikatoren handelt, muss noch diskutiert werden. Wesentlich ist, dass alle drei Säulen der Nachhaltigkeit berücksichtigt werden. Nach der Definition für nachhaltige Gebäude gelten diese auch als energie- und ressourceneffizient. Dabei ist die energetische Betrachtung einfacher durchzuführen als die Bewertung der eingesetzten Materialien (stofflicher Bereich). Derzeit wird beim DGNB-Zertifizierungssystem eine Ökobilanzierung nur für die Massenrohstoffe durchgeführt, die 80 % der Masse ausmachen<sup>96</sup>. Es liegen jedoch die Daten für sämtliche einge-

<sup>96</sup> Nachträgliche Anmerkung Herr Asam, BBSR: Im Gegensatz dazu bilanziert das BNB-Zertifizierungssystem alle Baustoffe.

setzte Stoffe vor, so dass diese in Zukunft ergänzend für die unterschiedlichen Bauwerke und Typen ausgewertet und bilanziert werden müssten. Entscheidend bei der Ökobilanzierung ist die Betrachtung des gesamten Lebenswegs. So weist beispielsweise Stahl in der Produktherstellung hohe Aufwendungen auf, die jedoch durch die lange Nutzungsdauer kompensiert werden können. Bei Hallen mit Holztragwerken wurden in der Vergangenheit vereinzelt deutlich verkürzte Nutzungsdauern beobachtet, die die Vorteile einer weniger ressourcenbeanspruchenden Produktherstellung merklich reduzierten.

In der Diskussion um Indikatoren für Ressourceneffizienz im Bauwesen stellt sich die Frage, wie der Nutzen zu definieren ist. Sinnvoll könnte die Definition einer Nutzungseffizienz sein, die aus Nutzungsdauer und Nutzungsintensität (z. B. über die Leerstandsquote) ermittelt wird, insbesondere wenn es um Fragen wie zunehmenden Flächenverbrauch oder einen Rebound-Effekt hinsichtlich der stetig wachsenden durchschnittlichen Wohnfläche pro Person geht. Heute kann noch keine Aussage darüber getroffen werden, wie sich das Verhalten der Nutzer zukünftig verändert. Neben der Abbildung von Massenströmen in der vorliegenden Modellrechnung bis 2050 könnten auch der zugehörige Energiebedarf und virtuelles Wasser interessante Parameter ergeben.

### Voraussetzungen für ein hochwertiges Recycling

Eine große Herausforderung an das Schaffen von Voraussetzungen für eine Wiederverwendung von Bauteilen und für ein hochwertiges Recycling liegt in der ungewissen Prognose der Anforderungen, die in Zukunft an Materialien und Werkstoffe gestellt werden. Möglicherweise werden in ca. 50 Jahren z. B. momentan verwendete Stoffe als Gefahrstoffe angesehen oder substituiert, so dass Wiederverwendung oder Recycling für diesen Stoff nicht mehr erwünscht sind. Trotz dieser gewissen Unschärfe sollten die Anstrengungen, effektive Wiederverwendungs- und Recyclingstrategien zu entwickeln und aufzubauen, im Hinblick auf die zu erwartenden Innovationen in den Prozessen nicht unterbleiben.

Bereits in der Planungsphase ist es erforderlich, eine Dokumentation der durchgeführten Baumaßnahmen und eingesetzten Materialien anzufertigen. Problematisch ist der Zeitpunkt der Übergabe eines Bauwerks an den Bauherren, weil hier alles Wissen um die Bauausführung, das Architekten und Bauunternehmer nicht dokumentiert haben, verloren geht. Anschließend werden diese Informationen in den rund 50 bis 100 Jahren Nutzungsdauer keine Aufmerksamkeit mehr geschenkt. Um ein hochwertiges Recycling zu ermöglichen, sollten bereits in der Planungsphase Vorkehrungen für eine lückenlose Dokumentation getroffen werden. Dies gilt auch vor dem Hintergrund, dass zum heutigen Zeitpunkt unklar ist, welche Rahmenbedingungen und Anforderungen an eine Wiederverwendung oder ein Recycling am Ende der Lebensdauer nach der Nutzungsphase gestellt werden. Ohne eine genaue, fortlaufende Dokumentation der verbauten Stoffe zu Beginn, in der Nutzungsphase, bei Renovierungs- und Sanierungsmaßnahmen ist es nahezu unmöglich, eine sachgerechte Zerlegung des Bauwerkes vorzunehmen und einer Wiederverwendung bzw. einem Recycling zuzuführen. Derzeit ist noch ungeklärt, wer für die Kosten einer derartigen fortlaufenden Dokumentation aufkommen wird oder soll oder welche Motivation der Bauherr oder Nutzer für eine Dokumentation in der Prozesskette besitzt. Zudem fehlt eine Einbettung in die politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen.

Ein neuer, noch in der Entwicklung befindlicher Ansatz, mit dem eine optimierte Planung, Ausführung und Bewirtschaftung von Gebäuden erreicht werden kann, ist das Building Information Modeling (BIM). Dabei sollen alle relevanten Gebäudedaten digital erfasst, kombiniert und vernetzt werden. Allerdings müssen die Produzenten der Bauteile einen großen Umfang an Daten an die Planer, Architekten und Bauherren weitergeben, um eine lückenlose Dokumentation gewährleisten zu können. Um diese Daten pflegen zu können, könnte eine zentrale Plattform oder ein Kataster eingerichtet werden. Eine Methode innerhalb des BIM, mit der sowohl eine Rückverfolgbarkeit von Bauteilen als auch eine fortlaufende Dokumentation der Zusammensetzung

von Bauwerken umgesetzt werden kann, ist die RFID-Technik (Radio-Frequency Identification). Mit Hilfe elektromagnetischer Wellen können Bauteile Informationen über ihren Einsatzort und die Zusammensetzung liefern. Auch wenn das so genannte „Taggen“ problemlos erfolgen kann, bestehen derzeit noch Unsicherheiten in der Weitergabe der Daten an möglicherweise wechselnde Eigentümer. Die Zuordnung der auslesbaren Zahlencodes ist in der Regel nur dem Hersteller bekannt und steht Dritten nicht zur Verfügung. Eine Dokumentation und Pflege der Daten von Bauteilen in diesem Rahmen ziehen umfangreiche Kosten nach sich, die im Zweifelsfall von dem Bauherren zu tragen sind. Dafür müssen Anreize geschaffen werden. Eine Motivation kann darin liegen, dass aufgrund der besseren Information über den Zustand von Gebäuden die Gebäudeversicherung gesenkt wird. Die Nutzung von RFID in Gebäudekomponenten wird von mindestens einem Unternehmen in den USA bereits praktiziert. In Dänemark wird in offenen Richtlinien sogar gefordert, dass Planungen mit BIM eingereicht werden. In den skandinavischen Ländern zeichnet sich auch eine höhere Akzeptanz hinsichtlich BIM ab. Am Beispiel von Gebäuden der ZÜBLIN AG in Deutschland wird BIM im Rohbau erfolgreich eingesetzt, allerdings noch nicht bei der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA). Obwohl geeignete Verfahren vorliegen, geht die Entwicklung im Bereich der TGA langsamer voran.

Das BIM und RFID, aber auch moderne Trennverfahren, sind Maßnahmen und Instrumente, die zukünftig in einem gewissen Umfang helfen werden, ein hochwertiges Recycling von Bauteilen zu gewährleisten. Ein hochwertiges Recycling folgt produktspezifisch der im Kreislaufwirtschaftsgesetz festgelegten Abfallhierarchie: Vermeidung - Wiederverwendung - Recycling - Verwertung - Beseitigung. Daraus ergibt sich, dass vor jedem weiteren Zerlegungsschritt geklärt werden sollte, ob Bauteile erneut verwendet werden können oder ob sie dem nächsten Schritt zugeführt werden müssen. Auch ergibt sich aus dieser Betrachtungsweise, dass eine molekulare Zerlegung der Materialien nicht einem hochwertigen Recycling entsprechen kann, da dafür

z. B. auch die aufzuwendende Energie hoch ist. In der Praxis zeigt sich, dass die Aussage über ein hochwertiges Recycling immer materialgruppenspezifisch getroffen werden muss. Beispielsweise gibt es beim Recycling von Kunststoffen stets einen physikalischen Funktionsverlust. Bei Holz handelt es sich zwar um einen nachwachsenden Rohstoff, der aber in Deutschland in der Regel energetisch und nicht stofflich verwertet wird. Dagegen sind die Recyclingquoten von Beton und Metallen hoch.

Letztlich zeigt sich auch beim Recycling, wie wichtig die Bereitstellung von Daten über verwendete Materialien und Stoffströme ist. Die Kenntnis über derzeitige und zukünftige Stoffströme im Bauwesen betrifft vor allem auch den Einfluss auf die Entwicklung des Urban Mining.

Ein modulares Konzept für Gebäude, wie es Prof. Wolfram Jäger (TU Dresden) vorsieht, ermöglicht eine leichte Demontage und eine vollständige Rezyklierbarkeit aller Teile. Hierfür müssen die verwendeten Mauerziegel aus Kalksandstein allerdings absolute exakte Maße aufweisen, damit ein möglichst geringes Fugenmaß eine Trockenfüugung ermöglicht. Nur so kann erreicht werden, dass es für die Demontage keine schwer zu trennenden Verbundsysteme mehr gibt.

Einen problematischen Bereich für ein hochwertiges Recycling stellt noch der Bauschutt dar. Zudem werden die anfallenden Baustellenabfälle, die beim Neubau beispielsweise als Verschnitt anfallen, nur zu 6 % recycelt. Ein Ziel sollte daher die abfallarme Baustelle sein, die keine unfraktionierten Baustellenabfälle mehr enthält. Hier fehlt es aber noch an organisierten und definierten Prozessen, wie recyclingfähige Fraktionen beschrieben, gesammelt bzw. mit einer innovativen Trenntechnik hergestellt werden können. Momentan werden Baustellenabfälle lediglich in verschiedenen Containern gesammelt, was für eine saubere Trennung nicht ausreichend ist.

### Recycling von Bauschutt und Mischabfällen

Problematisch ist das Recycling von Feinkornmaterial, welches zum eingeschränkten Einbau mit definierten techni-

schen Sicherheitsmaßnahmen geeignet ist. Da es sich dabei aber um Materialien minderer Qualität handelt, lassen sich kaum Abnehmer finden, so dass aktuell die Deponierung gängige Praxis ist.

Forschungsvorhaben zu dem Thema „Molecular Sorting“ oder der Verwertung von Gipssanden zur Erzeugung hochwertiger Bauprodukte könnten dieses Problem zukünftig lösen oder wenigstens verringern.

Ein weiteres Material, das aus Bauabfällen zurückgewonnen werden kann, ist ein Kunststoffgranulat (PVC) aus der Ummantelung von Kabeln. Dieses Granulat kann „verbacken“ und beispielsweise für Autobahnbacken verwendet werden. Allerdings werden deutlich weniger dieser Backen benötigt, als an Abfällen anfällt.

Ein Recycling von Gips aus alten Gipskartonplatten wird bereits ohne Qualitätsverlust durchgeführt. Der Gips kann in neue Produkte eingebracht werden.

Allgemein ist die Akzeptanz von Recyclingmaterialien bei den Bauherren gering, da diese keine „Abfälle“ verbauen wollen.

### **Normativer und rechtlicher Hintergrund**

Politische und juristische Handlungsempfehlungen richten sich immer auch nach dem Entwicklungsstand von Innovationen. Inwiefern sie umgesetzt werden können, ist sowohl eine Frage der Rahmenbedingungen, der finanziellen Machbarkeit und Motivation als auch der Wertigkeit von Materialien in den jeweiligen Ländern.

Es gibt die Beobachtung, dass in Ländern wie China, Indien oder Brasilien Recyclingsysteme im Vergleich zu Deutschland technologisch und formalistisch weniger ausgeprägt sind. Daher besteht eine größere Sensibilität gegenüber einer Wiedernutzung von Materialien.

Eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen ist in der Bauprodukte-Verordnung (BauPVO) von 2013 vorgeschrieben. Auch in den Bauordnungen der Bundesländer können Anforderungen verankert werden, die die nachhaltige Nutzung von Ressourcen betreffen. Hier handelt es sich um

eine normative und politische Entscheidung, ob und welche Indikatoren zur Bewertung herangezogen und verankert werden. Eine Festlegung von Massen- und Recyclingquoten oder Summenbetrachtungen werden als eher nicht zielführend für die praktische Anwendung angesehen.

### Beton

Recyclinggesteinskörnungen aus Betonabbruch ersetzen in Recyclingbeton einen Teil der Primärgesteinskörnungen, was dazu führt, dass Betonabbruch gleichwertig recycelt werden kann. Der Einsatz von Recyclingbeton ist nicht für alle Anwendungen zugelassen.

Ein hochwertiges Betonrecycling, also die Wiederverwendung von Abbruch-Beton als Recycling-Gesteinskörnungen im Hochbau, ist technisch möglich, jedoch nicht gängige Praxis. Derzeit wird Beton aus dem selektiven Rückbau als Unterfüllung im Straßenbau oder bei anderen Tiefbauarbeiten eingesetzt. Stünde dieses Material aufgrund eines hochwertigeren Recyclings dafür nicht mehr zur Verfügung, müssten Primärrohstoffe an Einsatzorten Verwendung finden, an denen eine hohe Materialqualität nicht erforderlich ist.

Einen Hinderungsgrund für den Einsatz von Recyclingbeton im Hochbau ergibt nach wie vor die fehlende Akzeptanz gegenüber Recycling-Materialien.

Bezogen auf Nachhaltigkeitsaspekte stellt sich die Frage, ob Bauwerke aus hochfestem oder ultrahochfestem Beton aufgrund der höheren zu erwartenden Lebensdauer als nachhaltiger angesehen werden können. In einer bereits älteren Studie wurde dies widerlegt. Neuere Erkenntnisse dazu liegen nicht vor, und der Sachverhalt müsste erneut geprüft werden, da sich die Parameter wegen neuer hochfester Stähle geändert haben könnten.

### Stahl

Bei Stahl ist es ressourceneffizient, hochfeste Sorten anzuwenden. Die Festigkeit wird durch entsprechende Walzverfahren, nicht durch die Legierung erreicht. Die Ökobilanz wird nicht negativ beeinflusst.

## Leichtbau

Moderne Anwendungen zum Leichtbau von Gebäuden, Fahrbahndecken oder Brücken nutzen verklebte Verbundwerkstoffe. Dies spart in der Summe zwar Material und reduziert die abzutragenden Lasten (schlankere Bauteile) sowie die Transportaufwendungen, allerdings sind diese Verfahren im Hinblick auf die Rezyklierbarkeit zu hinterfragen. Verklebte Verbundwerkstoffe sind praktisch untrennbar und können bestenfalls einer thermischen Verwertung zugeführt werden. Dies widerspricht dem Nachhaltigkeitsgedanken und wirkt sich negativ auf die Ökobilanz aus. Auch geht dies nicht konform mit dem Ansatz, dass eine leichte Demontage der Bauteile für ein hochwertiges Recycling angestrebt werden sollte. Besser sind Verfahren, in denen Verbünde nicht geklebt, sondern verschraubt werden.





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