

VDI

Zentrum
Ressourceneffizienz

VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 26

Rückbau im Hochbau - Aktuelle Praxis und Potenziale der Ressourcenschonung



VDI ZRE Kurzanalyse Nr. 26: Rückbau im Hochbau - Aktuelle Praxis und Potenziale der Ressourcenschonung

Autor:

Oliver S. Kaiser, VDI Technologiezentrum GmbH

Fachliche Ansprechpartnerin:

Franziska Pichlmeier, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Wir danken Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Jehle, Professur für Bauverfahrenstechnik am Institut für Baubetriebswesen an der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden, für seine fachliche Unterstützung.

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

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

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)

Bertolt-Brecht-Platz 3

10117 Berlin

Tel. +49 30-27 59 506-0

Fax +49 30-27 59 506-30

zre-info@vdi.de

www.ressource-deutschland.de

Titelbild: © Angelika Mettke

Druck: Bonifatius GmbH, Karl-Schurz-Straße 26, 33100 Paderborn

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

VDI ZRE Publikationen:
Kurzanalyse Nr. 26

Rückbau im Hochbau - Aktuelle Praxis
und Potenziale der Ressourcenschonung

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	5
TABELLENVERZEICHNIS	6
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	7
1 EINLEITUNG	9
2 MASSENSTRÖME IM HOCHBAU	11
3 RAHMENBEDINGUNGEN	20
3.1 Ressourceneffizienz	20
3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen	21
4 ABBRUCH, SELEKTIVER RÜCKBAU UND DEMONTAGE	27
4.1 Definitionen und Begrifflichkeiten	27
4.2 Stand der Technik	29
5 POTENZIALE ZUR RESSOURCENSCHONUNG - FORSCHUNGSPROJEKTE UND GUTE-PRAXIS-BEISPIELE	33
5.1 Gebäudeplanung	33
5.2 Dokumentation	44
5.3 Selektiver Rückbau und Demontage	47
5.4 Wiederverwendung von Bauteilen	57
5.5 Aufbereitung und Herstellung von Sekundärrohstoffen	63
6 FAZIT	73
7 DOKUMENTATION DES FACHGESPRÄCHS	77
7.1 Programm des Fachgesprächs „Rückbau im Hochbau - Aktuelle Praxis und Potenziale der Ressourcenschonung“	77
7.2 Dokumentation des Fachgesprächs	78
7.2.1 Motivation für ein hochwertiges Recycling von Abfällen aus dem Rückbau von Hochbauten	79
7.2.2 Selektiver Rückbau und hochwertiges Recycling	81
7.2.3 Aufbereitung und Akzeptanz von Recycling-Beton und anderen Recycling-Produkten	84

7.2.4	Produktdesign und Planung eines recyclinggerechten Gebäudes	87
7.2.5	Dokumentation	89
7.2.6	Fachwissen und Dialog	91
	LITERATURVERZEICHNIS	93

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Materialbestand im Hochbau im Jahr 2010 für 16 Materialgruppen	13
Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf des Anfalls von Bauschutt inkl. Bauabfällen auf Gipsbasis in den Jahren 1996 bis 2016	15
Abbildung 3: Materialströme im Hochbau für das Jahr 2010 für 16 Materialgruppen	16
Abbildung 4: Eine Aluminiumkassette mit Clipverbindung auf verschraubter Alu-Unterkonstruktion als Beispiel für eine demontierbare und recyclingfähige Fassade	37
Abbildung 5: Die vollständig demontierbare und recycelbare Backstube Peter in Essen	43
Abbildung 6: Selektives Abschälen der einzelnen Lagen eines WDVS. Oberputz (links), Dämmstoff (Mitte) und teilselektives Abschälen in der Praxis (rechts)	53
Abbildung 7: Porenbeton aus Ziegel (hinten), Porenbeton aus Kalksandstein (vorne)	69

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Recycling-Anteile für die Hochbauverwendung im jeweiligen Bauproduktsegment für das Jahr 2010 [in %]	19
------------	--	----

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ATV	Allgemeine technische Vertragsbedingungen
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BIM	Building Information Modeling
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMI	Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BTU	Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V.
DIN	Deutsches Institut für Normung
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPS	Expandiertes Polystyrol
EU	Europäische Union
GAEB	Gemeinsamer Ausschuss Elektronik im Bauwesen
HBCD	Hexabromcyclododecan
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IT	Informationstechnik
KEA	Kumulierter Energieaufwand

KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LB	Leistungsbereich
MGP	materieller Gebäudepass
PET	Polyethylenterephthalat
ProgRess	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm
R	ressourcenschonend
RC	Recycling
REA	Rauchgasentschwefelungsanlage
RFID	radio-frequency identification
STLB-Bau	Standardleistungsbuch für das Bauwesen
TU	Technische Universität
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WU	wasserundurchlässig

1 EINLEITUNG

Der Hochbau – also Wohn- und Nichtwohngebäude – ist ein sehr großes, anthropogenes Materiallager. Darin sind in Deutschland etwa 15 Mrd. t Baustoffe gebunden – im Vergleich dazu stecken „nur“ 400 Mio. t Rohstoffe in Kapital- und Konsumgütern, einschließlich aller Fahrzeuge, Maschinen, Haushaltsgeräte und Bekleidung.¹ Das anthropogene Materiallager im Hochbau verändert sich kontinuierlich: Jährlich fallen über 200 Mio. t Bau- und Abbruchabfälle aus dem Bauwesen an.² Das ist mehr als die Hälfte des gesamten deutschen Abfallaufkommens. Die jährliche Abbruchmenge bei den Hochbauten umfasst etwa 42 Mio. t.³ Sie besteht größtenteils aus mineralischen Materialien, das sind hauptsächlich Beton, Ziegel, Kalksandsteine und sonstiges Mineralisches einschließlich Bodenbelägen. Die aus ihnen hergestellten Recycling-Produkte werden nur zu einem sehr geringen Anteil im Hochbau selbst eingesetzt. Größtenteils werden dort Primärrohstoffe verbaut. In der Erschließung von Sekundärrohstoffen für den Hochbau schlummert also ein großes Potenzial zur Ressourcenschonung. Auch regionale Ressourcen- und Deponieengpässe könnten mit einer möglichst hochwertigen Verwertung von Sekundärrohstoffen entschärft werden.

Die heutige Planung von Neubauten legt den Grundstein für einen recyclingorientierten Abbruch in der Zukunft. Abbruch und Rückbau müssen im Lebenszyklus eines Gebäudes von Beginn an mitgeplant werden. Strategien für ein hochwertiges Recycling von Hochbauten sind sowohl eine recyclingfreundliche Stoffauswahl – idealerweise der Einbau auch von Sekundärrohstoffen – als auch die Berücksichtigung einer sortenreinen Wiedergewinnung bereits in der Planung der Konstruktion. Eine zuverlässige Dokumentation, welche Materialien wo verbaut sind, ist zwingend erforderlich und könnte mit Hilfe des sogenannten Building Information Modeling (BIM) erstellt werden.

¹ Vgl. Umweltbundesamt (2017a), S. 32.

² Vgl. Statistisches Bundesamt (2017), S. 57, Zeilen 29 und 47.

³ Vgl. BBSR (2017), S. 22.

Beim Abbruch von Bestandsbauten ist der wichtigste Ansatz zur Ressourcenschonung der „selektive Abbruch“, bei dem die Abfallfraktionen durch strikte Trennung sortenrein erfasst werden. Das macht eine gezielte Wiederverwertung der Stoffströme und somit ein hochwertiges Recycling möglich, bei dem die Qualitätsstufe des Sekundärrohstoffes idealerweise der des Primärrohstoffes entspricht und somit ein Einsatz im ursprünglichen Zweck möglich bleibt. Viele Bauteile lassen sich auf der Abbruch-Baustelle nicht sortenrein trennen, weil es sich um Verbundstoffe handelt, bei denen auch die spätere Aufbereitung eine saubere Trennung nicht ermöglicht. In der Praxis findet allerdings häufig lediglich ein teilselektiver Rückbau statt, der ein möglichst hochwertiges Recycling erschwert. Alternativ kommt eine Demontage in Betracht, bei der Bauteile zerstörungsfrei demontiert werden und damit erhalten bleiben. Die direkte Wiederverwendung der Bauteile steht dabei im Vordergrund. Es ist allerdings bis heute unüblich, Bauteile wiederzuverwenden, sodass dieses große Potenzial zur Ressourcenschonung ungenutzt bleibt.

Die vorliegende Kurzanalyse beinhaltet eine kurze Beschreibung der Massenströme im Hochbau, eine Vorstellung der (rechtlichen) Rahmenbedingungen, eine Sammlung der relevanten Begrifflichkeiten und eine Übersicht zum Stand der Technik beim Abbruch von Gebäuden. Der Schwerpunkt liegt darauf, die innewohnenden Potenziale zur Ressourcenschonung aufzuzeigen. Dabei werden Maßnahmen vorgestellt, die in der Planung und bei der Dokumentation umgesetzt werden können, um ein möglichst hochwertiges Recycling am Gebäudelebensende zu ermöglichen. Die Potenziale des selektiven Rückbaus bzw. der Demontage und bei der Aufbereitung der Sekundärrohstoffe werden ebenso betrachtet. Ergänzt werden die Ressourceneffizienzpotenziale mit aktuellen Forschungsvorhaben und Gute-Praxis-Beispielen.

2 MASSENSTRÖME IM HOCHBAU

Hochbauten – Wohn- und Nichtwohngebäude – stellen in Deutschland mit über 15 Mrd. t verbautem Material ein sehr großes, anthropogenes Materiallager dar. Der Hochbau umfasst damit etwa 55 % des menschengemachten Rohstofflagers im Bauwesen.⁴ Hinzu kommen noch über 12 Mrd. t Baustoffe im Tiefbau, zu dem sämtliche Bauwerke für die Verkehrsnetze gehören, sowie Versorgungs- und Entsorgungsnetze für Trinkwasser und Kanalisation. Zum Vergleich: Der Bestand an Rohstoffen, die in Konsum- und Kapitalgütern – wie Fahrzeugen, industriell genutzten Maschinen, Haushaltsgroßgeräten, Heimelektronik, IKT-Geräten, Bekleidung – gebunden sind, liegt mit insgesamt weniger als 400 Mio. t lediglich bei etwa 1,5 % der Rohstoffe im Bauwesen.⁵

Von den über 15 Mrd. t Material im Bestand der Wohn- und Nichtwohngebäude entfielen laut Umweltbundesamt 90 % auf mineralische Materialien, also Beton und Zement, Steine und Ziegel. Knapp 6 % sind Eisen, Baustahl und Nichteisenmetalle, 1,5 % erdölbasierte Kunststoffe. Alle diese Baustoffe und ihre Vorprodukte sind natürlichen Ursprungs und wachsen nicht nach – mit Ausnahme von Holz, das auf 2 % Anteil im anthropogenen Materiallager des Hochbaus kommt. Die sonstigen Stoffe, u. a. Glas und Keramik, kommen insgesamt auf nicht einmal 0,5 % Massenanteil.⁶

Eine umfassende Betrachtung des Bestands und der Materialströme im Hochbau einschließlich Aufschlüsselung nach Bauproduktgruppen für das Jahr 2010 bietet die 2017 vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) veröffentlichte Studie „Materialströme im Hochbau“.⁷ Die Autoren verarbeiten darin die Ergebnisse ihres Materialstrommodells mit den Statistiken aus der Produktions- und Abfallwirtschaft und den Zahlen der Verbände, um eine konsistente Modellrechnung zu schaffen und Abweichungen zu erklären. Bei allen aus dieser Studie zitierten Werten sind jedoch einige Einschränkungen zu beachten: So wurden etwa auch minera-

⁴ Vgl. Umweltbundesamt (2017a), S. 32.

⁵ Vgl. Umweltbundesamt (2017a), S. 32.

⁶ Vgl. Umweltbundesamt (2017a).

⁷ Vgl. BBSR (2017).

liche Produkte berücksichtigt, die bei Tiefbauarbeiten in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Hochbau auf der Liegenschaft eingesetzt werden, also bei Außenanlagen und dem Leitungs- und Wegebau.⁸ Gebäude unter 50 m² Grundfläche wurden nicht berücksichtigt.⁹ Die Struktur, Gliederung und Dimensionen von Daten fallen in den Quellen unterschiedlich aus, sodass Zuordnungen zu Bauproduktgruppen nicht immer eindeutig sind.¹⁰ Trotz dieser Einschränkungen liefert die Studie „Materialströme im Hochbau“ wichtige Anhaltspunkte für die Situation im Hochbau. Der Materialbestand im Hochbau ist in Abbildung 1 wiedergegeben.

⁸ Vgl. BBSR (2017), S. 29.

⁹ Vgl. BBSR (2017), S. 9.

¹⁰ Vgl. BBSR (2017), S. 20.

Materialbestand im Hochbau im Jahr 2010

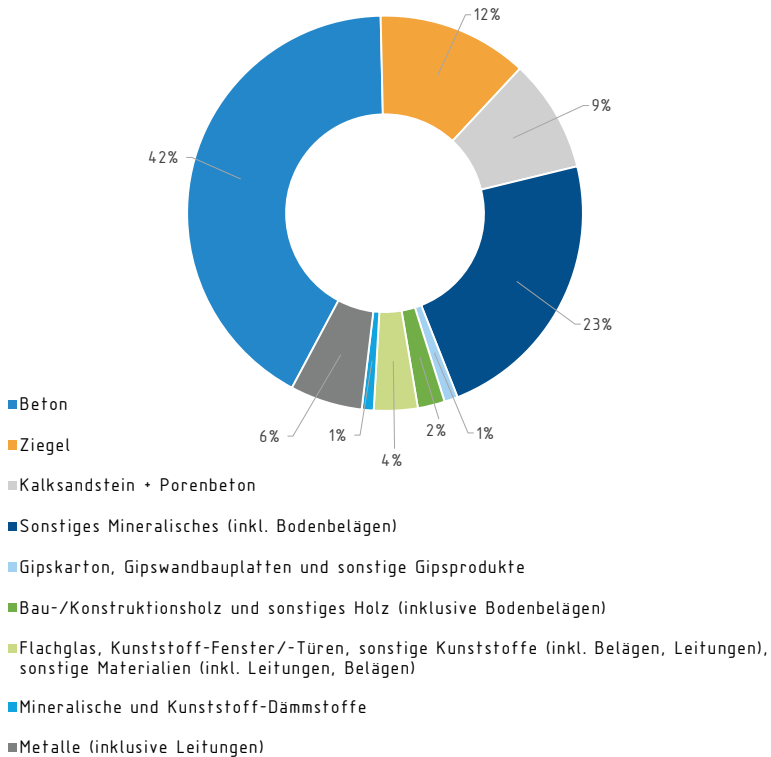


Abbildung 1: Materialbestand im Hochbau im Jahr 2010 für 16 Materialgruppen¹¹

Die mineralischen Fraktionen Beton, Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton und „sonstiges Mineralisches“ werden insgesamt als „Bauschutt“ bezeichnet. Zu den „sonstigen mineralischen“ Stoffen gehören u. a. Mörtel, Putz, Keramik, Granit, Marmor, Fliesen, Keramik und Sand.¹² Unter den sogenannten

¹¹ In Anlehnung an BBSR (2017), S. 21.

¹² Vgl. BBSR (2017), S. 18.

„Baustellenabfällen“ werden Holz, Glas, Kunststoffe und Metalle zusammengefasst. Hinzu kommen noch „Bauabfälle auf Gipsbasis“.¹³

Nach dem Bestand soll nun bei den Materialströmen insbesondere der Abfall im Bauwesen betrachtet werden. In Deutschland stellten im Jahr 2015 die 209 Mio. t Bau- und Abbruchabfälle aus dem Bauwesen über die Hälfte des gesamten deutschen Abfallaufkommens dar.¹⁴ Die Größenordnung dieses Wertes zeigt sich im Vergleich mit den in der Gesellschaft breit diskutierten Kunststoffabfällen, die bei Konsumenten und im Gewerbe anfallen: Hier handelt es sich in Deutschland um jährlich 5,92 Mio. t, also nicht einmal 3 % des Abfallaufkommens im Bauwesen.¹⁵

Für die zeitliche Entwicklung legt die Initiative „Kreislaufwirtschaft Bau“¹⁶ seit 1996 in Monitoring-Berichten die statistisch erfassten Mengen mineralischer Bauabfälle vor. Zwischen 1996 und 2016 fielen jährlich im Schnitt 55,5 Mio. t Bauschutt an, mit Schwankungen zwischen 50,8 Mio. t im Jahr 2004 und einem Maximum von 59,1 Mio. t im letzten Berichtsjahr 2016. Höchststände von über 58 Mio. t wurden bereits 1998 und 2008 erreicht, siehe Abbildung 2.

¹³ Vgl. Kreislaufwirtschaft Bau (2018), S. 5.

¹⁴ Vgl. Statistisches Bundesamt (2017), S. 57, Zeilen 29 und 47.

¹⁵ Vgl. Umweltbundesamt (2018).

¹⁶ Kreislaufwirtschaft Bau (2019).

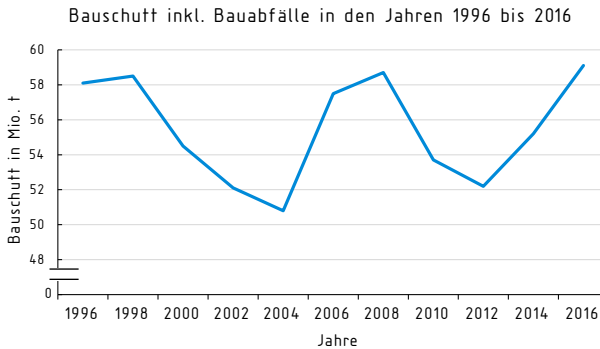
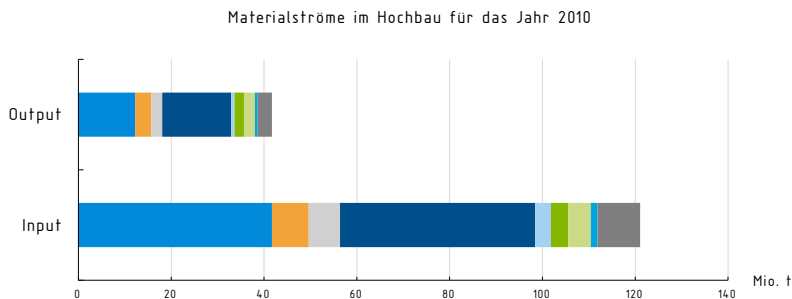


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf des Anfalls von Bauschutt inkl. Bauabfällen auf Gipsbasis in den Jahren 1996 bis 2016¹⁷

Die 2017 veröffentlichte Studie „Materialströme im Hochbau“ legt mit den oben genannten Einschränkungen Zahlen für den Input – also die Errichtung – und den Output – also für den Abbruch – speziell von Hochbauten für das Jahr 2010 vor. Diese Materialstrommengen sind in Abbildung 3 für Wohn- und Nichtwohngebäude nach 16 Materialgruppen aufgeschlüsselt.

¹⁷ In Anlehnung an Kreislaufwirtschaft Bau (2018), S. 14, eigene Darstellung.



Materialgruppen:

- Beton
- Ziegel
- Kalksandstein + Porenbeton
- Sonstiges Mineralisches (inkl. Bodenbelägen)
- Gipskarton, Gipswandbauplatten und sonstige Gipsprodukte
- Bau-/Konstruktionsholz und sonstiges Holz (inklusive Bodenbelägen)
- Flachglas, Kunststoff-Fenster/-Türen, Sonstige Kunststoffe (inkl. Belägen, Leitungen), sonstige Materialien (inkl. Leitungen, Belägen)
- Mineralische und Kunststoff-Dämmstoffe
- Metalle (inklusive Leitungen)

Abbildung 3: Materialströme im Hochbau für das Jahr 2010 für 16 Materialgruppen¹⁸

Im Jahr 2010 flossen Bauprodukte mit einer Masse von etwa 121 Mio. t in den Wohnungs- und Nichtwohnungsbau, während die Abbruchmenge (inkl. Umbauten) bei etwa 42 Mio. t lag.¹⁹ Insgesamt war in 2010 der Input also ca. dreimal größer als der Output, der für die Sekundärrohstoffherzeugung zur Verfügung stehen könnte. Es wäre somit rein mengenmäßig nicht möglich, neue Hochbauten allein aus Sekundärrohstoffen von abgebrochenen Bauten zu errichten.

Nicht nur bei der Beseitigung von Hochbauten, sondern auch beim Neubau entstehen Abfälle, vor allem durch Transportbetonüberschüsse, Verschnitt

¹⁸ In Anlehnung an BBSR (2017), S. 23.

¹⁹ Vgl. BBSR (2017), S. 22.

von Bauplatten und Bruch. Dieser sogenannte Bauabfall liegt je nach Bauproduktart zwischen 3 und 15 % und wird hier nicht näher betrachtet.²⁰

Die Initiative „Kreislaufwirtschaft Bau“ gibt für das Berichtsjahr 2016 an, dass etwa 59 Mio. t Bauschutt angefallen sind, also mineralische Abfälle wie Beton, Ziegel, Kalksandstein und Keramik. Dazu gehören die Massen aus Hoch- und Tiefbau, allerdings ohne den Straßenaufbruch. Davon wurden 3,6 Mio. t (6,2 %) auf Deponien beseitigt. 9,4 Mio. t (16,1 %) wurden im Rahmen der Verfüllung von Abgrabungen und auf Deponien verwertet. 45,5 Mio. t (77,7 %) – der größte Anteil also – wurde recycelt. Im Betrachtungszeitraum fielen 16 Mio. t Straßenaufbruch zusätzlich an, wovon 15,2 Mio. t (95,4 %) recycelt wurden. Lediglich 0,8 Mio. t wurden zu gleichen Teilen im Deponiebau/in Auffüllungen verwertet und auf Deponien beseitigt.²¹

Zu dem recycelten Bauschutt mit 45,5 Mio. t und dem Straßenaufbruch mit 15,2 Mio. t können noch 11,3 Mio. t Recycling-Gesteinskörnungen hinzugerechnet werden, die bei der Aufbereitung der Fraktion Boden und Steine angefallen sind. Zusammen mit einer geringen Menge aufbereiteter Baustellenabfälle (0,2 Mio. t) wurden im Jahr 2016 insgesamt 72,2 Mio. t Recycling-Baustoffe hergestellt.²²

Davon gelangten 15,2 Mio. t (21,0 %) als Gesteinskörnung in die Asphalt- und Betonherstellung. Dieser Anteil entspricht der beim Aufbereiten von Straßenaufbruch im Betrachtungszeitraum recycelten Menge. Anzumerken ist, dass davon lediglich 0,6 Mio. t bei der Betonherstellung Verwendung finden. Der Anteil der RC-Gesteinskörnung im Beton, die als Sekundärrohstoff speziell in die Anwendung im Hochbau gelangt, liegt damit bei unter 1 %.²³ Der größte Anteil an Recycling-Baustoffen mit 57 Mio. t wird zu ca. zwei Dritteln im Straßenbau und zu einem Drittel im Erdbau verwertet.²⁴

²⁰ Vgl. BBSR (2017), S. 20.

²¹ Vgl. Kreislaufwirtschaft Bau (2018), S. 7.

²² Vgl. Kreislaufwirtschaft Bau (2018), S. 10.

²³ Vgl. BBSR (2017), S. 51.

²⁴ Vgl. Kreislaufwirtschaft Bau (2018), S. 11.

Generell könnten mengenmäßig also weit mehr Recycling-Gesteinskörnungen aus dem Hochbau wieder im Hochbau eingesetzt werden. Die Recycling-Baustoffe größtenteils im Straßenbau zu verwenden, schafft eine große Abhängigkeit, da der materialintensive Neubau von Straßen vor allem in strukturell benachteiligten Regionen abnehmen wird.²⁵ Im Straßenbau werden an die verwendeten Gesteinskörnungen durchaus hohe Ansprüche gestellt. Beim Einsatz des Bauschutts im Straßen- und Erdbau handelt es sich um eine Weiterverwertung, die mit einem Qualitätsverlust der Materialien einhergeht und keinen Beitrag zu einem geschlossenen Kreislauf von Bauen und Rückbauen darstellt.²⁶ Die aus dem geschlossenen Kreislauf entnommenen Mengen für den Straßenbau - 2016 waren das 38,1 Mio. t²⁷ - werden durch natürliche Rohstoffe mit hydraulischen Bindemitteln ersetzt und zur Deckung des Bedarfs im Hochbau verbraucht. Stattdessen könnten diese natürlichen Ressourcen direkt in den Straßenbau fließen und gingen als natürlicher Rohstoff nicht verloren. Der Einbau im Straßenunterbau wäre nur eine örtliche Veränderung der Lagerstätte und kein tatsächlicher Verbrauch.²⁸

Es gibt für den Anteil von Recycling-Baustoffen, speziell im Hochbau insgesamt betrachtet, noch ein hohes Potenzial, da die Stoffströme aus dem Rückbau im Hochbau vorrangig im Tiefbau verwendet werden, wie die zuvor genannten Zahlen zeigen. Die Studie „Materialströme im Hochbau“ belegt dies anhand des - meist äußerst geringen bis nicht vorhandenen - Anteils von Sekundärrohstoffen, die aus der Rückgewinnung ehemals genutzter Bauprodukte des Hochbaus stammen. Bei der Betrachtung wird durchaus auch recyceltes Material aus anderen Branchen zugelassen, etwa Behälterglas (Flaschen), das bei der Herstellung von Glaswolle verwertet wird. In der vorgestellten Vergleichsrechnung sind Nebenprodukte wie Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen, Hüttensand oder Schlacke nicht berücksichtigt, da diese Nebenprodukte industrieller Prozesse nicht eigens für das Bauwesen anfallen, sondern lediglich dort verwertet werden.

²⁵ Vgl. Umweltbundesamt (2017b).

²⁶ Vgl. Rosen, A. (2017), S. 54.

²⁷ Vgl. Kreislaufwirtschaft Bau (2018), S. 11.

²⁸ Vgl. Jehle, P. (2019).

Auch die Rückführung von Produktionsresten oder Verschnitt fließt nicht mit ein.²⁹

Tabelle 1: Recycling-Anteile für die Hochbauverwendung im jeweiligen Bauproduktsegment für das Jahr 2010 [in %]³⁰

Bauprodukt	Recyclinganteile (in %)
Beton	0,4
Ziegel	0,0
Kalksandstein	0,0
Porenbetonstein	0,0
Gipskarton/Gipswandbauplatten/ sonstige Gipsprodukte	0,0
Konstruktionsholz	0,0
Holz-Bauplatten	4,0
Flachglas	15,0
Kunststofftüren/-fenster	13,0
Mineralische Wärmedämmungen	27,0
Erdölbasierte Wärmedämmungen	10,0

Für die in der Tabelle gelistete Fraktion Gips hat sich die Situation seit 2010 inzwischen geändert, nachdem das Umweltbundesamt in einem Forschungsvorhaben Verfahren zur Gipsaufbereitung aus Bau- und Abbruchabfällen untersuchen ließ, die ein Gipsrecycling in Deutschland in gewerblichem Maßstab ermöglichen sollten. Naturgips ist nur begrenzt verfügbar und der sogenannte REA-Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen von Kraftwerken wird durch die Stilllegung fossiler Kraftwerke mengenmäßig abnehmen.³¹ Im Jahr 2014 wurde in Deutschland die erste stationäre Aufbereitungsanlage zum hochwertigen stofflichen Recycling gipshaltiger Abfälle in Betrieb genommen.³² Speziell Gipskartonplatten als Bauprodukt werden zu Sekundärgips aufbereitet.³³

²⁹ Vgl. BBSR (2017), S. 50.

³⁰ BBSR (2017), S. 51.

³¹ Vgl. Umweltbundesamt (2016).

³² Vgl. MUEG (2019).

³³ Vgl. Müller, A. (2016a), S. 34 f.

3 RAHMENBEDINGUNGEN

Die in Kapitel 2 skizzierten großen Massenströme im Hochbau und der geringe Rezyklatanteil bei den im Hochbau genutzten Baustoffen zeigen die großen Potenziale der Ressourcenschonung deutlich auf. In diesem Kapitel werden sowohl Informationen zur Ressourceneffizienz gegeben als auch die rechtlichen Rahmenbedingungen vorgestellt.

3.1 Ressourceneffizienz

Die im Titel dieser Kurzanalyse genannte „Ressourcenschonung“ resultiert im Wesentlichen aus einer gesteigerten Ressourceneffizienz. Ressourceneffizienz ist nach der Richtlinie VDI 4800 Blatt 1, „Ressourceneffizienz; Methodische Grundlagen, Prinzipien, Strategien“³⁴, definiert als der Quotient aus dem Nutzen eines Produkts oder eines Prozesses und dem dafür aufgewendeten Einsatz natürlicher Ressourcen. Um diesen Quotienten und damit die Ressourceneffizienz zu erhöhen, wird entweder der Nutzen gesteigert oder/und der Aufwand verringert. Die Erhöhung des Nutzens kann etwa durch Kreislaufführung – also ein Produkt wird recycelt oder verwertet – oder durch eine Verlängerung der Nutzungsdauer erreicht werden: So erhöht sich der Nutzen eines Gebäudes, wenn es nicht abgerissen, sondern stattdessen saniert oder modernisiert wird.

Um den Aufwand zu reduzieren, sind die eingesetzten natürlichen Ressourcen wie Primärrohstoffe und Energie zu verringern, aber auch die Inanspruchnahme von Fläche oder Ökosystemdienstleistungen. Letztere bezeichnen den Nutzen, den die Menschen aus Ökosystemen wie dem Wald beziehen. In der Definition der Ressourceneffizienz wird der wirtschaftliche Aufwand wie Personal und Kapital nicht berücksichtigt.³⁵ Die in dieser Kurzanalyse betrachteten Ressourceneffizienzmaßnahmen zielen hauptsächlich darauf ab, natürliche Ressourcen wie Energie und Rohstoffe einzusparen.

³⁴ VDI 4800 Blatt 1:2016.

³⁵ Vgl. Vogt, M. (2015), Folie 2.

Auch das im März 2016 verabschiedete Deutsche Ressourceneffizienzprogramm II (ProgRess II) fordert eine Stärkung der Kreislaufführung bei Bauprozessen. Ein wichtiges Element von ProgRess II ist dabei die Förderung des selektiven Abbruchs und Rückbaus mit einer Aufbereitung von Bauabfällen, idealerweise vor Ort oder nahe der Baustelle.³⁶ Eine Änderung der gesetzlichen Vorgaben könnte den Einsatz mobiler Aufbereitungsanlagen im Zusammenhang mit einzelnen Abbruch- oder Rückbaumaßnahmen auch außerhalb der Liegenschaft möglich machen.³⁷

3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Bauproduktenverordnung

Die im Jahr 2013 eingeführte Bauproduktenverordnung fordert prinzipiell ein hochwertiges Recycling von Hochbauten. Sie gibt vor, dass Bauwerke bzw. ihre Teile nach dem Abbruch wiederverwendet bzw. recycelt werden müssen. Für neue Bauwerke müssen umweltverträgliche Rohstoffe und Sekundärrohstoffe verwendet werden. Allerdings sind keinerlei Anforderungen an Qualitäten oder Quantitäten des Recyclings definiert.³⁸ Darüber hinaus fehlen klare Vorgaben für die Herstellung bekannter und die Entwicklung neuer Bauprodukte bezüglich ihrer Recycling-Fähigkeit.

EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG

Die EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG³⁹ gibt u. a. eine Verwertungsquote bei Bau- und Abbruchabfällen von 70 % bis zum Jahr 2020 vor. Dieser Anteil muss also zur Wiederverwendung vorbereitet, recycelt oder auf andere Weise stofflich verwertet werden können. In Deutschland wird die Abfallrahmenrichtlinie seit 2012 im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) als zentrales Bundesgesetz im deutschen Abfallrecht umgesetzt.

³⁶ Vgl. BMUB (2016) Abschnitt 7.5.4.

³⁷ Vgl. Jehle, P. (2019).

³⁸ Vgl. Hillebrandt, A.; Riegler-Floors, P.; Rosen, A. und Seggewies, J. (2018), S. 16.

³⁹ Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien.

Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

Kern des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) ist die fünfstufige Abfallhierarchie, mit einer Abstufung aus Abfallvermeidung, Wiederverwendung, Recycling und sonstiger, auch energetischer Verwertung von Abfällen. Letzte Option ist die Abfallbeseitigung.⁴⁰ Es ist die Verwertungsmaßnahme durchzuführen, die den Schutz von Mensch und Umwelt über den gesamten Lebenszyklus des Abfalls am besten gewährleistet. Dabei sind insbesondere die zu erwartenden Emissionen, die Ressourcenschonung, die Energie – die eingesetzt werden muss, aber auch die, die gewonnen werden kann – und die Anreicherung von Schadstoffen in dem Stoff/Material, das ein Verwertungsverfahren durchlaufen hat, zu berücksichtigen.⁴¹ Die fünfstufige Abfallhierarchie ist nachfolgend detailliert dargestellt:⁴²

Stufe 1 **Abfallvermeidung:** Die Gebäudenutzungsdauer wird durch entsprechende Planung, Sanierung und Weiternutzung verlängert.

Stufe 2 **Vorbereitung zur Wiederverwendung:** Ein Bauteil oder Bauprodukt wird nach einer Prüfung, Reinigung und/oder Reparatur im ursprünglichen Zweck wiederverwendet.

Beispiel: Mauersteine nach Rückbau und Reinigung, Betonbauteile nach ihrem Ausbau.

Stufe 3a Recycling durch **Weiterverwendung:** Ein Bauteil oder Bauprodukt wird nicht mehr für den ursprünglichen Zweck eingesetzt, weil die nötige Qualität nicht mehr gewährleistet ist.

Beispiel: Ein Fenster wird im Gartenhaus weiterverwendet, weil der Wärmeschutz altersbedingt nicht mehr den heutigen Anforderungen entspricht.

⁴⁰ Vgl. BMU (2016).

⁴¹ Vgl. § 6 KrWG.

⁴² Vgl. Hillebrandt, A.; Riegler-Floors, P.; Rosen, A. und Seggewies, J. (2018), S. 17.

Stufe 3b Recycling durch **Wiederverwertung**: Bei einem werkstofflichen Recycling bleibt die gegebene Qualitätsstufe erhalten.

Beispiel: Fensterrahmen aus Aluminium können eingeschmolzen werden, aus dem Sekundärrohstoff können wieder Fensterrahmen hergestellt werden.

Stufe 3c Recycling durch **Weiterverwertung**: Das werkstoffliche Recycling geschieht unter Qualitätsverlust.

Beispiel: Das Recyclingmaterial von hochwertigem Flachglas aus Fenstern kann lediglich zu dekorativem Profilbauglas im Fassadenbau genutzt werden.

Stufe 4 **Sonstige Verwertung/sonstige Verwendung**: Verwendung zur Verfüllung oder energetische (thermische) Verwertung (Verbrennung zur Wärmegewinnung).

Stufe 5 **Beseitigung** von Stoffen auf einer Deponie.

Außerdem regelt **§ 5 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes**, dass ein Stoff oder Gegenstand genau dann kein Abfall mehr ist, nachdem dieser ein Verwertungsverfahren durchlaufen hat und anschließend „üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird“, „ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht“ und er in seiner jeweiligen Zweckbestimmung die geltenden technischen Anforderungen sowie Rechtsvorschriften und Normen erfüllt.⁴³

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz wird durch Rechtsverordnungen ergänzt und ausgefüllt, etwa durch die **Gewerbeabfallverordnung**, die **Nachweisverordnung** und die **Deponieverordnung**.⁴⁴ Auch die bautechnischen Anforderungen zur Verwendung von mineralischen Recycling-Baustoffen

⁴³ BfJ (kein Datum).

⁴⁴ Vgl. Kopp-Assenmacher, S. (2016), S. 8.

sind bundeseinheitlich geregelt. Weiterhin werden die verbleibenden abfallrechtlichen Regelungskompetenzen durch die jeweiligen Bundesländer bestimmt, wie z. B. das **Brandenburgische Abfall- und Bodenschutzgesetz**⁴⁵, das **Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz Berlin**⁴⁶, das **Bayerische Abfallwirtschaftsgesetz**⁴⁷ oder das **Landesabfallgesetz NRW**⁴⁸.

Gewerbeabfallverordnung

Die 2017 in Kraft getretene Gewerbeabfallverordnung gibt das verpflichtende Getrennhalten spezifischer Abfälle und das Zuführen zum Recycling für gewerbliche Siedlungsabfälle und Bau- und Abbruchabfälle vor. Folgende Fraktionen sind bei den Bau- und Abbruchabfällen zu trennen:⁴⁹

- Glas (Abfallschlüssel 17 02 02),
- Kunststoff (Abfallschlüssel 17 02 03),
- Metalle, einschließlich Legierungen (Abfallschlüssel 17 04 01 bis 17 04 07 und 17 04 11),
- Holz (Abfallschlüssel 17 02 01),
- Dämmmaterial (Abfallschlüssel 17 06 04),
- Bitumengemische (Abfallschlüssel 17 03 02),
- Baustoffe auf Gipsbasis (Abfallschlüssel 17 08 02),
- Beton (Abfallschlüssel 17 01 01),
- Ziegel (Abfallschlüssel 17 01 02),

⁴⁵ BbgAbfBodG (2016).

⁴⁶ KrW-/AbfG Bln (1999).

⁴⁷ BayAbfG (2018).

⁴⁸ LAbfG (1988).

⁴⁹ § 8 Absatz 1 GewAbfV (2017).

- Fliesen und Keramik (Abfallschlüssel 17 01 03).

Ausgenommen sind Abfälle wie Boden, Steine und Baggergut, die der Abfallgruppe 17 05 der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) zugeordnet werden können.⁵⁰

Nur wenn die getrennte Sammlung der jeweiligen Abfallfraktion wirtschaftlich nicht zumutbar (z. B. aufgrund einer hohen Verschmutzung) oder technisch nicht möglich ist (z. B. kein Platz, rückbautechnische Gründe), entfallen die oben genannten Pflichten.⁵¹ Da in der Regel logistische Aufgaben bzw. Herausforderungen gelöst werden können, sollte von diesen Pflichten nur im Einzelfall nach sorgfältiger Prüfung abgesehen werden.

Mitteilung 20 der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), Ersatzbaustoffverordnung und Mantelverordnung

Die Mitteilung 20 der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) behandelt die Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen und Abfällen. Dieses technische Regelwerk sollte zu einer einheitlichen Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Recycling-Baustoffen in Verwertungsvorhaben in allen Bundesländern führen⁵², was jedoch bisher nur in elf von 16 Bundesländern umgesetzt wurde.⁵³ Die Verwertung von Baustoffen und die Anforderungen an die Herstellung und Verwendung von mineralischen Ersatzbaustoffen sollen mittelfristig bundesweit einheitlich durch die geplante **Ersatzbaustoffverordnung** geregelt werden. Wie die Mitteilung 20 der LAGA wird aber auch die Ersatzbaustoffverordnung am Tiefbau orientiert sein und nicht die Verwendung von RC-Baustoffen im Hochbau umfassen.⁵⁴

Die geplante Einführung der Ersatzbaustoffverordnung ist eine Folge der im Mai 2017 verabschiedeten **Mantelverordnung**. Die Mantelverordnung soll mit der Novellierung der **Bundesbodenschutz- und Altlastenverord-**

⁵⁰ Vgl. § 2 Absatz 1 GewAbfV (2017).

⁵¹ Vgl. § 8 Absatz 1 GewAbfV (2017).

⁵² Vgl. Bertram, H.-U. (2003), S. 2.

⁵³ Vgl. LAGA (kein Datum).

⁵⁴ Vgl. BMU (2017).

nung sowie der Änderung der **Deponie- und Gewerbeabfallverordnung** die Forderungen nach einer Kreislaufwirtschaft mit verschärften Anforderungen an den Boden- und Grundwasserschutz in Einklang bringen.⁵⁵ Dieser verschärfte Boden- und Grundwasserschutz könnte gerade zu einer Stoffstromverschiebung Richtung Deponie führen.⁵⁶ Der Deponieraum ist jedoch begrenzt. Bedarfsprognosen einzelner Bundesländer gehen davon aus, dass vorhandene, geplante und genehmigte Deponien vor dem Jahr 2030 erschöpft sein werden. Ein Ausbau ist in Deutschland aufgrund der hohen Siedlungsdichte und geringen gesellschaftlichen Akzeptanz unwahrscheinlich, zumal Deponien meist regional in einem Umkreis von höchstens 50 km bedient werden. Als Folge der Mantelverordnung könnte der Bedarf für die Beseitigung von Bauabfällen auf einer Deponie also in Zukunft ansteigen, durch die begrenzten Deponiekapazitäten aber auch erheblich teurer werden.⁵⁷

Die zukünftigen regulativen Rahmenbedingungen, wie die Ersatzbaustoffverordnung und die anderen Verordnungen unter dem Dach der Mantelverordnung, können generell dazu führen, dass Bauschutt nicht mehr im Straßen- und Wegebau verwendet oder – im Falle von feinkörniger Gesteinskörnung – teuer deponiert wird. Deshalb werden neue Verwertungswege erforderlich.⁵⁸ Bestärkt wird dies durch die Forderung des Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschusses, im Rahmen der europäischen Aktivitäten zur Kreislaufwirtschaft („circular economy package“⁵⁹) die Verfüllung als Verwertungsoption entfallen zu lassen. Bestehende Gebäude müssten grundsätzlich als Ressource gesehen werden, die wiederverwendet und recycelt werden sollen.⁶⁰

⁵⁵ Vgl. BMUB (2016), Abschnitt 7.4.4.

⁵⁶ Vgl. Dittrich, S. et al. (2016), S. 456.

⁵⁷ Vgl. Hillebrandt, A.; Riegler-Floors, P.; Rosen, A. und Seggewies, J. (2018), S. 124.

⁵⁸ Vgl. Fraunhofer UMSICHT (2018a).

⁵⁹ Vgl. EC (2018).

⁶⁰ Vgl. Kopp-Assenmacher, S. (2016), S. 7.

4 ABBRUCH, SELEKTIVER RÜCKBAU UND DEMONTAGE

In diesem Kapitel werden grundlegende Definitionen im Bereich des Gebäudeabbruchs vorgestellt und der Stand der Technik beschrieben.

4.1 Definitionen und Begrifflichkeiten

Abbruchverfahren

In der VDI-Richtlinie 6210, „Abbruch von baulichen und technischen Anlagen“⁶¹, ist in Blatt 1 definiert: „**Abbruch** ist eine planvolle Teilung eines vorherigen Ganzen in zwei oder mehrere Teile, bei Anwendung geeigneter Verfahren zum ganzen oder partiellen Zerlegen von baulichen oder technischen Anlagen“. Im Alltagssprachgebrauch wird der Rückbau oft mit dem Abbruch gleichgesetzt. In der DIN 18007 ist Rückbau ein Synonym für Demontage.⁶² Die Richtlinie VDI 6210 geht in der Definition des Begriffs **Rückbau** als ein Synonym für Demontage weiter. Die **Demontage bzw. der Rückbau** ist eine besondere Verfahrensweise eines „zerstörungssarmen Abbruchs von Bauteilen durch das Lösen der Verbindungen und/oder das Herstellen von Trennschlitzten und/oder das Abheben der Bauteile zum Schutz verbleibender Bauwerksteile mit dem Ziel der Wieder- oder Weiterverwendung der ausgebauten Bauteile“⁶³. Im Übrigen definiert auch die Richtlinie VDI 6202 Demontage in Anlehnung an DIN 18007.⁶⁴ Die Demontage oder der Rückbau einzelner Bauteile dient hier insbesondere dem Zweck der Minimierung einer Schadstofffreisetzung bei dem Abbruch oder der Schadstoffsanierung.

In der baufachlichen Richtlinie Recycling wird der Begriff „Rückbau“ übergeordnet verwendet und schließt den Abbruch mit ein. Dabei wird der Rückbau als Summe aller Teilleistungen zur Beseitigung baulicher Anlagen verstanden und umfasst die Teilleistungen Entrümpelung, Demontage, Entkernung und Abbruch. Der Abbruch ist darin bezogen auf die Beseiti-

⁶¹ VDI 6210 Blatt 1:2016.

⁶² Vgl. DIN 18007:2000.

⁶³ VDI 6210 Blatt 1:2016.

⁶⁴ Vgl. VDI 6202 Blatt 1:2013.

gung der konstruktiven Elemente eines Bauwerks entgegen der DIN 18007 kein Abbruchverfahren, sondern eine Teilleistung des Rückbaus.⁶⁵

Im Sprachgebrauch wird auch zwischen konventionellem und selektivem Abbruch unterschieden. Der **konventionelle Abbruch** wird meist verstanden als Zertrümmern, Pulverisieren, Schneiden und Sprengen ohne zwingende Anforderungen hinsichtlich einer vorab durchzuführenden Entkernung und/oder Entrümpelung. Der **selektive Abbruch/Rückbau** erfolgt nach vorheriger Beräumung unter Berücksichtigung der Forderungen zum sortenspezifischen Erfassen und Entsorgen des Abbruchmaterials.⁶⁶

Die **Entrümpelung** bezeichnet das Entfernen von Einrichtungsgegenständen und anderen nicht befestigten Gegenständen und Materialien.⁶⁷

Der Begriff der **Entkernung** bezieht sich dabei auf den Ausbau von Anlagen und Gegenständen, die die Standsicherheit des Hochbaus nicht beeinflussen, sodass am Schluss das Tragwerk, meist aus Beton und/oder Stahl oder auch Holz, übrig bleibt.⁶⁸

Verwertungsverfahren

Für die Verwertungsverfahren werden hauptsächlich die Begrifflichkeiten des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, die in Kapitel 3.2 erläutert werden, genutzt.

Wird in der Kurzanalyse nur von **Verwertung** gesprochen, ist von Stufe 2 (Vorbereitung zur Wiederverwendung), Stufe 3 (Weiterverwendung, Wiederverwertung, Weiterverwertung) und Stufe 4 (sonstige Verwendung/sonstige Verwertung) die Rede.

Neben den Unterscheidungen nach der Abfallhierarchie werden speziell für die Verwertung von mineralischen Bauabfällen, dem Bauschutt, die Begriffe **werkstoffliche Verwertung** und **rohstoffliche Verwertung** benutzt.

⁶⁵ Vgl. BMI (2018), S. 19.

⁶⁶ Vgl. BMI (2018), S. 13.

⁶⁷ Vgl. Mettke, A. et al. (2018), S. 81.

⁶⁸ Vgl. MLUL (2015), S. 48.

Bei der werkstofflichen Verwertung werden nur die mechanischen Eigenschaften verändert. Die chemische und mineralogische Zusammensetzung bleibt gleich. Bei der rohstofflichen Verwertung geschieht ein stoffumwandelnder Prozess. Durch gezielte Veränderung der chemischen bzw. mineralogischen Zusammensetzung werden neue Produkteigenschaften generiert.⁶⁹

4.2 Stand der Technik

Der konventionelle Abbruch im Sinne der baufachlichen Richtlinie Recycling kommt heutzutage kaum noch vor, da eine Entkernung, Entrümpelung und Separierung von Abbruchmaterialien regelmäßig stattfinden. Nicht zuletzt müssen vor dem Zertrümmern oder Sprengen schadstoffhaltige Baumaterialien ausgebaut sein. Mit der Einführung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes 1996, seit 2012 nur noch Kreislaufwirtschaftsgesetz, werden anfallende Abbruchmaterialien zunehmend vorsortiert, da neben einer höherwertigen Verwertung die Verwertungskosten signifikant fallen. Eine Studie an der Technischen Universität Darmstadt, für die 32 Unternehmen befragt wurden, hat ergeben, dass eine Vorsortierung der Abbruchmaterialien nur in 3 % der untersuchten Fälle nicht stattgefunden hat.⁷⁰ Ungeachtet der unterschiedlichen Auffassungen zur Verwendung der Begriffe Abbruch und Rückbau stehen die qualifizierte Planung und die strukturierte Durchführung der zwingend erforderlichen Teilleistungen bei der teilweisen oder vollständigen Beseitigung baulicher Anlagen im Mittelpunkt dieser Veröffentlichung.

Dem Abbruch oder Rückbau geht eine Planungsphase voraus, in der ein Abbruch- und Entsorgungskonzept erstellt wird. Wesentliches Merkmal ist die Gewinnung möglichst getrennter Materialfraktionen, bei einer geringstmöglichen Menge nicht recycelbarer Materialien. Beim selektiven Rückbau wird entweder rein verwendungs- und verwertungsorientiert vorgegangen oder in umgekehrter Reihenfolge bezogen auf die ursprüngliche Montagereihenfolge. Bei beiden Vorgehensweisen werden nach der

⁶⁹ Vgl. Müller, A. (2016a), S. 18.

⁷⁰ Vgl. Motzko, C.; Klingenberger, J.; Wöltjen, J. und Löw, D. (2016), S. 27.

Entrümpelung stets zuerst in zugänglichen Bereichen kontaminierte und verunreinigte Bauteile demontiert. Am Schluss werden Störstoffe wie Dämmstoffe, Füllschäume und behandelte Hölzer entfernt, bevor mit dem Abbruch der konstruktiven Bauelemente im Sinne der Baufachlichen Richtlinie Recycling begonnen wird. Dabei muss darauf geachtet werden, dass von vornherein eine geeignete Sortiertiefe erreicht wird. So muss Mauerwerksbruch in einzelne Materialien wie Kalksandstein, Mauerziegel und Porenbeton unterteilt werden. Bereits am Abbruchort kann eine maschinelle Vorsortierung stattfinden.⁷¹

In der Praxis ist eine sortenreine Separierung aufgrund der Eigenschaften der Baustoffe und Bauteile (kaum recyclinggerecht konstruiert, oft mit Schadstoffen belastet) der Bestandsbauten häufig nicht vollständig (wirtschaftlich und technisch) machbar. Ist dies der Fall, wird ein teilselektiver Rückbau in Kauf genommen. Beispielsweise können beim Abbruch eines Bürogebäudes die Bauteilschichten des mit Kies bedeckten Flachdachs nicht sortenrein getrennt werden. Insbesondere lassen sich Bitumenabdichtung und verklebte Mineralwolle oder Schaumdämmstoffe nicht trennen. Darüber hinaus müssen bei einem möglichst hochwertigen Recycling Bitumenklebstoffe (Störstoffe) und ggf. teerhaltige Klebstoffe (Schadstoffe) von der Betonoberfläche abgefräst werden.⁷²

Demontage

Bei einer Demontage werden Bauteile der Rohbaukonstruktion durch das Lösen und Trennen von Verbindungen zerstörungsfrei rückgebaut. Durch (Heraus-)Stemmen, Brennschneiden, Trennschleifen/Sägen oder Auflockern können Verbindungen getrennt und freigelegt werden. Eine besondere Rolle spielt dabei die Sicherung der gelösten Bauteile gegen Umkippen und Herabfallen. Mit Hilfe eines Krans oder eines Seilbaggers können die Bauteile nacheinander abgehoben und abgelegt werden. Die Demontage ermöglicht den Erhalt von voll funktionsfähigen Bauteilen und -elementen, um diese an einer anderen Stelle wieder- oder weiterzuverwenden. Die

⁷¹ Vgl. MLUL (2015), S. 48.

⁷² Vgl. Rosen, A. (2017), S. 54.

Demontage ist mit einem höheren Zeit- und Personalaufwand verbunden und wird in der Praxis deshalb nur selten durchgeführt.⁷³ Zudem gibt es für die ausgebauten Teile kaum einen Markt.

Kosten

Die Abbruch- und Rückbaukosten sind sehr stark abhängig von der gewählten Verfahrensweise und dem Grad der Vorsortierung der anfallenden Abbruchmaterialien. Heute ist zu unterstellen, dass Abbruch- und Rückbauarbeiten grundsätzlich nach den gesetzlichen und rechtlichen Vorgaben, also nach dem Prinzip der Abfallminimierung, durchgeführt werden. Datenerhebungen und Expertengespräche haben ergeben, dass die Geräte- und Entsorgungskosten üblicherweise mit je ca. 40 % die Kostentreiber darstellen und den Preis unmittelbar beeinflussen.⁷⁴

Die Demontage oder der vollständige Rückbau ganzer Bauteile ist aufgrund des höheren Zeit- und Personalaufwands oft teurer als ein konventionelles Abbruchverfahren. Allerdings können sich die Entsorgungskosten durch das Wiederverwenden kompletter Bauteile erheblich reduzieren.⁷⁵ Eine vollständige Demontage oder der Rückbau kompletter Massivbauwerke ist abhängig vom Vorfertigungsgrad der Gebäudekonstruktion und bis heute den Fertigteilbauten vorbehalten.

Aufbereitung

Grundlage für die Aufbereitung der mengenmäßig dominierenden, mineralischen Bauabfälle zu Recycling-Baustoffen sind die mechanischen Verfahrenstechniken Zerkleinern, Klassieren und Sortieren, die in mobilen oder stationären Anlagen erfolgen. Zerkleinert wird beispielsweise mit Backen- und Prallbrechern. In der anschließenden Klassierung wird das Haufwerk fraktioniert. Bei der einstufigen Klassierung in mobilen Anlagen werden die Korngrößen eingegrenzt. Regelmäßig fallen dabei drei Fraktionen an: die feinkörnige Fraktion 0/8, die Zielfraktion 8/56 und das Überkorn > 56 mm Kantenlänge. Das Überkorn kommt erneut in die Brechanlage, um

⁷³ Vgl. Mettke, A. et al. (2018), S. 101.

⁷⁴ Vgl. Motzko, C.; Klingenberger, J.; Wölfjen, J. und Löw, D. (2016), S. 210.

⁷⁵ Vgl. Mettke, A. et al. (2018), S. 102.

zerkleinert zu werden. Je nach Bedarf lassen sich Ober- und Untergrenze der Zielfraktion variieren. Durch den Einsatz mehrerer Siebböden nacheinander mit unterschiedlichen Lochdurchmessern/Maschenweiten lassen sich weitere Fraktionen herstellen, beispielsweise bei einer rezyklierten Gesteinskörnung der Korngruppe 16/32, also mit Durchmessern zwischen 16 und 32 mm.⁷⁶ Dazu werden die Gesteinskörnungen durch zwei Begrenzungssiebe geleitet, z. B. mit den Lochweiten 32 mm oben und 16 mm unten.⁷⁷ Im dritten Schritt, der Sortierung, werden Störstoffe wie Folien, Pappe, Dämmstoffe und Kunststoffe entfernt. Im trockenen Zustand geschieht das durch das sogenannte Windsichten, bei dem leichte Störstoffe weggeblasen werden, während die schwereren auf dem Förderband liegen bleiben. Nasse Sortierverfahren wie Hydrobandscheider, Setzmaschinen und Waschtrommeln trennen leichte mineralische Baustoffe wie Porenbeton und leichte Gipsbaustoffe nach ihrer Dichte ab. Überbandmagnete entfernen metallische, magnetisierbare Störstoffe. Auch von Hand wird aussortiert.⁷⁸

Seit einigen Jahren werden in manchen Branchen sensorgestützte Sortieranlagen eingesetzt, mit deren Hilfe die Materialien nach Farbe, Form und Größe sortiert werden können. Dabei erfassen Kamerasysteme das zu sortierende Gut, identifizieren nach vorgegebenem Muster die einzelnen Stoffe und Körnungen und trennen diese durch gezielten Einsatz scharfer Luftströme. Beim Sortieren von Abbruchmaterialien hat sich das sensorgestützte Verfahren beispielsweise im Gegensatz zur Sortierung von Kunststoffabfällen oder zur Selektierung von Gesteinsgranulaten nach Farbe bisher noch nicht etabliert.

⁷⁶ Vgl. Müller, A. (2016a).

⁷⁷ Vgl. Beton (2016).

⁷⁸ Vgl. Müller, A. (2016a).

5 POTENZIALE ZUR RESSOURCENSCHONUNG - FORSCHUNGSPROJEKTE UND GUTE-PRAXIS-BEISPIELE

Zwischen der Errichtung eines Hochbaus und dessen Abbruch liegen meist viele Jahrzehnte – im Jahr 2010 war etwa die Hälfte der abgebrochenen Hochbauten 40 bis 60 Jahre alt.⁷⁹ Daher werden in diesem Kapitel zuerst Maßnahmen für eine recyclinggerechte Planung beschrieben, die heute umgesetzt werden können und in einer fernen Zukunft Wirkung zeigen werden. Dann wird die benötigte Dokumentation betrachtet, damit die Informationen der Gebäudeplanung und -erstellung am Lebenszyklusende bereitstehen.

Anschließend wird anhand von Beispielen aufgezeigt, wie sowohl der selektive Abbruch als auch die Demontage von Bauteilen aus Bestandsbauten zu möglichst sortenreinen Stoffströmen beitragen können. Abschließend geht es um die Frage, wie aus diesen Stoffströmen Sekundärrohstoffe aufbereitet und hergestellt werden können, die ihrerseits im Hochbau verwendet werden.

5.1 Gebäudeplanung

Die Entwurfs- und Planungsphase beeinflusst den gesamten nachfolgenden Lebenszyklus und damit auch das Lebensende eines Hochbaus maßgeblich. Mit Hilfe einer integralen Gebäudeplanung können sowohl RC-Baustoffe berücksichtigt als auch am Lebensende ein hochwertiges Recycling im Hochbau ermöglicht werden. Die lange Nutzungsphase von Hochbauten – meist erheblich länger als die von Investitionsgütern wie etwa Maschinen – bringt allerdings Herausforderungen mit sich: Sowohl die Beurteilung von Materialien/Stoffen als auch die Möglichkeiten, die in Zukunft bei Materialien und Verfahren bestehen, sind heute unbekannt. In 30 bis 50 Jahren können heutzutage verwendete Stoffe anders beurteilt werden, was deren Tauglichkeit für ein Recycling und die heute angenommenen, geeigneten Rückbauverfahren hinfällig machen könnte – so wie es in der Vergangenheit mit Asbest geschehen ist.⁸⁰ Die Berücksichtigung und der Einsatz

⁷⁹ Vgl. BBSR (2017), S. 16.

⁸⁰ Vgl. Kaiser, O. S.; Krauss, O. (2015), S. 51.

recyclingfähiger Baustoffe, die am Ende des Lebenszyklus leicht voneinander zu trennen sind, unterstützen die Entnahme umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe aus dem Kreislauf. Andererseits können Innovationen dafür sorgen, dass in Zukunft etwa die Trennung von fest verklebten Verbundstoffen effizient möglich wird. Durch die Kombination unterschiedlicher leistungsfähiger Materialien können funktionelle Bauteile mit minimiertem Materialeinsatz konzipiert werden, wie dies beispielsweise durch Leichtbau im Hochbau bereits sinnvoll umgesetzt wird. Dazu sind aber schon heutzutage für Leichtbaukonstruktionen lösbare Verbindungen unabdingbar, die ein späteres Recycling in der Zukunft zulassen. Der Mehraufwand für das noch nicht etablierte recyclinggerechte Planen ist momentan nicht in der gängigen Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) abgebildet, sodass dieser in der frühen Planungsphase nicht vergütet wird.⁸¹ Ist zukünftig die Berücksichtigung der Recycling-Fähigkeit im Hinblick auf Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung in der Planung etabliert, das Wissen darüber weit verbreitet und einfach zugänglich, fällt diese Herausforderung weg.

In den Bewertungssystemen des Bundesbauministeriums (BMI) „Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen“ (BNB) und der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) werden das recyclinggerechte Planen und Bauen an mehreren Stellen positiv bewertet. Bei dem BNB-System werden u. a. folgende Maßnahmen betrachtet:

- das Wiederverwenden von Bauteilen und das Nutzen von RC-Baustoffen,
- die Rückbau- und Recycling-Fähigkeit des Gebäudes,
- das Erstellen eines Abfall- und Wertstoffkonzepts.⁸²

Auch in der gültigen Bewertungsversion aus dem Jahr 2017 der DGNB wird das recyclinggerechte Planen positiv bewertet, da hier Boni für Aspekte der „Circular Economy“ vergeben werden, die das Zertifizierungsergeb-

⁸¹ Vgl. Rosen, A. (2017), S. 57.

⁸² Vgl. BMI (2015).

nis verbessern. Unter anderem begünstigt das Kriterium Rückbau- und Recycling-Freundlichkeit Bauteile, auf die komplett verzichtet wird, die wiederverwendet werden oder die mittels werkstofflicher Verwertung zu einem vergleichbaren Produkt verarbeitet werden oder wurden.⁸³

Zusätzlich könnten Aus- und Fortbildungsangebote für das inhaltliche Verständnis von Gebäuden als Rohstofflager das recyclinggerechte Planen und Bauen weiter fördern. Der akademischen Ausbildung im Bereich Bauen im Bestand und Abbruch/Rückbau wird bisher noch zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt.⁸⁴

Verlängerung der Nutzungsphase

Im Kreislaufwirtschaftsgesetz steht in der Rangfolge des Umgangs mit Abfällen deren Vermeidung an erster Stelle. Diese Abfallvermeidung ist im existierenden Hochbaubestand durch Sanierung, also Verzicht auf Abbruch und Neubau, machbar. In der Planungsphase kann bereits der Grundstein für eine spätere Sanierung eines Hochbaus gelegt werden, damit neue Nutzungsszenarien möglich werden. Dazu gehören eine großzügige Raumhöhe und ausreichend dimensionierte Schächte, sodass neue Haustechnik nachträglich integriert werden kann. Flexible Raumaufteilungen werden mit Grundrissen weitgehend ohne tragende Wände vorbereitet.⁸⁵ Auch Austauschprozesse lassen sich durch geschickte Planung optimieren, indem Bauteile, die eine eigene Nutzungseinheit oder sonstige konstruktive Einheiten bilden, mit gut lösbaren Verbindungen konzipiert wurden.⁸⁶ Zusätzlich sollte auf Bauteil- und Baustoffebene nach dem Leitspruch: „So viel wie nötig, so wenig wie möglich“, geplant werden.

Mit der Verlängerung der Nutzungsphase beschäftigt sich auch die Gesellschaft für Immobilienwirtschaftliche Forschung e.V. in einem 2016 veröffentlichten Leitfaden „Redevelopment – Leitfaden für den Umgang mit vorgenutzten Grundstücken und Gebäuden“. Darin werden die Optionen

⁸³ Vgl. DGNB (2018).

⁸⁴ Vgl. Rosen, A. (2017), S. 57.

⁸⁵ Vgl. Rosen, A. (2017), S. 58 f.

⁸⁶ Vgl. El khouli, S.; John, V.; Zeumer, M. und Hartmann, F. (2014), S. 67.

für ein Refurbishment (Wieder-Aufpolieren), eine Revitalisierung (Wiederbelebung) und ein Redevelopment (Weiterentwicklung) diskutiert.⁸⁷ Der im Eigenverlag erschienene Leitfaden soll in Form einer Richtlinie VDI 6209 bis Ende 2019 erscheinen.

Recyclingfreundliche Baustoffauswahl

Ein recyclinggerechtes Planen beginnt schon bei der Baustoffauswahl. Dabei sollten das zukünftige Recycling-Potenzial und der zukünftige Verwertungsweg der Baustoffe zwingend betrachtet werden. Baustoffe mit Herstellerrücknahmesystemen oder Leasing-Modellen haben den Vorteil, dass sie vorhandene Recycling-Strukturen besitzen und gezielt in ihrem Materialkreislauf bleiben. Diese insbesondere in der Konsumindustrie verbreitete Strategie ist für die lange Baustofflebensdauer, vor allem der Rohbaumaterialien in der Bauindustrie, schwer realisierbar. Eine wichtige Voraussetzung für eine möglichst hochwertige Verwertung liegt darin, dass die Materialien frei von Schadstoffen sind. Die Schadstofffreiheit ist in jedem Einzelfall zu definieren. Werden mögliche Schadstoffe bei der Produktherstellung dauerhaft und sicher gebunden und bei der Bearbeitung oder dem Recycling nicht wieder freigesetzt, sollen diese nach der Meinung einiger Experten als schadstofffrei deklariert werden.⁸⁸ Beispielsweise sind im natürlichen Ton Schwermetalle geogenen Ursprungs enthalten, die beim Ziegelbrand dauerhaft immobilisiert werden; die Ziegel und Ziegelsteine gelten als schadstofffrei. Im Gegensatz dazu werden bei der Bearbeitung asbesthaltiger Produkte die zunächst fixierten Fasern wieder freigesetzt, was bereits bei geringen Asbestfasergehalten mit erheblichen Gesundheitsrisiken infolge der Faserfreisetzung verbunden ist.

Außerdem verringert eine geringe Materialvielfalt oder gar eine homogene Materialwahl bei Bauteilen den Aufwand der Separierung beim Rückbau. Die homogenen Materialien haben den Vorteil, dass eine gemeinsame Verwertung möglich ist, beispielsweise ein Holztragwerk mit Holzweichfaserdämmung ohne Zusatzstoffe oder eine Aluminiumblechfassade auf Alu-

⁸⁷ Vgl. Gif, Gesellschaft für Immobilienwirtschaftliche Forschung e.V. (2016).

⁸⁸ Vgl. Jehle, P. (2019).

Unterkonstruktion (siehe Abbildung 4). Eine homogene Materialwahl bei Bauteilschichten ist oft bei gleichzeitiger Forderung nach Wärmeschutz und Dichtheit gegen Feuchtigkeit schwierig umsetzbar. Nicht trennbare Verbundmaterialien sollten aber auf den Ausnahmefall beschränkt oder nur eingesetzt werden, wenn ein etabliertes Recycling-Verfahren dafür existiert.⁸⁹ Die zuletzt entwickelten Verbundwerkstoffe aus dämmstoffgefüllten Ziegelsteinen verdeutlichen solche Problematiken.



Abbildung 4: Eine Aluminiumkassette mit Clipverbindung auf verschraubter Alu-Unterkonstruktion als Beispiel für eine demontierbare und recyclingfähige Fassade⁹⁰

Lösbare Konstruktionen

Neben der Materialauswahl ist eine lösbare Fügung der Materialien wichtig für die spätere Recycling-Fähigkeit der Baustoffe. Die Verbindungstechniken sollten anstelle von Verklebungen als Klemmverbindungen oder lose Auflagen geplant werden – so könnte z. B. eine recyclingfähige Dachab-

⁸⁹ Vgl. Rosen, A. (2017), S. 53 – 59.

⁹⁰ Foto: Rosen, A. (2017), S. 56.

dichtungsbahn mittels einer Dachbegrünung gegen Wind gesichert sein. Ziel aller Maßnahmen muss sein, dass unterschiedliche Materialien leicht lösbar und sortenrein demontiert werden können.⁹¹ Bei permanenten Verbindungen wie Kleben, Schweißen, Löten und Warm- oder Kaltnieten oder dem Fügen im Verbund mittels Mörtel ist dies meist schlecht möglich. Lösbare Verbindungen können sowohl kraftschlüssig als auch formschlüssig sein, wie Schnapp-, Dreh- und Klemmverschlüsse, Schrauben und Nägel. Vorteilhaft sind generell wenige und wenig unterschiedliche Verbindungen.⁹²

Das modulare Bauen bietet hinsichtlich der Demontage einige Vorteile. Bei diesem Bausystem werden vorgefertigte Module nach einem Baukastensystem zusammengesetzt. Bei der Demontage können die Außenhülle und dann die einzelnen Module wieder abgebaut und abtransportiert werden. Aufgrund der zerstörungsfreien Demontage sind eine Wiederverwendung und ein Recycling meist gut möglich.⁹³ Die Wiederverwendung ist dabei abhängig von der Abnutzung oder Alterung.

Einstoffliche Bauweise

Ein gänzlich anderer Ansatz, um Verbindungen von Bauteilen zu vermeiden, ist die sogenannte einstoffliche Bauweise. Tragkonstruktionen und Hüllbauteile setzen sich aus einer Vielzahl aufeinanderfolgender, jeweils spezialisierter Schalen und Schichten zusammen. Gegenüber der traditionellen Bauweise mit Tragkonstruktionen und Hüllbauteilen, die aus einer Vielzahl aufeinanderfolgender, jeweils spezialisierter Schalen und Schichten mit und ohne Verbund bestehen, etablieren sich in den letzten Jahren vor allem im Holzbau einstoffliche Bauteile. Wird stattdessen nur noch ein Basismaterial benutzt, das die funktionalen bauphysikalischen Anforderungen erfüllen kann, erleichtert dies das sortenreine Trennen. Ein Beispiel dafür bietet die Holzbauweise, bei der sowohl scheiben- und plattenartige Bauteile aus Holz gefertigt sind: Voll- oder Leimholz als Tragglieder, Holzfaserdämmstoffe als Füllstoff und Holzwerkstoffplatten oder Holzbrettscha-

⁹¹ Vgl. Rosen, A. (2017), S. 53 – 59.

⁹² Vgl. El khouli, S.; John, V.; Zeumer, M. und Hartmann, F. (2014), S. 67.

⁹³ Vgl. Dutczak, M. (2013).

lungen für die Flächen. Die aufwendige sortenreine Trennung ist bei einer energetischen Verwertung der Holzbaustoffe nicht erforderlich. Soll dieses Downcycling aber einer stofflichen Verwertung nachgestellt werden, ist eine spätere sortenreine Trennung auch mit einem erhöhten Aufwand verbunden und oftmals unwirtschaftlich. Bei abzudichtenden und erdbeberührten Bauteilen ist die einstoffliche Bauweise durch den Einsatz von WU-Beton (wasserundurchlässiger Beton) leicht möglich. Einstoffliche Massivbauweisen aus Lehm, Ziegel, Poren- und Leichtbeton können nur mit Einschränkungen so bewertet werden. Sie erfüllen nicht immer alle gestellten Anforderungen an Tragwirkung, Wärme- oder Schallschutz oder an die Dichtheit. Die bautechnischen und bauphysikalischen Anforderungen werden oft nur mit weiteren Funktionsschichten aus anderen Materialien erfüllt.

Eine weitere Herausforderung besteht bei der Aufbereitung und den Verwertungswegen. Diese sollten im Einzelfall geprüft werden. Leichtbeton z. B. muss bis heute als mineralischer Bauschutt deponiert werden, weil sich der eigenschaftsbildende Zuschlag aus Blähton oder Glasschotter nicht vom übrigen Betonanteil trennen lässt und an ihm Zement anhaftet. Selbst eine Weiterverwertung als Tragschicht im Unterbau kommt wegen der geringen Dichte sowie der fehlenden Frostsicherheit und Tragfähigkeit nicht in Frage.⁹⁴ Bei einer zukünftigen erneuten Verwendung im Leichtbeton oder bei der Verarbeitung zu RC-Steinen kann eine sofortige Deponierung umgangen werden.

Forschungsprojekt: „Zukunftshaus B10“

Den Rückbau und eine Weiterverwendung und -verwertung mitzuplanen gehörte zum Konzept des Forschungsprojekts „Zukunftshaus B10“ aus dem Jahr 2014, benannt nach seinem Standort Bruckmannweg 10 in Stuttgart. Da das Haus als zeitlich beschränktes Experiment angelegt ist, dauert sein Lebenszyklus nicht einmal ein Jahrzehnt. Nach der Nutzung in den Jahren 2015 bis 2019 wird es abgebaut. Alle Materialien des Fertighauses lassen sich sortenrein trennen und wiederverwerten. Im Jahr 2018 war noch nicht

⁹⁴ Vgl. Hillebrandt, A.; Riegler-Floors, P.; Rosen, A. und Seggewies, J. (2018), S. 105.

entschieden, ob es stofflich recycelt oder an anderer Stelle wiederaufgebaut wird.⁹⁵ Unter Forschungsgesichtspunkten war das Lebenswegende nur ein Teilaspekt. Konzipiert wurde „B10“ vor allem als Plusenergiehaus mit konsequenter IT-Vernetzung, Bedienung durch Smartphones sowie Integration eines elektrisch angetriebenen Autos als Energiespeicher.⁹⁶

Forschungsprojekt „ReMoMaB - Rezyklierbare modulare massive Bauweise“ und Nachfolgeprojekt

Im Vergleich zum Forschungsprojekt „Zukunftshaus B10“ verfolgte Prof. Wolfram Jäger vom Lehrstuhl Tragwerksplanung an der Technischen Universität Dresden im Forschungsprojekt „ReMoMaB“ bis 2016 einen konsequent über den gesamten Lebensweg auf Recycling angelegten Planungsansatz. Mit der - nach Projektakronym - „rezyklierbaren modularen massiven Bauweise“ wurde die Wiederverwendung der einzelnen Bestandteile angestrebt, indem das übliche „Fügen im Verbund“ auf der Baustelle, also das Zusammenfügen verschiedenartiger Materialien wie Beton, Stahl und Kunststoffe durch flüssige Verbundstoffe, aufgegeben wird. Beim Mauerwerk etwa werden Plansteine so präzise gefertigt, dass sie trocken gefügt werden können, was den problemlosen Rückbau nach der Nutzungsdauer ermöglicht. Gebäudehülle und Innenausbau sind als getrennte Schichten ausgeführt, um für den Innenausbau während der Nutzungsdauer jederzeit den Austausch mittels punktförmiger Verbindungen und einfachen Fügen und Lösen von Hand zu gewährleisten. Um nasse Fugen zu vermeiden, die Toleranzen ausgleichen und eine homogene Oberfläche schaffen, wurden Techniken wie Schrauben, Klipsen und Klettverbindungen bis hin zum Spannen geprüft.⁹⁷ Im Ergebnis konnten mit verbundlos gefügten Kalksandstein-Planelementen vollständig demontierbare Massivkonstruktionen hergestellt werden - das mörtellose Mauerwerk.⁹⁸ Auch konnten die Bauteilmassen durch den Einsatz der Vorspannung reduziert werden. Das gesamte Bauwerk lässt sich rasch errichten und am Ende des Lebenszyklus

⁹⁵ Vgl. HfWU (2018).

⁹⁶ Vgl. Abele, R. (2014).

⁹⁷ Vgl. Sigmund, B. (2014).

⁹⁸ Vgl. Schwede, D. (2015).

sortenrein zerlegen, wobei die Materialien ohne zusätzlichen Energieaufwand getrennt werden.⁹⁹

Als Nachfolgeprojekt von „ReMoMaB“ wird im Bauforschungsprojekt „Von der Theorie zur Praxis: Entwicklung einer anwendbaren Trockenbauweise zum Einsatz beim Aufbau von demontierbaren, energiehocheffizienten Musterhäusern“ von 2017 bis 2019 weiter an der rezyklierbaren Trockenbauweise gearbeitet. Dazu wird aus den gesammelten Erkenntnissen mindestens ein Musterhaus errichtet. Wie schon bei „ReMoMaB“ ist die Konstruktion für die Nutzungsphase auf Nullenergiebasis konzipiert. Um den Lebenszyklus zu schließen, wird das aufgebaute Musterhaus wieder abgebaut und wiederverwendet, um die Demontierbarkeit in der Praxis zu demonstrieren.¹⁰⁰

Forschungsprojekt: „Design2Eco“

Lebenszyklusbetrachtungen sollten frühzeitig beginnen, also bereits in der Konzept- und Planungsphase. Für Büro- und Verwaltungsgebäude wurde am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen der Technischen Universität München im Projekt „Design2Eco“ untersucht, wie lebenszyklusbasierte Informationen über die ökonomischen und ökologischen Qualitäten der fünf betrachteten Gebäude als Entscheidungsgrundlagen zur Ressourcenschonung dienen können. Dazu werden detaillierte Lebenszykluskostenberechnungen und Ökobilanzen durchgeführt und daraus folgende, bereits in Grundlagenermittlung und Vorentwurf wirksame Stellschrauben identifiziert und als Handlungsempfehlungen für Planer bereitgestellt. Der Abschlussbericht des im November 2018 beendeten Projekts steht noch aus. Dennoch wurde bereits deutlich, dass ohne Mehrkosten über den Lebenszyklus der Konstruktion 22 % des Treibhauspotenzials durch geeignete Bauteile eingespart werden können.¹⁰¹

⁹⁹ Vgl. TU Dresden (2016).

¹⁰⁰ Vgl. Fraunhofer IRB (2019a).

¹⁰¹ Vgl. Zukunft Bau (2018).

Praxisbeispiel: Aktivhaus-Siedlung Winnenden

Ein Beispiel ist die Aktivhaus-Siedlung Winnenden, eine Wohnanlage für 200 Flüchtlinge. Die gesamte Siedlung basiert auf einem Bausystem mit Modulen in Holzrahmenbauweise.¹⁰² Die Holzkonstruktion ist mit einer Schicht aus Holzfaserplatten gedämmt und mit einer Lärchenschalung bekleidet. Auf Verbundwerkstoffe wurde verzichtet, um ein späteres Recycling möglich zu machen. Von Anfang an wurde auch die Nachnutzung mitgedacht. Deshalb sind die einzelnen Module erweiterbar und können rückgebaut werden.¹⁰³

Praxisbeispiel: Backstube der Bäckerei Peter

Ein weiteres Praxisbeispiel für einen Hochbau, der auf Verbundstoffe und unlösbare Verbindungen verzichtet und am Lebenswende komplett recycelt werden kann, ist die im Jahr 2018 eröffnete Backstube der Bäckerei Peter in Essen (Ruhrgebiet) (Abbildung 5). Die Planer haben die Demontage des Gebäudes so weit mitgedacht und so konsequent umgesetzt, dass sie auch ab- und an anderer Stelle wieder aufgebaut werden könnte. Dafür wurde die Gold-Zertifizierung der „Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen“ (DGNB) vergeben.¹⁰⁴

¹⁰² Vgl. BDA (2017).

¹⁰³ Vgl. Schönwetter, C. (2017).

¹⁰⁴ Vgl. Peter Backwaren (2018).



Abbildung 5: Die vollständig demontierbare und recycelbare Backstube Peter in Essen¹⁰⁵

Praxisbeispiel: Verwaltungssitz der RAG-Stiftung und der RAG AG in Essen

Ebenfalls in Essen befindet sich ein Hochbau im Sinne der Kreislaufwirtschaft, der Verwaltungssitz der RAG-Stiftung und der RAG AG auf dem Gelände des Weltkulturerbes Zollverein. Das 2018 fertiggestellte Gebäude ist ein Pilotprojekt des EU-Forschungsprojekts „Building as Material Banks“ (BAMB). Alle Materialien sind nach ihrer Kreislauffähigkeit ausgewählt und demontierbar¹⁰⁶, die Bauprodukte sind auf ihre Kreislauffähigkeit geprüft und zertifiziert, Verbundbaustoffe und „Sandwichmaterialien“ werden nicht angewendet.¹⁰⁷ Zusätzlich sind alle Komponenten in einem „Material Passport“ dokumentiert, um später als Materialdepot dienen zu können.¹⁰⁸

¹⁰⁵ Foto: Peter Backwaren (2018).

¹⁰⁶ Vgl. Baunetz (2018).

¹⁰⁷ Vgl. Baunetz (2018), Bildergalerie, Bild 21.

¹⁰⁸ Vgl. Kölbl Kruse (kein Datum).

5.2 Dokumentation

Um am Lebensende einen hochwertigen und effizienten Recycling-Prozess möglich zu machen, müssen verwertungsrelevante Informationen wie zu den verbauten Baustoffen und zur Baukonstruktion vorliegen. Ist dies nicht der Fall, gehen die Vorteile des recyclingfreundlichen Planens und Bauens zum großen Teil verloren. Dies gilt auch für geplante Nachnutzungskonzepte. Deshalb sind eine systematische Erfassung und Dokumentation von wesentlichen Gebäudeinformationen und die Aktualisierung und Fortschreibung über den gesamten Lebenszyklus notwendig. Bisher war eine detaillierte, materialbezogene Dokumentation nicht üblich. Wesentliche Informationen sind u. a. ein Nachnutzungskonzept, ein Demontageplan, Daten zu Gewicht und Vorkommen von Baustoffen, Verwertungsstrategien, Recycling-Potenziale usw.¹⁰⁹

Oftmals schätzen Abbruchunternehmer die Abbruchkosten aus Erfahrung oder orientieren sich am Bruttorauminhalt, da Informationen über verbaute Materialien nicht vorliegen oder vor Ort kaum zu erkennen sind. Dieses Problem wird durch eine qualifizierte Abbruch- und Rückbauplanung gelöst. Eine Leistungsbeschreibung nach ATV DIN 18459 der VOB/C erfolgt grundsätzlich auf der Basis der verwendeten Baustoffe und Materialien. Der Bruttorauminhalt bietet keine geeignete Kalkulations- und Abrechnungsgrundlage. Im Übrigen sind zumindest die öffentlichen Bauherren an den Einsatz der dynamischen Baudaten gebunden, die vom GAEB¹¹⁰ erstellte Leistungstexte enthalten. In den Leistungsbereichen des STLB-Bau¹¹¹ werden qualifizierte Textbausteine für den Abbruch im LB 084 „Abbruch-, Rückbau- und Schadstoffsanierungsarbeiten“ sowie im LB 087 „Abfallentsorgung, Verwertung und Entsorgung“ zur Verfügung gestellt, die aber auch eine intensive Planung voraussetzen. Liegen diese Informationen vor, kann sich ein Bauherr anhand einer belastbaren Kalkulation auch

¹⁰⁹ Vgl. Brenner, V. (2010), S. 67.

¹¹⁰ GAEB, Gemeinsamer Ausschuss Elektronik im Bauwesen. Die Arbeitsergebnisse des GAEB werden vom DIN Deutsches Institut für Normung e.V. herausgegeben. Sie sind Voraussetzungen für die Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung von Bauleistungen (AVA).

¹¹¹ STLB-Bau, Standardleistungsbuch für das Bauwesen des Gemeinsamen Ausschusses Elektronik im Bauwesen, für Ausschreibungen von Bundeshochbaumaßnahmen per Erlass bereits ab 1998 verbindlich eingeführt.

aus monetären Gründen für einen selektiven Rückbau entscheiden. Im Moment entscheidet das Abbruchunternehmen über das Abbruchverfahren, von dem die Qualität der Verwertung abhängt, denn nach geltender Rechtslage haftet der Bauherr zwar für die ordnungsgemäße Entsorgung, er ist aber nicht für die Qualität der Verwertung verantwortlich.¹¹² Nach Meinung einiger Experten fehlen in der Praxis flächendeckend qualifizierte Planer. Darüber hinaus werden an die Ausführungsunternehmen keine besonderen Anforderungen bei der Gewerbezulassung gestellt. Die weitreichendste Entwicklung besteht darin, dass in den novellierten Landesbauordnungen die Beseitigung baulicher Anlagen aus der Genehmigungspflicht und zum Teil aus der Anzeigepflicht entlassen wurde.¹¹³

Building Information Modeling (BIM)

Ein Hilfsmittel, um die Gebäudeeigenschaften in einem „digitalen Zwilling“ dauerhaft zu dokumentieren, kann das sogenannte Building Information Modeling (BIM) sein. Diese Methode erfasst die Daten eines Bauwerks digital und über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Das virtuelle, objektorientierte und dreidimensionale Abbild eines Hochbaus kann die bisher getrennte Planung und Bauausführung zusammenführen und ist auch beim Betrieb nützlich. Ziel ist es dabei, dass alle Änderungen an dem Gebäude und seiner Ausstattung während seiner Nutzung und Sanierung erfasst werden. Der Materialeinsatz ist nachvollziehbar und verortbar, was sowohl die Sanierung als auch den Rückbau planbar macht.¹¹⁴ Im Bauteil verbaute RFID-Chips (radio-frequency identification) können die lokale Dokumentation der verbauten Materialien übernehmen und ein digitales Bindeglied zur BIM-basierten zentralen Datenbank darstellen.¹¹⁵ Auf entsprechende Forschungsergebnisse des Instituts für Baubetriebswesen, Professur für Bauverfahrenstechnik der Technischen Universität Dresden, wird an dieser Stelle verwiesen.¹¹⁶

¹¹² Vgl. Hillebrandt, A.; Riegler-Floors, P.; Rosen, A. und Seggewies, J. (2018), S. 21 f.

¹¹³ Vgl. Jehle, P. (2019).

¹¹⁴ Vgl. BMWi (2018), S. 24 f.

¹¹⁵ Vgl. Jehle, P.; Seyffert, S.; Wagner, S. (2011), S. 50.

¹¹⁶ Vgl. Seyffert, S. (2011).

Forschungsprojekt: „BIMaterial“

Es ist naheliegend, aus den BIM-Daten einen materiellen Gebäudepass (MGP) zu generieren, um die Zusammensetzung der Baurestmassen über den vorherigen Lebensweg zu dokumentieren. Das Forschungsprojekt „BIMaterial“ an der Technischen Universität Wien verfolgt den Ansatz des Gebäudepasses, in dem die Massen- und Mengenermittlung einschließlich einer Verortung der Baustoffe und Materialien sowie ihre Zugänglichkeit und Trennbarkeit automatisiert erstellt werden.¹¹⁷ Mit einem Proof of Concept ist das Projekt erfolgreich abgeschlossen worden, sodass eine semi-automatisierte Erstellung eines materiellen Gebäudepasses mit BIM als Werkzeug machbar erscheint. In Zukunft soll die Kopplung der digitalen Werkzeuge und Datenbanken durch ein eigenständiges Softwareprodukt für die automatisierte Gebäudepass-Erstellung ermöglicht werden. Zudem würde eine Kopplung zu einem Geoinformationssystem den Aufbau eines flächendeckenden Sekundärrohstoffkatasters ermöglichen.¹¹⁸

Forschungsprojekt: „Building Information Modeling (BIM) als Basis für den Umgang mit digitalen Informationen zur Optimierung von Stoffkreisläufen im Bauwesen“

Auch in Deutschland ist der Einsatz von BIM für den Rückbau vorgesehen. Im Forschungsvorhaben „Building Information Modeling (BIM) als Basis für den Umgang mit digitalen Informationen zur Optimierung von Stoffkreisläufen im Bauwesen“ wird bis Mitte 2019 untersucht¹¹⁹, wie Stoffkreisläufe im Bausektor geschlossen werden können, indem konkrete Daten über die Bauprodukte vorliegen, die später zurückgebaut und recycelt werden müssen. Dazu werden diese Bauprodukt Daten aus allgemein zugänglichen Datenbanken gewonnen oder während der Bauausführung erhoben, etwa im Rahmen der baubegleitenden Qualitätssicherung oder bei Rück- bzw. Umbaumaßnahmen, sowie im Bestand durch Inaugenscheinnahme und Beprobungen ermittelt. Betrachtet werden Stahl, Baumetalle, die mineralischen Baustoffe Beton, Mauerwerk und Putz, Trockenbaustoffe, Klebstoffe, Teppiche und Innenfarben. Die im Projekt neu entwickelte Software „Re-

¹¹⁷ Vgl. IÖR (2017).

¹¹⁸ Vgl. Kovacic, I. et al. (2018), S. 10 – 12.

¹¹⁹ Vgl. DBU (2019).

cycBIM“ wird für die genannten Bauprodukte an realen Baustellen getestet und validiert.¹²⁰

Forschungsprojekt: „Nachhaltige Kunststoffwertschöpfungskette“ (KUBA)

Da für den Gebäudebestand meist Informationen über die eingebauten Materialien fehlen, ist es sinnvoll, Erkenntnisse über den gegenwärtigen Zustand bzw. den Materialbestand zu gewinnen. So werden im Forschungsprojekt „Nachhaltige Kunststoffwertschöpfungskette“ (KUBA) die in deutschen Bestandsbauten eingelagerten Kunststoffmengen und -qualitäten ermittelt, um die Entsorgungsströme für relevante Kunststoffe bei Neu-, Um- und Rückbau prognostizieren zu können. Letztendlich können dadurch Best-Practice-Ansätze für die Erfassung relevanter Kunststoffströme aus dem Baubereich definiert werden.¹²¹ In Deutschland wird etwa ein Fünftel der hergestellten Kunststoffe im Bauwesen eingesetzt.¹²²

5.3 Selektiver Rückbau und Demontage

Bei der Schließung von Kreisläufen im Bauwesen spielt der Abbruch von Gebäuden eine wesentliche Rolle. Das Abbruchverfahren beeinflusst maßgeblich die Qualität des Verwertungsweges nach dem Lebensende eines Gebäudes. Über die größten Potenziale zur Ressourcenschonung verfügen dabei der selektive Rückbau und die Demontage, die im Folgenden näher betrachtet werden. Bevor jedoch abgebrochen wird, sollte geprüft werden, ob der Erhalt des Bestandsgebäudes technisch und wirtschaftlich möglich bzw. sinnvoll ist.

Verlängerung der Nutzungsphase

Durch den Erhalt des Bestandes und die somit verlängerte Nutzungsphase steigt die Ressourceneffizienz, wie in Kapitel 3.1 dargestellt wurde. Damit wird die in der Abfallhierarchie des Kreislaufwirtschaftsgesetzes definierte Vermeidung von Abfällen durch Weiternutzung erreicht. Dazu sind eine

¹²⁰ Vgl. BIM-Institut (2017).

¹²¹ Vgl. FH Münster (2018a).

¹²² Vgl. El khouli, S.; John, V.; Zeumer, M. und Hartmann, F. (2014), S. 62.

vorsorgende Instandhaltung, eine Sanierung oder ein Umbau in Betracht zu ziehen. Bei einer Sanierung nach etwa 40 Jahren werden nur etwa 3 bis 5 % des „Materiallagers“ eines Hochbaus freigesetzt.¹²³ Der Rest des „Materiallagers“ wird weiter genutzt. Gerade Hochbauten mit hohem Betonanteil, also gewerblich genutzte Bauten, verursachen meist hohe Abbruchkosten, verfügen aber in der Regel über Reserven in Dauerhaftigkeit und Festigkeit¹²⁴, sodass eine Weiternutzung in Betracht gezogen werden sollte.¹²⁵

¹²⁶

Partieller Rückbau bzw. Teilrückbau

Ein weiteres Ressourceneffizienzpotenzial birgt der partielle Rückbau bzw. Teilrückbau. Vorhandener Bestand muss nicht vollständig abgebrochen oder zurückgebaut werden. Durch Umgestaltung und einen gezielten partiellen Rückbau kann er an moderne Anforderungen angepasst und aufgewertet werden. Das Abtragen von Geschossen und/oder das Aufteilen langer Wohnblöcke in Solitäre sind dabei zwei hilfreiche Strategien. So wird ein Teil der Bausubstanz bzw. der verbauten Ressourcen weitergenutzt und Abfall vermieden.¹²⁷

Selektiver Rückbau

Beim selektiven Rückbau werden Materialfraktionen getrennt erfasst und stetig getrennt gehalten. Ziel dabei ist es, eine Vermischung der verschiedenen Materialfraktionen zu vermeiden und zur Vorbereitung auf ein späteres Recycling den Störstoffanteil in den Materialfraktionen so gering wie möglich zu halten. Werden die Materialfraktionen nicht konsequent beim Abbruch getrennt, ist zwar eine spätere Separation oft möglich, diese fällt jedoch deutlich aufwendiger aus. Eine sortenreine Getrennthaltung bietet die Grundlage für ein möglichst hochwertiges Recycling.¹²⁸ Für spezifische Abfallfraktionen ist die Getrennthaltung nach der Gewerbeabfallverord-

¹²³ Vgl. BBSR (2017), S. 20.

¹²⁴ Vgl. Zeumer, M.; Hartwig, J. (2010).

¹²⁵ Vgl. Gif, Gesellschaft für Immobilienwirtschaftliche Forschung e.V. (2016).

¹²⁶ Vgl. Rosen, A. (2017), S. 56.

¹²⁷ Vgl. Mettke, A. (2008).

¹²⁸ Vgl. Mettke, A. et al. (2018), S. 86.

nung (siehe Kapitel 3.2) Pflicht. Nach wie vor mangelt es flächendeckend an qualifizierten Planern und einer gesetzlichen Regelung zur Gewerbezulassung als Abbruchunternehmer.¹²⁹ Neben der Pflicht zur Getrennthaltung spezifischer Abfallfraktionen führen auch die hohen Kosten zur Beseitigung gemischter Abfälle dazu, dass Abbrüche eher selten sind. Durch den selektiven Rückbau kann die Sortiertiefe verbessert werden, sodass z. B. Mauerwerksbruch in weitere einzelne Materialien wie Porenbeton, Ziegel, Kalksandstein etc. aufgetrennt werden kann. Kalksandsteine können dabei auch der Betonfraktion zugemischt werden. Für Leichtbetone und Porenbeton oder Ziegel sind eigene geschlossene Stoffkreisläufe zu fordern. Potenziale zur weiteren Ressourcenschonung bestehen vor allem bei der zusätzlichen Getrennthaltung von Materialien mit eigenen Verwertungswegen und bei Verfahren, die die Materialtrennung beim Rückbau mit möglichst geringem Zeitaufwand durch den Einsatz geeigneter Maschinenteknik verbessern und die das Ausschleusen von Schadstoffen möglich machen. Die noch nicht ausgeschöpften Potenziale zur Ressourcenschonung des selektiven Rückbaus von Gipskartonplatten und Wärmeverbundsystemen werden nachfolgend genauer betrachtet.

¹²⁹ Vgl. Jehle, P. (2019).

Selektiver Rückbau von Gipskartonplatten

Wie in Kapitel 2 beschrieben, ist durch die begrenzte Verfügbarkeit von Naturgips und die abnehmende REA-Gips-Menge das Recycling von Gipskartonplatten eine Möglichkeit, eine neue Rohstoffquelle zu beziehen. Die Entwicklungen in den letzten Jahren haben das Gipsrecycling rentabel gemacht und technisch so weit entwickelt, dass Recycling-Gips mit hoher Qualität direkt in der Produktion von Gipskartonplatten eingesetzt werden kann.¹³⁰ Um diese hohe Qualität zu erreichen, ist es wichtig, dass der Gipskartonplattenbruch sortenrein dem Recycling-Verfahren zugeführt wird. Störstoffe, die die Qualität deutlich mindern, sind u. a. gipshaltige Estriche und Putze. Nach der Gewerbeabfallverordnung sind aber alle Baustoffe auf Gipsbasis (z. B. Gipskartonplatten, Gipsputz, gipshaltige Estriche) im gleichen Abfallschlüssel (AVV 170802) enthalten. Eine weitere Getrennthaltung ist nicht vorgeschrieben, eine nachträgliche Separation ist nicht möglich.¹³¹ Die Potenziale des Gipsrecyclings können durch das selektive Rückbauen und eine konsequente Sortenreinheit von Gipskartonplattenbruch weiter ausgeschöpft werden.

Selektiver Rückbau von Wärmeverbundsystemen (WDVS)

Zur Energieeinsparung in der Nutzungsphase werden an Gebäuden in großem Maße Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) verbaut, in Deutschland von 1960 bis 2012 rund 900 Mio. m², allein über 31 Mio. m² im Jahr 2015. Das bestimmende Dämmmaterial ist expandiertes Polystyrol (EPS), dessen aktueller Marktanteil aktuell leicht rückläufig ist und bei etwa zwei Dritteln der WDVS liegt, im Bestand aber auf über 80 % Marktanteil kommt.¹³² Der größte Anteil des produzierten Polystyrols und expandierten Polystyrols wird im Bausektor und hier in WDVS eingesetzt. In EPS-Dämmplatten liegt der Massenanteil von Polystyrolgranulat bei 85 bis 93 %. Hinzu kommen als Flammschutzmittel 2 bis 3 % nicht chemisch gebun-

¹³⁰ Vgl. Bunzel, J. (2017).

¹³¹ Vgl. Mettke, A. et al. (2018), S. 86.

¹³² Vgl. FH Münster (2018b).

denes Hexabromcyclododecan (HBCD) als homogene Dispersion sowie Pigmente und Materialstabilisatoren.¹³³

Die Dämmplatten werden direkt auf die Außenwand geklebt oder an einem mechanischen Befestigungssystem verdübelt und von außen verputzt. Den größten Massenanteil im Gesamtsystem WDVS haben nicht die leichten EPS-Platten, sondern die mineralische oder organische Putzschicht, Kleber, die mechanischen, metallischen Befestigungssysteme und Gewebefraktionen wie Glasfaser. Dennoch stellen gerade die letztendlich aus Erdöl hergestellten Dämmplatten selbst einen hochwertigen und erhaltenswerten Rohstoff dar. Da von den Herstellern in die Platten keine definierten Trennschichten eingebaut werden, ist die sortenreine Rückgewinnung des EPS schwierig¹³⁴, obwohl die rückgebauten Mengen durch Sanierungs- oder Abbruchmaßnahmen steigen werden. Der direkte Verbund der EPS sowohl mit der Hausaußenwand als auch dem Außenputz macht den Rückbau von WDVS kostspielig. Entweder wird ein Außengerüst aufgebaut und das WDVS mit handwerklichen Verfahren schichtweise zurückgebaut und entsorgt, oder der gesamte Verbund wird mit dem Löffel eines Baggers quasi abgeschabt. Allerdings werden hierbei in der Praxis aus Zeitgründen die einzelnen Schichten nicht selektiv rückgebaut, sondern der abgeschabte Verbund einer Baumischabfalltrennanlage zugeführt, mit der die mineralische von der organischen Fraktion getrennt und letztere lediglich durch eine kontrollierte Verbrennung energetisch verwertet wird.¹³⁵ Bei dem selektiven Rückbau und der Verwertung von Wärmeverbundsystemen bestehen noch Ressourceneffizienz- und Optimierungspotenziale bei der Sortierung durch sensorgestützte Anlagen.

Demontage

Bei einer Demontage werden voll funktionsfähige Bauteile und -elemente erhalten. Diese sparen bei der Wiederverwendung im Vergleich zu neu hergestellten Betonfertigteilen nicht nur Primärmaterial ein, sondern auch eine erhebliche Menge an Herstellungsenergie. So entstehen bei der Her-

¹³³ Vgl. Deilmann, C.; Krauß, N.; Gruhler, K. (2014), S. 67.

¹³⁴ Vgl. Zeumer, M.; Hartwig, J. (2010).

¹³⁵ Vgl. Albrecht, W.; Schwitalla, C. (2014), S. 52.

stellung von 1 t bewehrtem Betonfertigteile 242 kg CO₂-Emissionen, bei der Demontage eines bewehrten Betonfertigteils (1 t) nur etwa 13 kg CO₂-Emissionen. Das ergibt eine Emissionsreduzierung von 95 %.¹³⁶ Diese Vorteile sind eng gebunden an den Entwurf und die Konstruktion von Bauwerken mit hohen Vorfertigungsgraden.

Effiziente Baumaschinen

Nicht nur die Verfahren auf der Abbruch-Baustelle, auch die Baumaschinen können ressourceneffizient sein, beispielsweise durch Kettenbagger, die mit hydraulikbasierter Hybridtechnologie ausgestattet sind. Anstatt wie bei Pkw in einem Hybridantrieb einen zusätzlichen Elektromotor einzusetzen, wird beim Bagger die Bremsenergie des ständig drehenden und wieder abbremsenden Oberwagens in einem Druckspeicher mit Hydrauliköl gespeichert, um beim erneuten Drehen wieder abgegeben zu werden.¹³⁷ In der Praxis sinkt der Kraftstoffverbrauch um 15 %.¹³⁸

Forschungsprojekt: „Universelles Baggeranbaugerät zum gezielten Abtrag von Wärmedämmverbundsystem mit integrierter pneumatischer Abförderung“

Da Großgeräte wie Hydraulikbagger sowieso auf der Abbruchstelle vorhanden sind, soll für diese im Kooperationsprojekt „Universelles Baggeranbaugerät zum gezielten Abtrag von Wärmedämmverbundsystem mit integrierter pneumatischer Abförderung“ ein Anbaugerät entwickelt werden, das die wirtschaftliche Handhabung zur sortenreinen Trennung mit maschinellen Mitteln erleichtert und dabei die Außenwand vollständig von Dämmstoffen befreit. Der Kern des Verfahrens besteht darin, die Arbeitsgänge Trennen und Sammeln zu vereinen, indem mit einem speziellen Bürstenwerkzeug Putz und Dämmstoffe sowie die Verklebung von der Gebäudeaußenwand abgespannt werden (Abbildung 6). Der Bürstenkopf ist eingehäust und mit einer Absaugeinrichtung versehen, die unvermeidbaren Stäube und Späne werden direkt am Entstehungsort gesammelt. Dabei soll der Baggerführer das Anbaugerät intuitiv wie eine Schaufel bedienen können.

¹³⁶ Vgl. Mettke, A. (2019).

¹³⁷ Vgl. Cat (2019).

¹³⁸ Vgl. Feess (2018).

Der Zeitaufwand soll im Vergleich zum Abschälen nur mit der Bagger-schaufel nicht steigen. Das Projekt läuft bis Mitte 2019.¹³⁹



Abbildung 6: Selektives Abschälen der einzelnen Lagen eines WDVS. Oberputz (links), Dämmstoff (Mitte) und teilselektives Abschälen in der Praxis (rechts)¹⁴⁰

Forschungsprojekt: „RESSOURCE.WDVS – Ressourceneffiziente Nutzung von qualitätsgesichertem Sekundär-EPS sowie der mineralischen Fraktionen aus WDVS“

Neben diesem technischen Ansatz für die Baustelle verfolgt das Projekt „RESSOURCE.WDVS – Ressourceneffiziente Nutzung von qualitätsgesichertem Sekundär-EPS sowie der mineralischen Fraktionen aus WDVS“ der FH Münster und mehrerer Industrieunternehmen einen breiteren Ansatz zur Optimierung der WDVS-Verwertung. Ziel ist es einerseits, die Ressourcenpotenziale der Stoffströme effizient zu nutzen, und andererseits, vorhandene Schadstoffe zu zerstören. Damit wird nicht allein der Rückbau selbst adressiert, sondern auch Logistikprozesse und als zentraler Punkt die mechanische Aufbereitung der Abfallströme mit dafür geeigneten Anlagen. Dazu gehören ebenfalls ein Qualitätssicherungssystem, eine Ökoeffizienzanalyse der gesamten Entsorgungskette und eine Entscheidungs-

¹³⁹ Vgl. KIT (2019).

¹⁴⁰ Foto: Albrecht, W.; Schwitalla, C. (2014), S. 53

matrix, mit der die Entsorgungsoptionen von EPS-basierten WDVS aufgezeigt werden. Das Projekt läuft bis 2021.¹⁴¹

Forschungsprojekt: „Entwicklung eines automatisierten Feucht-Sandstrahlsystems mit pneumatischer Abförderung zum Abtrag asbesthaltiger Spachtelmassen auf Beton“ (FeSS)

Während bei den WDVS ein erhöhter Automatisierungsgrad den selektiven Rückbau von Kunststoffprodukten und deren Recycling wirtschaftlich macht, steht bei asbesthaltigen Spachtelmassen eine möglichst effiziente Beseitigung des Schadstoffs Asbest im Vordergrund. Die Gefahrstoffverordnung sieht vor, dass vor dem Abbruch karzinogene Materialien wie Asbest komplett zu entfernen sind. Der Bedarf an einer effizienten Asbestbeseitigung ist sehr groß, da bis zum generellen Verbot 1995 in Deutschland bauchemische Asbestprodukte wie asbesthaltige Putze, Spachtelmassen und Fliesenkleber in großer Menge hergestellt wurden. Allein im Jahr 1975 wurden für Bauprodukte, darunter auch asbesthaltige Spachtel- und Vergussmassen, 10.000 t Asbest produziert, die dann schätzungsweise zu weit über 200.000 t Bauprodukten verarbeitet wurden. Spachtelmassen enthalten ca. 0,5 bis 4 % Asbest und wurden nur in dünnen Schichten eingesetzt, dies dann aber äußerst großflächig.¹⁴²

Diese Spachtelmassen werden in der Praxis von einem Arbeiter mit umgebungsluftabhängigem Atemschutz von Hand entfernt. Neuere Entwicklungen erlauben auch den Einsatz spezieller Fräs- und Schleifgeräte mit integrierter Absaugung. Der gesamte Sanierungsbereich ist in der Regel komplett einzuhausen und durch Unterdruck innerhalb des kontaminierten Bereiches zu sichern. Am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wird daher bis Ende 2019 ein System zur restlosen Entfernung asbesthaltiger Spachtelmassen auf Beton entwickelt. Im Projekt „Entwicklung eines automatisierten Feucht-Sandstrahlsystems mit pneumatischer Abförderung zum Abtrag asbesthaltiger Spachtelmassen auf Beton“ (FeSS) ist ein rollbarer Versuchsstand skizziert, der in Breite und Höhe verfahren werden kann

¹⁴¹ Vgl. FH Münster (2018b).

¹⁴² Vgl. VDI (2015), S. 4

und bei dem ein rotierendes Düsenpaar in eine Einhausung mit Absaugung integriert ist. Konzept und Erprobung dieses rotierenden Werkzeugkopfes sind ein wichtiges Element des Vorhabens, wobei das Gesamtsystem aufgrund eines guten Preis-Leistungs-Verhältnisses später auch für kleinere Unternehmen erschwinglich sein wird.¹⁴³

Forschungsprojekt: „Abbruch, Rückbau und Recycling von C³-Bauteilen“

Ein Beispiel für einen neuen Werkstoff, der erst in diesem Jahrhundert in die Anwendung gebracht wurde, ist der sogenannte Carbon-Beton (engl. auch Carbon Concrete Composite, kurz C³ genannt), bei dem die sonst übliche Bewehrung aus Stahl durch eine aus Matten oder Stäben aus Kohlenstofffasern ersetzt wird. Im Vergleich zu Stahlbeton bietet Carbonbeton teilweise bessere mechanische Eigenschaften und kann nicht korrodieren, sodass die bei Stahlbeton übliche, mehrere Zentimeter dicke Betondeckung – der Abstand zwischen Betonaußenfläche bis zum Bewehrungsstahl im Inneren – wesentlich dünner ausfallen kann, was materialsparende, dünne und leichte Betonbauteile ermöglicht.¹⁴⁴

Wie ein „Abbruch, Rückbau und Recycling von C³-Bauteilen“ geschehen kann, war eine Forschungsaufgabe im gleichnamigen Teilprojekt des Verbundprojekts „Zwanzig20 – C³ Carbon Concrete Composite“, der sich das Institut für Baubetriebswesen der Technischen Universität Dresden bis ins Jahr 2018 gewidmet hat. Bei der Entwicklung des neuen Verbundmaterials waren sich die Beteiligten einig, dass eine nicht nachgewiesene Recycling-Fähigkeit oder auftretende Gesundheitsrisiken bei der Bearbeitung oder Aufbereitung eine Markteintrittsbarriere darstellen und die Entwicklung ausgesetzt werden müsste.¹⁴⁵ Neben kleinteiligen Versuchen und Testreihen wurden die entstehenden Stäube über Filter erfasst und auf mögliche

¹⁴³ Vgl. KIT (2017).

¹⁴⁴ Vgl. C3 (kein Datum).

¹⁴⁵ Vgl. Bienkowski, N. et al. (2017), S. 110 – 121.

WHO-Fasern untersucht. Expositionsversuche mit Lungenzellkulturen ergaben keinen Anstieg der akuten Toxizität durch Carbonbetonpartikel.¹⁴⁶

Zu weiteren Testzwecken wurden zwei kleine Carbonbetonhäuschen aus 6 bzw. 8 cm dünnen Fertigteilen errichtet, in denen sowohl Matten als auch Stäbe als Bewehrung verbaut wurden. Daran konnten dann Betonbohr- und -trenntechniken sowie Demontearbeiten durchgeführt werden.¹⁴⁷ In den 22 t Beton waren etwa 300 m² Matten und 80 m stabförmige Carbonbewehrung verbaut. Im Vergleich zu Stahlbeton waren Bohren und Sägen mit praxisüblichen, aber kleineren Geräten und geringerem Werkzeugverschleiß möglich. Die Abbrucharbeiten selbst verliefen zügig und ohne Probleme, der Beton konnte nahezu rückstandsfrei von der eingesetzten Matten-Bewehrung getrennt werden.¹⁴⁸

Forschungsprojekt: „Entwicklung und Anwendung von komplett demontierbaren Wohneinheiten aus ressourcenschonendem Beton“

Im aktuellen Forschungsvorhaben „Entwicklung und Anwendung von komplett demontablen Wohneinheiten aus ressourcenschonendem Beton“ der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg und der Technischen Universität Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung von Prof. Wolfram Jäger, sollte ein vollständig geschlossener Stoffkreislauf für massive, modulare und transportable Wohneinheiten demonstriert werden. Der Lebensweg beginnt mit einer Herstellung aus RC-Beton. Anschließend sind die Wohneinheiten voll demontierbar und damit flexibel, da sie schnell abgebaut werden können und vielfältig einsetzbar sind. Im Projekt soll die wiederholte Wiederverwendbarkeit demonstriert und auch optimiert werden. Für eine Nachhaltigkeitsbeurteilung einer Konstruktion wurde ein Demontagekoeffizient entwickelt, mit dem der nötige Input und mögliche Output erfasst werden.¹⁴⁹

¹⁴⁶ Vgl. Kortmann, J. et al. (2018), S. 37 – 44.

¹⁴⁷ Vgl. TU Dresden (2018).

¹⁴⁸ Vgl. Kortmann, J. et al. (2018), S. 37 – 44.

¹⁴⁹ Vgl. BTU (2016a).

Praxisbeispiel: „Ahrensfelder Terrassen“ in Berlin-Marzahn

In Berlin-Marzahn konnte eine Plattenbausiedlung in eine moderne Wohnsiedlung umgestaltet werden. Durch den strukturellen Wandel und Trend zum Einfamilienhaus gab es in den Plattenbauten zuletzt einen erheblichen Leerstand. Die Wohnungsbaugesellschaft WBG Marzahn hatte mit dem Projekt „Ahrensfelder Terrassen“ das Ziel, den Wohnungsbestand auszdünnen und gleichzeitig die vorhandene Bausubstanz aufzuwerten. Insgesamt wurden 1.670 Plattenbauwohnungen auf 409 moderne und attraktive Mietwohnungen reduziert. Dafür wurde die Geschossanzahl gesenkt und nur wenige ganze Sektionen wurden abgerissen. Besonderer Wert wurde auf die attraktive Gestaltung der Grundrisse gelegt: Küche und Bäder wurden mit Fenstern geplant, alle Wohnungen besitzen Balkone und 45 Wohneinheiten haben Zugang zu Dachgärten. Die große Nachfrage nach den Wohnungen kann als Zeichen für den Erfolg des schonenden Rück- und Umbaus gedeutet werden.¹⁵⁰

5.4 Wiederverwendung von Bauteilen

In der fünfstufigen Abfallhierarchie steht gleich nach der Vermeidung die Vorbereitung zur Wiederverwendung, also die Nutzung im ursprünglichen Zweck.

Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen

Die Wiederverwendung der Betonbauteile ist das langjährige Arbeitsgebiet von Prof. Angelika Mettke von der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg, für das sie 2016 den Deutschen Umweltpreis der Deutschen Bundesstiftung Umwelt erhielt.¹⁵¹ Dank ihrer umfangreichen Forschungsarbeiten wurden über 30 Gebäude aus mehr als 1.000 Betonbauteilen errichtet, die zuvor anderswo rückgebaut und dann zwischengelagert und qualitätsgeprüft wurden. Dabei fiel auf, dass sich der Beton generell in einem guten Zustand befand, da er beim Bau bereits nach 28 Tagen qualitätsgeprüft wird, anschließend aber noch weiter aushärtet.

¹⁵⁰ Vgl. alsecco GmbH & Co. KG (kein Datum).

¹⁵¹ Vgl. BTU (2016b).

Diese Wiederverwendung ist vor allem bei den sogenannten Plattenbauten in Wohn-, aber auch Gewerbe- und Industriebauten relevant.¹⁵²

Am deutlichsten zeigen sich die Potenziale zur Ressourcenschonung der Wieder-/Weiterverwendung bei der Betrachtung des kumulierten Energieaufwands in der Herstellung (KEA_H) eines neuen bewehrten Betonfertigteils. In einem Berechnungsbeispiel von Prof. Angelika Mettke wird eine Stahlbetoninnenwand mit einer Masse von 3,1 t betrachtet. Für die Herstellung dieser Wand werden etwa 7.200 MJ benötigt. Dafür müssten z. B. 220 l Heizöl eingesetzt werden. Beim Einsatz eines gleichwertigen Altbetonfertigteils entfällt dieser Herstellungsenergieaufwand.¹⁵³

Obwohl das Bauen mit wiederverwendeten Platten gegenüber herkömmlichen Rohbauten etwa 25 % der Baukosten einsparen kann, wird es aus verschiedenen Gründen nur selten praktiziert. Dazu gehört die oft erforderliche Zwischenlagerung der großformatigen Betonelemente, weil beim (Teil-)Rückbau die neue Nutzung häufig noch nicht feststeht. Die potenzielle Ressourcenschonung und der Umweltschutz motivieren zudem nur wenige Bauherren, für die in der Regel die Kosten im Vordergrund stehen. Auch ist der Genehmigungsaufwand bei der Wieder-/Weiterverwendung von Bauteilen hoch, und es stehen noch Fragen zur Haftung und Gewährleistung offen.¹⁵⁴

Wiederverwendung von Stahlbauteilen

Die Stahlbauweise ist vor allem bei Nichtwohngebäuden zu finden (64,8 %, ohne landwirtschaftliche Gebäude).¹⁵⁵ Sie werden u a. in Skelett- und Fachwerkkonstruktionen, Tragwerken, dem Stahl-Verbundbau, in Stahl-Verbundkonstruktionen (Stahlbeton) und Einzelbauteilen angewandt. Der Betonstahl wird an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, da dieser im Zuge der Stahlbetonaufbereitung getrennt und direkt stofflich verwertet wird. Stahl ist zu 100 % recyclingfähig und kann ohne Qualitätsverlust immer

¹⁵² Vgl. Seelig, L. (2018).

¹⁵³ Vgl. Umweltbundesamt (2015), 93 f.

¹⁵⁴ Vgl. Seelig, L. (2018).

¹⁵⁵ Vgl. Umweltbundesamt (2015), S. 97.

wieder recycelt werden.¹⁵⁶ 99 % können nach der Nutzung aufgrund ihrer technischen Eigenschaften (Stahl ist zumeist magnetisch) wiedergewonnen werden. Schätzungen zufolge werden gegenwärtig 88 % der Stahlprodukte recycelt und ca. 11 % wiederverwendet.¹⁵⁷ Der Materialkreislauf für Stahlprodukte ist weitestgehend geschlossen. Potenziale zur Ressourcenschonung bestehen noch bei der Erhöhung der Wieder-/Weiterverwendungsquote. Stahlprodukte sollten, falls dies technisch und wirtschaftlich möglich ist, wieder- und weiterverwendet werden. Konstruktive Elemente und Fassadenbekleidungen können meist problemlos wiederverwendet werden.¹⁵⁸ Dadurch kann zusätzlich zum Primärrohstoff auch Energie eingespart werden, die zum Recycling, vor allem beim energieintensiven Einschmelzen, benötigt wird.

Die Demontage von konstruktiven Stahlbauteilen ist dadurch, dass meist Schraubenverbindungen genutzt wurden, relativ einfach durchführbar. Aber auch Schweißverbindungen können durch geeignete Trennverfahren wie Brennschneiden gelöst werden. Die Anforderungen bezüglich der Produkteigenschaften von wieder- oder weiterverwendeten Stahlbauteilen unterscheiden sich nicht von denen an neue Stahlbauteile. Die Beurteilung kann von einem Fachkundigen bzw. Statiker durchgeführt werden.

Wiederverwendung von Holzbauteilen

Seit Jahrhunderten schon werden Häuser in Holzbauweise errichtet. Neben dem Einsatz als Konstruktionselement in Außen-/Innenwänden (Fachwerk, Holzständerbauweise, Holztafelbauweise) wird Holz im Dachbereich und in Decken genutzt. Holzelemente können dabei u. a. auch mit Ziegel oder Beton kombiniert werden. Da Holz ein nachwachsender Rohstoff ist, werden durch seinen Einsatz für konstruktive Zwecke natürliche Ressourcen geschont.¹⁵⁹ Im Jahr 2017 lag die Holzbauquote¹⁶⁰ bei 17,7 % der geneh-

¹⁵⁶ Vgl. Umweltbundesamt (2015), S. 102.

¹⁵⁷ Vgl. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) (2018), S. 4.

¹⁵⁸ Vgl. Umweltbundesamt (2015), S. 100.

¹⁵⁹ Vgl. Umweltbundesamt (2015), S. 104.

¹⁶⁰ Anm.: Die Holzbauquote im Hochbau wird üblicherweise anhand der Anzahl der genehmigten Neubauvorhaben ermittelt.

migten Wohngebäude und bei 17,1 % der Nichtwohngebäude. Bei den Wohngebäuden ist die Holzbauquote seit 2012 kontinuierlich gestiegen.¹⁶¹

Die Wieder-/Weiterverwendung von Holzbauteilen wird in der Praxis schon von vielen Unternehmen praktiziert. Um diese wieder- bzw. weiterzuverwenden, müssen jedoch zahlreiche Faktoren beachtet werden. Wichtig dabei ist, dass die Holzbauteile auf den Gehalt und die Abgabe schädlicher Stoffe an die Umwelt untersucht werden. Holzschutzmittel, Flammschutzmittel oder Anstriche beinhalten oft Inhaltsstoffe, die als gesundheitsgefährdend eingestuft werden. Sind die Holzbauteile mit gefährlichen und toxischen Stoffen kontaminiert, können sie nicht wieder-/weiterverwendet werden. Außerdem sollte untersucht werden, ob das Holz feucht ist oder ob ein Pilz- bzw. Schädlingsbefall vorliegt.¹⁶²

Vor allem bei historischen Holzbauteilen ist es gängige Praxis, sie erneut zu verwenden. Bei anderen ausgebauten Holzbauteilen wird das Potenzial der Wieder-/Weiterverwendung jedoch noch nicht ausgeschöpft. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass eine selektiver und zerstörungsfreier Rückbau und die strikte Trennung von unbehandeltem Holz meist aus Zeitgründen nicht umgesetzt werden. Oft erschwert die Art der Verbindungen (u. a. Kammnagelverbindungen) zusätzlich den zerstörungsfreien Ausbau.¹⁶³

Wiederverwendung von Ausbauteilen - Bauteilbörsen

Neben der Wiederverwendung von Teilen des Tragwerks ist auch die Wiederverwendung kleiner Bauteile und von Ausbauteilen möglich. Verschiedene Bauteilbörsen mit Lagern an fünf Standorten haben sich zum Kooperationsnetzwerk „Bauteilnetz Deutschland“¹⁶⁴ zusammengeschlossen, um Nachfrage und Angebot zusammenzubringen.¹⁶⁵ Die in Bremen entstandene Initiative wurde 2010 mit dem Deutschen Umweltpreis der Deutschen

¹⁶¹ Vgl. Holzbau Deutschland Bund deutscher Zimmermeister (2018).

¹⁶² Vgl. Umweltbundesamt (2015), S. 107 f.

¹⁶³ Vgl. Umweltbundesamt (2015), S. 115 f.

¹⁶⁴ Bauteilnetz (2019).

¹⁶⁵ Vgl. Zeumer, M.; Hartwig, J. (2010).

Bundesstiftung Umwelt ausgezeichnet.¹⁶⁶ Gehandelt wird vorrangig mit historischen Baustoffen, etwa Türen und Toren, Fenstern, Treppen, Böden, Ziegelsteinen, Dachpfannen und Kacheln, Heizkörpern und Sanitärausstattung.¹⁶⁷ Der größte Umsatz nach Stückzahlen besteht bei Innenraumtüren.¹⁶⁸

Forschungsprojekt/Praxisbeispiel: „Superlocal“

In den Niederlanden hat die Wohnungsbaugesellschaft HEEMwonen das Projekt „Superlocal“ in Kerkrade initiiert. Dort stehen in einer schrumpfenden Bergbaustadt vier Gebäuderiegel mit 500 Wohnungen aus den 1960er Jahren. In Zukunft sollen Bauteile aus den vier Gebäuden für drei Häuser mit 125 Wohnungen wiederverwendet werden. Eine Weiternutzung kommt nicht in Frage, da speziell bei den außenliegenden Laubengängen die Betonfertigung beim Bau fehlerhaft durchgeführt wurde. Beteiligt ist der Lehrstuhl der Juniorprofessur für Rezykliergerichtetes Bauen an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen.¹⁶⁹

Da der Wohnungsbedarf in Kerkrade sinkt, wurde das erste der fünf Gebäude bereits vollständig rückgebaut, mit der Erkenntnis, dass die Bausubstanz nicht nur wieder- und weiterverwertet, sondern auch wiederverwendet werden kann. Das soll mit einem hochlokalen Ansatz geschehen. Dazu wird das zu entwickelnde Gelände eingezäunt und soll autark entwickelt werden. Erste Prototypen sind bereits entstanden.¹⁷⁰ Trotz der damaligen Baufehler – falsch verbaute oder gar fehlende Bewehrung im Stahlbeton – lassen sich viele Bauprodukte wiederverwenden, wie ein Katalog zeigt.¹⁷¹ Ein erstes Ausstellungsgebäude wurde bereits errichtet.¹⁷²

¹⁶⁶ Vgl. Bauteilnetz (2010).

¹⁶⁷ Vgl. Bauteilnetz (2019).

¹⁶⁸ Vgl. Umweltbundesamt (2015), S. 58 und S. 70.

¹⁶⁹ Vgl. IBA Thüringen (2016), ab Minute 7:30.

¹⁷⁰ Vgl. RWTH (2018).

¹⁷¹ Vgl. RWTH (2017).

¹⁷² Vgl. Superlocal (kein Datum).

Praxisbeispiel: Planung und Neubau der Stadtwerke Neustadt mit wiederverwendbaren Bauteilen

Der 2018 fertiggestellte Neubau der Stadtwerke Neustadt zeigt, wie die Ressourceneffizienz eines Gebäudes nicht nur bei der Nutzungsphase, sondern schon bei der Baustoff- bzw. Bauteilwahl betrachtet werden kann. Die Planung des Gebäudes wurde von dem Projekt „Integration von wiederverwendbaren Bauteilen und Recyclingbaustoffen und die damit verbundenen Auswirkungen auf den Planungsprozess“, das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert wurde, begleitet.¹⁷³ Durch die Wieder- und Weiterverwendung von Bauteilen konnten große Mengen an Herstellungsenergie eingespart und Primärrohstoffe geschont werden. Die Elemente für die Glastrennwände zwischen den Büros und dem Flur stammen aus der Philips-Zentrale in Hamburg. In der Eichenholz-Fassade wurden Holzelemente verbaut, die zuvor Teil eines Fachwerkgebäudes waren. Die Sessel im Eingangsbereich standen früher in dem ehemaligen Neustädter Hotel „Wallburg“. Sogar das Blockheizkraftwerk für die Wasserbereitung wurde nicht neu eingekauft. Es wird das vorhandene Werk des alten Unternehmenssitzes der Stadtwerke im Ziegelhof genutzt.¹⁷⁴

Praxisbeispiele zur Wiederverwendung von Betonbauteilen

Für das Wiederverwenden gebrauchter Betonbauteile gibt es zahlreiche Beispiele. Um den Rahmen der Kurzanalyse nicht zu sprengen, wird lediglich auf eine Zusammenstellung von Praxisbeispielen hingewiesen.¹⁷⁵ Diese Sammlung zeigt nicht nur Ein- und Mehrfamilienhäuser, in denen Betonbauteile wieder-/weiterverwendet wurden, sondern auch Nichtwohngebäude und weitere Verwendungsmöglichkeiten gebrauchter Betonbauteile.

¹⁷³ Vgl. Rosenkötter, S. (2018).

¹⁷⁴ Vgl. Dechantsreiter, U. et al. (2016).

¹⁷⁵ Anm.: Die Zusammenstellung der Praxisbeispiele ist unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_93_2015_wiederverwertung_von_bauteilen_0.pdf ab Seite 207 zu finden.

5.5 Aufbereitung und Herstellung von Sekundärrohstoffen

Die Idee, Baustoffrecycling als Mittel der Ressourcenschonung zu betrachten, kam in Deutschland etwa Mitte der 1980er Jahre auf. Obwohl die politischen und gesellschaftlichen Anforderungen an die Aufbereitung und Verwertung von Bauschutt und die Umsetzung von Recycling-Projekten seither angestiegen sind, verläuft der technologische Fortschritt auf diesem Gebiet eher schleppend.¹⁷⁶ Etwa ab dem Jahr 2000 wurde das Ausschleusen von Schadstoffen aus dem Stoffkreislauf vorrangig. Seit 2010 ist der Aspekt der Ressourceneffizienz vermehrt in den Fokus gerückt.¹⁷⁷

Sortierung und Rücknahmesysteme

Wenn auf der Baustelle die Abbrüche nicht selektiv getrennt und sortenrein entsorgt werden, kommen traditionelle Bauschuttaufbereitungsanlagen bei der Aufbereitung hinsichtlich der Qualität der erzeugten RC-Baustoffe an ihre Grenzen. Bei Bauschuttkomponenten wie Mauerwerkbruch wird in der Praxis nicht weiter in die verschiedenen Wandbaustoffarten sortiert, da geeignete Sortiertechniken noch nicht existieren und nur eine händische Sortierung möglich ist.¹⁷⁸ In Zukunft ist jedoch mit einer noch größeren Heterogenität der Abbruchabfälle zu rechnen. Nur mit Hilfe innovativer Sortierverfahren können zukünftig sortenreine Materialfraktionen aus gemischten Abbruchabfällen gewonnen werden.

Die sensorgestützte Sortierung wird bei manchen Fraktionen von Siedlungsabfällen bereits häufig verwendet. Vor allem Altglas und Kunststoffe werden auf diese Weise von Störfractionen getrennt und ihrerseits nach Glasfarbe oder Kunststoffsorte getrennt. Dazu werden mit Sensoren ausgestattete Bandmaschinen genutzt. Zunächst trennt ein Ausbreitungsband das Material in einzelne Stücke auf. Danach wird das Material über eine Rutsche geführt und der Materialstrom wird von einer oder mehreren Kameras aufgenommen. Ein Computer ermittelt beispielsweise aus dem Farb-

¹⁷⁶ Vgl. Müller, A. (2016a), S. 15.

¹⁷⁷ Vgl. Müller, A. (2016b).

¹⁷⁸ Vgl. Müller, A. (2016a), S. 25 f.

spektrum die Materialeigenschaften oder über Form und Größe die Störstoffe, sodass eine nachfolgende Reihe von Drucklufteinheiten die identifizierten Partikel in verschiedene Behältnisse sortiert. Auf diese Weise werden die Fremdstoffe ausgeschleust oder gleichförmige Körnungen nach Farbe sortiert. Neben Kameras werden auch Spektrometer verwendet, die aus dem zerlegten Farbspektrum der Partikel die stofflichen Eigenschaften ermitteln. Als Sensoren werden ebenso Röntgendetektoren und induktive Detektoren verwendet. Letztere sortieren unterschiedliche Metallsorten aus der Veränderung eines magnetischen Wechselfeldes aus.¹⁷⁹

Für die automatisierte Sortierung von Bauabfällen würden die sensorgestützten Verfahren ein großes Potenzial zur Ressourcenschonung bieten, etwa um Gips- und Ziegelpartikel aus Bauschuttgemischen abzutrennen. Das betrifft vor allem Partikel mit weniger als 45 mm Korngröße, die händisch schwer zu sortieren sind.¹⁸⁰ Diese Technik wird in Deutschland allerdings nicht angewandt. In Europa sind lediglich zwei Anlagen bekannt: eine in Spanien, die Gips aus Bauschutt aussortiert, und eine in der Schweiz, mit der Beton- von Ziegelpartikeln getrennt werden.¹⁸¹

Rücknahmesysteme für Materialien wie Gipskartonplatten, die stofflich recycelt werden können, könnten zu einer höheren Sortenreinheit und höheren Recycling-Mengen führen.¹⁸² Angesichts der langen Lebensdauer baulicher Anlagen werden sich Rücknahmesysteme jedoch nur für einige wenige Baustoffe/-produkte am Markt etablieren.

Aufbereitung von Abbruchabfällen

Die Aufbereitung von Abbruchmaterialien sollte zu einem möglichst hochwertigen Recycling führen. Eine Voraussetzung dafür ist, dass die Recycling-Fähigkeit von Materialien schon bei der Produktentwicklung berücksichtigt wird.

¹⁷⁹ Vgl. Müller, A. (2016a), S. 36.

¹⁸⁰ Vgl. IAB (2018).

¹⁸¹ Vgl. Müller, A. (2016a), S. 37.

¹⁸² Vgl. Mettke, A. et al. (2018), S. 129.

Außerdem sollten die Hemmnisse abgebaut werden, um eine höhere Auslastung der bereits bestehenden Recycling-Anlagen wie Gipsrecycling-Anlagen zu erreichen. Diese werden durch mangelnde Sortenreinheit, fehlende Rücknahmesysteme, fehlende Kenntnisse über innovative Recycling-Verfahren und die unzureichende Nachfrage nach RC-Baustoffen häufig nicht vollständig ausgelastet. Ungenutzte Potenziale sind vor allem bei der Aufbereitung von Gipskartonplatten, Dämmungen und mineralischen Abbruchabfällen vorhanden.

Aufbereitung von mineralischen Abbruchabfällen

Beton ist mengenmäßig der meistgenutzte Baustoff. Allein für den Hochbau von Wohn- und Nichtwohngebäuden wurden in Deutschland 2010 rund 42 Mio. t verbaut. Gleichzeitig wurden über 12 Mio. t abgebrochen.¹⁸³ Der Recycling-Anteil, der erneut im Hochbau als Sekundärrohstoff eingesetzt wird, liegt jedoch unter 1 %, wie bereits in Kapitel 2 beschrieben wurde.

Beton besteht aus Gesteinskörnung, Zement, Wasser, Zusatzmittel wie Fließmittel und eigenschaftsbeeinflussenden Zusatzstoffen, sogenannten Additiven. Anstatt hierfür nur natürliche Gesteinskörnung als Primärrohstoff einzusetzen, enthält sogenannter R-Beton Anteile rezyklierter Gesteinskörnung (RC-Gesteinskörnung), die aus Bauschutt gewonnen wurde. R-Beton ist die Kurzform für „ressourcenschonender Beton“¹⁸⁴ und wird synonym zum Begriff „Recycling-Beton“ (RC-Beton) verwendet.¹⁸⁵

Die Zusammensetzung von R-Beton ist mit Beton aus Primärrohstoffen weitgehend vergleichbar, allerdings werden neben der RC-Gesteinskörnung spezielle Fließmittel eingesetzt. Der Zementanteil entspricht dem von Standardbeton, was angesichts der hohen klimaschädlichen Kohlendioxid-Emissionen bei der Zementherstellung wichtig ist und dem R-Beton hierbei keinen Nachteil bringt.^{186, 187} Die Ökobilanz hängt von vielen Parametern

¹⁸³ Vgl. BBSR (2017), S. 22.

¹⁸⁴ StMUV (2017), S. 8.

¹⁸⁵ Vgl. Schwenk (2018).

¹⁸⁶ Vgl. UM BW (2017), S. 8 f.

¹⁸⁷ Vgl. Stürmer, S.; Kulle, C. (2017), S. 126.

ab – neben der Rezeptur auch von den Transportentfernungen – und fällt für konventionellen und R-Beton ähnlich aus.^{188, 189} Dennoch ist der Abbau von Primärgestein mit einem erheblichen Eingriff in die Landschaft verbunden. In der Regel muss das Primärgestein auch aus größeren Entfernungen zur Baustelle transportiert werden als sekundäre Rohstoffe, die in der Nachbarschaft anfallen können.¹⁹⁰

In der Schweiz wird R-Beton im Hochbau wesentlich häufiger verwendet als in Deutschland. Dort produzierten im Jahr 2015 insgesamt 67 Betonwerke R-Beton, die 10 % der gesamten Betonnachfrage deckten.¹⁹¹ Auch wird hier die natürliche Gesteinskörnung häufig vollständig durch RC-Gesteinskörnung ersetzt, nicht nur anteilig. Öffentliche Bauherren in manchen Kantonen genehmigen den Einsatz von Beton aus Primärrohstoffen nur dann, wenn der R-Beton nicht die bautechnischen Anforderungen erfüllt.¹⁹² Im Durchschnitt der öffentlichen Baumaßnahmen in allen Kantonen liegt der Anteil von R-Beton bei etwa 15 %.¹⁹³ Auch in den Niederlanden und Belgien befindet sich der Anteil von R-Betonen im Hochbau im zweistelligen Prozentbereich.¹⁹⁴

Obwohl R-Beton ohne Anpassungen in der Planung von Hochbauten angewendet werden kann und erst bei der Vorbereitung zur Vergabe berücksichtigt werden muss, ist er unter Architekten und Tragwerksplanern weitgehend unbekannt.¹⁹⁵ Ist der Baustoff jedoch erst einmal im Markt bekannt, könnte auch die Nachfrage steigen.¹⁹⁶

Forschungsprojekte zu innovativen Sortierverfahren

Die sensorgestützte Sortierung ist in Deutschland Gegenstand mehrerer Forschungsvorhaben, sowohl bei der Aufbereitung von Wärmedämmver-

¹⁸⁸ Vgl. Stürmer, S.; Kulle, C. (2017), S. 115 – 125.

¹⁸⁹ Vgl. Knappe, F.; Reinhardt, J.; Schorb, A.; Theis, S. (2016), S. 27 – 33.

¹⁹⁰ Vgl. Knappe, F.; Reinhardt, J.; Schorb, A.; Theis, S. (2016), S. 33 und 88.

¹⁹¹ Vgl. MI BW (2016), Folie 73.

¹⁹² Vgl. SenUVK (2015), S. 14

¹⁹³ Vgl. idw (2017a).

¹⁹⁴ Vgl. MI BW (2016), Folie 75.

¹⁹⁵ Vgl. MI BW (2016), Folie 181.

¹⁹⁶ Vgl. MI BW (2016), Folie 95.

bundssystemen¹⁹⁷ als auch bei der Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen. Bei Letzteren konnte die grundsätzliche Funktionalität am Institut für Angewandte Bauforschung Weimar bereits gezeigt werden, etwa um sulfathaltige Baustoffe auszusortieren. Es lassen sich in Bauschutt auch Ziegel von Beton trennen, was zurzeit aber nur bei Korngrößen über 10 mm wirtschaftlich wäre.¹⁹⁸

Forschungsprojekt: „ReWaste 4.0“

Bei Restmüll - sowohl aus Siedlungs- als auch aus Bauabfällen - ist das technologische Potenzial zur Erhöhung der Recycling-Quote noch längst nicht ausgeschöpft. In Österreich sind viele Abfallbehandlungsanlagen auf dem Stand der 1990er-Jahre, sodass die Etablierung eines zeitgemäßen Industrie 4.0-Ansatzes mit Digitalisierung, Vernetzung und maschinellem Lernen zu mehr Sekundärrohstoffen aus Siedlungs- und Bauabfällen führen wird. Diesen Anspruch verfolgt seit 2017 das österreichische Kompetenzzentrum „ReWaste 4.0“, was für „Recycling and Recovery of Waste 4.0“ steht. Unter der Konsortialführung der Montanuniversität Leoben und der Mitwirkung des Instituts für Infrastruktur, Wasser, Ressourcen, Umwelt der Fachhochschule Münster sowie Industriepartnern soll die aktuelle Recycling-Quote aus gemischten Abfällen von weniger als 5 % deutlich gesteigert werden. In Österreich fallen jährlich etwas über 4 Mio. t Siedlungsabfälle an. 1,4 Mio. t davon sind „gemischte Siedlungsabfälle“, die besser verwertet werden sollen. Im Gegensatz zu den sortenreinen Sammlungen sind bei den gemischten Abfällen Schadstoffe und Verschmutzungen auf die Materialien verteilt und derzeit oft nicht abtrennbar. Diese Mischung niedriger Qualität ist daher für ein Recycling ungeeignet und wird lediglich thermisch verwertet, also verbrannt.¹⁹⁹ In den vier Jahren des Projekts sollen daher neben übergreifenden strategischen Konzepten technische Themen angegangen werden, etwa die Charakterisierung von gemischten Abfällen in Echtzeit, die Weiterentwicklung neuer Sortier-, Trenn- und Zerkleinerungstechnologien und im Sinne des Industrie-4.0-

¹⁹⁷ Vgl. FH Münster (2018b).

¹⁹⁸ Vgl. IAB (2018).

¹⁹⁹ Vgl. APA (2017).

Ansatzes die Entwicklung von Modellen, Steuerungsprogrammen und Kommunikationstechniken für digitalisierte Geräte.²⁰⁰ Ein Projektpartner ist die Saubermacher AG in Retznei, die für das benachbarte Zementwerk von Lafarge in 15 Betriebsjahren bisher 1 Mio. t Ersatzbrennstoffe erzeugte – über 90 % des Brennstoffbedarfs bei einem EU-Durchschnitt von nur 40 % – und dazu rund 27.000 t Altmetalle und rund 5.000 t PET-Kunststoffabfälle aussortierte und stofflich verwertete. Mittels ReWaste 4.0 sollen noch mehr Wertstoffe vollautomatisch aus dem Abfall herausgeholt werden.²⁰¹

Forschungsprojekt: „BauCycle“

Das Fraunhofer-Verbundprojekt „BauCycle“ hat sich für sein Vorhaben die Korngrößen kleiner als 2 mm vorgenommen. Von dieser Feinfraktion, auch Brechsand genannt, fallen jährlich rund 5 Mio. t aus dem Abriss von Hoch- und Infrastrukturbauten an. Diese landen als nicht verwertbarer Reststoff auf Deponien. BauCycle strebt eine möglichst hochwertige Verwertung an, indem aus unterschiedlichen Bauschutt-Fractionen Porenbeton als Sekundärrohstoff hergestellt wird. Dieser kann als tragende Konstruktion für zweistöckige Häuser oder zur Schall- und Wärmedämmung eingesetzt werden.²⁰²

Das Forschungskonsortium aus vier Fraunhofer-Instituten setzt auf die sensorgestützte, selektive Sortierung des Bauschutts aus Kalksandstein, Ziegel, Beton und Gips. Daraus lässt sich dann Porenbeton sowohl rein aus Ziegel oder Kalksandstein herstellen als auch aus einer Mischung von 80 % Kalksandstein und 20 % Altbeton (Abbildung 7). Die Mischung besitzt im Vergleich zum Primärwerkstoff konkurrenzfähige Festigkeiten und kann eine tragende Funktion erfüllen. Im laufenden Vorhaben ist es inzwischen gelungen, Partikel mit einer Größe von einem Millimeter werkstofflich

²⁰⁰ Vgl. Loeben (kein Datum).

²⁰¹ Vgl. MSV (2018).

²⁰² Vgl. Fraunhofer UMSICHT (2018a).

voneinander zu unterscheiden. Als Durchsatz sind 1,5 t pro Stunde möglich.²⁰³



Abbildung 7: Porenbeton aus Ziegel (hinten), Porenbeton aus Kalksandstein (vorne)²⁰⁴

Forschungsprojekt: „Untersuchung von Mauerwerksabbruch und Ableitung von Kriterien für die chemisch und physikalisch verträgliche und ökologische Anwendung in RC-Beton“

Trotz der ersten Praxiserfahrungen bleibt R-Beton bzw. RC-Beton ein Forschungsthema. Zusammen mit weiteren Partnern startete 2017 an der Hochschule Konstanz das Forschungsprojekt „Untersuchung von Mauerwerksabbruch und Ableitung von Kriterien für die chemisch und physikalisch verträgliche und ökologische Anwendung in RC-Beton“. Es soll untersuchen, wie sich Mauerziegel anstelle von gebrochenem Beton in RC-Beton verhalten und wie die Ökobilanz aussieht.²⁰⁵

²⁰³ Vgl. Fraunhofer UMSICHT (2018b).

²⁰⁴ Foto: Fraunhofer UMSICHT (2018b).

²⁰⁵ Vgl. idw (2017a).

Forschungsprojekt: „Energie und Materialflüsse entlang der Herstellung und des Einsatzortes von Sekundärrohstoffen im Hochbau“

Speziell um Ökobilanzen von R-Beton und anderen Bauprodukten geht es bis 2019 im Bauforschungsprojekt „Energie und Materialflüsse entlang der Herstellung und des Einsatzortes von Sekundärrohstoffen im Hochbau“ des Leibniz-Instituts für ökologische Raumentwicklung. Dabei werden die Herstellung und der Einsatzort von Sekundärrohstoffen im Hochbau hinsichtlich Energie- und Masseperspektive untersucht.²⁰⁶

Forschungsprojekt: „R-Beton: Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation“

Ein großes Verbundvorhaben ist „R-Beton: Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation“ im Rahmen der BMBF-Initiative „HighTechMatBau“. Seit 2014 und noch bis 2019 untersuchen Universitäten und Unternehmen gemeinsam, wie Bauschutt aus dem Hochbau wieder in den Hochbau zurückgeführt werden kann.²⁰⁷ Adressiert wird die gesamte Wertschöpfungskette, um geschlossene Materialkreisläufe im Hochbau realisieren zu können. Dabei soll neben Betonbruch auch Mauerwerksbruch verwertet werden, ebenso feine RC-Gesteinskörnung²⁰⁸, wie dies schon im Projekt „BauCycle“ passiert, wobei sich BauCycle auf die Herstellung von Porenbeton beschränkt. Als Großdemonstrator wurde im R-Betonprojekt das „Small House III“ auf dem Gelände der Technischen Universität Kaiserslautern errichtet. Dieser Großdemonstrator ist das deutschlandweit erste Gebäude, bei dem in ausnahmslos allen Bauteilen R Beton zum Einsatz gekommen ist.²⁰⁹

Forschungsprojekt: „SeRaMCo“ (Secondary Raw Materials for Concrete Precast Products, Sekundärrohstoffe für Betonfertigteile)

Auf Basis des Verbundforschungsvorhabens „R-Beton“ wurde im Jahr 2017 das EU-Förderprojekt „SeRaMCo“ (Secondary Raw Materials for Concrete

²⁰⁶ Vgl. Fraunhofer IRB (2019b).

²⁰⁷ Vgl. BMBF (2019).

²⁰⁸ Vgl. R-Beton (2019).

²⁰⁹ Vgl. HeidelbergCement AG (2017).

Precast Products, dt.: Sekundärrohstoffe für Betonfertigteile) gestartet. Sein Schwerpunkt liegt in der Übertragung und Umsetzung der Erkenntnisse bei den geschlossenen, mineralischen Stoffkreisläufen speziell auf Betonfertigteilen. Unter Leitung der Technischen Universität Kaiserslautern arbeiten elf Partner aus Wirtschaft, Verwaltung und Wissenschaft in fünf Ländern zusammen.²¹⁰ Dabei wurden konkrete Fernziele gesetzt: Zehn Jahre nach Projektende sollen jährlich 13 Mio. t Baustoffe wie Beton, Mauerwerk, Dachziegel und Keramik wiederverwertet werden.²¹¹

Praxisbeispiel: Herstellung von RC-Gesteinskörnung

Ein bekanntes Unternehmen, das seit langem sowohl Abbrucharbeiten durchführt als auch Recycling-Gesteinskörnungen daraus herstellt, ist die Firma Heinrich Feess in Kirchheim/Teck. Der Geschäftsführer Walter Feess bekam 2016 den Deutschen Umweltpreis als Wegbereiter für Recycling-Beton verliehen. Für die Herstellung von RC-Gesteinskörnungen entwickelte er spezielle Sortierverfahren zur Aufbereitung von Bauabfällen und Waschverfahren zum Trennen von Boden- und Bauschuttgemischen.²¹² Feess bekam als erstes Unternehmen vom Deutschen Institut für Bautechnik die bauaufsichtliche Zulassung für seine Recycling-Gesteinskörnung.²¹³

Praxisbeispiel: Entwicklung von RC-Betonsteinen

Vergleichbar mit dem mörtellosen Mauerwerk des Forschungsprojekts „ReMoMaB“ (Kapitel 5.1) entwickelte Feess „Ökostones“ genannte Betonsteine, die mittels kegelförmiger Noppen auf der Oberseite und entsprechender Mulden auf der Unterseite der Steine gestapelt werden. Im unbewehrten Beton der Betonsteine sind bis zu 90 Massen-% RC-Gesteinskörnung aus dem eigenen Werk enthalten. Die Ökostones dienen als Mauersteine für Silowände auf Lagerflächen. Sie können auch im Garten- und Landschaftsbau verwendet werden.²¹⁴

²¹⁰ Vgl. idw (2017b).

²¹¹ Vgl. TU Kaiserslautern (2017), S. 9.

²¹² Vgl. Ilg, G. (2016).

²¹³ Vgl. DBU (2016).

²¹⁴ Vgl. Stürmer, S.; Kulle, C. (2017), S. 102 – 106.

Praxisbeispiele zum Einsatz von R-Beton

In Deutschland wurde R-Beton in den vergangenen Jahren vermehrt in Süddeutschland verbaut. Die Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg geben entsprechende Leitfäden heraus.^{215, 216} In Berlin wurde als Pilotprojekt im Jahr 2014 der Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes für Lebenswissenschaften der Humboldt-Universität in Berlin-Mitte fertiggestellt, der R-Beton im Tragwerk für den Hochbau und auch in der Schlitzwand für die Errichtung der Baugrube enthielt. Für die Schlitzwand wurden 1.700 m³ R-Beton verwendet. Davon wurden 25 Volumen-% des Gesteins durch RC-Gesteinskörnung ersetzt. Im Tragwerk waren es 3.800 m³ R-Beton mit einem RC-Substitutionsanteil von 40 Volumen-%. Insgesamt wurden über 2.800 t RC-Gesteinskörnung verbaut.²¹⁷ Für die Umweltstation der Stadt Würzburg kamen 450 t RC-Gesteinskörnung zur Herstellung von 600 m³ R-Beton zum Einsatz, der Substitutionsanteil lag bei 45 %. In Berlin als auch in Würzburg wurden Betonfestigkeiten erreicht, die höher sind als gefordert. Im Vergleich zum Standardbeton wurden keine Unterschiede beim R-Beton festgestellt.²¹⁸

Inzwischen existiert eine Vielzahl von Gute-Praxis-Beispielen von Hochbauten mit R-Beton, von denen einige auf einer Website des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) dargestellt sind.²¹⁹ Darunter befinden sich nicht nur gewerblich genutzte Bauten, sondern auch Ein- und Mehrfamilienhäuser, wie das bundesweit erste Einfamilienhaus unter Verwendung von R-Beton in Ludwigshafen aus dem Jahr 2010.²²⁰

²¹⁵ Vgl. UM BW (2017).

²¹⁶ Vgl. StMUV (2017).

²¹⁷ Vgl. SenUVK (2015).

²¹⁸ Vgl. StMUV (2017), S. 12.

²¹⁹ Vgl. ifeu (kein Datum a).

²²⁰ Vgl. ifeu (kein Datum b).

6 FAZIT

Das Bauwesen ist für den größten Anteil der Abfallmassenströme verantwortlich. Davon stammt ein wesentlicher Teil aus dem Hochbau. Die Verwertungsquote der Bau- und Abbruchabfälle ist zwar hoch, aber der größte Teil geht in den Tiefbau. Durch die Wiederverwendung von Bauteilen oder ein möglichst hochwertiges Recycling können im Hochbau selbst Primärrohstoffe substituiert und so der Kreislauf im Hochbau geschlossen werden. Das Potenzial, dadurch Ressourcen zu schonen, ist noch nicht ausgeschöpft. Das möglichst hochwertige Recycling wird auf regionaler Ebene aufgrund von Deponieengpässen und/oder Ressourcenengpässen immer mehr in den Fokus treten und die Kreislaufwirtschaft auch unter ökonomischen Aspekten noch interessanter machen.

Der Abbruch von Gebäuden ist meist von einem Zeit- und Kostendruck geprägt. Aber auch rechtliche Rahmenbedingungen wie u. a. die Gewerbeabfallverordnung haben den Gebäudeabbruch in den vergangenen Jahren stark beeinflusst. Der konventionelle Abbruch (Zertrümmern und Sprengung) wird kaum noch angewandt, da die Deponierung der anfallenden unsortierten Baumischabfälle sehr teuer ist und die Gewerbeabfallverordnung die Getrennthaltung spezifischer Abfälle vorschreibt. Meist wird teilselektiv rückgebaut, um die Planungs- und Personalkosten sowie den Zeitaufwand möglichst gering zu halten. Der Aspekt der Ressourcenschonung durch das Weiterverwenden oder das möglichst hochwertige Recycling wird beim Abbruch bislang kaum berücksichtigt.

Um eine Wiederverwendung und/oder ein möglichst hochwertiges Recycling möglich zu machen, können Maßnahmen in der Planung, bei der Dokumentation, dem selektiven Rückbau/der Demontage und bei der Aufbereitung der Sekundärrohstoffe umgesetzt werden.

Recyclinggerechtes Planen

Bei der Planung eines Gebäudes werden Entscheidungen für den gesamten Lebenszyklus getroffen. Dabei sollte auch der Rückbau bzw. die Recyclingfähigkeit eines Gebäudes berücksichtigt werden. Eine allgemeine Strategie zur Steigerung der Ressourceneffizienz liegt in der Verlängerung der Nutzungsphase, beispielsweise durch flexible Grundrisse. Die zwei grundle-

genden Strategien, um die Wiederverwendung und ein möglichst hochwertiges Recycling möglich zu machen, sind

- die Auswahl recyclingfreundlicher Baustoffe,
- das Verwenden lösbarer Verbindungen und Konstruktionen.

Weitere Vorteile können das modulare Bauen und die einstoffliche Bauweise zeigen, wobei beide genau zu prüfen sind.

In der Planung sollten auch, soweit möglich, gebrauchte Bauteile wieder-/weiterverwendet und RC-Baustoffe eingesetzt werden, denn nur wenn die vorhandenen Recycling-Produkte genutzt werden, entwickelt sich ein Markt für sie.

Aufgrund der langen Nutzungsdauer von Gebäuden wird das Lebensende bei der Planung meist nicht mitgedacht. Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass der höhere Planungsaufwand nach der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) nicht gesondert vergütet wird. Außerdem fehlt bei Planern und Bauausführenden oft das Wissen über die Strategien des recyclinggerechten Planens. Durch das Integrieren dieses Wissens in die Ausbildung, in Fortbildungsmaßnahmen und kostenlos zugängliche Informationsplattformen könnte die Wissenslücke geschlossen werden.

Dokumentation

Die Strategien, die in der Planung angewandt werden, helfen nur halb so viel, wenn Informationen über die eingebauten Materialien und die Konstruktion nicht vorhanden sind. Werden diese Informationen dokumentiert und über den gesamten Lebensweg aktuell gehalten, kann dies den Rückbau erleichtern und durch die bessere Planbarkeit (belastbare Kalkulationen) für das Abbruchunternehmen ökonomische Vorteile nach sich ziehen.

Meist werden diese Informationen erst gar nicht systematisch erfasst oder nicht aktuell gehalten. Eine weitere Frage ist oft, in welcher Form die Dokumentation gespeichert werden soll. Eine Chance bietet hier das Building Information Modeling (BIM). Die Daten werden digital in einem 3D-Modell des Gebäudes gespeichert. Da dieses Werkzeug ebenso für das Facility

Management genutzt werden kann, könnte es eventuell in diesem Rahmen aktuell gehalten werden. Auch ein Materialpass analog zum EnEV-Nachweis ist denkbar.

Selektiver Rückbau und Demontage

Bevor ein Gebäude abgebrochen wird, sollte geprüft werden, ob es saniert werden kann, denn wird die Nutzungsphase verlängert, steigt die Ressourceneffizienz. Eine weitere Möglichkeit für einen kompletten Abbruch ist der partielle Rückbau oder Teilrückbau. Auch hier wird ein Teil der eingebauten Materialien weitergenutzt und dadurch werden Material und Energie eingespart. Nur wenn beides technisch oder wirtschaftlich nicht sinnvoll ist, sollte rückgebaut werden.

Die höchsten Ressourceneffizienzpotenziale beim Rückbau weist die Demontage auf, denn wird ein Bauteil demontiert und an einer anderen Stelle wiedereingebaut, werden nicht nur Primärrohstoffe geschont, sondern auch die Herstellungsenergie, die benötigt worden wäre, wird eingespart. Da nicht alle Bauteile zerstörungsfrei ausgebaut oder wiederverwendet werden können, ist eine Kombination aus Demontage und selektivem Rückbau sinnvoll. Ziel des selektiven Rückbaus ist die sortenreine Trennung und Getrennthaltung der Abfallfraktionen. Die Sortenreinheit kann über die spätere Qualität des Sekundärrohstoffes entscheiden. Außerdem sollten Abbruchfraktionen wie der Gipskartonbruch selektiv rückgebaut und getrennt gehalten werden, wenn es eigene Verwertungswege dafür gibt.

Aufgrund des zusätzlichen Aufwands beim selektiven Rückbau wird oft nur teilselektiv rückgebaut. Der Aufwand entsteht meist durch nicht lösbare Verbindungen und fehlende Informationen über die eingebauten Materialien. Rückbaugerechte Gebäude, bestenfalls mit einer vorhandenen Dokumentation, könnten diesen Aufwand reduzieren.

Aufbereitung und Herstellung von Sekundärrohstoffen

Wird ein Gebäude nicht selektiv rückgebaut und werden die Abfallfraktionen nicht getrennt gehalten, ist eine spätere Sortierung sehr aufwendig oder teilweise gar nicht mehr möglich. Durch innovative Sortiertechniken, beispielsweise die sensorgestützte Sortierung, können diese Baumischabfälle besser sortiert werden, um so in ein möglichst hochwertiges Recycling

zu gehen. Außerdem können durch eigene Rücknahmesysteme Abfallfraktionen wie der Gipskartonplattenbruch vermehrt und mit höherer Sortenreinheit zur Aufbereitungsanlage gebracht werden.

Hemmnisse bei der Aufbereitung von Sekundärrohstoffen sind u. a. die fehlende Sortenreinheit und die unzureichende Nachfrage nach RC-Baustoffen. Durch intensive Forschung können Verfahren weiterentwickelt und neue Verwertungswege gefunden werden. Die Kreislaufwirtschaft bietet hier die Möglichkeit, auch neue Geschäftsfelder zu erschließen (z. B. Leasingsysteme).

Ausblick

Hochbauten haben im Lebenszyklus eine lange Nutzungsphase von mehreren Jahrzehnten. Das bringt die Herausforderung mit sich, dass heutzutage die Beurteilung von Materialien/Stoffen und auch die Möglichkeiten, die in Zukunft bei Materialien und Verfahren bestehen, unbekannt sind. Dies kann sich sowohl negativ als auch positiv auswirken: Heute vermeintlich harmlose Baustoffe könnten in Zukunft zu Schadstoffen deklariert werden, aber es ist auch möglich, dass bald neue technische Verfahren zur Verfügung stehen, mit denen etwa aktuell verbaute, unlösbare Verbundstoffe zuverlässig getrennt werden können. Die Materialvielfalt wird in Zukunft noch weiter steigen, weswegen die Lösbarkeit von Konstruktionen und Verbindungen essenziell für ein möglichst hochwertiges Recycling ist. Außerdem sollte das Wissen zur Rückbaufähigkeit und Recycling-Fähigkeit in die Ausbildung von relevanten Fachplanern und in Fortbildungskurse integriert werden.

7 DOKUMENTATION DES FACHGESPRÄCHS

7.1 Programm des Fachgesprächs „Rückbau im Hochbau – Aktuelle Praxis und Potenziale der Ressourcenschonung“

Berlin, 24. Januar 2019

Moderation: Dr. Christof Oberender
(VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH)

- TOP 1:** Begrüßung und Vorstellungsrunde
- TOP 2:** Vorstellung der Kurzanalyse „Rückbau im Hochbau – Aktuelle Praxis und Potenziale der Ressourcenschonung“,
Oliver S. Kaiser (VDI Technologiezentrum GmbH)
- TOP 3:** Selektiver Rückbau in der Praxis – Recycling beginnt auf der Baustelle,
Robert Halter (Geschäftsführer Halter Spreng- und Umwelttechnik GmbH, Berlin)
- TOP 4:** Ressourcenschonung durch zirkuläres Wirtschaften,
Prof. Dr. Angelika Mettke (Leiterin des Arbeitsgebiets Bauliches Recycling an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik)
- TOP 5:** Moderierte Diskussion zu den Vorträgen
- TOP 6:** Recyclinggerechtes Konstruieren von Hochbauten,
Bernd Köhler (Senior Architekt, Werner Sobek Design GmbH, Stuttgart)
- TOP 7:** Ressourceneffizienz, Rückbau und Circular Economy aus der Sicht eines Hybridbau-Spezialisten,
Dr. Jan Wenker (Brüninghoff-Unternehmensgruppe, Heiden)
- TOP 8:** Moderierte Diskussion zu den Vorträgen
- TOP 9:** Zusammenfassung und Ausblick

7.2 Dokumentation des Fachgesprächs

Am 24. Januar 2019 fand in Berlin ein Fachgespräch zum Thema „Rückbau im Hochbau – Aktuelle Praxis und Potenziale der Ressourcenschonung“ mit 36 Teilnehmerinnen und Teilnehmern von Hochschulen, Unternehmen, Netzwerken und Verbänden statt. Zu diesem Fachgespräch hatte die VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH eingeladen. In den Diskussionen der Teilnehmenden wurden aktuelle Rückbautechniken, Verwertungs- und Entsorgungswege sowie Chancen für ein hochwertiges Recycling von Bauabfällen und recyclinggerechtes Bauen erörtert. Es wurde darauf hingewiesen, dass Akteure aus der Abfallwirtschaft und Bauherren nicht anwesend waren, sodass deren Diskussionspunkte möglicherweise nicht ausreichend Berücksichtigung fanden.

Vorstellung der Kurzanalyse „Rückbau im Hochbau – Aktuelle Praxis und Potenziale der Ressourcenschonung“, Oliver S. Kaiser (VDI Technologiezentrum GmbH)

Der Bestand an Wohn- und Nichtwohngebäuden in Deutschland beherbergt mit 15 Mrd. t ein enormes anthropogenes Reservoir an Material. Beim Rückbau von Gebäuden kann dieses Material selektiv zurückzugewonnen, recycelt und im Hochbau oder an anderer Stelle wieder eingesetzt werden. Die Verwertungsquote im Bauwesen liegt zwar bei mehr als 75 %, aber nur ein geringer Teil wird recycelt und bleibt im Hochbau. Ein Großteil des Bauschutts wird derzeit im Straßenbau oder zur Landverfüllung verwendet. Recycling-Beton für Neubauten wird lediglich in einem geringen Umfang hergestellt. Auch die Wiederverwendung von ganzen Betonplatten aus Abbruchhäusern findet nur in einem geringen Ausmaß statt. In der Planung können der selektive Rückbau und das möglichst hochwertige Recycling u. a. durch eine recyclingfreundliche Baustoffauswahl, durch lösbare Verbindungen und die Dokumentation der relevanten Informationen gefördert werden. Auch der selektive Rückbau kann dazu beitragen, dass durch eine höhere Sortenreinheit ein hochwertiges Recycling möglich ist. Verschiedene Projekte zeigen, wie dies in der Praxis und in der Forschung umgesetzt wird. Herausforderungen sind u. a. die lange Nutzungsphase, rechtliche Gegebenheiten und der Mehraufwand in der Planung wie auch im Abbruch.

7.2.1 Motivation für ein hochwertiges Recycling von Abfällen aus dem Rückbau von Hochbauten

Die Teilnehmenden des Fachgesprächs stellten sich die Frage, aus welchen Gründen vor allem ein hochwertiges Recycling angestrebt werden sollte, zumal bereits jetzt schon von einer Verwertungsquote von mehr als 75 % ausgegangen werden kann.

Ein Grund für das hochwertige Recycling liegt in der Schonung von Primärrohstoffen. Zwar bestehen derzeit noch ausreichende Kapazitäten an Primärrohstoffen, jedoch sind diese regional unterschiedlich verteilt und ein Großteil ist im Moment nicht nutzbar, da die Flächen bebaut sind, landwirtschaftlich genutzt werden oder unter Naturschutz stehen. Langfristig ist mit einer Ressourcenverknappung im Bau zu rechnen, wenn weiterhin in der Regel vor allem auf Primärmaterialien zurückgegriffen wird. Aus Gründen des Ressourcenschutzes ist daher ein Recycling von Baustoffen sinnvoll.

Bei der Ressourcenschonung durch das hochwertige Recycling von Bauabfällen sollte aber auch der Klimaschutz im Auge behalten und deshalb die Nachhaltigkeit des gesamten Aufbereitungsprozesses von Sekundärrohstoffen überprüft werden. Dabei sollte neben dem Potenzial zur Ressourcenschonung ebenfalls die Energie, die für den Rückbau, den Transport und die Aufbereitung benötigt wird, berücksichtigt werden. Ebenso sollte die Energie betrachtet werden, die bei der Herstellung von Bauteilen mit Primärrohstoffen benötigt worden wäre. Dies spielt vor allem bei der Wieder-/Weiterverwendung von Bauteilen eine Rolle.

Selektiver Rückbau in der Praxis – Recycling beginnt auf der Baustelle, Robert Halter (Geschäftsführer Halter Spreng- und Umwelttechnik GmbH, Berlin)

Ein wesentlicher Punkt in der Rückbaupraxis betrifft die vorherige Bestandsaufnahme. Dabei werden ein Schadstoffgutachten, ein Entsorgungskonzept, ein Analysekonzept und die Planung der Entsorgungswege erstellt. Bei der Entrümpelung ist die Wirtschaftlichkeit der selektierten Abfallstoffe entscheidend. Bei Metallen ist diese im Gegensatz zu z. B. Gips gegeben. Beim selektiven Rückbau selbst ist sortenreiner Betonbruch leicht abzugeben. Für z. B. Gips und Ziegel hingegen lohnt sich der Aufwand momentan nicht. Die Demontage ganzer Bauteile (z. B. das Schlitzen von Betonbauteilen) verläuft meist schneller und sauberer als das Brechen. Zusätzlich wird weniger Platz benötigt und die Erschütterungen und Abplatzungen fallen geringer aus.

Hemmnisse für den selektiven Rückbau sind:

- die Wirtschaftlichkeit (Erzeugung der Einzelstoffe im Vergleich zum Preis für die Abnahme von Sekundärrohstoffen),
- der hohe Wettbewerbsdruck,
- fehlende Nachfrage von RC-Baustoffen (meist werden in Ausschreibungen nur Primärrohstoffe für Hochbauten oder für den Wegebau nachgefragt),
- fehlende Prüfung der Rückbaukonzepte und der Einhaltung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes,
- fehlende Kontrollen der Getrennthaltung.

Die Motivation für den selektiven Rückbau aus der Sicht eines Rückbauers gründet auf dem Kreislaufwirtschaftsgesetz, der Wirtschaftlichkeit, der Rechtssicherheit und einem guten Gewissen.

Eine noch zu klärende Frage ist, ob auf der Baustelle selbst oder bei den Recycling-Unternehmen selektiert werden soll.

7.2.2 Selektiver Rückbau und hochwertiges Recycling

Die heutige Abbruch- und Baupraxis weist viele Potenziale, aber auch Hemmnisse und Fragen auf. Grundsätzlich ist beim Rückbau die Selektion von Gefahrstoffen sehr wichtig. Dabei spielt es keine Rolle, ob diese im Baustoff selbst oder erst bei der Nutzung in das Gebäude eingebracht worden sind.

Oft sind die Wirtschaftlichkeit und die noch geringe Abnahme von Sekundärrohstoffen beim selektiven Rückbau eine Herausforderung. Es stellt sich die Frage nach dem Sinn einer weiteren Trennung neben der gesetzlich geforderten, wenn es für die so gewonnenen Abfallfraktionen noch keine etablierten Rücknahme- und Recycling-Systeme gibt. Werden die getrennten Abfallfraktionen nicht für eine nachfolgende Aufbereitung nachgefragt oder sind die Transportwege zu lang, erweist sich der Mehraufwand für die Trennung von Bauschutt oft noch nicht als wirtschaftlich.

Ungeklärt bleibt auch die Frage, welcher Ort für die Trennung besser geeignet ist. Wenn die Fraktionen direkt an der Baustelle getrennt werden, erfordert dies eine sorgfältige Abbrucharbeit und geschulte Mitarbeiter. Eine Sortierung im jeweiligen Aufbereitungsbetrieb könnte vorteilhaft sein, wenn dort die technischen Anlagen für eine maschinelle Sortierung vorhanden sind und insbesondere diejenigen Materialien fraktioniert werden, die im Unternehmen aufbereitet werden sollen.

Eine weitere Schwierigkeit für einen selektiven Rückbau stellen Verbundmaterialien dar, für die es keine funktionierenden oder effizienten Trennverfahren gibt. Deshalb sollten beim Bau Systeme Anwendung finden, für die geeignete Trennverfahren vorhanden sind oder die mit Steck-, Klemm- oder Schraubverbindungen ohne Schäumen oder Kleben auskommen. Auf Details müsse geachtet werden, etwa dass sich Schraubverbindungen nach Jahrzehnten unter Druck oder Zug nicht mehr zuverlässig lösen ließen. Auf Verbundwerkstoffe kann nicht vollständig verzichtet werden. Beispielsweise hat Carbonbeton Vorteile im Bau und wird beim Abbruch genauso behandelt wie Stahlbeton. Aber es stellt sich die Frage der Verwertung der Carbonfasern. Die Teilnehmenden sind sich nicht einig darüber, wie gut das Recycling von Carbonfasern aus Carbonbeton momentan funktioniert.

Das Abfallrecht ist mit verschiedenen Verordnungen bereits sehr umfassend im Rahmen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes geregelt. Ein Schwachpunkt besteht allerdings darin, dass die Vorgaben nach dem selektiven Rückbau nicht überwacht werden. Es finden nur selten Kontrollen statt, die bei Abbruchunternehmen überprüfen, ob Materialien getrennt erfasst und einer möglichst hochwertigen Verwertung zugeführt werden.

Ein spezifisches, auf Rückbaueigenschaften bezogenes Zertifikat der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB e.V.) ist in Planung.

Ressourcenschonung durch zirkuläres Wirtschaften, Prof. Dr. Angelika Mettke (Leiterin des Arbeitsgebiets Bauliches Recycling an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik)

Wiederverwendung von Fertigbetonbauteilen - ökologische Vorteile

Für die Wiederverwendung von Bauteilen ist das Sportlerheim Kolkwitzer Sportverein 1896 e.V. ein gutes Beispiel. Die ökologischen Vorteile liegen in den enormen Einsparungen an Rohstoffen und Energie, die zur Herstellung neuer Betonelemente erforderlich sind. Die Herstellung ist besonders energieintensiv: Für 1 t Fertigbeton werden 3.080 MJ (856 kWh) (umgerechnet auf Heizöl: etwa 72 l) benötigt. Die Bereitstellung gebrauchter Elemente erfordert lediglich umgerechnet etwa 3,7 l Heizöl pro t Betonfertigteile (= Energieaufwand für die Demontage). Das ergibt eine Einsparung von 95 % an Energie. Die Höhe des Energieverbrauchs korreliert mit der Freisetzung klimarelevanter Schadstoffemissionen: Anstelle von 394 kg/t CO₂ werden nur 12 kg CO₂ für die Bereitstellung der gebrauchten Bauelemente freigesetzt (= 3 % von 394 kg/t). Neben den ökologischen Vorteilen sind auch ökonomische Benefits zu verzeichnen: Die Kosteneinsparung für den Rohbau bei 400 m² Grundfläche betrug 30.000 € durch die Wiederverwendung von 40 Wänden und 40 Deckenplatten für die Dachausbildung.

Einsatz von RC-Beton beim Pilotvorhaben der HU Berlin

Bei einem Pilotvorhaben der Humboldt-Universität Berlin wurden die ökologischen Vorteile des RC-Betons bei der Errichtung des Tragwerks im Vergleich zu Primärbeton betrachtet. Durch die Verwendung von RC-Gesteinskörnung konnten für die 3.800 m³ RC-Beton 4,4 t CO₂ im Vergleich zum Normalbeton eingespart werden. Außerdem konnten natürliche Lagerstätten durch die Nichtinanspruchnahme von 680 m² Kiesabbaufäche geschont bzw. erhalten bleiben. Die Flächeneinsparung entspricht der Größe von fast vier Tennisplätzen oder einem Fußballfeld. Die kurzen Transportdistanzen für RC-Gesteinskörnungen bis zu ihrem Einsatzort und deren hochwertige Einsatzmöglichkeiten bieten die besten Voraussetzungen für eine optimale zirkuläre Wirtschaftsweise.

Zu beachten ist, dass der Einsatz von RC-Beton für jedes Bauvorhaben eine einzelfallbezogene Prüfung erfordert. Zu prüfen ist, welche ökologischen und ökonomischen Vorteile jeweils erzielt werden. Der Standort der Baumaßnahme ist dabei entscheidend. Städtische Ballungsräume bieten die besten Voraussetzungen für den Einsatz von RC-Beton, denn dort fallen bei Abbruch-/Rückbaumaßnahmen große Mengen an Bauschutt an, RC-Anlagen befinden sich im Einzugsgebiet und zugleich werden große Mengen an Gesteinskörnungen für die Betonproduktion benötigt, um Neubauten zu errichten.

Handlungsempfehlungen

Um ein möglichst rezyklierbares Bauwerk zu erstellen, sind folgende Strategien erforderlich:

- eine konstruktive Trennung von unterschiedlich beanspruchten Bauteilen,
- lösbare und flexible Verbindungsteile und Konstruktionen,
- der Einsatz von schadstofffreien, langlebigen Baumaterialien und -produkten inkl. RC-Baustoffen und -Produkten,
- Nutzung demontierbarer Systeme für Innenwände,
- Einsatz möglichst reststoffarmer Materialien und Bauprozesse.

Je sorgfältiger die Planung des Abbruchs/Rückbaus eines Gebäudes erfolgt, desto differenzierter kann die Entsorgung der Bauabfälle umgesetzt und können Baukosten eingespart oder für Teilströme sogar Erlöse erzielt werden. Dabei sind die regionale Situation und Anforderungen hinsichtlich Wiederverwendung bzw. hochwertigen Recyclings zu berücksichtigen.

7.2.3 Aufbereitung und Akzeptanz von Recycling-Beton und anderen Recycling-Produkten

Unstrittig ist, dass Recycling-Beton und auch andere Recycling-Baustoffe bereits heute in einer sehr guten Qualität hergestellt werden können. Außerdem führt der Einsatz von RC-Gesteinskörnungen bei der Betonherstellung in der Regel nicht dazu, dass mehr Zement als bei der Betonherstellung mit Primärrohstoffen benötigt wird. Viele Umsetzungsbeispiele belegen auch, dass es in der Praxis möglich ist, demontierte Bauteile wiederzuverwenden. Hinsichtlich der Ressourcenschonung ist dies der zu bevorzugende Weg, da so Primärrohstoffe eingespart werden können und die Herstellungsenergie entfällt. Dabei sollte neben dem Potenzial zur Ressourcenschonung auch die Energie, die für den Rückbau (z. B. das Zuschneiden), den Transport und die Aufbereitung benötigt wird, in der Bilanz berücksichtigt werden.

Die Teilnehmenden des Fachgesprächs kommen zu dem Ergebnis, dass der rechtliche Rahmen ein Hemmnis beim hochwertigen Recycling und bei der Bauteilwiederverwendung darstellt. Ein Hauptproblem liegt darin, dass das Kreislaufwirtschaftsgesetz und das Baurecht keine aufeinander abgestimmten Vorgaben enthalten. Dies führt dazu, dass die Deklaration von Abfall und Bauprodukt im Rahmen von Recycling-Produkten nicht klar geregelt ist.

Ähnlich verhält es sich mit der Konkretisierung des Rechtsbegriffs im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) und einer möglichen Anpassung der Gefahrstoffverordnung, die aus Sicht einiger Akteure notwendig ist. Nach dem KrWG darf eine Verwertung nur stattfinden, wenn diese für Mensch und Umwelt ungefährlich ist. Dies wird im Moment vorsorgeorientiert ausgelegt. Außerdem sollte überprüft werden, ob bestimmte Schadstoffe

z. B. im Beton verbleiben können, wenn sie eingebunden keine Auswirkung auf Menschen und Umwelt haben. Ein derartiges Vorgehen könnte z. B. die Herstellung von Recycling-Beton vereinfachen.

Ein Hemmnis bei der Wiederverwendung von Bauteilen liegt in den noch offenen Fragen bezüglich der Rechtssicherheit.

Trotz der hohen Qualität der Sekundärrohstoffe besteht nur eine geringe Nachfrage nach Recycling-Produkten. Es wurde festgehalten, dass die meisten Planer und Architekten den Einsatz von Recycling-Material nicht in Erwägung ziehen und - vor allem private - Bauherren dies auch nicht nachfragen.

Die Teilnehmenden des Fachgesprächs gehen davon aus, dass dies insbesondere dem mangelnden Kenntnisstand und fehlenden Fachwissen über die Möglichkeiten des Einsatzes von Recycling-Materialien geschuldet ist. Zudem wünschen sich viele Bauherren keine Bauteile aus schon einmal genutzten und aufbereiteten Materialien, da diese immer noch als qualitativ weniger hochwertig eingeschätzt werden. Hinzu kommt, dass in öffentlichen Ausschreibungen für Neubauten oder Ertüchtigungsbauten noch selten Recycling-Produkte gefordert und/oder berücksichtigt werden.

Ein mehrfach diskutiertes Argument betrifft die mangelnde Wirtschaftlichkeit an verschiedenen Stellen des Rück- und Neubauprozesses. Bei Massenströmen ist der Transport ein entscheidender Kostenfaktor. Abbruchunternehmen können ihre Abfälle oft nicht rentabel an Recycling-Unternehmen abgeben, da der Transportweg dorthin zu lang ist. Dies gilt genauso für die Beschaffung von Baumaterialien. Selbst wenn Recycling-Beton günstiger ist, kann es sich aufgrund der hohen Transportkosten lohnen, Primärrohstoffe aus einem nahegelegenen Steinbruch zu beziehen. Der Transport ist auch bei der ökologischen Betrachtung zu berücksichtigen.

Als Kernaussage lässt sich zusammenfassen, dass sowohl für Abbruchunternehmen als auch für die Hochbauunternehmen das Wissen und die Wirtschaftlichkeit gegeben sein müssen, ansonsten kann die Forderung nach einem hochwertigen Recycling lediglich durch Fördermaßnahmen erzielt werden.

Recyclinggerechtes Konstruieren von Hochbauten

„Experimentaleinheit Urban Mining & Recycling (UMAR)“, Bernd Köhler (Projektleiter /Senior Architekt, Werner Sobek Design GmbH, Stuttgart)

Werner Sobek mit Dirk E. Hebel und Felix Heisel haben in Zusammenarbeit mit weiteren Partnern das Forschungshaus „UMAR“ konzipiert und gebaut. Dabei wurde deutlich, dass es durchaus möglich ist, ein recyclinggerechtes, gut designtes Gebäude aus überwiegend recycelten Produkten zu errichten.

Es wurde beachtet, dass alle Materialien in technische oder biologische Kreisläufe zurückgeführt werden können und nach ihrem Recycling für gleichwertige Anwendungszwecke zur Verfügung stehen. Es zeigte sich aber, dass es mit großem Aufwand verbunden ist, geeignete Produkte am Markt zu finden.

Bei der Planung des Gebäudes wurde darauf geachtet, dass alle Konstruktionen und Verbindungen lösbar sind (sogar im Nassbereich), die einzelnen Bauteile wiederverwendbar, wiederverwertbar, kompostierbar sind und Recycling-Baustoffe/-teile eingesetzt werden.

Beispiele dafür sind:

- eine Drehwand, deren Steine aus mineralischem Bauschutt gebacken worden sind,
- Modulbauteile aus unbehandeltem Holz, das nach dem Rückbau weiterverwendet werden kann,
- Dämmmaterial aus Pilz-Myzelien,
- eine Fassade aus Kupferplatten, die beispielsweise für ein Hoteldach genutzt wurden,
- Türgriffe, die aus einer ehemaligen Bank stammen,
- eine Glastrennscheibe, die aus Recycling-Glas hergestellt wurde und wiederverwendbar ist.

Das Projekt beweist darüber hinaus, dass ein recyclinggerechtes Gebäude aus Recycling-Materialien auch einen hohen architektonischen Anspruch erfüllen kann.

7.2.4 Produktdesign und Planung eines recyclinggerechten Gebäudes

Bei der Planung von recyclinggerechten Gebäuden müssen mehrere Planungsstrategien, wie die recyclingfreundliche Baustoffauswahl oder das Konstruieren mit lösbaren Verbindungen, beachtet werden. Eine Herausforderung bei der Umsetzung dieser Planungsstrategien stellen insbesondere das Wissen und Datenmaterial zu Produkten und Konstruktionsweisen dar. Dies wird in Kapitel 7.2.5 der Dokumentation näher betrachtet. Außerdem ist der Abstimmungsaufwand bei der Planung heutzutage schon hoch. Zudem sollte eine Lösung gefunden werden, wie das Lebensende eines Gebäudes systematisch in die Planung integriert werden kann.

Realisierte Beispiele zeigen, dass die Umsetzung des recyclinggerechten Planens und Bauens möglich ist und dies auch mit einem hohen architektonischen Anspruch verbunden werden kann. Hinter den umgesetzten Projekten stehen momentan oft noch der Idealismus einzelner Bauherren oder ein Forschungszweck.

Anhand der Beispiele ist auch zu sehen, dass sich die Planung insbesondere wegen der Suche nach geeigneten Konstruktionslösungen und Produkten aufwändig gestaltet.

Die Teilnehmenden des Gespräches kommen deshalb zu dem Ergebnis, dass das hochwertige Recycling schon beim Produktdesign berücksichtigt werden muss. Bauprodukthersteller sollten stärker in die Pflicht genommen werden. Bereits bei der Entwicklung von Bauprodukten sollte ihre Recycling-Fähigkeit berücksichtigt werden. Dabei soll der gesamte Lebenszyklus betrachtet und in diesem Stadium schon geprüft werden, welche Rückbautechniken und welche Abfallsammelstellen bzw. -infrastruktur vorhanden sind.

Außerdem wurde diskutiert, ob die genormten Produktkennzeichnungen ausreichend sind oder ob diese erweitert werden müssen. Vor dem Hinter-

grund der großen Rezepturvielfalt bei den Bauprodukten sind zukünftig eventuell weitere Informationen für das Recycling-Unternehmen notwendig.

Ressourceneffizienz, Rückbau und Circular Economy aus der Sicht eines Hybridbau-Spezialisten, Dr. Jan Wenker (Brüninghoff-Unternehmensgruppe, Heiden)

Bei der Planung und Umsetzung zukunftsfähiger, lebenszyklusorientierter und nachhaltiger Gebäude ist Ressourceneffizienz ein essenzieller Bestandteil. Ressourceneffizienz beschreibt das Verhältnis von Nutzen zu eingesetzten technischen und natürlichen Ressourcen – idealerweise betrachtet über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes einschließlich eines möglichen Rückbaus. Ressourceneffizientes Bauen hat daher das Ziel, den Einsatz von Ressourcen so effizient wie möglich zu gestalten und damit so wirtschaftlich, ökologisch und sozial verträglich wie möglich zu halten.

Hybrides Bauen bedeutet, unterschiedliche Materialien wie Holz, Beton, Stahl und Aluminium intelligent miteinander zu kombinieren und so neue Eigenschaften zu erzielen, die durch den schlichten Einsatz einzelner Werkstoffe unerreichbar sind. Als wesentliches Element der Hybridbauweise bietet der nachwachsende Rohstoff Holz spezielle Vorteile hinsichtlich Effizienz, Ablaufgeschwindigkeit der Baustelle und Nachhaltigkeit. Als besonders wirtschaftliche Lösung erweist sich dabei die Kombination von Holz und Beton innerhalb des Tragwerks – beispielsweise im Rahmen einer Holz-Beton-Verbunddecke.

Bereits bei der Planung eines Gebäudes sollte ein möglicher Rückbau bedacht werden – als letzte Maßnahme, wenn eine Sanierung, Revitalisierung und/oder Umnutzung aus wirtschaftlichen oder technischen Gründen ausgeschlossen werden kann. Beim Rückbau selbst sollte das Ziel darin liegen, möglichst hochwertige Rezyklate zu gewinnen. Eine Herausforderung stellt hierbei oftmals die Unkenntnis über verbaute Materialien oder über das Vorhandensein von Schadstoffen im Bestand dar.

Es kommt daher darauf an, Konstruktionen so zu planen, zu konstruieren und zu bauen, dass die Aspekte sortenreiner Rückbau und Recycling berücksichtigt werden. Entscheidend sind unter anderem die Wahl der eingesetzten Rohstoffe, die Menge des eingesetzten Materials sowie die Wahl für den Rückbau geeigneter Fügeverfahren und Anschlussverbindungen. Die Umsetzung dieser Konzepte soll die wiederholte Nutzung der verwendeten Baustoffe im Sinne einer Circular Economy zulassen. Großes Potenzial entfaltet hier die Hybridbauweise, die für einen hohen Einsatz nachwachsender Rohstoffe steht. Im Lebenszyklus eines hybriden Gebäudes müssen alle Phasen – beginnend mit einer integralen Planung über den Betrieb und die Instandhaltung bis zum Rückbau – ganzheitlich betrachtet werden. Hybrides Bauen zeichnet sich zudem bei intelligenter Planung durch einen hohen Vorfertigungsgrad und leicht trennbare Konstruktionen auf Bauteil- und Gebäudeebene aus.

In diesem Zusammenhang sollten auch die Potenziale von Building Information Modeling (BIM) nicht unerwähnt bleiben. Mit BIM werden alle physikalischen und funktionalen Eigenschaften eines Gebäudes sowie projektrelevante Informationen wie Materialeigenschaften und Bauteilkonstruktionen in einem digitalen Modell erfasst und zusammengeführt. Im Falle eines Rückbaus kann auf diese aktuelle und vollständige Datenbasis zurückgegriffen werden. Dies bedingt jedoch, dass BIM ganzheitlich über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes eingebunden war. Dies ist heute jedoch häufig noch nicht der Fall. So unterstützen oftmals nicht alle Projektbeteiligten BIM, oder die Methode wird nicht in allen Phasen und mit allen für den späteren Rückbau notwendigen Informationen implementiert. Künftig wäre ein Einsatz von BIM über den gesamten Lebenszyklus daher sinnvoll und wünschenswert.

7.2.5 Dokumentation

Wenn ein Gebäude nach rund 70 Jahren Nutzungsdauer zurückgebaut und die Materialien recycelt werden sollen, ist es hilfreich – auch für die Zukunft –, sämtliche verbaute Materialien zu kennen. Dies lässt sich mit einer Dokumentation der Planungs- und Bauphase sowie der Nutzung mit Umbauten, Renovierungen oder Ertüchtigungsbauten erreichen.

Darüber, wie genau eine derartige Dokumentation erreicht werden kann, wurde umfassend diskutiert. Unstrittig ist, dass die Dokumentation lückenlos über die gesamte Lebensdauer des Gebäudes erfolgen müsste, damit am Ende der Nutzungsphase über das beste Vorgehen beim Rückbau entschieden werden kann. Klar ist aber auch, dass die vollständige Erfassung von Bauteilen, Bauprodukten und deren Konstruktionsweisen wegen der unterschiedlichen Beteiligten in den einzelnen Lebenszyklusphasen nur selten sicherzustellen ist. Zudem können heute verbaute Materialien bisher unbekannte Schadstoffe enthalten und daher nicht als solche erfasst werden. Dies könnte bei Beginn des Rückbaus zu nicht absehbaren Schwierigkeiten führen.

Uneinigkeit bestand über die Art der Datenerfassung, Datenspeicherung und Dokumentation. Eine digitale Datenerfassung mit heute verfügbarer Software und Datenbanken kann möglicherweise nach 70 oder mehr Jahren nicht mehr ausgelesen werden, weil diese Systeme nicht mehr existieren. Als Beispiele dafür wurde die Speicherung auf Mikrofilm oder CDs genannt, die nach relativ kurzer Zeit überholt war. Es besteht aber die Forderung nach einer kontinuierlichen Fortführung der Datenerfassung und Speicherung, sodass sich bei Änderungen der Systeme die Daten sehr wahrscheinlich übertragen und an neue Anforderungen anpassen lassen. Es wurde dagegen gehalten, dass es bei einem so langen Zeitraum der Dokumentation besser sei, sich nicht auf die digitale Speicherung zu verlassen.

Mögliche digitale Methoden zur Bauproduktenkennzeichnung während der Bauphase sind RFID-Chips (Radio-Frequency Identification). Diese eignen sich allerdings nicht, um sämtliche Materialien im Gebäude zu dokumentieren. Hier bieten sich in erster Linie Methoden zur Bauwerksdatenmodellierung wie das BIM an. Dies erleichtert allen am Bau beteiligten Akteuren die Abstimmung während des Baus und kann anschließend für die Baubewirtschaftung in der Nutzungsphase weiterverwendet werden. Dabei sind jedoch der Aufwand zur Erstellung eines BIM-Modells und die Kompatibilität bei allen Beteiligten zu berücksichtigen. Grundsätzlich erscheint die Nutzung dieses Modells ebenfalls für eine langfristige Dokumentation der Gebäudedaten sinnvoll - inwieweit sich BIM tatsächlich dafür eignet, muss sich in Zukunft noch zeigen. Einigkeit bestand aber darüber, dass es not-

wendig ist, heute schon Vorbereitungen zu treffen, um eine lückenlose Dokumentation der Gebäudedaten zu erreichen.

Unabhängig davon, auf welche Weise die Dokumentation des Gebäudebestands erfolgen wird, muss die Frage geklärt werden, wer für die Datenerfassung verantwortlich ist. In der Planungsphase sind die Planer und Architekten gefragt. In der Bauphase sind zusätzlich viele verschiedene Gewerke mit dem Einbau von Material beschäftigt. Nach der Übergabe an den Bauherren ist dieser für Veränderungen wie Renovierungen oder Umbauten des Gebäudes zuständig. Auch Handwerksbetriebe können dann tätig werden. Es wurde die Meinung vertreten, dass ab Übergabe des Gebäudes allein der Bauherr für die Fortführung der Speicherung und für die weitere Dokumentation verantwortlich sei, da nur dieser über Maßnahmen am Bestand entscheiden könne. Die Mehrheit der Teilnehmenden sprach sich aber dafür aus, dass sämtliche Akteure, die sich zu unterschiedlichen Zeiten und Zwecken mit dem Gebäude befassen, für die Datenerfassung verantwortlich sind. Das betrifft den Bauherren genauso wie den Planer, das Bauunternehmen und die Handwerksbetriebe. Die Fortschritte in der Digitalisierung bieten Möglichkeiten, diese Aufgabe auch gemeinsam wahrzunehmen, wenn dafür die richtigen Voraussetzungen und Anforderungen geschaffen werden.

7.2.6 Fachwissen und Dialog

Ein entscheidendes Hemmnis für ein hochwertiges Recycling von Rückbauten und für nachhaltiges Bauen wird in dem Fachwissen vieler ausführender Beteiligten gesehen. Bereits die Bauherren haben in der Regel kein Wissen oder keine Kenntnis über recyclinggerechtes Bauen bzw. die Möglichkeit, auch mit Recycling-Materialien qualitativ hochwertig bauen zu können. Es ist heutzutage noch unüblich, dass Planer und Architekten den Bauherren das Bauen mit Recycling-Produkten empfehlen oder anbieten. Das liegt auch in der Ausbildung der Planer begründet, in der recyclingbezogene Prozess- und Rückbaustrategien als Einzelaspekte durchaus vorkommen, eine Durchgängigkeit jedoch fehlt, sodass das Wissen nur sehr langsam in die Baupraxis einfließen kann. Gleiches gilt auch für die ausführenden Gewerke, bei denen der aktuelle Wissensstand über Rückbaubarkeit und Recycling in der Bauwirtschaft noch nicht Bestandteil der Aus-

bildung ist. Planer müssten idealerweise die Expertise der Abbruchunternehmer einbeziehen. Verstärkt wird dieses Hemmnis durch den größer werdenden Fachkräftemangel, der auch das Bauwesen erreicht.

Insgesamt hat die Diskussion während des Fachgesprächs gezeigt, dass es erforderlich ist, in sämtlichen Prozessen des Bauens und Rückbauens alle Akteure einzubinden. Ein Dialog der Beteiligten ist notwendig, damit bereits in der Planungsphase der spätere verwendungs- und verwertungsfähige Rückbau berücksichtigt wird. Entsorger und Abbruchunternehmen sollten dabei genauso zu Rate gezogen werden wie die ausführenden Gewerke und Produktionsbetriebe. Ein Beispiel, wie dies funktionieren könnte, ist das Forschungsgebäude „UMAR“²²¹. Auch wenn die in diesem Modellhaus verwendeten Gestaltungsprinzipien nicht für die Errichtung von Standardgebäuden geeignet sind, so kann daran doch gut gezeigt werden, wie recyclinggerechtes Bauen mit Recycling-Materialien und die Demontage am Lebenswegende in Zukunft möglich werden könnten.

²²¹ Weitere Informationen unter: <https://www.empa.ch/de/web/nest/urban-mining>

LITERATURVERZEICHNIS

Abele, R. (2014): Experimentalkapsel für das Wohnen von morgen [online]. Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH, 6. Sep. 2014 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.faz.net/aktuell/stil/drinnen-draussen/zukunftshaus-b10-experimentalkapsel-fuer-das-wohnen-13126855.html

Albrecht, W.; Schwitalla, C. (2014): Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Valley, 12. Nov. 2014 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.ivh.de/Studie_Rueckbau__Recycling_und_Verwertung_von_WDVS_I_2677.whtml?lcr=ru

alsecco GmbH & Co. KG (kein Datum): alsecco Objektbericht. Rückbau-Projekt „Ahrensfelder Terrassen“ in Berlin Marzahn [online]. alsecco GmbH & Co. KG [abgerufen am: 11. März 2019], verfügbar unter: <https://docplayer.org/46494760-Alsecco-objektbericht-rueckbau-projekt-ahrensfelder-terrassen-in-berlin-marzahn.html>

APA (2017): Projekt „ReWaste 4.0“ erforscht Abfallbehandlung der Zukunft [online]. APA - Austria Presse Agentur eG, Wien, 7. April 2017, [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: [sci-ence.apa.at/dossier/Projekt_ReWaste_4_0_erforscht_Abfallbehandlung_der_Zukunft/SCI_20170407_SCI73674347035400274](http://science.apa.at/dossier/Projekt_ReWaste_4_0_erforscht_Abfallbehandlung_der_Zukunft/SCI_20170407_SCI73674347035400274)

Baunetz (2018): Ewigkeitslasten im Welterbe: Bürogebäude in Essen [online]. BauNetz Media GmbH, 17. Juli 2018 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.baunetz.de/meldungen/Meldungen-Buerogebaeude_in_Essen_von_kadawittfeldarchitektur_5449893.html

Bauteilnetz (2010): Deutscher Umweltpreis 2010 [online]. Ute Dechantsreiter, Bremen, 30. Okt. 2010 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.bauteilnetz.de/bauteilnetz/website/stdws_news/projekttagbuch/148.html

Bauteilnetz (2019): Bauteilnetz Deutschland [online]. Ute Dechantsreiter, Bremen [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.bauteilnetz.de

BayAbfG (2018): Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und sonstigen Bewirtschaftung von Abfällen in Bayern [online]. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, zuletzt geändert 24. Juli 2018 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.umweltpakt.bayern.de/abfall/recht/bayern/125/bayabfg-bayerisches-abfallwirtschaftsgesetz

BbgAbfBodG (2016): Brandenburgisches Abfall- und Bodenschutzgesetz [online]. Land Brandenburg, zuletzt geändert 25. Jan. 2016 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: bravors.brandenburg.de/gesetze/bbgabfbodg_2016

BBSR (2017): Materialströme im Hochbau: Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn, 2017, Zukunft Bauen: Forschung für die Praxis, Band 06, ISBN 978-3-87994-284-8, auch verfügbar als PDF unter: www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/ZukunftBauenFP/2017/band-06-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=2

BDA (2017): Aktivhaus-Siedlung Winnenden [online]. Bund Deutscher Architekten BDA Köln, 2017 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: bda-koeln.de/awards/aktivhaus-siedlung/

Bertram, H.U. (2003): Aktueller Stand der Überarbeitung der LAGA-Mitteilung 20 [online]. Niedersächsisches Umweltministerium, Hannover, 2003 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.laga-online.de/documents/m20_hintergrundinformationen_2_1517834519.pdf

Beton (2016): Gesteinskörnungen für Normalbeton: Zement-Merkblatt Betontechnik. InformationsZentrum Beton GmbH, Erkrath, 2016, auch verfügbar als PDF unter: www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkblätter/B2.pdf

Bienkowski, N. et al. (2017): Bearbeitung von Carbonbeton – eine bauverfahrenstechnische und medizinische Betrachtung. Bauingenieur, VDI-Bautechnik, Jahresausgabe 2017/2018, S. 110 – 117.

BfJ (kein Datum): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG): § 5 Ende der Abfalleigenschaft [online]. Bundesamt für Justiz [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/__5.html

BIM-Institut (2017): BIM zur Optimierung von Stoffkreisläufen [online]. Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft an der Bergischen Universität Wuppertal, 2017 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.biminstitut.de/forschung/aktuelle-projekte-bim/fokus-rueckbau

BMBF (2019): Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation (R-Beton) [online]. Förderkatalog des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Bonn [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: foerderportal.bund.de/foekat/jsp/SucheAction.do?actionMode=view&fkz=13N13119

BMI (2015): Kriterien – BNB Büro- und Verwaltungsgebäude – Neubau [online]. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI), 2015 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/bnb-buerogebaeude/bnb-bn-2015/kriterien-bnb-buero-und-verwaltungsgebaeude-neubau.html

BMI (2018): Baufachliche Richtlinie Recycling – Arbeitshilfen zum Umgang mit Bau- und Abbruchabfällen sowie zum Einsatz von Recycling-Baustoffen auf Liegenschaften des Bundes [online]. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat [abgerufen am 11. März 2019], verfügbar unter: https://www.bfr-recycling.de/downloads/Baufachliche_Richtlinien_Recycling.pdf

BMU (2016): Eckpunkte des neuen Kreislaufwirtschaftsgesetzes [online]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 7. Dez. 2016 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: <https://www.bmu.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/abfallpolitik/kreislaufwirtschaft/eckpunkte-des-neuen-kreislaufwirtschaftsgesetzes/>

BMU (2017): Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung [online]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 3. Mai 2017 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.bmu.de/gesetz/verordnung-zur-einfuehrung-einer-ersatzbaustoffverordnung-zur-neufassung-der-bundes-bodenschutz-und/

BMUB (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II. 1. Auflage, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin, auch verfügbar als PDF unter: www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf

BMWi (2018): Ressourcenschonendes Bauen. In: Schlaglichter der Wirtschaftspolitik, Monatsbericht Juni 2018. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin, auch verfügbar als PDF unter: www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Monatsbericht/Monatsbericht-Themen/2018-09-bauen.pdf?__blob=publicationFile&v=6

Brenner, V. (2010): Recyclinggerechtes Konstruieren: Konzepte für eine abfallfreie Konstruktionsweise im Bauwesen. Diplomarbeit am Institut für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren (ILEK) der Universität Stuttgart, Ellwangen, Okt. 2010, auch verfügbar als PDF unter: issuu.com/valib/docs/recycling

BTU (2016a): Entwicklung und Anwendung von komplett demontablen Wohneinheiten aus ressourcenschonendem Beton [online]. Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, 2016 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.b-tu.de/ag-baurecycling/forschung/projekte#c159979

BTU (2016b): Prof. Dr.-Ing. Angelika Mettke erhält den Deutschen Umweltpreis für recycelten Beton [online]. Presseinformation vom 30. Okt. 2016 der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU) [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.b-tu.de/news/artikel/10807-prof-dr-ing-angelika-mettke-erhaelt-den-deutschen-um

Bunzel, J. (2017): Recyclingverfahren für gipshaltige Abfälle, Erfahrungen aus der ersten Gipsrecyclinganlage in Deutschland. Vortrag, 13.09.2017, Vortrag im Rahmen der VDI BG Cottbus-Lausitz, an der BTU Cottbus-Senftenberg.

C3 (kein Datum): Fragen und Antworten [online]. C³ – Carbon Concrete Composite e.V. [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.bauen-neu-denken.de/faq/

Cat (2019): Cat Kettenbagger 336F LN XE mit Hybridantrieb [online]. Zeppelin Baumaschinen GmbH Garching, 2019 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.zeppelin-cat.de/produkte/bagger/cat-hybridbagger-336f-ln-xe.html

DBU (2016): Mit „Mut, Ehrgeiz und Sachverstand“ Schutz knapper Ressourcen im Blick [online]. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 12. Okt. 2016 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.dbu.de/123artikel36908_2418.html

DBU (2019): Building Information Modeling (BIM) als Basis für den Umgang mit digitalen Informationen zur Optimierung von Stoffkreisläufen im Bauwesen [online]. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2019 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.dbu.de/projekt_33110/01_db_2848.html

Dechantsreiter, U. et al. (2016): Integration von wiederverwendbaren Bauteilen und Recyclingbaustoffen und die damit verbundenen Auswirkungen auf den Planungsprozess eines Neubaus der Stadtwerke Neustadt [online]. Stadtwerke Neustadt in Holstein, Neustadt in Holstein [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: https://www.dbu.de/projekt_32618/01_db_2409.html

Deilmann, C.; Krauß, N.; Gruhler, K. (2014): Sensitivitätsstudie zum Kreislaufwirtschaftspotenzial im Hochbau [online]. Endbericht, Aktenzeichen 10.08.17.7 - 12.29, 17. Juli 2014 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBauqualitaet/2013/Kreislaufwirtschaftspotenzial/01_s tart.html?nn=436654¬First=true&docId=1153180

DGNB (2018): Circular Economy [online]. DGNB GmbH, 2018 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.dgnb-system.de/de/system/version2018/kernthemen/circular-economy/index.php

DIN 18007:2000: Deutsches Institut für Normung e.V., Abbrucharbeiten - Begriffe, Verfahren und Anwendungsbereiche. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Dittrich, S. et al. (2016): Das Verbundprojekt BauCycle: Von feinkörnigem Bauabbruch zu funktionalen Baumaterialien und Bauteilen [online]. Fraunhofer-Gesellschaft, München [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.vivis.de/phocadownload/Download/2016_mna/2016_MNA_455-464_Dittrich.pdf

Dutczak, M. (2013): Bauen - aber wie? Konventionelle Bauart versus Modulbauweise [online]. Deutsche Bauzeitschrift, Aug. 2013 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.dbz.de/ausgaben/dbz_2013-08_1765220.html

EC (2018): Towards a circular economy [online]. Europäische Kommission, 2018 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: ec.europa.eu/commission/priorities/jobs-growth-and-investment/towards-circular-economy_de

El khouli, S.; John, V.; Zeumer, M. und Hartmann, F. (2014): Nachhaltig konstruieren. 1. Auflage, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München, ISBN 978-3-955532-17-8.

Feess (2018): Fabrik am Fließband [online]. Heinrich Fees GmbH & Co. KG, 9. Juli 2018 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.feess.de/neuigkeiten/fabrik-am-fliessband.html

FH Münster (2018a): KUBA – Nachhaltige Kunststoffwertschöpfungskette: Pilotfall Kunststoffe in Bauwirtschaft und Gebäuden [online]. FH Münster, 2019 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.fh-muenster.de/forschung/forschungsprofil/projekt.php?pr_id=966

FH Münster (2018b): RESSOURCE.WDVS – Ressourceneffiziente Nutzung von qualitätsgesichertem Sekundär-EPS sowie der mineralischen Fraktionen aus WDVS [online]. FH Münster, 2018 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.fh-muenster.de/forschung/forschungsprofil/projekt.php?pr_id=958

Fraunhofer IRB (2019a): Von der Theorie zur Praxis: Entwicklung einer anwendbaren Trockenbauweise zum Einsatz beim Aufbau von demontierbaren, energiehocheffizienten Musterhäusern [online]. Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, 2019 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.irb.fraunhofer.de/bauforschung/baufolit/projekt/Von-der-Theorie-zur-Praxis-Entwicklung-einer-anwendbaren-Trockenbauweise-zum-Einsatz-beim-Aufbau-von-demontierbaren-energiehocheffizienten-Musterh%C3%A4usern/20180059

Fraunhofer IRB (2019b): Energie und Materialflüsse entlang der Herstellung und des Einsatzortes von Sekundärrohstoffen im Hochbau [online]. Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, 2019 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.irb.fraunhofer.de/bauforschung/baufolit/projekt/Energie-und-Materialfl%C3%BCsse-entlang-der-Herstellung-und-des-%20Einsatzortes-von-Sekund%C3%A4rrohstoffen-im-Hochbau/20170162/

Fraunhofer UMSICHT (2018a): BauCycle: Recycling von Baustoffen [online]. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, 26. Sep. 2018 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.umsicht.fraunhofer.de/de/referenzen/baucycle-recycling-baustoffe.html

Fraunhofer UMSICHT (2018b): Neuartiges Recycling von Bauschutt [online]. Presseinformation vom 25. Okt. 2018 von Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2018/oktober/neuartiges-recycling-von-bauschutt.html

GewAbfV (2017): Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung - GewAbfV). Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz.

Gif, Gesellschaft für Immobilienwirtschaftliche Forschung e.V. (2016): Redevelopment – Leitfaden für den Umgang mit vorgenutzten Grundstücken und Gebäuden [online]. Gesellschaft für Immobilienwirtschaftliche Forschung e.V., Wiesbaden 2016, Eigenverlag [abgerufen am: 11. März 2019], verfügbar unter: <https://www.gif-ev.de/onlineshop/download/direct,302>

HeidelbergCement AG (2017): BMBF HighTechMatBau Vorhaben „R-Beton“ – erste Ergebnisse und erste praktische Umsetzung im Großdemonstrator [online]. HeidelbergCement AG, Heidelberg, Dez. 2017 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.heidelbergcement.de/de/system/files_force/assets/document/hightechmatbau-ressourcenschonender-beton-rezykliertes-gesteinskoernung-rc-gesteinskoernung-forschungsprojekt-r-beton-nlt29-2017.pdf?download=1

HfWU (2018): Auf Besichtigungstour der Zukunft [online]. Presseinformation vom 24. Sep. 2018 der Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU), Nürtingen [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.hfwu.de/aktuelles/pressemeldungen/pressemeldung/news/auf-besichtigungstour-der-zukunft/

Hillebrandt, A.; Riegler-Floors, P.; Rosen, A. und Seggewies, J. (2018): Atlas Recycling. 1. Auflage, Detail Business Information GmbH, München, ISBN 978-3-95553-415-8.

Holzbau Deutschland Bund deutscher Zimmermeister (2018): Lagebericht und Statistiken 2018 [Online]. Holzbau Deutschland Bund deutscher Zimmermeister auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamtes, Stand: Mai 2018 [abgerufen am: 15. Nov. 2018], verfügbar unter: https://www.holzbau-deutschland.de/aktuelles/lagebericht_und_statistiken/

IAB (2018): Sensorgestützte Sortierung von Bau- und Abbruchabfällen [online]. IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH, Weimar, 14. Feb. 2018 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.iab-weimar.de/sensorgestuetzte_sortierung-von-bau-und-abbruchabfaellen/

IBA Thüringen (2016): Superlocal - Kreislaufdenken in der Architektur von Prof. Dr. Linda Hildebrand [Video]. IBA Thüringen, 12. Aug. 2016 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.youtube.com/watch?v=ihID1v3k8ZI

idw (2017a): Beton - gebaut für die Ewigkeit? Ressourceneinsparung mit Recyclingbeton [online]. idw - Informationsdienst Wissenschaft, Bayreuth, 19. April 2017 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: idw-online.de/de/news673069

idw (2017b): TU-Bauingenieure koordinieren EU-Projekt zu Recycling-Beton von über sieben Millionen Euro [online]. idw - Informationsdienst Wissenschaft, Bayreuth, 24. März 2017 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: idw-online.de/de/news670239

ifeu (kein Datum a): Bauen mit RC-Beton: Pilotprojekte im Überblick [online]. ifeu-Istitut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.rc-beton.de/index-pilotprojekte.html

ifeu (kein Datum b): Bauen mit RC-Beton: Steckbrief Projekt LU-Friesenheim [online]. ifeu-Istitut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.rc-beton.de/rc-beton-projekte/friesenheim/friesenheim.html

Ilg, G. (2016): Deutscher Umweltpreis: Auszeichnung für Baustoff-Recycling [online]. Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, 23. Nov. 2016 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.process.vogel.de/deutscher-umweltpreis-auszeichnung-fuer-baustoff-recycling-a-561588/

Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) (2018): Umwelt-Produktdeklaration – Baustähle: Offene Walzprofile und Grobbleche [online]. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) [abgerufen am 11. März 2019], verfügbar unter: <https://www.dillinger.de/d/downloads/download/12818>

IÖR (2017): BIMaterial: „BIM-basierter materieller Gebäudepass“ [online]. Veranstaltungshinweis vom April 2017 des Leibniz-Instituts für ökologische Raumentwicklung (IÖR), Dresden [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: idw-online.de/de/attachmentdata57214.pdf

Jehle, P. (2019): Telefonat mit Prof. Dr.-Ing. Peter Jehle zum Thema Rückbau und hochwertiges Recycling am 7. März 2019, 17:30 Uhr, Professur für Bauverfahrenstechnik an der TU Dresden und Vorsitzender im Richtlinienausschuss VDI 6210 „Abbruch von baulichen und technischen Anlagen“.

Jehle, P.; Seyffert, S.; Wagner, S. (2011): Das intelligente Bauteil [online]. RFID im Blick, Ausgabe 02/2009 [abgerufen am 11. März 2019], S. 36 - 37, ISSN 1860-5907, verfügbar unter: https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/ibb/ressourcen/dateien/publikationen/periodika/2009/das_intelligente_bauteil.pdf

Kaiser, O. S.; Krauss, O. (2015): Systemische Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Bauwesen. Kurzanalyse Nr. 12, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin, auch verfügbar als PDF unter: www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/VDI-ZRE_Kurzanalyse-12_Web.pdf

Knappe, F.; Reinhardt, J.; Schorb, A.; Theis, S. (2016): Untersuchungs- und Demonstrationsvorhaben zur Intensivierung der Verwendung von aufbereitetem Bauschutt als Betonzuschlagsstoff [online]. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg [abgerufen am 11. März 2019], verfügbar unter: https://www.bvse.de/images/pdf/mineralik/20160201-Bericht_R-Beton_ifeu.pdf

KIT (2017): Entwicklung eines automatisierten Feucht-Sandstrahlsystems mit pneumatischer Abförderung zum Abtrag asbesthaltiger Spachtelmasse auf Beton (FeSS) [online]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 19. Juni 2017 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.tmb.kit.edu/3744.php

KIT (2019): Universelles Baggeranbaugerät zum gezielten Abtrag von Wärmedämmverbundsystem mit integrierter pneumatischer Abförderung [online]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 8. Jan. 2019 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.tmb.kit.edu/Forschung_3523.php

Kölbl Kruse (kein Datum): Verwaltungsgebäude RAG-Stiftung und RAG [online]. Kölbl Kruse GmbH [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: koelbl-kruse.de/bauprojekte/neuer-verwaltungssitz-rag-stiftung-und-rag-agenessen/

Kopp-Assenmacher, S. (2016): Zum Erfordernis einer Vereinheitlichung der Regelwerke für Bau- und Abbruchabfälle: Rechtsgutachten [online]. Kanzlei Kopp-Assenmacher & Nusser, Berlin, 20. Okt. 2016 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: [www.zdb.de/zdb-cms.nsf/res/2-Rechtsgutachten.pdf/\\$file/2-Rechtsgutachten.pdf](http://www.zdb.de/zdb-cms.nsf/res/2-Rechtsgutachten.pdf/$file/2-Rechtsgutachten.pdf)

Kortmann, J. (2018): Recycling von Carbonbeton - Aufbereitung im großtechnischen Maßstab gelungen. Bauingenieur, VDI-Bautechnik, Jahressausgabe 2018/2019, S. 37 - 44.

Kovacic, I. et al. (2018): BIMaterial: Prozess-Design für den BIM-basierten, materiellen Gebäudepass [online]. Österreichisches Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, Projektbericht, 8. Juni 2018 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.industriebau.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-industriebau/Bilder/Forschung/BIMaterial_Endbericht.pdf

Kreislaufwirtschaft Bau (2018): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2016: Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2016. Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V., Berlin, Dez. 2018, Bericht 11, auch verfügbar als PDF unter: kreislaufwirtschaftbau.de/arge/Bericht-11.pdf

Kreislaufwirtschaft Bau (2019): Kreislaufwirtschaft Bau [online]. Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V. [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.kreislaufwirtschaft-bau.de/

KrW-/AbfG Bln (1999): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen in Berlin [online]. Land Brandenburg, zuletzt geändert 21. Juli 1999 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: gesetze.berlin.de/jportal/portal/t/1g5v/pa-ge/bsbeprod.psm?pid=Dokumentanzeige&showdoccase=1&js_peid=Trefferliste&documentnumber=1&numberofresults=1&fromdoctodoc=yes&doc.id=jlr-KrW_AbfGBErahmen&doc.part=X&doc.price=0.0#focuspoint

LABfG (1988): Abfallgesetz für das Land Nordrhein-Westfalen [online]. Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen, zuletzt geändert 21. Juni 1988 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: recht.nrw.de/lmi/owa/br_bes_text?anw_nr=2&gld_nr=7&ugl_nr=74&bes_id=4794&menu=1&sg=0&aufgehoben=N&keyword=Landesabfallgesetz#det0

LAGA (kein Datum): Links zu den länderspezifischen Regelungen zur Umsetzung der LAGA M20 [online]. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.laga-online.de/Links-51-Links-zu-M20.html

Loeben (kein Datum): ReWaste4.0 – Recycling and Recovery of Waste4.0 [online]. Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik & Abfallwirtschaft, Leoben [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: avaw.unileoben.ac.at/de/forschung-ag_waste_fuel-laufende_projekte-rewaste4.0/

Mettke, A. (2008): Gut erhalten – Die Nutzung gebrauchter Bauteile bei Neubau und Sanierung [online]. Vortrag, Info-Veranstaltung SBB am 28.02.2008, Potsdam [abgerufen am 11. März 2019], verfügbar unter <https://www.sbb-mbh.de/fileadmin/media/publikationen/seminarunterlagen/2008-28-02/mettke.pdf>

Mettke, A. et al. (2018): Untersuchungen zur ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft – Das selektierbare Bauwerk. Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Cottbus.

Mettke, A. (2019): Ressourcenschonung durch zirkuläres Wirtschaften. Vortrag, Fachgespräch Rückbau im Hochbau, Berlin, 24. Jan. 2019.

MI BW (2016): Optimierung der Ressourceneffizienz in der Bauwirtschaft: R-Beton hilft Stoffkreisläufe schließen [online]. Ministerium für Inneres, Digitalisierung und Migration Baden-Württemberg (MI BW), Fachsymposium, 20. Jan. 2016 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.rc-beton.de/vortraege_pdfs/Symposium-R-BetonBeton-20-01-2016.pdf

MLUL (2015): Brandenburger Leitfaden für den Rückbau von Gebäuden. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg, Potsdam, 13. Jan. 2015, auch verfügbar als PDF unter: https://mlul.brandenburg.de/media_fast/4055/Leitfaden_selektiver_Rueckbau.pdf

Motzko, C.; Klingenberger, J.; Wöltjen, J. und Löw, D. (2016): Bewertungsmatrix für die Kostenplanung beim Abbruch und Bauen im Bestand Datenbanksystem zur Analyse und Bewertung in Bezug auf Kosten, Technologien und Dauern [online]. Forschungsinitiative Zukunft Bau F 2975, Fraunhofer IRB Verlag [abgerufen am 11. März 2019], verfügbar unter: www.irbnet.de/daten/rswb/16019002126.pdf

MSV (2018): ThermoTeam: 1 Million Tonnen EBS für die Zementindustrie produziert [online]. MSV Mediaservice & Verlag GmbH, Alling/Biburg, 1. März 2018 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: recyclingportal.eu/Archive/38960

MUEG (2019): Recycling von gipshaltigen Abfällen [online]. Mitteldeutsche Umwelt- und Entsorgung GmbH [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.mueg-gipsrecycling.de

Müller, A. (2016a): Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Kreislaufwirtschaft Bau [online]. Endbericht, Aktenzeichen 10.08.17.7 - 14.27, 12. Feb. 2016 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBauqualitaet/2016/ressourceneffizienzpotenziale/Endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Müller, A. (2016b): Ressourcen- und klimaschonendes Bauen: Übereinstimmende oder widersprüchliche Ziele [online]. Vortrag, 21. Juni 2016 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.abw-recycling.de/art/publik/Veroeffentlichungen_2016/DBU_Marienthal.pdf

- Peter Backwaren (2018):** Deutschlands modernste Backstube [online]. Peter Backwaren OHG, Essen [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.baecker-peter.de/unsere-werte/deutschlands-modernste-backstube/
- R-Beton (2019):** R-Beton: Mineralische Bauabfälle vs. hochwertige Werkstoffe aus Altbaustoffen [online]. Konsortium R-Beton, Heidelberg [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.r-beton.de
- Rosen, A. (2017):** Bauen? In Zukunft nur recyclinggerecht [online]. factory - Magazin für Nachhaltiges Wirtschaften, Ausgabe 2-2017 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.factory-magazin.de/fileadmin/magazin/media/bauen/factory_2_2017_besser_bauen_web.pdf
- Rosenkötter, S. (2018):** Vorzeige-Bau in Neustadt: Geduldssprobe für die Stadtwerke [online]. Lübecker Nachrichten, Verlagsgesellschaft Madsack GmbH & Co. KG, 10. Aug. 2018 [abgerufen am: 11. Feb. 2019], verfügbar unter: <http://www.ln-online.de/Lokales/Ostholstein/Vorzeige-Bau-in-Neustadt-Geduldssprobe-fuer-die-Stadtwerke>
- RWTH (2017):** SUPERLOCAL Produkte [online]. Rheinische-Westfälische Technische Hochschule, Aachen, 2017 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.superlocal.eu/wp-content/uploads/2016/03/Brosch%C3%BCre_Produkt%C3%BCbersicht.pdf
- RWTH (2018):** M1 Superlocal Prototype [online]. Rheinische-Westfälische Technische Hochschule, Aachen, 16. Mai 2018 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.rb.rwth-aachen.de/cms/RB/Studium/Veranstaltungen-Archiv/~jasg/M1-SUPERLOCAL/
- Schönwetter, C. (2017):** Flüchtlingsunterkunft in Winnenden: Modul als Modell? [online]. Deutsche Bauzeitung, 10. Jan. 2017 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.db-bauzeitung.de/db-themen/schwerpunkt/modul-als-modell/
- Schwede, D. (2015):** Entwerfen und Konstruieren für Demontage, Recycling und Ressourceneffizienz [online]. Vortrag, 19. Nov. 2015 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.detail.de/fileadmin/uploads/02-Research/ZdB_Recycling_im_Bau_Dirk_Schwede.pdf
- Schwenk (2018):** Recyclingbeton - Baustoff der Zukunft? [online]. SCHWENK Zement KG, Ulm, 28. Feb. 2018 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.schwenk.de/recyclingbeton-baustoff-der-zukunft/

Seelig, L. (2018): Angelika Mettke: „Intakte Gebäude abreißen und schreddern? Das kam für mich nicht in Frage“ [online]. EDITION F GmbH, 26. Feb. 2018 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: editionf.com/Interview-Angelika-Mettke-25-Frauen-Beton-Bauliches-Recycling

SenUVK (2015): Dokumentation zum Einsatz von ressourcenschonendem Beton beim „Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes für Lebenswissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin“ in Berlin-Mitte [online]. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Referat Abfallwirtschaft Berlin, März 2015 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.berlin.de/senuvk/umwelt/abfall/rc-beton/download/dokumentation_einsatz_rc_beton_berlin_hul.pdf

Seyffert, S. (2011): Optimierungspotenziale im Lebenszyklus eines Gebäudes - Entwicklung und Nachweis eines Modells zur Anwendung der Radio-Frequenz-Identifikation im Bauwesen. Vieweg+Teubner Verlag, ISBN: 978-3-8348-8185-4.

Sigmund, B. (2014): Modularer Massivbau: demontierbares Baukastenprinzip [online]. DETAIL - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 7. April 2014 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.detail.de/artikel/modularer-massivbau-demontierbares-baukastenprinzip-11900/

Statistisches Bundesamt (2017): Umweltnutzung und Wirtschaft: Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen. Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden, 08.12.2017, Teil 4: Rohstoffe, Wassereinsatz, Abwasser, Abfall. Artikelnummer 5850007177006, auch verfügbar als PDF unter: www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/Querschnitt/UmweltnutzungundWirtschaftTabelle5850007177006Teil_4.pdf?__blob=publicationFile

StMUV (2017): Einsatz von mineralischen Recycling-Baustoffen im Hoch- und Tiefbau. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, München, Nov. 2017, auch verfügbar als PDF unter: www.bvse.de/images/news/Mineralik/2017/04-11_Brosch%C3%BCre_Einsatz_von_mineralischen_Recycling-Baustoffen_im_Hoch-_und_Tiefbau.pdf

Stürmer, S.; Kulle, C. (2017): Untersuchung von Mauerwerksabbruch (verputztes Mauerwerk aus realen Abbruchgebäuden) und Ableitung von Kriterien für die Anwendung in Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung (RC-Beton mit Typ 2 Körnung) für den ressourcenschonenden Hochbau [online]. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Abschlussbericht, Aktenzeichen 32105, Okt. 2017 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.ifeu.de/wp-content/uploads/2017-10-17-Abschlussbericht-RC-Beton.pdf

Superlocal (kein Datum): Expo-Gebäude [online]. Superlocal, Kerkrade [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: https://translate.googleusercontent.com/translate_c?depth=1&hl=de&url=translate.google.com&sl=nl&sp=nmt4&tl=de&u=http://www.superlocal.eu/expogebouw/&xid=17259,15700022,15700124,15700186,15700190,15700201,15700248&usg=ALkJrhgKR6F_3kzSijDNrYDNbZapOm6Uzw

TU Dresden (2016): REMOMAB [online]. TU Dresden, Professur für Tragwerksplanung, 6. April 2016 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: tu-dresden.de/bu/architektur/twp/forschung/forschungsprojekte/remomab

TU Dresden (2018): C3-V1.5: Abbruch, Rückbau und Recycling von C³-Bauteilen [online]. TU Dresden, Institut für Massivbau, 21. März 2018 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/forschung/Forschungsfelder/TRC-C3/C3-vorhaben/C3-V1.5

TU Kaiserslautern (2017): Konstruktiver Ingenieurbau – Großes Interesse und viel Gesprächsstoff: Das Fachsymposium R-Beton im Rahmen der Jahrestagung des DAfStb am 20./21.09.2017 in Kaiserslautern [online]. TU Kaiserslautern [abgerufen am 11. März 2019], verfügbar unter: https://www.bauing.uni-kl.de/fileadmin/fwb/download/jahresbericht_schnell_2017_72dpi.pdf

UM BW (2017): Leitfaden zum Einsatz von R-Beton. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Stuttgart, Sep. 2017, auch verfügbar als PDF unter: um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Leitfaden_R-Beton.pdf

Umweltbundesamt (2015): Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertiger Verwertung von Baustoffen. UBA, Dessau-Roßlau, auch verfügbar als PDF unter: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_93_2015_wiederverwertung_von_bauteilen_0.pdf

Umweltbundesamt (2016): Stoffstrommanagement im Bauwesen [online]. UBA, 10. Feb. 2016 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining/stoffstrommanagement-im-bauwesen

Umweltbundesamt (2017a): Urban Mining: Ressourcenschonung im Anthropozän. 1. Auflage, UBA, Dessau-Roßlau, auch verfügbar als PDF unter: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/uba_broschuere_urbanmining_rz_screen_0.pdf

Umweltbundesamt (2017b): Bauabfälle [online]. UBA, 6. Juni 2017 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewahlter-abfallarten/bauabfaelle

Umweltbundesamt (2018): Kunststoffabfälle [online]. UBA, 20. Dez. 2018 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewahlter-abfallarten/kunststoffabfaelle

VDI (2015): Asbesthaltige Putze, Spachtelmassen und Fliesenkleber in Gebäuden: Diskussionspapier. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, Juni 2015, auch verfügbar als PDF unter: www.gesamtverband-schadstoff.de/files/z04-diskussionspapier_asbest_web_2015_06_16.pdf

VDI 4800 Blatt 1:2016: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 6202 Blatt 1:2013: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Schadstoffbelastete bauliche und technische Anlagen - Abbruch, Sanierung und Instandhaltungsarbeiten. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 6210 Blatt 1:2016: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Abbruch von baulichen und technischen Anlagen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Vogt, M. (2015): Vernetzung der Industrie zur Erhöhung der Ressourceneffizienz [online]. Vortrag, 20. Mai 2015 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.staedtetag.de/imperia/md/content/dst/presse/2015/fdw_2015_hp_vortrag_vogt_akt.pdf

Zeumer, M.; Hartwig, J. (2010): Potenziale und Schwierigkeiten beim Recycling im Bauwesen. DETAIL - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, Ausgabe 12/2010, auch verfügbar als PDF unter: inspiration.detail.de/technik-potenziale-und-schwierigkeiten-beim-recycling-im-bauwesen-108752.html

Zukunft Bau (2018): Lebenszyklusbetrachtung als Entscheidungsgrundlage in frühen Planungsphasen: Design2Eco [online]. Forschungsinitiative Zukunft Bau, 2018 [abgerufen am 11. Feb. 2019], verfügbar unter: www.forschungsinitiative.de/antragsforschung/projekte/1008187-1660/

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bertolt-Brecht-Platz 3
10117 Berlin
Tel. +49 30-2759506-0
Fax +49 30-2759506-30
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

Im Auftrag des:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit



NATIONALE
KLIMASCHUTZ
INITIATIVE