

Frank U. Vogdt, Anke Schenk, Altunay Koc

Urban Mining

Leitfaden zur Vermeidung nicht recyclingfähiger
Bauabfälle bei künftigen kommunalen
Hochbauvorhaben

F 3108

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0398-3

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung



Senatsverwaltung
für Umwelt, Verkehr
und Klimaschutz

Urban Mining

Leitfaden zur Vermeidung nicht recyclingfähiger
Bauabfälle bei künftigen kommunalen Hochbauvorhaben

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank U. Vogdt, Dipl.-Ing. Anke Schenk, M.Sc. Altunay Koc



Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-15.53)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Kurzzusammenfassung

Zweck und Ziel des „Leitfadens zur Vermeidung nicht recyclingfähiger Bauabfälle bei künftigen kommunalen Hochbauvorhaben“ (Urban Mining) ist es bereits in der Planungsphase bei der Wahl der Baumaterialien und Baukonstruktionen Hilfestellungen zu geben, um bei zukünftigen Rückbauvorhaben den Anteil an recycelfähigen Materialien zu erhöhen.

Dabei wendet sich das Forschungsvorhaben, das in Kooperation mit der Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz bearbeitet wurde, an die Bauverwaltung des Landes Berlin. Der Leitfaden kann aber gleichfalls Vorbildfunktion für andere öffentliche Bauherren sowie private Bauherren haben.

Bauwerke weisen in der Regel eine sehr lange Lebensdauer auf, so dass die Schwierigkeit darin besteht heute zu prognostizieren, was übermorgen Stand der Technik beim Recyceln von Baumaterialien ist. Darüber hinaus ergeben sich vielfache – teilweise konkurrierende – Anforderungen an Gebäude in ökonomischer, ökologischer soziokultureller und technischer Hinsicht. Eine Bewertung dieser Eigenschaften wird im Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen BNB des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung BBSR durchgeführt, das bei öffentlichen Bauvorhaben des Landes Berlin verbindlich eingeführt werden soll.

Im vorliegenden Bericht wird der Entwurf eines Indikators zur quantitativen Bewertung der Recyclingeffizienz vorgestellt, der mittelfristig in das Bewertungssystem nachhaltiges Bauen integriert werden sollte.

Die Recyclingeffizienz basiert auf dem klassischen Ansatz vom Verhältnis von Nutzen zu Aufwand. Dabei wird jedoch der traditionelle massenbezogene Ansatz um einen volumenbezogenen Ansatz erweitert, da im Bauwesen sowohl Produkte hoher Rohdichte, wie z. B. Stahlbeton, als auch Produkte geringer Rohdichte, wie z. B. Dämmstoffe angewendet werden. Ein rein massebezogener Ansatz würde letztgenannte Produkte bei der Ermittlung der Recyclingeffizienz unterrepräsentieren. Dies wäre insbesondere vor dem Hintergrund sich zukünftig noch weiter verschärfender Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz und damit zunehmender Dämmstoffvolumina nicht zielführend.

Der Nutzen der Recyclingeffizienz ergibt sich aus dem Produkt der Qualität des aufbereiteten Recyclingmaterials – z. B. sortenreines Material – und der Technologieverfügbarkeit. Etablierte Verwertungswege erhalten die höchste Stufe der Technologieverfügbarkeit. Die Qualität des Recyclingprodukts orientiert sich dabei an der Hierarchie des Kreislaufwirtschaftsgesetzes von der Wiederverwendung als höchster Stufe bis hin zur Deponierung als unterste Stufe. Auf Grund der langen Nutzungsdauer von Bauwerken sollen dabei auch Materialien „belohnt“ werden, bei denen nach derzeitigem Stand der Technik zunächst Pilotanwendungen / Pilotanlagen vorhanden sind, oder sich der Recyclingansatz gar erst im Laborstadium befindet.

Der Aufwand setzt sich als Produkt aus dem Rückbauaufwand, dem Transportaufwand und dem Aufbereitungsaufwand zusammen.

Der im vorliegenden Forschungsbericht angegebene erste Ansatz für die Eingangskenngrößen ist dabei keinesfalls als final anzusehen, sondern soll vielmehr die Methodik zur Bestimmung der Recyclingeffizienz erläutern. Die Eingangskenngrößen sollten im Konsens der beteiligten interessierten Akteure ermittelt werden und die Bewertung einer Pilotanwendung unterzogen werden.

Bis dahin wird in den Kapiteln drei und vier des vorliegenden Leitfadens eine qualifizierende Bewertung unterschiedlicher Baumaterialien und Baukonstruktionen gegeben, ohne den Anspruch auf Vollständigkeit erheben zu können.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung.....	3
1. Zielsetzung	7
1.1 Motivation zum Urban Mining.....	7
1.2 Zielgruppe des Leitfadens	9
1.3 Ressourceneffizienz, Recycling und Recyclingfähigkeit	9
1.4 Nachhaltigkeit im Bauwesen.....	12
1.5 Selektiver Gebäude-Rückbau – Grundlage eines hochwertigen Recyclings.....	12
2. Baurechtliche Einordnung.....	19
2.1 Errichtung von baulichen Anlagen	19
2.2 Regelungen im Baurecht.....	19
2.3 Verordnungen, Vorschriften und Richtlinien zu energetischen Gebäudestandards.....	20
2.4 Rückbau von baulichen Anlagen.....	27
2.4.1 Regelungen im Baurecht	27
2.4.2 Regelungen im Abfallrecht	28
3. Recyclingpotenziale der Materialkreisläufe	33
3.1 Qualitäten von Recyclingprodukten	33
3.2 Logistik und Transportwege.....	34
3.3 Bauschutttaufbereitung	34
3.4 Baumaterialien für eine möglichen Verwertung	35
3.5 Mineralische Materialien ohne Gips.....	37
3.5.1 Betone und Ziegel	37
3.5.2 Kalksandstein und Porenbeton	40
3.5.3 Glas	40
3.5.4 Sonstige Betonarten	41
3.5.5 Mineralische Dämmstoffe	44
3.6 Mineralische Materialien mit Gips.....	45
3.7 Gipskartonplatten und andere Gipsplatten.....	47
3.8 Kunststoffe	49
3.8.1 Kunststoffe (ohne Dämmstoffe).....	49
3.8.2 Dach- und Wandabdichtungen.....	50
3.8.3 Dämmstoffe (Polystyrolbasis)	51
3.9 Baumaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen	52

3.9.1	Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen	52
3.9.2	Holz	52
3.9.3	Dämmstoffe (allgemein)	54
3.10	Metalle	54
3.11	Sonstige Verwertungspotentiale	55
3.11.1	Stoffliche Verwertung im ungebunden Einbau	55
3.11.2	Energetische Verwertung	55
3.12	Fügetechniken, Trennbarkeit und Recycling	56
4.	Übersicht der Recyclingeffizienzeigenschaften ausgesuchter Baumaterialien	61
4.1	Tabelle 18: Beton	62
4.2	Tabelle 19: Mauerwerk	65
4.3	Tabelle 20: Putze und Mörtel	69
4.4	Tabelle 21: Glas	71
4.5	Tabelle 22: Metalle	72
4.6	Tabelle 23: Gipshaltige Baumaterialien	73
4.7	Tabelle 24: Dämmstoffe	76
4.8	Tabelle 25: Kunststoffe	85
4.9	Tabelle 26: Holz /Holzwerkstoffe	87
4.10	Tabelle 27: Bitumen	90
5.	Begleitende Studien	92
6.	Bewertungsmethodik zur Recyclingeffizienz	99
6.1	Veranlassung	99
6.2	Entwurf des Indikators „Recyclingeffizienz“	100
7.	Fazit und Ausblick	104
8.	Literatur	105

1. Zielsetzung

1.1 Motivation zum Urban Mining

Im Deutschen Ressourceneffizienzprogramm II (ProgRes II)¹ von 2016 wird die Notwendigkeit der nachhaltigen Entnahme und Nutzung natürlicher Ressourcen als Ziel klar definiert.

„Urban Mining“ ist nach der Definition des Umweltbundesamtes ein integraler Ansatz der Ressourcenbewirtschaftung.² Dabei werden die Betrachtungsgrenzen so breit wie möglich gefasst. Wirtschaftliche Güter jeder Art, also auch Gebäude, werden als Ressource betrachtet, die es gilt im Kreislauf zu führen und damit bestmöglich zu nutzen. Der Baustoff von heute wird Sekundärrohstoff von morgen. Die gebaute Umwelt ist demzufolge das Rohstofflager der Zukunft. Die Umsetzung von „Urban Mining“ leistet somit einen wichtigen Beitrag zur ökologischen und vielfach auch ökonomischen Dimension der Nachhaltigkeit von Gebäuden. Die Vermeidung nicht recyclingfähiger Baustoffe greift genau diesen Ansatz auf.

„Urban Mining“ in der Praxis braucht das Bewusstsein aller am Bau Beteiligten. Jeder steht in der Verantwortung, seinen Beitrag zu dessen Umsetzung zu leisten.

Hersteller	<ul style="list-style-type: none">• Herstellung von recyclingfähigen Produkten, Verwendung von Recycling- / Sekundärrohstoffen (herstellereigene Stoffkreisläufe), Bereitstellung von Produktinformationen, die das Recycling fördern.
Bauherr	<ul style="list-style-type: none">• Nachfrage nach recyclingfähigen Baumaterialien und Baukonstruktionen sowie insbesondere auch Recyclingmaterialien. Dokumentation der Bausubstanz.
Planer	<ul style="list-style-type: none">• Die Verwendung recyclingfähiger Baumaterialien und Baukonstruktionen sowie insbesondere Recyclingmaterialien als Planungsgrundlage für die technische Umsetzung aller Anforderungen an Gebäude oder Bauteile.
Bauausführende, Handwerker	<ul style="list-style-type: none">• Qualitätsgerechtes recyclingfähiges Errichten, Verarbeiten und Fügen der Baumaterialien oder Baukonstruktionen.• Aufrechterhaltung der Recyclingfähigkeit der Baumaterialien, Baukonstruktionen oder Gebäudetechnik (TGA) bei Wartung und Inspektion, Instandsetzung sowie Modernisierung.
Nutzer	<ul style="list-style-type: none">• Weiterführung des Urban Mining Gedankens während des Gebäudebetriebs. Dokumentation von Änderungen an der Gebäudesubstanz über den Lebenszyklus.

1 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Deutsches Ressourceneffizienz-programm II Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen, Stand: November 2016

2 Umweltbundesamt, Fachgebiet Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie, Urban Mining – Ressourcenschonung im Anthropozän, Stand Juli 2017

Abbruchunternehmen	<ul style="list-style-type: none"> • Selektiver Rückbau (siehe Kapitel 1.5)
Verwerter	<ul style="list-style-type: none"> • Logistiksystem zum Sammeln der Sekundärrohstoffe • Aufbereitung der Sekundärrohstoffe • Rückführung zum Hersteller bzw. in Produktionskreisläufe

In Abbildung 1 ist dargestellt, wie der ideale Stoffkreislauf beim Bauen aussehen kann. Die ökologische Bewertung der Primärrohstoffe sowie die Möglichkeit der Verwendung von Recyclingrohstoffen finden hier Berücksichtigung.

Das Verwertungspotential einzelner Stoffe hängt zum einen von natürlichen Materialeigenschaften und zum anderen von technisch vorhandenen Aufbereitungsverfahren ab. Des Weiteren spielen Verfahren zur Trennung von rückgebauten Materialgemischen sowie Vermarktungschancen von RC-Baustoffen eine große Rolle für die Aufrechterhaltung von Stoffkreisläufen.

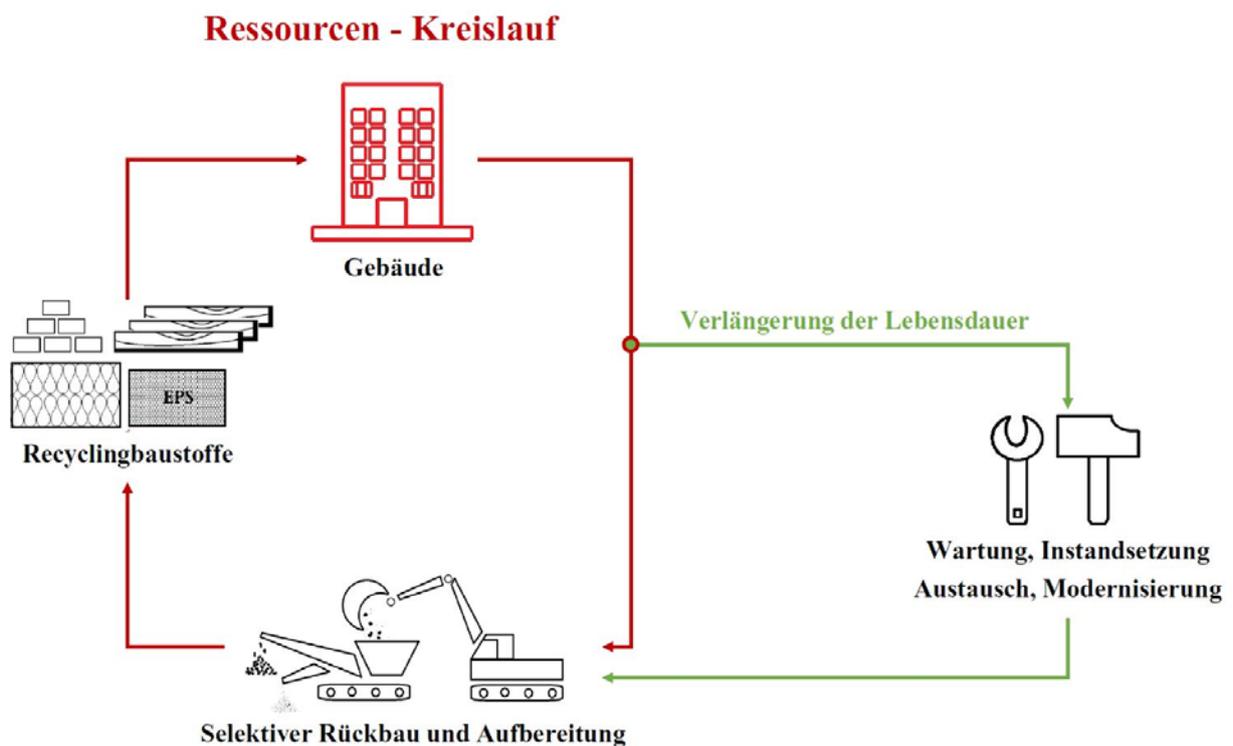


Abbildung 1: Urban Mining – idealer Stoffkreislauf

„Da ca. 50 % der Abfallmengen in Deutschland aus dem Bauwesen stammen, sollte die Eignungsprüfung des Gebäudes hinsichtlich Rückbau, Trennung und Verwertung ... bereits in der Planung Berücksichtigung finden. Hierbei gilt die Reihenfolge: Vermeidung vor Verminderung von Abfällen, dabei ist eine Wiederverwendung einer stofflichen Wiederverwertung (Recycling) vorzuziehen. Sind diese nicht möglich, folgen die thermische Verwertung und zuletzt die Deponierung. Anzustreben ist der Verzicht auf nicht notwendige Bauteile, eine möglichst sortenreine Trennbarkeit

und besonders die Vermeidung von Gefahrstoffen. Der Rückbau und die erforderliche Trennung verschiedener potentieller Störstoffe, ggf. auch bestimmter Verbundbauteile, ist zu beachten.“³

Berlin besitzt als Stadtstaat eine besondere Stellung. Berlin verfolgt deshalb die Zielsetzung, natürliche Ressourcen zu schonen und knappen Deponieraum zu sparen. Der Leitfaden soll zur Umsetzung der Ziele des Berliner Abfallkonzeptes 2010 – 2020 beitragen, um höheren Abfallmengen bereits frühzeitig entgegenzuwirken, die aufgrund des Bevölkerungswachstums und der Entwicklung im Bauwesen - wie z.B. höhere Dämmstoffdicken aufgrund höherer energetischer Anforderungen - zu erwarten sind.

1.2 Zielgruppe des Leitfadens

Dieser Leitfaden soll zunächst für den **Planungsprozess der öffentlichen Hand** die Aspekte, die beim nachhaltigen und recyclinggerechten Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden zu beachten sind, bündeln und darstellen. Weiterhin kann er **Vorbild für den privaten Bauherrn** sein sowie die Forschung und Entwicklung zu optimierten Produktkreisläufen und Bauweisen anregen.

1.3 Ressourceneffizienz, Recycling und Recyclingfähigkeit

Effizienz ist allgemein ein Ausdruck für das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand. Die unter dem Effizienzaspekt zu berücksichtigenden relevanten Ressourcen in Bauwesen werden seit Jahren kontrovers diskutiert. Das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm in der zweiten Fassung (PROGRESS II), das von der Bundesregierung 2013 ins Leben gerufen wurde, fokussiert z. B. auf einen Teilbereich der natürlichen Ressourcen - insbesondere auf die stofflich genutzten Rohstoffe auf mineralischer, fossiler und biotischer Basis (Abbildung 2).

3 Presse – und Informationsamt der Bundesregierung, Nationale Nachhaltigkeitsstrategie – Forschungsbericht 2012

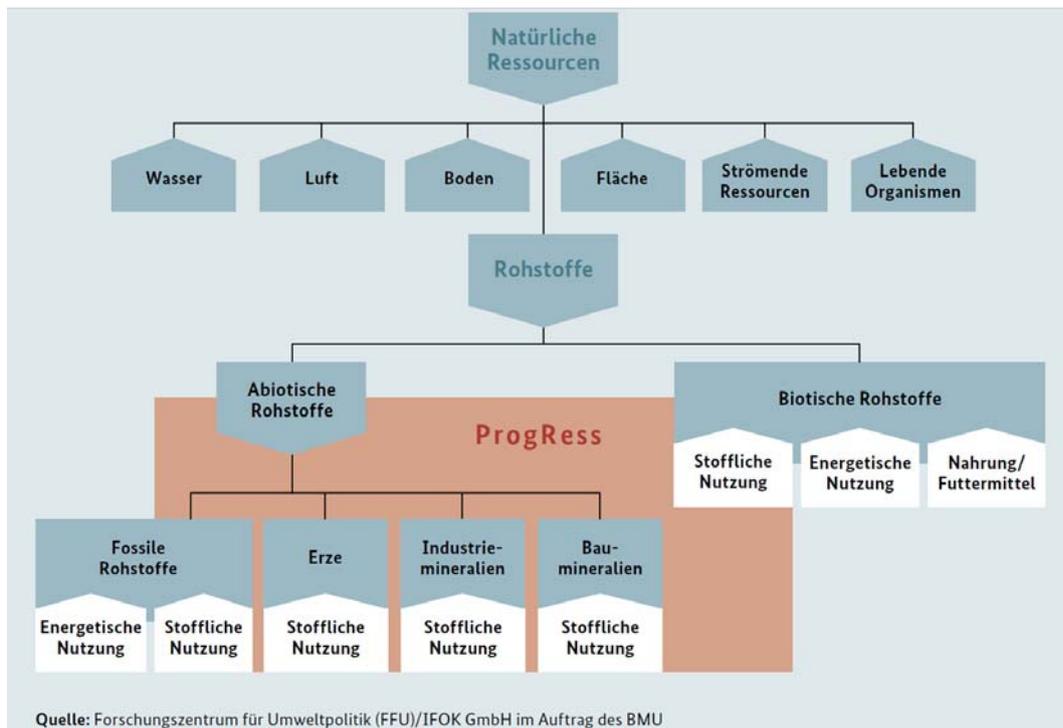


Abbildung 2: Natürliche Ressourcen in Progress II

Das Bauwesen findet sich in den Bereichen Baumineralien (z.B. Kiese, Sande, Natursteine, etc.), Erzen (z.B. Eisen, Aluminium, Kupfer, Zink, etc.) und fossile Rohstoffe (div. Kunststoffe und kunststoffmodifizierte Produkte) mit zum Teil erheblichen - massen- oder volumenbezogenen - Mengenanteilen wieder.

Weiterhin hat die Inanspruchnahme von Rohstoffen im Bauwesen eine direkte Auswirkung auf die anderen natürlichen Ressourcen. Eine Lebenszyklusbetrachtung zeigt die kritischen Aspekte der gebauten Umwelt gegenüber der Natur auf. Beispielsweise beeinflusst die Entnahme der Rohstoffe für die Herstellung von Materialien auf mineralischer Basis auch Böden und Flächen durch den bergmännischen Eingriff. Auch die Erzeugung von nachwachsenden Baumaterialien nimmt u.a. Einfluss auf die Ressourcen Boden und Fläche, da Anbauflächen forst- und landwirtschaftlich bearbeitet werden. Der Blick an das Lebenszyklusende offenbart die Kreislauffähigkeit der Baumaterialien. Derzeit werden noch zu häufig Flächen (z.B. Deponie) und strömenden Ressourcen (z.B. auch Verbrennung) als Senke für Abfälle genutzt. Strategien zur besseren Ausnutzung der natürlichen Ressourcen setzen an verschiedenen Stellen im Lebenszyklus an und sind je nach Ausgangslage anzupassen. Folgende Handlungsschwerpunkte zur Steigerung der Ressourceneffizienz werden derzeit in der Fachwelt - teilweise auch kontrovers - diskutiert:

1. Vermehrter Einsatz von Recyclingmaterialien
2. Substitution von Baumineralien durch biotische nachwachsende Rohstoffe
3. Verminderung des Rohstoffeinsatzes durch Leichtbau
4. Suffizienzgedanke (Verzichten, Teilen, Tauschen, Reparieren)

Als wichtigste Stellschraube im Baubereich wird der vermehrte Einsatz von Recyclingmaterialien gesehen.

Der Begriff „Recycling“ ist im Kreislaufwirtschaftsgesetz wie folgt definiert:

Unter **Recycling** wird „jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind“⁴ verstanden.

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass zur Vermeidungsstrategie von Abfallströmen zuerst das Vermeidungsprinzip gilt. Hierzu zählt vor allem, der Weiternutzung des Baubestandes vor dem Neubau den Vorrang zu geben. In den Nutzungskategorien „Temporäre Bauwerke“, „Bauwerke mit definiertem Nutzungsende“ oder „Bauwerke mit hoher Wahrscheinlichkeit von mittelfristigen Eingriffen in die Bausubstanz“ ist eine Wiederverwendung von Bauteilen bzw. eine additive Erweiterung oder Verkleinerung der Bauwerksbereiche durch wiederverwendungs- und umnutzungsfreundliche Bauweisen (z.B. Modulbauweise) von besonderer Bedeutung.

Zurück zum Recyclinggedanken.

Die **Recyclingfähigkeit** von Baukonstruktionen wird bestimmt durch die Möglichkeit, Baukonstruktionen nach ihrem Lebensende sortenrein zu trennen und die einzelnen Materialien im Stoffkreislauf zu führen. Um eine nachhaltige Urban Mining Strategie einzuführen, ist es erforderlich an mehreren Punkten anzusetzen:

1. Zu Beginn des Materialzyklus muss darauf geachtet werden, dass ein werkstoffliches oder rohstoffliches Recycling prinzipiell möglich ist.
2. Weiterhin ist bei der Planung der Bauteile darauf zu achten, dass Bauteilschichten am Nutzungsende so voneinander getrennt werden können, dass ein Recycling stattfinden kann.
3. Um natürliche Ressourcen zu schonen, ist der Einsatz von Recyclingmaterial zu maximieren.

Unter Umständen kann es ökologisch günstiger sein, eine nach Kreislaufwirtschaftsgesetz minderwertigere „sonstige“ stoffliche bzw. thermische Verwertung umzusetzen. Das Optimum ist im hohen Maße situationsabhängig und von vielfälligen Parametern beeinflusst. Es kann im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse im Variantenvergleich identifiziert werden.

Die Substitution von Baumineralien durch biotische Rohstoffe als weiterer wichtiger Handlungsschwerpunkt zur Steigerung der Ressourceneffizienz wird vor allem im Hochbau als vielversprechendes Instrument gesehen. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass bei einem Variantenvergleich konstruktiv und bauphysikalisch gleichwertige Bauteile verglichen werden. Weiterhin ist bei nachwachsenden Rohstoffen auf die nachhaltige Bewirtschaftung der Böden und Flächen zu achten. Die Bewertungssysteme nachhaltiges Bauen BNB bzw. nach Deutscher Gesellschaft für nachhaltiges Bauen DGNB schreiben deshalb die Zertifizierung des gesamten Lebenswegs von forstwirtschaftlichen Erzeugnissen über Label wie FSC oder PEFC vor.

4 Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG zuletzt geändert am 20.11.2015, §3 (25)

1.4 Nachhaltigkeit im Bauwesen

Mit den oben bereits angeführten Bewertungssystemen BNB bzw. DGNB findet der Nachhaltigkeitsgedanke mit den Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziokulturellem auch im Bauwesen Anwendung. In der ökologischen Dimension der Nachhaltigkeit werden zum einen Umweltwirkungen und zum anderen die Ressourceninanspruchnahme betrachtet, die durch die Rohstoffgewinnung und Herstellung von Baustoffen sowie durch die Errichtung, Nutzung und den Rückbau von Gebäuden entstehen. Dazu gehören auch Überlegungen, wie mit den Baumaterialien nach ihrem Lebenszyklusende möglichst umweltschonend umgegangen werden kann.

Dieser Leitfaden beschreibt die Möglichkeiten, bereits bei der Planung die Komplexität der Nachhaltigkeit zu betrachten. Vorhandene Nachhaltigkeitsbewertungssysteme, wie z.B. das BNB, liefern hierfür wichtige Grundlagen.

Für den vorliegenden Leitfaden liegt der Schwerpunkt in der Beschreibung und dem Vergleich von Baumaterialien und Baukonstruktionen hinsichtlich ihrer Ökologie und Ökonomie an ihrem Nutzungsende. Im Hinblick auf das BNB werden mit diesem Leitfaden insbesondere die Inhalte des BNB-Kriteriensteckbriefes KSB 4.1.4 Rückbau-Trennung-Verwertung angesprochen.

Es gilt die technischen Möglichkeiten und ökonomischen Potentiale zu identifizieren, um Baumaterialien auf Grund ihrer Rückbau- und Trennbarkeit verwerten zu können, sie möglichst ohne Qualitätsverlust im Kreislauf zu führen und somit Deponieräume zu schonen.

Baumaterialien und Baukonstruktionen, deren Volumen und Massen aufgrund der erhöhten Anforderungen an die Energieeffizienz der Gebäude in der Nutzungsphase in den nächsten Jahren zunehmen werden, sind ebenfalls auf ihre Recyclingfähigkeit untersucht worden. Daraus lassen sich Empfehlungen für Baumaterialien und Baukonstruktionen ableiten, ohne jedoch den Anspruch auf Vollständigkeit erheben zu können.

1.5 Selektiver Gebäude-Rückbau – Grundlage eines hochwertigen Recyclings

Ein selektiver Rückbau ist Voraussetzung für ein hochwertiges Recycling nach KrWG.

Selektiver Rückbau wird jedoch weder in der Literatur noch in der Praxis eindeutig definiert.

In diesem Leitfaden soll darunter folgendes verstanden werden:

Selektiver Rückbau bezeichnet Verfahren zum Rückbau von baulichen Anlagen, bei denen vor Ort einzelne Stofffraktionen nach der Möglichkeit ihrer Aufbereitung und Verwertung möglichst sortenrein ausgebaut und gesammelt werden.

Die Teilschritte des selektiven Rückbaus sind in Abbildung 3 dargestellt.⁵ Dabei ist es erforderlich, dass während jeden Schrittes eine Getrennthaltung und Sortierung erfolgt. Je sortenreiner die einzelnen Stofffraktionen bereits zurückgebaut bzw. -gewonnen werden können, desto einfacher

5 Detaillierte Ausführungen zur Planung und zum Ablauf des selektiven Rückbaus sind im „Brandenburger Leitfaden für den Rückbau von Gebäuden“ zu finden.

und hochwertiger kann die Verwertung erfolgen. Aufgrund einer Getrennthaltung während des Rückbaus entstehen somit geringere Aufwendungen für die Aufbereitung zur Verwertung.

Im Idealfall könnten Abbruchbaustoffe Ausgangsstoffe für gleichartige Baumaterialien sein. Voraussetzung hierfür ist das Vorhandensein eines geeigneten Recyclingverfahrens sowie einer zugehörigen Logistik.

Selektiver Rückbau			
	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbau schadstoffhaltiger und gefährlicher Stoffe 		Getrennthaltung bzw. Sortierung von Stofffraktionen während des Rückbaus nach der Möglichkeit ihrer anschließenden Aufbereitung und Verwertung
	<ul style="list-style-type: none"> • Demontage von baulichen (z.B. Innenausbau, Fassade, etc.) und technischen Anlagen TGA 		
	<ul style="list-style-type: none"> • Rückbau der Tragkonstruktionen (Rohbau) 		
	<ul style="list-style-type: none"> • Rückbau der erdberührten Bauteile bzw. Gründung 		

Abbildung 3: Teilschritte des selektiven Rückbaus

Materialien aus dem Gebäuderückbau gelten allgemein als Bauabfälle. Diese werden gemäß Abfallverzeichnisverordnung (AVV)⁶ durch sogenannte Abfallschlüssel klassifiziert. Die meisten der entstehenden Stofffraktionen können dem Abfallschlüssel 17 „Bau- und Abbruchabfälle“ zugeordnet werden. Die rückgebauten Materialien müssen gemäß dieser Zuordnung weiter verwertet werden. Zur Verwertung zählen vorrangig, das Recycling, die thermische Verwertung, Verwendung als Verfüllmaterial und die Deponierung.

Recycling- bzw. Verwertungsunternehmen sind auf die Verarbeitung von bestimmten Materialien spezialisiert und achten sehr auf Qualität bzw. die Zusammensetzung der zu verarbeitenden Sekundärrohstoffe.

In Tabelle 1 bis Tabelle 3 sind beispielhaft Stofffraktionen zusammengestellt, die hinsichtlich ihrer nachfolgenden Aufbereitung zur Verwertung getrennt gehalten werden müssen. Für **mineralische Stofffraktionen** ergeben sich somit mindestens 13 Sortiereinheiten, da für ein hochwertiges Recycling der mineralischen Fraktionen gipshaltige Stoffgemische von nicht gipshaltigen Stoffgemischen getrennt werden müssen. Für die Verwendung als Verfüllmaterial kann Betonbruch, mit begrenzten Anteilen an Ziegel, Kalksandstein und Porenbeton gemischt werden. Zur Erhöhung regionaler Vermarktungschancen werden jedoch teilweise Porenbeton und Kalksandstein - auch ohne Gipsanhaftungen - von Beton und Ziegel separiert.

Metalle werden nach ihrer Art getrennt gesammelt und verwertet. Hier sind etablierte Sammel- und Verwertungssysteme bereits marktüblich.

⁶ Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV) vom 10.12.2001, zuletzt geändert am 17.06.2017

Holz wird nach Altholzverordnung in die Klassen A1 – A4 eingeteilt und muss entsprechend entsorgt werden.

Der derzeitige vorrangige Verwertungsweg der **organischen Stoffe** ist die thermische Verbrennung.

Einige mineralische und organische **Dämmstoffe** können wieder in den Produktionsprozess zurückgeführt werden. Die Anforderungen an die Eigenschaften der Materialien sind jedoch sehr hoch, sodass dieser Verwertungsweg derzeit noch eine untergeordnete Rolle spielt.

Besonders die Stofffraktionen der **Verbundbaustoffe** und -produkte sind weitaus vielfältiger als in den folgenden Tabellen dargestellt. Für diese Produkte gibt es überwiegend noch keine Verwertung. In Abhängigkeit von den organischen Anteilen erfolgt ggf. eine thermische Vorbehandlung.

Tabelle 1: Auswahl mineralischer/metallischer Stofffraktionen, die während des selektiven Rückbaus anfallen können

ohne Gipsputz oder -estrich	mit Gipsputz oder -estrich	Dämmung		Sonstiges		
Beton	Beton	Steinwolle	Glaswolle, Schaumglas	Flachglas	Metalle	Gipskarton
Ziegel	Ziegel					
Porenbeton	Porenbeton					
Kalksandstein	Kalksandstein					

Tabelle 2: Auswahl organischer Stofffraktionen, die während des selektiven Rückbaus anfallen können

Erdölbasiert				aus nachwachsenden Stoffen		
Abdichtungen		Dämmstoffe		Holz	Dämmstoffe	
bituminös	PVC	EPS, XPS	PUR		Holzfasern, Zellulose	Hanf, Flachs, Kork

Tabelle 3: Auswahl von Verbundbaustoffen oder -produkten, die während des selektiven Rückbaus anfallen können⁷

mineralisch/metallisch		organisch/mineralisch/metallisch				
Mit Steinwolle oder Perlite gefüllte Ziegel	Aluminiumkaschierte Stein- oder Glaswolle	Sandwichelemente aus		Aluminiumkaschierte PS oder PU	Verbundbauprodukte	
		Holzwoolleleichtbauplatten mit PU oder EPS	Aluminium mit PU oder PS			

Um den selektiven Rückbau erfolgreich umsetzen zu können, werden nachfolgend Konstruktionsgrundsätze genannt, die das Recyclingpotential gewährleisten bzw. ausbauen.

In Tabelle 4 sind die Konstruktionsprinzipien zur Erhaltung des stofflichen Verwertungspotenzials zusammengefasst. Baukonstruktionen können dabei hinsichtlich eines Prinzips günstiger, hinsichtlich eines anderen Prinzips aber ungünstiger abschneiden. Hier sind dann Abwägungen erforderlich, die im Kapitel den folgenden Kapiteln beschrieben werden.

⁷ Auswahl stellt Beispiele dar, auf dem Markt vorhandene Produktpalette ist weitaus größer.

Tabelle 4: Konstruktionsgrundsätze zur Erhaltung der stofflichen Verwertungspotentiale

Nr.	Prinzip	Erläuterung	günstig	ungünstig	Begründung
1	Material mit bereits etablierten Verwertungssystemen nutzen	Baustoffe oder Bauprodukte auswählen, für die es eine stoffliche Verwertung gibt.	Rein mineralische Baumaterialien (z.B. Beton, Ziegel, Glas) Metalle (z.B. Stahl und Aluminium) PVC-Fenster und PVC-Abdichtungsbahnen, Unbehandelte Hölzer, Gipskartonplatten	keine Verwendung von Verbundbaustoffen oder Verbundbauprodukten ⁸ ohne etablierten Verwertungsweg	Vorhanden Verwertungssysteme gewährleisten stoffliche Verwertung, Verbundbaustoffe mit organischen Materialien, thermische Verwertung möglich, ohne organische Materialien Deponierung
2	Besonders besorgniserregende und gefährliche Stoffe vermeiden	Baustoffe oder Bauprodukte verwenden, die keine besonders besorgniserregenden ⁹ oder gefährlichen Stoffe enthalten.	Holzkonstruktionen für Wände und Dächer wählen, die ohne chemischen Holzschutz ausgeführt werden können ¹⁰	Flammschutzmittel, Biozide, chemischer Holzschutz ¹¹	Mineralische Stoffgemische erhalten aufwendige Vorbehandlung in Bodenwaschanlagen zur Einhaltung der LAGA-

8 Verbundbaustoffe sind Bauprodukte, die aus fest miteinander verbundenen unterschiedlichen Materialien bestehen, z.B. Sandwich-Elemente für Trapezdächer, Vorhangfassaden, mehrschichtige Dämmelemente, gedämmte Ziegel.

9 Informationen darüber, in welchen Baustoffen und -materialien besonders besorgniserregende Stoffe (SVHC) enthalten sind, finden sie hier: SVHC am Beispiel von Flammschutzmitteln in Bauprodukten

10 Konstruktionen nach DIN 68800-2:2012-02 Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau

Nr.	Prinzip	Erläuterung	günstig	ungünstig	Begründung
			(z. B. nach BNB-KSB 1.1.6)		Grenzwerte (Deponierung dennoch nicht ausgeschlossen).
3	Bevorzugt Materialien mit gemeinsamen Verwertungsweg kombinieren	Keine Vermischung von Materialien, die dazu führen, dass einzelne Baustoffe aus dem stofflichen Verwertungskreislauf ausscheiden.	Mineralische und organische Materialien nicht vermischen. Beton oder ungedämmte Ziegel mit Normalmörtel und Kalk- oder Kalkzementputz ¹²	Gipsputz oder –estrich auf mineralischen Untergründen, mit organischen Dämmstoffen gedämmte Ziegel, Dämmputze mit organischen Bestandteilen, Vorhangfassaden mit Sandwichpaneel ¹³ ,	Stoffgemische mit organischen Anteilen können je nach Zusammensetzung und Art der Bestandteile thermisch verwertet werden.
4	Sortenreine Trennbarkeit erleichtern	Baukonstruktionen vermeiden, bei denen einzelne Bauteilschichten	Außenwände mit vorgehängter hinterlüfteter Bekleidung ¹⁴ , Vorhangfassaden mit		Oft aufwendige manuelle Trennung erforderlich, keine Technik am Markt, die

11 Die Liste besonders besorgniserregende Stoffe sind auf der Kandidatenliste der ECHA veröffentlicht. Eine Identifizierung der stofflichen Zusammensetzung kann durch Angaben in Sicherheitsdatenblättern erfolgen. Liegt kein Sicherheitsdatenblatt vor, kann dazu eine Anfrage beim Hersteller erfolgen. Der Hersteller ist aussagepflichtig. Hierfür stellt das Umweltbundesamt den Musterbrief „Musterbrief SVHC-Anfrage REACH“ bereit.

Die Liste gefährlicher Stoffe ist in der Gefahrstoffverordnung Anhang II enthalten. Auf der Suche nach gefährlichen Stoffen in Bauprodukten erhält man auch bei der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft Informationen. Außerdem ist hier eine Übersicht über in Deutschland zugelassene Holzschutzmittel zu finden.

12 Normalmörtel besteht wie Kalk- oder Kalkzementputz in seiner Zusammensetzung aus Kalk, Zement und Sand.

13 Zur Vorhangfassade siehe auch <https://de.wikipedia.org/wiki/Vorhangfassade>

Nach DIN EN 13830:2015-07 - Vorhangfassaden ist ein Sandwichpaneel ein Verbundmaterial „bestehend aus zwei Flächen, die auf beiden Seiten eines Kerns positioniert sind, der aus wärmedämmendem Material hergestellt sein kann und so mit den beiden Flächen verbunden ist, dass diese Bauteile unter Belastung im Verbund wirken“

14 Nach DIN 18516 - Außenwandbekleidungen, hinterlüftet besteht die Konstruktion aus folgenden Elementen, die meist punktförmig mechanisch miteinander verbunden sind:

Nr.	Prinzip	Erläuterung	günstig	ungünstig	Begründung
		unlösbar miteinander verbunden sind.	Ausfachungspaneel ohne Verbund ¹⁵ Flachdächer mit lose verlegten bzw. nur punktuell mechanisch befestigten Abdichtungsbahnen, Dachdämmung in Steildachkonstruktionen	Wärmedämmverbundsysteme	für den schichtweisen Rückbau von Wärmedämmverbundsystemen eingesetzt werden kann
5	Materialvielfalt begrenzen	Auf ein Minimum an Materialvielfalt achten, Prüfen, ob Schichten oder Materialien entfallen können oder ob Materialien der gleichen Stoffgruppe verwendet werden können.	Einschichtige Konstruktionen, z.B. Sichtbeton-Bauteile, Verwendung von gleichen Materialien in unterschiedlichen Bauteilschichten, z.B. Stahlbetondecke mit Verbund-Zementestrich oder zweischalige Wand aus Wandschalen gleichen Materials	Mehrschichtige Konstruktionen, z.B. Wand in Holzrahmenbauweise mit massiver Vorsatzschale	geringerer Aufwand bei Rückbau und Trennung, weniger unterschiedliche Entsorgungswege

- einer Tragschicht,
- einer Unterkonstruktion in der die Dämmebene integriert ist,
- einer Luftschicht (Hinterlüftungsebene)
- einer äußeren Bekleidung

15 Nach DIN EN 13830:2015-07 – Vorhangfassaden bestehen Ausfachungspaneel ohne Verbund „aus einer äußeren Scheibe, einem Abstandshalter, einem Kern, einer Dampfsperre und hinteren Innenscheibe“.

2. Baurechtliche Einordnung

2.1 Errichtung von baulichen Anlagen

Bei der klassischen Bauplanung standen bisher die Baukosten, also die Kosten für die Herstellung des Gebäudes, im Vordergrund. Mit der lebenszyklusorientierten Planung nach BNB wurde der Blick auf die Nutzungs- und Instandhaltungskosten erweitert. Das Nutzungsende eines Gebäudes wird derzeit jedoch meist nicht berücksichtigt. Dabei können auch durch den Gebäuderückbau und die Entsorgung der anfallenden Baustofffraktionen erhebliche Kosten entstehen. Wie hoch diese sein werden, ist jedoch nur mit hohen Unsicherheiten einschätzbar. Hierfür können exemplarisch folgende Gründe genannt werden:

- die in der Regel lange Nutzungsdauer von Gebäuden,
- die zunehmend höheren Anforderungen an Baukonstruktionen, wie z.B. an den Brandschutz, Wärmeschutz, Schallschutz etc.,
- die Verknappung des Deponieraums,
- gesetzgeberische Verschärfungen.

Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass Baumaterialien, die nach dem Rückbau sortenrein und ohne gefährliche Stoffe vorliegen, in einen Verwertungskreislauf zurückgeführt werden. Demzufolge kann der Gebäuderückbau beim Ziel nachhaltig zu bauen nicht vernachlässigt werden und spielt - neben den ökologischen Belangen - sowohl betriebs- als auch volkswirtschaftlich eine zunehmende Rolle.

Dieses ist auch ein Grund dafür, dass der öffentliche Bauherr verpflichtet ist, die Nachhaltigkeit durch Anwendung des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB) des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) bei der Planung eines Gebäudes zu berücksichtigen.

Baurechtliche Grundlagen, den Gebäuderückbau bereits in der Planungsphase eines Bauwerks zu berücksichtigen, existieren derzeit noch nicht.

2.2 Regelungen im Baurecht

Das Baurecht umfasst das Bauordnungsrecht, das Bauplanungsrecht sowie das Baunebenrecht.

Die Klassifizierung der Gebäude erfolgt gemäß der Berliner Bauordnung in §2 Abs. 3 durch die Gebäudeklassen. Je höher die Gebäudeklasse, desto höher auch die Anforderungen, z. B. an den baulichen Brandschutz. Tabellarisch kann die Definition der Gebäudeklassen wie folgt zusammengefasst werden.

Tabelle 5: Gebäudeklassen nach Berliner Bauordnung §2, Abs.3

Gebäudeklasse	Standort	Nutzung	Anzahl der Nutzungseinheiten	Brutto-Grundfläche	Gebäudehöhe
1	Freistehende Gebäude	k.A.	≤ 2	≤ 400 m ²	≤ 7m
		land- und forstwirtschaftlich	k.A.	k.A.	k.A.
2	Gebäude	k.A.	≤ 2	≤ 400 m ²	≤ 7m
3	Sonstige Gebäude	k.A.	k.A.	> 400 m ²	≤ 7m
4	Gebäude	k.A.	> 2	≤ 400 m ² / Nutzungseinheit	> 7m ≤ 13m
5	Sonstige Gebäude, einschließlich unterirdischer Gebäude	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Baurechtlich können Büro- und Verwaltungsgebäude darüber hinaus nach §2, Abs.4 zu Sonderbauten gehören, wenn die folgenden Merkmale zutreffen.

§ 2 (4) Sonderbauten sind Anlagen und Räume besonderer Art oder Nutzung, ...:

- Hochhäuser (Gebäude mit einer Höhe von mehr als 22m)
- Gebäude mit mehr als 1.600 m² Brutto-Grundfläche des Geschosses mit der größten Ausdehnung, ausgenommen Wohngebäude ...
- Gebäude mit Räumen, die einer Büro- oder Verwaltungsnutzung dienen und einzeln eine Brutto-Grundfläche von mehr als 400 m² haben, ...“

Bei Sonderbauten gibt es weiterführende Anforderungen. Es bestehen zudem Besonderheiten im Baugenehmigungsverfahren.¹⁶

2.3 Verordnungen, Vorschriften und Richtlinien zu energetischen Gebäudestandards

Gebäude müssen neben der Standsicherheit und dem Brandschutz vor allem Anforderungen an den Wärme- und Schallschutz erfüllen. Daraus resultiert ein Wandel in der Anwendung von

¹⁶ Ausführungsvorschriften zu Sonderbauten und Garagen (AV Sonderbauten - Garagen) 2016

Baukonstruktionen und Baumaterialien für die Gebäudehülle, der im Hinblick auf das Recycling massen- bzw. volumenrelevant werden kann.

Wärmeschutz

Um die Entwicklung abzuschätzen, werden im Folgenden die zu erwartenden energetischen Standards vom Niveau der derzeit gültigen Energieeinsparverordnung EnEV 2016 bis hin zum Niedrigstenergiegebäude (Neubau UBA 2019) am Beispiel des Wärmedurchgangskoeffizienten U dargestellt.

Tabelle 6: Anforderungsniveau gemäß EnEV ab dem 01.01.2016 für Nichtwohngebäude

Bauteile der wärmeübertragenden Gebäudehülle	Mittlere Wärmedurchgangskoeffizienten
Opake Außenbauteile, z.B. Wände und Dächer	$\bar{U} \leq 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Transparente Außenbauteile, z.B. Fenster	$\bar{U} \leq 1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Vorhangfassaden	$\bar{U} \leq 1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Glasdächer, Lichtbänder, Lichtkuppeln	$\bar{U} \leq 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Im Anhang I der Berliner Verwaltungsvorschrift Umwelt und Bauen vom 23.02.2016¹⁷ sind in den Abschnitten 27 und 28 die Mindestanforderungen an die energetische Qualität von Außenbauteilen definiert (siehe Tabelle 7). Die angegebenen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) müssen gegebenenfalls entsprechend der Anforderungen an den Jahres-Primärenergiebedarf des gesamten Gebäudes angepasst werden. Dadurch würde sich der energetische Standard der Gebäudehülle erhöhen.

Tabelle 7: Energetische Qualität von Außenbauteilen nach Verwaltungsvorschrift Umwelt und Bauen vom 23.02.2016, Anhang I, Abschnitte 27 und 28

Bauteile der wärmeübertragenden Gebäudehülle	Wärmedurchgangskoeffizienten
Außenwand	$U \leq 0,22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Fenster	$U \leq 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Oberste Geschossdecke, Decken gen Außenluft, Dächer, Dachschrägen	$U \leq 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Die EU Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden sieht vor, dass „nach dem 31.12.2018 neue Gebäude, die von Behörden als Eigentümer genutzt werden, Niedrigstenergiege-

¹⁷ Verwaltungsvorschrift für die Anwendung von Umweltschutzanforderungen bei der Beschaffung von Liefer-, Bau- und Dienstleistungen vom 23.02.2016 (Verwaltungsvorschrift Beschaffung und Umwelt Berlin - VwVUB)

bäude sind.⁴¹⁸ Wie dieser Standard national umgesetzt wird, bleibt abzuwarten. Sicher ist, dass sich die Anforderungen an die Gebäudehülle nochmals erhöhen werden.

In der Praxis gibt es noch weitere Energiestandards, z.B. den Passivhausstandard oder die KfW-Effizienzhaus-Standard. Bei umgesetzten Bauprojekten, wie zum Beispiel beim Gebäude UBA2019 in Berlin-Marienfelde, einem Bürogebäude mit BNB-Gold-Zertifizierung, wurden deutlich geringere U-Werte, als nach EnEV 2016 gefordert, erreicht. Tabelle 8 gibt dazu eine Übersicht.

Tabelle 8: Übersicht zu verschiedenen Anforderungen an Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) bei verschiedenen Energiestandards im Vergleich zum UBA 2019

Bauteile der wärmeübertragenden Gebäudehülle	Verwaltungsgebäude UBA 2017 BNB-Zertifikat GOLD	Passivhaus	KfW-Effizienzhaus 55
Bodenplatte	U = 0,11 W/(m ² K)	U ≤ 0,15 W/(m ² K)	U ≤ 0,25 W/(m ² K)
Außenwand	U = 0,10 W/(m ² K)	U ≤ 0,15 W/(m ² K)	U ≤ 0,20 W/(m ² K)
Fenster	U = 0,80 W/(m ² K)	U ≤ 0,80 W/(m ² K)	U ≤ 0,90 W/(m ² K)
Dach	U = 0,08 W/(m ² K)	U ≤ 0,15 W/(m ² K)	U ≤ 0,14 W/(m ² K)

Um die abstrakten U-Werte durch Baukonstruktionen zu veranschaulichen wurden in Tabelle 9 die erforderlichen Dämmschichtdicken zur Erreichung der oben genannten Energiestandards nach Tabelle 6 und Tabelle 8 berechnet.

Tabelle 9: Analyse zu erforderlichen Dämmschichtdicken bei ausgewählten Außenwandkonstruktionen

Bauteile	Beton, d = 20 cm, λ = 2,5 W/(mK)		Kalksandstein, d = 30 cm, λ = 0,99 W/(mK)		Porenbeton, d = 48 cm, λ = 0,08 W/(mK)		Leichtlochziegel, d = 50 cm, λ = 0,08 W/(mK)	
Energiestandard	Dämmschichtdicken bei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten λ [W/(mK)] der Dämmung							
	0,04	0,035	0,04	0,035	0,040	0,035	0,04	0,035
EnEV 2016 U ≤ 0,28 W/(m ² K)	13 cm	12 cm	14 cm	12 cm	keine zusätzliche Dämmung erforderlich		keine zusätzliche Dämmung erforderlich	
KfW 55 U ≤ 0,20 W/(m ² K)	19 cm	16 cm	18 cm	16 cm				

¹⁸ Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, Artikel 9, Satz 1b

Bauteile	Beton, d = 20 cm, $\lambda = 2,5 \text{ W/(mK)}$	Kalksandstein, d = 30 cm, $\lambda = 0,99 \text{ W/(mK)}$	Porenbeton, d = 48 cm, $\lambda = 0,08 \text{ W/(mK)}$	Leichtlochziegel, d = 50 cm, $\lambda = 0,08 \text{ W/(mK)}$				
Energie- standard	Dämmschichtdicken bei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten $\lambda \text{ [W/(mK)]}$ der Dämmung							
	0,04	0,035	0,04	0,035	0,040	0,035	0,04	0,035
Passivhaus $U \leq 0,15$ $\text{W/(m}^2\text{K)}$	25 cm	22 cm	24 cm	21 cm	2 cm	2 cm		
UBA 2019 $U \leq 0,10$ $\text{W/(m}^2\text{K)}$	40 cm	34 cm	38 cm ¹⁹	34 cm	16 cm	14 cm	14 cm	12 cm

Es zeigt sich, dass zukünftig unabhängig vom Wandbildner zusätzliche Dämmsysteme erforderlich werden, um noch vertretbare Gesamtkonstruktionsdicken zu gewährleisten. Aufgrund der anwachsenden Volumina an zukünftig zu entsorgender Dämmstoff resultiert die Notwendigkeit mögliche quantifizierende Bewertungen der Recyclingeffizienz nicht nur massebezogen sondern auch volumenbezogen durchzuführen.

Schallschutz

Im städtischen Raum spielen der Schallschutz gegen Außenlärm sowie der bauliche Schallschutz zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten innerhalb eines Gebäudes eine wesentliche Rolle und muss gemäß DIN 4109-1:2018-17²⁰ beachtet werden.

Um zu überprüfen, ob die untersuchten Wandkonstruktionen nach zukünftigen energetischen Gebäudestandards auch die Anforderungen an den Schallschutz erfüllen können oder baukonstruktive Zusatzmaßnahmen erforderlich werden, ist in Tabelle 10 das Direktschalldämm-Maß $R'_{Dd,w}$ angegeben.

Anforderungen zum Schutz gegen Außenlärm ergeben sich gemäß DIN 4109-1:2018-01, Abschnitt 7 in Abhängigkeit vom maßgeblichen Außenlärmpegel L_a für Büroräume nach der Gleichung:

erf $R'_{w,ges} = L_a - 35 \text{ dB}$. Mindestens ist jedoch ein $R'_{w,ges}$ von 30 dB einzuhalten.

Als Kenngröße dient das resultierende Schalldämm-Maß $R'_{w,ges}$ der Hüllfläche des betrachteten Raumes, das sich aus den Schalldämm-Maßen der einzelnen Bauteile (Wand, Dach, Fenster, Tür) und weiterer Außenwandelemente (Lüftungsöffnungen, Elemente der Verschattungseinrichtungen) mit

¹⁹ UBA2019-Standard (annähernd gleicher U-Wert), auch bei Kalksandstein, d = 17,5 cm bzw. 24 cm, $\lambda = 0,99 \text{ W/(mK)}$

²⁰ DIN 4109-1:2018-01, Schallschutz im Hochbau, Teil 1: Mindestanforderungen

deren jeweiligen Flächenanteilen ergibt. Das Schalldämm-Maß der Außenwand selbst wird maßgeblich von den schalltechnischen Eigenschaften der Außendämmung beeinflusst.

Der Vergleich zeigt, dass Wärmedämmverbundsysteme mit Dämmschichten geringer dynamischer Steifigkeit $s' = E_{\text{dyn}} / d_{\text{WD}}$ (z.B. $s' = 5 \text{ MN/m}^3$) die höchsten Schalldämm-Maße erzielen. Dämmstoffe mit hohem dynamischen Elastizitätsmodul E_{dyn} - wie nicht elastifiziertes Polystyrol oder Mineralfaser-Lamellen - verschlechtern das Schalldämm-Maß, höhere Dämmstoffdicken d_{WD} verbessern es.

Konstruktionen ohne Zusatzdämmung weisen auf Grund ihrer geringen Rohdichte und der daraus resultierenden geringen flächenbezogenen Masse geringe Schalldämm-Maße auf.

Darüber hinaus wird deutlich, dass die höheren Anforderungen an den Wärmeschutz bei sämtlichen Varianten zu keiner Reduzierung, sondern vielmehr zu einer Verbesserung des Schallschutzes führen.

Anhaltswerte für Schalldämm-Maße von Außenwandkonstruktionen in Massivholz- und Holzrahmenbauweise sind bei Herstellern oder unter <https://www.dataholz.eu/> zu finden.

Tabelle 10: Schalldämm-Maße für massive Außenwandkonstruktionen nach Tabelle 9

Bauteile	Beton, d = 20 cm, $\lambda = 2,5 \text{ W}/(\text{mK})$		Kalksandstein, d = 30 cm, $\lambda = 0,99 \text{ W}/(\text{mK})$		Porenbeton, d = 48 cm, $\lambda = 0,08 \text{ W}/(\text{mK})$		Leichtlochziegel, d = 50 cm, $\lambda = 0,08 \text{ W}/(\text{mK})$	
Energie- und Schalldämm- standard	Dämmschichtdicken bei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten λ [W/(mK)] der Dämmung							
	0,04	0,035	0,04	0,035	0,040	0,035	0,04	0,035
EnEV 2016 $U \leq 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	13 cm	12 cm	14 cm	12 cm	keine zusätzliche Dämmung erforderlich			
$R'_{\text{Dd,w}21}$ Miwo-Platte	$\approx 61 \text{ dB}^{22}$		$\approx 62 \text{ dB}^{23}$	$\approx 61 \text{ dB}^{22}$	Ohne Dämmung $\approx 48 \text{ dB}$		Ohne Dämmung $\approx 56 \text{ dB}$	
$R'_{\text{Dd,w}}$ Miwo-Lamelle	$\approx 53 \text{ dB}^{24}$							
KfW 55 $U \leq 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	19 cm	16 cm	18 cm	16 cm	keine zusätzliche Dämmung erforderlich			
$R'_{\text{Dd,w}}^{97}$ Miwo-Platte	$\approx 62,4 \text{ dB}^{23}$				Ohne Dämmung $\approx 48 \text{ dB}$		Ohne Dämmung $\approx 56 \text{ dB}$	
$R'_{\text{Dd,w}}$ Miwo-Lamelle	$\approx 52 \text{ dB}^{25}$	$\approx 53 \text{ dB}^{24}$	$\approx 52 \text{ dB}^{25}$	$\approx 53 \text{ dB}^{24}$				

- 21 Direkt-Schalldämm-Maß einschließlich Wärmedämmverbundsystem, berechnet nach Fachverband Wärmedämmverbund-Systeme e.V. - Technische System Info 7 – WDV-Systeme zum Thema Schallschutz, 2013
- 22 Dämmstoff: Steinwolle-Platte, dynamische Steifigkeit $s' = 7 \text{ MN} / \text{m}^3$, Längenbezogener Strömungswiderstand $r \geq 30 \text{ kPa s} / \text{m}^2$, Putz: Kalkzementputz $d = 0,015 \text{ m}$
- 23 Dämmstoff: Steinwolle-Platte, dynamische Steifigkeit $s' = 5 \text{ MN} / \text{m}^3$, Längenbezogener Strömungswiderstand $r \geq 30 \text{ kPa s} / \text{m}^2$, Putz: Kalkzementputz $d = 0,015 \text{ m}$
- 24 Dämmstoff: Steinwolle-Lamelle, dynamische Steifigkeit $s' = 80 \text{ MN} / \text{m}^3$, Längenbezogener Strömungswiderstand $r \geq 15 \text{ kPa s} / \text{m}^2$, Putz: Kalkzementputz $d = 0,015 \text{ m}$

Bauteile	Beton, d = 20 cm, $\lambda = 2,5 \text{ W/(mK)}$	Kalksandstein, d = 30 cm, $\lambda = 0,99 \text{ W/(mK)}$	Porenbeton, d = 48 cm, $\lambda = 0,08 \text{ W/(mK)}$	Leichtlochziegel, d = 50 cm, $\lambda = 0,08 \text{ W/(mK)}$				
Energie- und Schalldämm- standard	Dämmschichtdicken bei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten λ [W/(mK)] der Dämmung							
	0,04	0,035	0,04	0,035	0,040	0,035	0,04	0,035
Passivhaus $U \leq 0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	25 cm	22 cm	24 cm	21 cm	2 cm	2 cm		
$R'_{Dd,w}$ Miwo-Platte	$\approx 62 \text{ dB}^{23}$				--^{26}		Ohne Dämmung $\approx 56 \text{ dB}$	
$R'_{Dd,w}$ Miwo-Lamelle	--^{27}	$\approx 53 \text{ dB}^{28}$						
UBA 2019 $U \leq 0,10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	40 cm	34 cm	38 cm	34 cm	16 cm	14 cm	14 cm	12 cm
$R'_{Dd,w}$ Miwo-Platte	$\approx 62 \text{ dB}^{23}$							$\approx 61 \text{ dB}^{22}$
$R'_{Dd,w}$ Miwo-Lamelle	--^{27}				$\approx 55 \text{ dB}^{24}$			

-
- 25 Dämmstoff: Steinwolle-Lamelle, dynamische Steifigkeit $s' = 60 \text{ MN / m}^3$, Längenbezogener Strömungswiderstand $r \geq 15 \text{ kPa s / m}^2$, Putz: Kalkzementputz d = 0,015 m
- 26 Einbau einer 2cm dicken Dämmschicht wäre zwar technisch möglich, entspricht baupraktisch nicht dem Stand der Technik
- 27 Miwo-Lamelle nur bis zu einer Dicke von 24 cm erhältlich
- 28 Dämmstoff: Steinwolle-Lamelle, dynamische Steifigkeit $s' = 40 \text{ MN / m}^3$, Längenbezogener Strömungswiderstand $r \geq 15 \text{ kPa s / m}^2$, Putz: Kalkzementputz d = 0,015 m

2.4 Rückbau von baulichen Anlagen

2.4.1 Regelungen im Baurecht

Im Sinne der Berliner Bauordnung (BauO Bln)²⁹ ist der Rückbau von Gebäuden die „Beseitigung von Anlagen“.

Dabei werden **verfahrenspflichtige und verfahrensfreie Bauvorhaben** unterschieden.

Im §53 (1) Satz 1 heißt es, dass „die Bauherrin oder der Bauherr ... zur Vorbereitung, Überwachung und Ausführung ... der Beseitigung von Anlagen geeignete Beteiligte nach Maßgabe der §§ 54 bis 56 zu bestellen, soweit sie oder er nicht selbst zur Erfüllung der Verpflichtungen nach diesen Vorschriften geeignet ist.“¹⁰

Gemäß BauO Bln §62 (3) Satz 1 sind die Beseitigung von Anlagen nach §61 (1) sowie die Beseitigung freistehender Gebäude der Gebäudeklassen 1 und 3 **verfahrensfrei**.

Zu freistehenden Gebäuden gehören folgende Gebäude:

Tabelle 11: Freistehenden Gebäuden nach §2 (3)

Gebäudeklasse	Standort	Nutzung	Anzahl der Nutzungseinheiten	Brutto-Grundfläche	Gebäudehöhe
1	Freistehende Gebäude	-	≤ 2	≤ 400 m ²	≤ 7m
		land- und forstwirtschaftlich	-	-	-
3	Sonstige Gebäude	-	-	> 400 m ²	≤ 7m

In §61 (3) Satz 2 ist festgelegt, dass die „beabsichtigte Beseitigung von Anlagen **mindestens einen Monat zuvor** der Bauaufsichtsbehörde anzuzeigen“ ist.

Werden nicht freistehende Gebäude abgebrochen, muss die Standsicherheit des Gebäudes gemäß §61 (3) Satz 3 „durch einen qualifizierten Tragwerksplaner im Sinn des § 66 (2) beurteilt und im erforderlichen Umfang überwacht werden; die Beseitigung ist, soweit notwendig, durch den qualifizierten Tragwerksplaner zu überwachen.“ Gemäß § 66 (1) Satz 1 müssen der Baubehörde für die Beseitigung von baulichen Anlagen keine bautechnischen Nachweise (z.B. der Standsicherheit) vorgelegt werden; soweit es sich um verfahrensfreie Vorhaben handelt.

Nach der Bauverfahrensverordnung (BauVerfVO)³⁰ § 6 (1) sind für die Beseitigung von Anlagen der Bauaufsichtsbehörde „... ein Auszug aus der Flurkarte, der die Lage der zu beseitigenden Anlagen

29 Bauordnung für Berlin (BauO Bln), vom 29. September 2005, zuletzt geändert am 17. Juni 2016

unter Bezeichnung des Grundstücks nach Straße und Grundstücksnummer und die Nachbargebäude darstellt...“ vorzulegen.

Weiterhin ist gemäß §6 (2) der Fragebogen des Amtes für Statistik Berlin-Brandenburg für die Statistik des Bauabgangs gemäß Hochbaustatistikgesetz vom 5. Mai 1998 ausgefüllt einzureichen.

Für die Anzeige zur Beseitigung baulicher Anlagen ist das Formular – Bauaufsicht 104 zu verwenden.

2.4.2 Regelungen im Abfallrecht

Das Abfallrecht ist nicht losgelöst vom Umweltrecht und Arbeitsschutz zu betrachten.

Im Abfallrecht geht es um die Definition und die Klassifizierung von Abfall, das heißt die Zuordnung von Abfällen zu verschiedenen Abfallfraktionen. Unterschieden werden immer gefährliche und nicht gefährliche Abfälle. Was gefährlicher oder nicht gefährlicher Abfall ist, wird bestimmt durch gefahrenrelevante Eigenschaften, die in der Abfallrahmenrichtlinie Anhang III zusammengestellt sind. Ob eine oder mehrerer dieser Eigenschaften zutreffen, kann anhand von Stoffkonzentrationen oder aufgrund der Ergebnisse international anerkannter Testmethoden bewertet werden.

Vorrangig geht es immer um Abfallvermeidung, die Getrennthaltung und die sortenreine Erfassung einzelner Stofffraktionen sowie um eine möglichst stoffliche Verwertung.

Auf welche Art und Weise rückgebaute Stoffe verwertet werden sollen, ist jedoch nicht verbindlich vorgegeben. Die im Kreislaufwirtschaftsgesetz ehemals gültige Heizwertklausel 11 MJ /kg kann übergangsweise noch herangezogen werden, ist jedoch nicht als starre Vorgabe zu betrachten. Beispielsweise können Materialien mit geringerem Heizwert auch thermisch verwertet werden, wenn dies besser für den Schutz von Mensch und Umwelt ist. Andererseits können Materialien mit höherem Heizwert auch wiederverwendet oder stofflich verwertet werden, wenn es dazu praktikable Möglichkeiten gibt.

Das eine Verwertung bestmöglich gelingen kann und dadurch gleichzeitig Rückbaukosten für Vorbehandlung und Aufbereitung von Abfall möglichst gering ausfallen, sind bereits bei der Planung von Gebäuden Konstruktionsgrundsätze zu beachten. Durch den Erhalt des stofflichen Verwertungspotentials werden nicht nur natürliche Rohstoffressourcen sondern auch Deponieräume geschont.

Die Regelungen des Arbeits- und Umweltschutzes wirken sich besonders auf den organisatorischen und zeitlichen Ablauf eines Rückbauvorhabens und somit auch auf die Rückbaukosten aus. Je mehr Gefahrstoffe³¹ für Mensch und Umwelt auf der Baustelle identifiziert werden, desto aufwendiger wird das Rückbauvorhaben.

Tabelle 12 und Tabelle 13 zeigen ausgewählte Gesetze (Stand Oktober 2017) und ihre Bezüge zur Baupraxis.

30 Verordnung über Bauvorlagen, bautechnische Nachweise und das Verfahren im Einzelnen (Bauverfahrensverordnung - BauVerfVO), vom 19. 10 2006, zuletzt geändert am 04.02.2016

31 „Gefahrstoffe sind Stoffe oder Gemische, die für Mensch oder Umwelt gefährlich sein können oder schädigende Wirkung haben.“ Weitere Informationen unter www.baua.de

Tabelle 12: Richtlinien, Gesetze und Verordnungen zum Umgang mit Abfall aus dem Baubereich

Richtlinien, Gesetze und Verordnungen	Zweck und Anwendungsbereich	Ausgewählte Inhalte	Bezug zum Planen, Errichten und Rückbau von Gebäuden
RICHTLINIE 2008/98/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. November 2008 über Abfälle	„Mit dieser Richtlinie werden Maßnahmen zum Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit festgelegt, indem die schädlichen Auswirkungen der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen vermieden oder verringert, die Gesamtauswirkungen der Ressourcennutzung reduziert und die Effizienz der Ressourcennutzung verbessert werden. “	Abfallvermeidung die oberste Priorität	Nutzen von Hersteller-Rücknahmesystemen für Bauprodukte während der Errichtung, siehe Tabelle 18 bis Tabelle 21
		Einführung der erweiterten Herstellerverantwortung	Produkte mit Recyclingpotential verwenden
Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen vom 24.02.2012	„Zweck des Gesetzes ist es, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen.“	5-stufige Abfallhierarchie	
		1. Vermeiden von Abfällen „...jede Maßnahme, die ergriffen wird, bevor ein Stoff, Material oder Erzeugnis zu Abfall geworden ist,...“	Vermeidung z.B. Verschnitt während der Errichtung durch maß- und mengengenaue Planung
		2. Vorbereitung zur Wiederverwendung „... jedes Verwertungsverfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur, bei dem Erzeugnisse, die zu Abfällen geworden sind, so vorbereitet werden, dass sie ohne weitere Vorbehandlung wieder für denselben Zweck verwendet werden können, für den sie ursprünglich bestimmt waren. „	Einbaumethoden wählen, die einen Rückbau ohne Beschädigungen und Verunreinigungen ermöglichen sowie sorgfältige Demontage bzw. Rückbau auf der Baustelle • Bauteile, wie z.B. Fenster, Türen, Bekleidungen, Dachziegel (meist problematisch, da Bereitschaft gering ist, Produkte mit Gebrauchsspuren zu akzeptieren)

Richtlinien, Gesetze und Verordnungen	Zweck und Anwendungsbereich	Ausgewählte Inhalte	Bezug zum Planen, Errichten und Rückbau von Gebäuden
			<ul style="list-style-type: none"> Baustoffe, wie z.B. lose verbaute Dämmstoffe aus dem Dach oder Innenwandausbau
		<p>3. Recycling</p> <p><i>„... ist jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen ... entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung ... zur Verfüllung bestimmt sind.“</i></p>	<p>Produkte mit Recyclingpotential verwenden, siehe Tabelle 18 bis</p> <p>Tabelle 21</p>
		<p>4. sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung</p>	<p>energetische Verwertung - siehe Kapitel 3.11.2</p> <p>Verfüllmaterial - siehe Tabelle 18 und Tabelle 19</p>
		<p>5. Beseitigung</p> <p><i>„... ist jedes Verfahren, das keine Verwertung ist, auch wenn das Verfahren zur Nebenfolge hat, dass Stoffe oder Energie zurückgewonnen werden.“</i></p>	<p>Abbruchmaterial, das auch nach einer Vorbehandlung oder Aufbereitung nur einer Deponie zugeführt werden kann, möglichst vermeiden</p>
		<p>Recyclingquote</p> <p>Vorbereitung zu Wiederwendung, das Recycling,</p>	<p>Kostengünstige regionale Sammelsysteme nutzen³²</p>

32 Schaffung von Marktanreizen, z.B. Sammelsystem für Gipskartonplatten, Senatsverwaltung organisiert Entgegennahme und Transport zur Recyclinganlage nach MUEG Sachsen, Bauherren und Entsorger sind immer bestrebt Kosten zu sparen.

Richtlinien, Gesetze und Verordnungen	Zweck und Anwendungsbereich	Ausgewählte Inhalte	Bezug zum Planen, Errichten und Rückbau von Gebäuden
		sonstige stoffliche Verwertung nicht gefährlicher Bau- und Abbruchabfälle (außer AVV 170504) bis 1.Januar 2020 \geq 70 Gew.-%	
		Getrennthaltungspflichten und Vermischungsverbot	Ausschließlich selektiver Rückbau, der weniger aufwendig umsetzbar bei Gebäuden ist, die unter Beachtung der Konstruktionsgrundsätze nach errichtet wurden.
Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen in Berlin vom 21.07.1999	„Zweck dieses Gesetzes ist die Förderung einer abfallarmen Kreislaufwirtschaft und die Sicherung der umweltverträglichen Abfallbeseitigung. “	Vorbildwirkung der öffentlichen Hand bei der „ Entwicklung und Anwendung von Verfahren zur umweltverträglichen Verwertung von Abfällen und die Durchführung von Sammlungen verwertbarer Abfälle und von Problemabfällen“	
Verordnung über die Entsorgung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen vom 18.04.2017	Diese Verordnung gilt unter anderem für die Bewirtschaftung, insbesondere die Erfassung, die Vorbehandlung, die Vorbereitung zur Wiederverwendung, das Recycling und die sonstige Verwertung von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen.	Abfallfraktionen jeweils getrennt zu sammeln, zu befördern ... vorrangig der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem Recycling zuzuführen Dokumentationspflicht für die Sammlung und Beförderung des entstandenen Abfalls	Vermeiden gefährlicher Stoffe beim Errichten von Gebäuden,
Verordnung über Deponien und Langzeitlager vom 27.04.2009	Diese Verordnung gilt unter anderem für die Ablagerung von Abfällen auf Deponien	Nach einer der chemischen Analyse der Zusammensetzung des Deponiegutes Zuordnung zu einer Deponieklasse oder Verwendung als Deponieersatzbaustoff	Deponien in Berlin nicht vorhanden, Nutzung von Deponien in Brandenburg (Knappheit von Deponieraum führt zu höheren Kosten)

Tabelle 13: Verordnungen zum Umgang mit gefährlichen und nicht gefährlichen Stoffen zum Schutz von Mensch und Umwelt

Verordnung	Zweck und Ziele	Ausgewählte Inhalte	Bezug zum Planen, Errichten und Rückbau von Gebäuden
<p>VERORDNUNG (EG) Nr. 850 / 2004 DES EURO-PÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 29. April 2004 über persistente organische Schadstoffe und zur Änderung der Richtlinie 79 / 117 / EWG von 2016</p>	<p><i>„ Unter Berücksichtigung insbesondere des Vorsorgeprinzips ist es das Ziel dieser Verordnung, die menschliche Gesundheit und die Umwelt vor persistenten organischen Schadstoffen zu schützen, und zwar durch das Verbot oder die möglichst baldige Einstellung oder die Beschränkung der Herstellung, des Inverkehrbringens und der Verwendung von Stoffen ...“</i></p>	<p>Umgang mit gefährlichen Abfälle und nicht gefährlichen Abfällen, die persistente organische Schadstoffe enthalten aber aufgrund der Unterschreitung der Stoffkonzentration, nicht als gefährlich gelten</p>	<p>Vermeiden von Baustoffen oder -materialien, die planmäßig mit Flammschutzmitteln oder Bioziden ausgestattet sind, z.B. organische Dämmstoffe oder Anstriche. Konstruktionen wählen, die den Einsatz von Materialien ohne o.g. Stoffe ermöglichen</p>
<p>Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz auf Baustellen vom 10.06.1998</p>	<p>Diese Verordnung dient der wesentlichen Verbesserung von Sicherheit und Gesundheitsschutz der Beschäftigten auf Baustellen.</p>	<p>Vorkehrungen zur Lagerung und Entsorgung der ... Abfälle, insbesondere der Gefahrstoffe sind zu treffen</p>	<p>Vermeiden von Bauprodukten oder -materialien die Gefahrstoffe enthalten bzw. bei deren ein- bzw. Ausbau Gefahrstoffe entstehen</p>

3. Recyclingpotenziale der Materialkreisläufe

Ein gesellschaftspolitisches Ziel ist es Wertstoffkreisläufe zu schließen, indem weitere Recyclingtechnologien mit zugehörigen Logistik- und Verwertungswegen entwickelt werden, die das Recycling immer wirtschaftlicher machen. Dazu gibt es bereits positive Beispiele, wie insbesondere die Materialkreisläufe der Metalle zeigen. Die derzeit realisierten Stoffkreisläufe weiterer Material- bzw. Abfallgruppen werden in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt. Die in den Abbildungen gestrichelt dargestellten Pfeile symbolisieren dabei Verwertungswege, die nach dem Stand der Forschung möglich sind, praktisch jedoch aus unterschiedlichen Gründen (z.B. fehlende Marktakzeptanz, zu hohe Kosten, noch im Pilotstadium etc.) noch nicht umgesetzt werden.

Wie bereits beschrieben, werden gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz neben der Wiederverwendung und der Beseitigung folgende Verwertungswege unterschieden in,

- Recycling
- Sonstige Verwertung
 - Verfüllungen (ungebundene Einbau im Straßen- und Tiefbau)
 - Thermische Verwertung

Die Potentiale für das Recycling, die Verfüllung und die thermische Verwertung, die in diesem Bericht für ausgewählte Baukonstruktionen detailliert beschrieben werden, werden als Qualitätsstufen eines Recyclingprodukts betrachtet.

Die Qualität von Recyclingprodukten hängt demzufolge von Verwertungswegen oder -technologien ab, die grundsätzlich möglich sind. Inwieweit diese in der Praxis etabliert sind, liegt wesentlich an wirtschaftlichen Faktoren und kann zudem regional unterschiedlich sein.

3.1 Qualitäten von Recyclingprodukten

Höchste Qualitäten für das Recycling ergeben sich immer dann, wenn Baumaterialien ohne Verunreinigung und sortenrein vorliegen. Materialien, die z.B. während des Einbaus als Verschnitt o.ä. anfallen, lassen sich demzufolge am ehesten wieder dem Herstellungsprozess zuführen. Dazu gehören zum Beispiel sortenrein gesammelte Mauersteine ohne Mörtelanhaftungen. Vielfach bestehende herstellereigene Rücknahmesysteme für Baustellenverschnitt garantieren den Rücktransport ins Produktionswerk. Für eine abfallarme Baustelle sollten deshalb Produkte bevorzugt werden, deren Hersteller Rücknahmesysteme anbieten.

Anders verhält sich die Materialqualität beim Gebäuderückbau. Hier liegen der Grad der Verunreinigung und der Sortenreinheit in den seltensten Fällen in einem Bereich, der für ein direktes Produktrecycling geeignet wäre.

Aber auch hier existieren Beispiele mit wirtschaftlich etablierten Produktrecycling-Systemen,

wie z. B.: Metalle (Tabelle 22), Gipskartonplatten (Tabelle 23), Lose verbaute Dämmstoffe (Tabelle 24) und PVC-Kunststoffe (Tabelle 25)

Ein Verfahren für das Recycling von Steinwollendämmung - selbst mit Verunreinigungen durch Putz- oder Kleberreste von Wärmedämmverbundsystemen - wurde bereits entwickelt und könnte zukünftig eingesetzt werden²².

Auch für EPS und XPS-Dämmungen existiert ein Verfahren zur stofflichen Rückgewinnung, das sog. CreaSolv-Verfahren, bei dem es auch möglich wird, Polystyrol (PS) chemisch vom Flammschutzmittel zu trennen. Ziel dieses Verfahrens ist es, das Styrol wieder in den Herstellungsprozess neuer Dämmmaterialien zurückzuführen und gleichzeitig die Bromverbindungen des Flammschutzmittels zu entfernen und Brom als Rohstoffquelle zu gewinnen.

3.2 Logistik und Transportwege

Voraussetzung für funktionierende Materialkreisläufe sind spezifische Sammel- und Transportsysteme zwischen Abfallerzeuger und Verwertungs- bzw. Recyclingunternehmen. Je besser die beim Rückbau anfallenden Bauabfälle vorsortiert werden, desto einfacher wird die nachfolgende Aufbereitung zum RC-Baumaterial. Häufig verhindern jedoch beengte Baustellenverhältnisse das parallele Einrichten von Lagern für die unterschiedlichen Abfallfraktionen. Deshalb ist eine Rückbauplanung stets unter Berücksichtigung der Abfalllogistik durchzuführen.

Auch der Transport zur Aufbereitungsanlage beeinflusst den Recyclingaufwand. Mit zunehmender Anzahl von Abfallfraktionen auf der Baustelle steigt der Transportaufwand. Je kürzer die Transportwege, desto wirtschaftlicher wird die Erzeugung von Recyclingbaustoffen. Dieses wirkt sich bei einer Lebenszyklusanalyse für die Herstellung des RC-Produktes auch auf den Primärenergieeinsatz und die verbundenen Umweltwirkungen aus.

Industriesymbiosen zwischen Abbruch- und Recyclingunternehmen sowie zwischen Recyclingunternehmen und verarbeitender Industrie gewährleisten dauerhafte Stoffkreisläufe.

3.3 Bauschutttaufbereitung

Die Aufbereitung von Bauschutt kann sowohl in stationären, als auch in mobilen Anlagen erfolgen.

Abbildung 4 zeigt die Verteilung der stationären Bauschutt-Recyclinganlagen in Berlin. Die Standorte dieser Anlagen sind nach Bundesimmissionsschutzverordnung genehmigt und werden streng überwacht. Daneben wird eine Vielzahl mobiler Anlagen betrieben. Mobile Anlagen sind bisher genehmigungsfrei. Die genaue Anzahl der Anlagen und deren erzeugte Aufbereitungsmengen sind nicht bekannt.

Es kann davon ausgegangen werden, dass mobile Anlagen einstufig arbeiten. D.h. das zu rezyklierende Material wird über ein Vorsieb in einen Grob- und Feinanteil getrennt und anschließend in einem Brecher zerkleinert. Mit einem Magnetabscheider kann vorhandener Stahl abgetrennt werden. In der Regel ist nur der Grobanteil als Recyclingmaterial nutzbar. Der Feinanteil kann für sonstige Verwertungen, evtl. für Verfüllungen genutzt, oder muss je nach Verunreinigung deponiert werden. Bei einstufigen Anlagen hängen die Qualität und die Quantität der erzeugten Recyclingmaterialien sehr stark vom Ausgangsmaterial ab.

Hingegen kann mit stationären Anlagen die zwei- oder mehrstufige Aufbereitungsmodule haben flexibler auf wechselnde Bau- und Abbruchabfälle reagiert werden. Folgende Module sind am Markt verfügbar: Unterschiedliche Brechertypen oder auch in Kombination arbeitend (Prall- und Backenbrecher), Windsichter zum Aussortieren von leichten Störstoffen, Bereiche zum händischen

Sortieren, Waschanlagen über die eine Dichtentrennung und die Reinigung von feinen Anhaftungen realisiert werden kann.

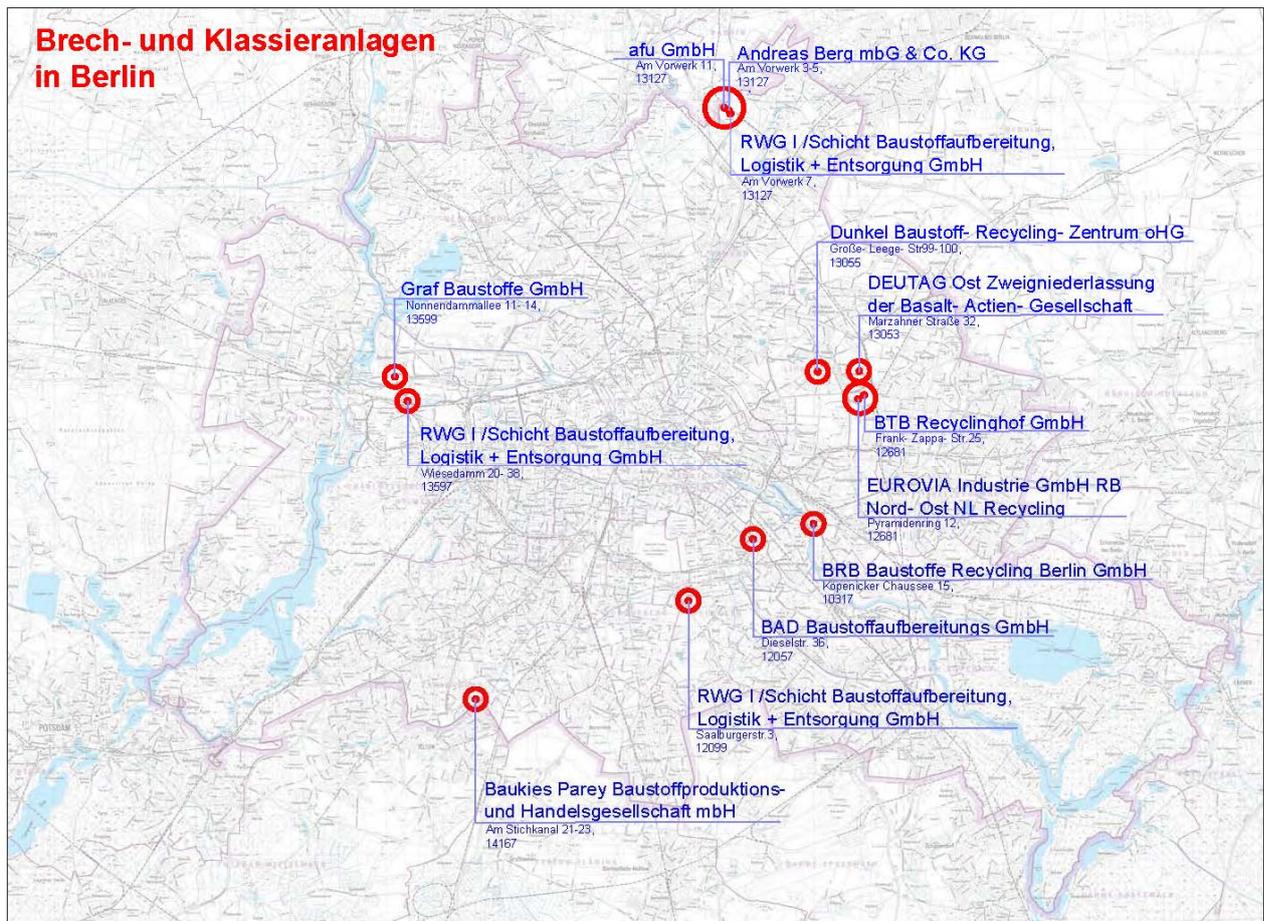


Abbildung 4: Stationäre Bauschutt-Recyclinganlagen in Berlin, Stand 09/2017

3.4 Baumaterialien für eine möglichen Verwertung

Bei der Aufbereitung zur Verwertung handelt es sich um Maßnahmen, die zur Erreichung von Materialqualitäten als Voraussetzung für bestimmte Verwertungswege dienen. Diese Voraussetzungen können die Zusammensetzung bzw. Sortenreinheit des Materialgemisches oder die Größe der Einzelbestandteile betreffen.

Um ein hohes Verwertungspotenzial zu erreichen, sind während des selektiven Rückbaus möglichst viele Materialien bereits möglichst sortenrein zu erfassen. Die wichtigsten Materialien im Hochbau sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 14: Häufige, auf der Baustelle zu selektierende Materialien

Mineralische Materialien	Organische Materialien (aus Erdöl)	Organische Materialien (aus nachwachsenden Rohstoffen)	Metalle
<ul style="list-style-type: none"> • Beton • Leichtbeton • Ziegel, Putz, Mörtel ohne Gips • Ziegel, Putz, Mörtel mit Gips • Gipskarton, • Kalksandstein, Putz, Mörtel ohne Gips • Kalksandstein, Putz, Mörtel mit Gips • Porenbeton, Putz, Mörtel ohne Gips • Porenbeton, Putz, Mörtel mit Gips • Glas- und Steinwollendämmung • Glas 	<ul style="list-style-type: none"> • hochpolymere Dämmstoffe (z.B. EPS, XPS, PUR) • Abdichtungen aus Bitumen oder Kunststoff • Hochpolymere Dampfbremsen • Fensterrahmen und Türen 	<ul style="list-style-type: none"> • Holz und Holzwerkstoffe • Holzfaser- und Hanfdämmung 	<ul style="list-style-type: none"> • Mischschrott • Scherenschrott • Aluminium • Blei • Edelstahl • Hartmetall • Kupferschrott • Messing • Zinn • Zink

3.5 Mineralische Materialien ohne Gips

Zu dieser Produktgruppe zählen alle Materialien wie Beton, Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton, Glas sowie auch Dämmstoffe (z.B. Stein- und Glaswolle).

3.5.1 Betone und Ziegel

Beton und Ziegel werden überwiegend als Verfüllmaterial im Tief- und Straßenbau (siehe Tabelle 18 und Tabelle 19) verwertet. Eine weitere Verwertungsmöglichkeit ist die Herstellung von Recycling-Gesteinskörnungen (überwiegend aus Beton) und deren Verwendung als Gesteinskörnung für die Betonherstellung.

Die Verwendung von Gesteinskörnungen aus rückgebautem Beton als Zuschlagstoff für Betone (RC-Beton) im Hochbau ist technisch möglich und gesetzlich geregelt. Unter rezyklierten Gesteinskörnung (RC-GK), werden gemäß DIN EN 206 Gesteinskörnungen verstanden, „*die durch Aufbereitung von vorher beim Bauen verwendeten anorganischen Stoffen gewonnen*“ wurden.³³ Dabei kann es sich um Betonsplitt, Ziegelsplitt oder einem Gemisch aus beidem handeln.³⁴

Normative Vorgaben sind gegeben in:

- a) DIN EN 12602³⁵ und DIN 1045-2³⁶ Anforderungen an Gesteinskörnungen
- b) DIN 4226-101³⁷ Stoffliche Zusammensetzung der Typen rezyklierter Gesteinskörnungen
- c) DIN EN 206³³ Empfehlungen für die Verwendung von groben rezyklierten Gesteinskörnungen in Beton (zulässige Massenanteile in Abhängigkeit von der Expositionsklasse des Bauteils)

Eine gute Übersicht über bau- und abfallrechtliche Anforderungen an RC-GK und RC-Beton sind im Abschnitt 4.1 des Brandenburger Leitfadens „Ausschreibungen“ zu finden.³⁸

Die Initiative Kreislaufwirtschaft Bau³⁹ veröffentlicht seit 2002 in ihren Monitoring-Berichten das statistische Aufkommen und den Verbleib mineralischer Bauabfälle in Deutschland.

33 DIN EN 206:2017-01 - Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität

34 BBSR, Forschung für die Praxis, Band 06, Materialströme im Hochbau- potientiale für eine Kreislaufwirtschaft, 2017, S. 31 RC-Beton wird derzeit ohne Ziegelanteile hergestellt, obwohl normativ möglich.

35 DIN EN 12620:2008-07 - Gesteinskörnungen für Beton

36 DIN 1045-2:2008-08 - Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton –Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität

37 DIN 4226-101:2017-08 - Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen

38 Brandenburger Leitfaden „Ausschreibungen“, Steigerung der Ressourceneffizienz des Recyclings von mineralischen Bau-und Abbruchabfällen, 2017

39 Kreislaufwirtschaft BAU – Eine Initiative der deutschen Bauwirtschaft

Dabei wird auch der Anteil an Gesteinskörnungen erfasst, der aus rückgebauten mineralischen Bauabfällen (Recyclingmaterial) hergestellt wurde. Außerdem wird angegeben, wie viel davon direkt in die Herstellung von Asphalt und Beton zurückfließt.

Die Entwicklung der Verwertung von mineralischen Bauabfällen als Gesteinskörnungen, weist eine deutliche Steigerung bis derzeitig auf 20 % auf (Abbildung 5). Die Verwertung als Gesteinskörnungen bei der Beton- und Asphaltherstellung stagniert seit 2006 bei ca. 12%.

Von 2002 -2008 wurde die Verwendung von RC-GK zur Betonherstellung gesondert dargestellt (Abbildung 5). Der Anteil ist sehr gering und wird seit 2014 nunmehr zusammen mit der Asphaltherstellung (Straßenbau) ausgewiesen (Abbildung 6).

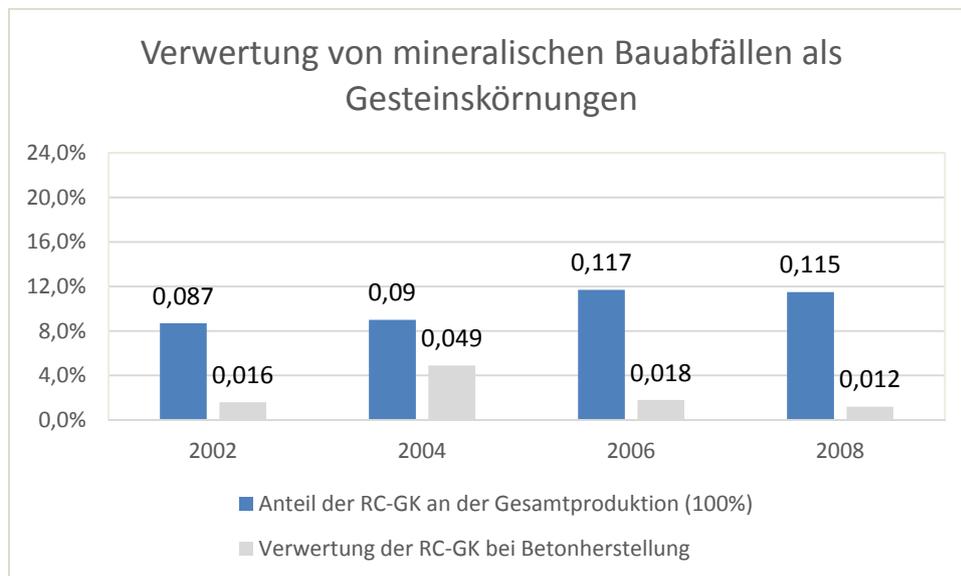


Abbildung 5: Verwertung mineralischer Bauabfälle als Recycling-Gesteinskörnungen (RC-GK) von 2002 – 2008⁴⁰

40 Auswertung Kreislaufwirtschaft Bau, Monitoring-Berichte: Link: www.kreislaufwirtschaftbau.de

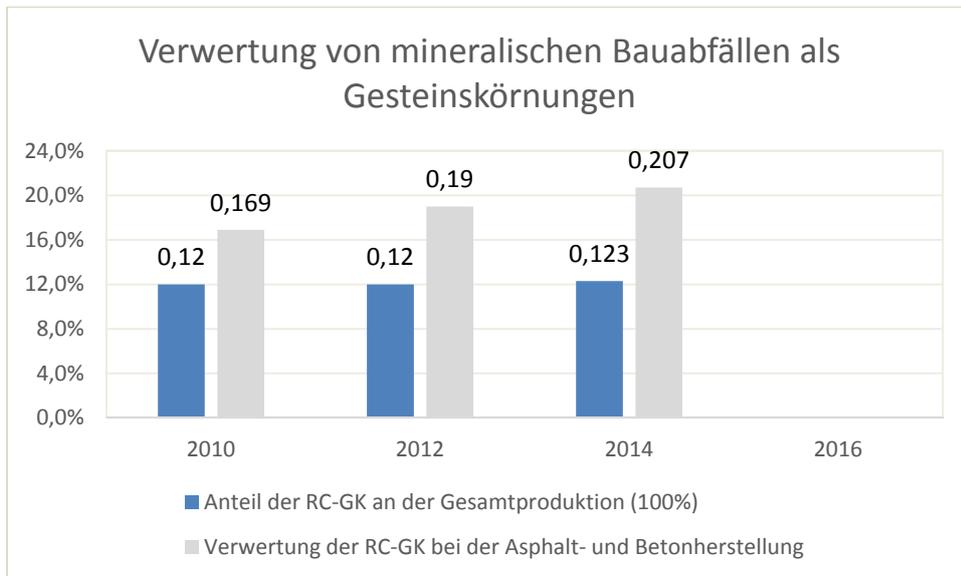


Abbildung 6: Verwertung mineralischer Bauabfälle als Recycling-Gesteinskörnungen (RC-GK) von 2010 – 2014 ⁴⁰

Der Einsatz von Recycling-Gesteinskörnungen in Beton (Recyclingbeton) bei der Errichtung von Hochbauten ist derzeit noch die Ausnahme. Einige „Leuchtturmprojekte“ sind jedoch bereits umgesetzt. In Berlin zählt dazu das Rhoda-Erdmann-Haus der Humboldt-Universität⁴¹.

Das Land Berlin schafft derzeit gesetzliche Rahmenbedingungen, die den Einsatz von Recyclingbeton in Hochbauten fördern. Dazu zählt zum Beispiel die Bewertung von Angeboten unter Berücksichtigung des Zuschlagskriteriums für umweltbezogene Aspekte des Auftragsgegenstandes⁴². Dadurch könnte der von Bietern angebotene Anteil an RC-Material im Beton berücksichtigt werden.

Zukünftig strebt das Land Berlin an, bei öffentlichen Hochbauvorhaben RC-Beton einzusetzen, um dadurch eine relevante Umwelt- und Ressourcenschonung zu erzielen. Durch die am 1. Januar 2013 in Kraft getretene Berliner Verwaltungsvorschrift "Beschaffung und Umwelt – VwVBU" verfügt Berlin über ein geeignetes Instrument, künftig bei öffentlichen Gebäuden sowohl die sortenreine Separierung von Beton beim Gebäuderückbau als auch den Einsatz von RC-Beton beim Neubau über ökologische Mindestkriterien mittels entsprechender Leistungsblätter verbindlich zu fordern.

Der schon eingesetzte Paradigmenwechsel zum nachhaltigen Bauen wird langfristig auch die Verwendung von RC-GK einbeziehen. Öffentliche Bauvorhaben besitzen hier eine bedeutende Vorbildfunktion.

41 Roda-Erdmann-Haus der Humboldt-Universität Berlin: Pressemitteilung

42 VOB/A – Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil A, Abschnitt 2, §16d EU Wertung, Abs. (2) Nr.1

3.5.2 Kalksandstein und Porenbeton

Für Kalksandstein wurde wie auch für Ziegel der Nachweis erbracht, dass er in rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 eingesetzt werden kann. In der Praxis wird Kalksandstein meist in ungebundenen Tragschichten des Tiefbaus zugemischt.

Porenbeton aus Rückbaumaßnahmen kann derzeit aufgrund der Verunreinigung, wie auch beim Kalksandstein nicht in den Herstellungsprozess zurückgeführt werden. Eine Verwertung von Porenbeton im Tiefbau ist wegen der geringen Kornfestigkeit und der fehlenden Frostbeständigkeit nicht erwünscht und nur in sehr geringen Anteilen bei zertifizierten RC-Baustoffen zugelassen. Üblicherweise werden Abfälle aus Porenbeton für untergeordnete Verfüllungen genutzt oder deponiert.

Für ein hochwertiges Recycling müssen Kalksandstein sowie Porenbeton sortenrein und unverschmutzt vorliegen, um sie dem Herstellungsprozess wieder zuführen zu können. Hintergrund hierfür ist neben den technischen Anforderungen an die Begrenzung des Sulfatgehalts auch die vom Markt nicht akzeptierte Graufärbung des RC-Steins, die durch noch anhaftende Mörtelreste nach Aufbereitung des Mauerwerkabbruchmaterials entstehen würde.

Viele Hersteller bieten deshalb nur Rücknahmesysteme für eigene Produkte an, die während des Einbaus in Form von Verschnittresten anfallen (siehe Tabelle 19).

Kalksandstein und Porenbeton können gemäß DIN 4226-101:2017-08 in einem bestimmten Umfang Bestandteil von rezyklierten Gesteinskörnungen (Rb) sein.⁴³ Zu beachten sind hierbei immer die zulässigen Gehalte an Stör- und Gefahrstoffen in Eluat und Feststoff.⁴⁴

In der Praxis gelten für Kalksandstein als Richtwerte maximal 5 %, für Porenbeton 3% im Masseanteil des Nicht-Betonanteils der Gesteinskörnungen.⁴⁵ Porenbeton wird in RC-GK möglichst vermieden, da chemische Untersuchungen in realen Bauschuttproben vergleichsweise hohe Gips- bzw. Sulfatgehalte ergeben haben.⁴⁶

3.5.3 Glas

Für Baugläser existiert keine eigene Verwertungsstrecke. Aufgrund des geringen Masseanteils am gesamten Bau- und Abbruchabfall werden Glasscherben bei der mineralischen Bauschutttaufbereitung mit verarbeitet.

43 DIN 4226-101:2017-08, Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen, Tabelle 1: Stoffliche Zusammensetzung der Typen rezyklierter Gesteinskörnungen

44 DIN 4226-101:2017-08, Tabelle 2 – Höchstwerte der Eluat- und Feststoffparameter

45 BBSR, Forschung für die Praxis, Band 06, Materialströme im Hochbau- potenziale für eine Kreislaufwirtschaft, 2017, S. 32 – 33

46 UBA Texte 05/2013 - Optimierung des Rückbaus / Abbruchs von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung, Tabelle A5, S.186

Glas besitzt ein sehr hohes Recyclingpotenzial. Weiterhin ist Glas als mineralischer Baustoff in Verbindung mit anderen mineralischen Materialien unproblematisch bei der Verwertung. Damit lässt sich die eher selten praktizierte Getrennthaltung von Glas bei Rückbauten, besonders bei geringen Mengen, erklären.

Im Hochbau fällt Glas insbesondere in Form von Fensterglas an. Hier gibt es unterschiedlichste Ausführungen, z.B. Flach(Float)-Glas auch als Einscheibensicherheitsglas (ESG) oder als Verbundsicherheitsglas (VSG) mit Verbundfolie.

Gläser sind unter Einsatz modernster opto-elektronischer Sortiersysteme sehr gut sortenrein trennbar und aufzubereiten. Folien werden beim Zerkleinern der Scheiben entfernt.

Dabei freigesetzte Edelgase aus dem Scheibenzwischenraum⁴⁷ von Isolierverglasungen sind ungiftig, in größeren Mengen aber Sauerstoff verdrängend, für den Recyclingprozess jedoch nicht von Belang.

Fensterglas bietet ein hohes Potential im Wertstoffkreislauf Glas allgemein. Derzeit kann der Floatglas-Kreislauf nicht geschlossen werden, da ein sehr hoher Reinheitsgrad des Bruchglases für die Zugabe bei der Neuproduktion erforderlich ist. Ein Recycling bei dem aus Fensterglas wieder Fensterglas entsteht, erfordert absolut sortenreines Glas. Kleinste Verunreinigungen oder die Vermischung unterschiedlicher Glasfarben, führen zu Qualitätsveränderungen. Ein wirtschaftliches Flachglasrecycling setzt eine entsprechende saubere und sortenreine Flachglaserfassung und -logistik voraus.

In der Praxis kann Flachglas als Ausgangsstoff zur Herstellung von Blähglas- oder Schaumglas (aus bis zu 100% Altglas)⁴⁸ oder auch Glaswolle (aus bis zu 70% Altglas) verwendet werden.

3.5.4 Sonstige Betonarten

In verschiedenen Forschungsvorhaben werden neue Materialien für den Hochbau entwickelt und untersucht. Dazu gehören überwiegend Verbundbaustoffe, die gegenüber den bisherig verwendeten Baustoffen Vorteile hinsichtlich statischer und/oder bauphysikalischer Eigenschaften aufweisen. Zu nennen sind im Folgenden verschiedene Betonarten.

Infraleichtbeton

Infraleichtbeton ist Beton mit einer Rohdichte von $< 800 \text{ kg/m}^3$ ⁴⁹. Er besteht aus Zement, Wasser, chemischen Zusätzen, wie Luftporenbildner, Fließmittel, Stabilisierer, Hydrophobierer Schwindreduzierer, Schaumbildner, und Leichtzuschlägen aus Schaumglas, Blähton oder Blähglas. Auf Grund dieser Zusammensetzung besitzt er im Vergleich zu Normalbeton geringere Festigkeiten, aber höhere Wärmedämmeigenschaften. Bauteile aus Infraleichtbeton werden durch korrosionsgeschützten (verzinkten) Betonstahl oder Glasfaserstabbewehrung verstärkt. Bei hohen Anforderungen an die Tragfähigkeit, kann die Variante der sog. Stabwand eingesetzt werden, bei der

47 Als Gase werden z.B. Argon, Xenon, Krypton verwendet.

48 BBSR, Forschung für die Praxis, Band 06, Materialströme im Hochbau- potenziale für eine Kreislaufwirtschaft, 2017, S. 36

49 <http://infraleichtbeton.de/>

der vertikale Lastabtrag durch Bauteilkern aus ultrahochfestem Beton gewährleistet wird. Meist werden Außenwände daraus hergestellt. Von Vorteil ist, dass aufgrund der relativ zu Beton, guten Wärmedämmeigenschaften bei geringen bis mittleren Wärmeschutzanforderungen auf eine zusätzliche Dämmung verzichtet werden kann. Nachteilig sind im Vergleich zu mehrschichtigen funktionsgetrennten Konstruktionen mit Dämmschicht die höhere Bauteildicke, die geringe Wärmespeicherkapazität für den sommerlichen Wärmeschutz und die geringere flächenbezogene Masse im Hinblick auf den Schallschutz. Um Infralichtbeton auch bei hohen Anforderungen an den Wärmeschutz einsetzen zu können, wird derzeit untersucht, ob der Einsatz von Kapillarrohrsystemen aus PE-Kunststoffen (Polypropylen Random-Copolymerisat) und eine temporäre aktive Bauteiltemperierung energetisch sinnvoll sind.

Aus Sicht der Technologien für Rückbau und Aufbereitung zur Verwertung durchlaufen Infralichtbeton und Normalbeton denselben Technologiekreislauf. Bei Normalbeton gelingt die Aufbereitung zur RC-Gesteinskörnung und die Trennung der Stahlbewehrung sehr gut. Die Verwertungskreisläufe für Infralichtbeton, mit all seinen mineralischen Leichtzuschlägen, sind jedoch bisher nicht erprobt. Aufgrund seiner geringen Festigkeit ist er nur sehr bedingt für Schottertragschichten im Verkehrswegebau nutzbar. Ob es sich als Verfüllmaterial oder als Zuschlagstoff für neuen Infralichtbeton eignet, wäre zu untersuchen.

Faserbeton

Faserbeton ist ein Beton, dem zusätzlich zum Bewehrungsstahl oder als Ersatz Fasern zugegeben werden. Die Fasern sind aus unterschiedlichen Materialien und besitzen verschiedene Formen und Größen.

Als Fasern werden heute Stahl-, Kunststoff (Polypropylen)- oder Glasfasern verwendet.

Die Fasern bewirken zum einen eine Verringerung der Rissbildung während des Abbindeprozesses des Frischbetons und führen zum anderen zu einer erhöhten Biegezugfestigkeit und einer Rissbreitenbeschränkung beim Festbeton.

Eingesetzt wird Faserbeton im Hochbau vorwiegend in Betonfertigteilen, bei Decken, Bodenplatten oder Estrichen. In Tabelle 5 sind die Eigenschaften der Fasermaterialien zusammengefasst.

Tabelle 15: Fasereigenschaften⁵⁰

Faser	Eigenschaften im Beton	Einsatz	Durchmesser	Länge
-------	------------------------	---------	-------------	-------

Stahl	Gewährleistung der Biegezug- und Schubfestigkeit des Festbetons, Geringere Rissbildung und Verformung des Frischbetons	Decken, Fertigteilwände	0,2-0,5 mm	20-50 mm
Alkalibeständiges Glas	Wie Stahlfasern, aber keine Mindestbetondeckung erforderlich	WU-Beton, Fassadenelemente ⁵¹	0,01 mm	50-70 mm
Polypropylen (PP)	Weniger Risse im Frischbeton	Estriche, Fertigteilwände	0,01 -0,1 mm	50-70 mm

Für ein angestrebtes hochwertiges Beton-Recycling ist das Entfernen der Fasern aus dem Beton entscheidend. Stahlfasern könnten über eine Magnetsortierung vom gebrochenen Beton getrennt werden, sofern der Beton entsprechend fein aufgebrochen wird. Die dabei entstehende sandförmige Körnung ist für den Einsatz als RC-Gesteinskörnung oder als Verfüllmaterial zu fein, so dass ein Recycling von Stahlfaserbeton mit derzeitigen Aufbereitungsmöglichkeiten noch Theorie bleibt.

Glasfasern können als mineralischer Bestandteil aufgrund ihres geringen Anteils im RC-Materialgemisch verbleiben und zur Verfüllung dienen. Kunststofffasern als organischer Bestandteil gelten unter dem Aspekt des Recyclings als Störstoffe im Beton. Für die Verwendung als RC-Material, darf der Anteil organischer Bestandteile bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten. (RC-Gesteinskörnungen). Davon unabhängig sollte vor dem Hintergrund der aktuellen Mikroplastik-Diskussion der Einsatz geprüft werden.

Carbonfaserbeton (Carbonbeton)

Beim Carbonfaserbeton wird an Stelle von Stahl Carbonfasern, die zu Stäben und Gittern laminiert werden, als Bewehrung verwendet. Der Vorteil von Carbonbeton ist die zugfestere, dehnsteifere und korrosionsbeständige Bewehrung. Dadurch können Carbonbeton-Konstruktionen schlanker und leichter, also mit weniger Material, gebaut werden als mit Stahlbeton.⁵²

„Die Trennung von Carbon und Beton wird derzeit unter Laborbedingungen erforscht und gelingt bereits. Aufschlussraten von bis zu 95% konnten erzielt werden. Ungelöst ist jedoch die Aufbereitung des Beton-Carbon-Abbruchmaterials. Mit herkömmlichen Sortier- und Klassieranlagen ist eine Trennung beider Materialien nicht möglich, so dass sich nach derzeitiger Praxis die aufgeschlossene Carbonbewehrung im Betonverwertungsprozess anreichert. Separiertes und sauberes Carbon wird

51 Beispiele für Glasfaserbetonelemente im Hochbau

52 Video über Carbon-Beton verfügbar bis zum 15.11.2021 in ARD-Mediathek

den gleichen Recycling-Prozessen zugeführt, die aus der Luftfahrt-, Auto- und Sportartikelindustrie bekannt sind. Das Beton-Recycling erfolgt wie bisher.⁵³

„Ob die herkömmliche Brech-, Sieb- und Sortiertechnik soweit nachgerüstet werden kann, um Carbonfaserverbindungen zu separieren, ist fraglich. Bisher müssen die Fasern zu einem Großteil in der mineralischen Fraktion verbleiben. Das Risiko einer negativen Beeinflussung des mineralischen Stoffrecyclings ist dadurch gegeben.“⁵⁴

Wie sich Carbonfasern als organisches Material im mineralischen Baumaterial verhält, ist noch nicht untersucht worden. Außerdem besteht die Tendenz der Zerlegung der Fasern. Erste Kurzzeitstudien zeigen zwar keine Tendenz einer Kanzerogenität. Wie sich jedoch die Fasern unter Langzeit-Umwelteinflüssen oder Extrembeanspruchung (Brand, Explosion, etc.) verändern ist unbekannt.

Ökonomisch wäre bei einem derzeitigen Beschaffungswert ca. 50.000 €/t von Carbonfasern ein werkstoffliches Recycling zwingend geboten.

3.5.5 Mineralische Dämmstoffe

Mineralische Dämmstoffe aus Steinwolle können technisch zu 100 % in den Herstellungsprozess zurückfließen. Geringe Mengen von mineralischen Anhaftungen sind dabei tolerierbar. Damit sind auch Wärmedämmverbundsysteme mit Steinwollendämmung künftig gut recycelbar.⁵⁵ In der Praxis wird ein Steinwollerecycling zurzeit noch in geringem Umfang umgesetzt. Die überwiegende Abfallmenge wird deponiert.

Steinwolle-Recycling:

Technisch realisierbare Verfahren zum Recycling von Steinwolle hat die Fa. Rockwool im Rahmen eines Forschungsprojektes entwickelt. Danach sind mineralische Anhaftungen aus Putz und Gewebe im Recyclingprozess unproblematisch. Die Steinwolle kann samt der Anhaftungen gemahlen, mit Hilfe eines Windsichters sortiert und wieder für die Herstellung neuer Dämmstoffe verwendet werden. Dabei können auch Mineralwollen alter Rezeptur, die teilweise als gesundheitsgefährdend eingestuft wurden, zurückgeführt werden, da durch die Zugabe weitere mineralischer Bestandteile die RC-Mineralwolle eine gesundheitlich unbedenkliche Zusammensetzung erhält. Somit wäre bei Mineralwolle aus alter Rezeptur auch das Problem der ansonsten notwendigen Deponierung als „gefährlicher Stoff“ nicht mehr gegeben.

53 Aus Internet www.bauen-neu-denken

54 Zitat aus Fachvortrag „Sind neuartige Faserbetone nachhaltig? Die Aussagen des Autors beziehen sich auf Carbonbeton, gelten aber grundsätzlich für alle Faserarten.

55 Ergebnisse Forschungsbericht „LifeCycle KMF - Optimierung der Stoffströme im Lebenszyklus von Bauprodukten aus künstlichen Mineralfaserdämmstoffen“ gefördert durch Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-14.24)

Für Glaswolleabfälle ist derzeit keine Recyclingmethode bekannt. Die Neuproduktion erfordert hohe Reinheitsgrade der Rohstoffe, die durch Rückbauabfälle nicht erreicht werden kann. Die Deponierung wird deshalb für Glaswolle auch in Zukunft der Regelentsorgungsweg bleiben.

Schaumglasplatten könnten zu Dämm-Schüttungen aufbereitet werden. Da Schaumglasplatten in Bitumen eingeschwemmt werden, ist zu klären, mit welchem Trennschnitt der Rückbau erfolgen kann, d.h. wieviel Anhaftungen von Bitumen u.a. verbleiben. Bei massivem Untergrund ist zu erwarten, dass das Bitumen eher am Untergrund haftet. Es kommt zum Kohäsionsbruch in der Dämmung. Bei weichen Untergründen kommt es eher zum Bruch im Untergrund mit erheblichen Anhaftungen am Schaumglas. Dämm-Schüttungen können so lange wieder als Schüttung verwendet werden, solange die zur Verdichtung erforderliche Korngröße dies zulässt. (siehe Kapitel 3.9.3. sowie Tabelle 24).

In Abbildung 7 ist der Stoffkreislauf dieser Produktgruppe veranschaulicht.

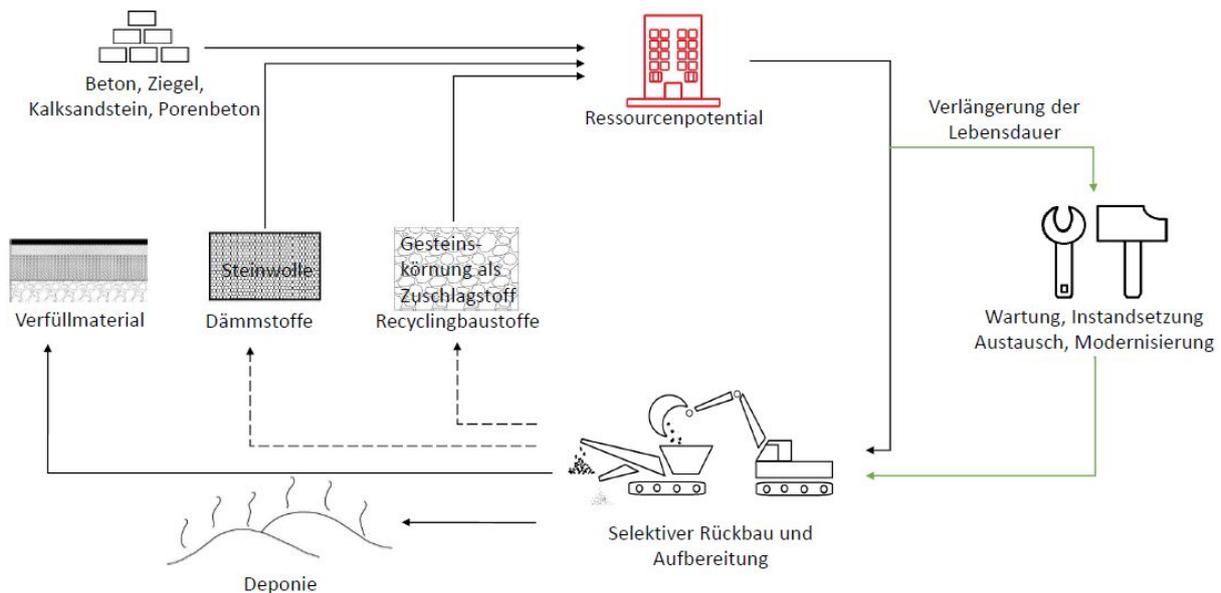


Abbildung 7: Stoffkreislauf mineralische Materialien ohne Gips

3.6 Mineralische Materialien mit Gips

Diese Produktgruppe ist durch die Vermischung von mineralischen Materialien, wie z.B. Beton, Ziegel, Kalksandstein, etc. mit gipshaltigen Baustoffen gekennzeichnet. Gips in mineralischem Material führt zu hohen Sulfatgehalten, die bereits ab einer relativ geringen Konzentration im Mineralstoffgemisch eine stoffliche Verwertung ausschließt. Verunreinigungen durch Gips dürfen in Verwertungs- und Recyclingmaterialien nur in sehr begrenzten Umfang vorliegen. Baugips wird in Form von Gips- und Anhydritestrich oder Putzmörtel verwendet. Dabei gehen sie meist eine direkt haftende und später schwer lösbare Verbindung mit anderen mineralischen Baustoffen ein. Diese nicht rückstandslos lösbare Verbindung führt dazu, dass gut verwertbare Bauprodukte, wie Beton oder Mauersteine, aus den Wertstoffkreisläufen ausscheiden müssen und auch der Gips, ein gut zu

recyclendes und wertvolles Material, verloren geht. Der Gips selbst ist ein wertvoller Rohstoff (insbesondere auch dadurch, dass mit einer zu erwartenden Reduzierung der Kohleverstromung von einem deutlichen Rückgang der REA-Gipse auszugehen ist) und für ein Recycling prinzipiell sehr gut geeignet. Die Voraussetzung ist auch hier die Getrenntsammlung. Bei einigen Kombinationen von gipshaltigen Baustoffen mit mineralischen Materialschichten existieren keine Verfahren, die eine Trennung weder technisch noch wirtschaftlich möglich machen. Zuvorderst ist die Kombination Gipsputz auf mineralischen Trägerbaustoffen zu nennen. Aber auch andere Putz- und Estrichkombinationen, bei denen ein direkter Verbund vorliegt, gelten derzeit als nicht selektiv rückbaubar. Gipshaltige Anhaftungen führen zu hohen Sulfatkonzentrationen⁵⁶ im Materialgemisch.

Sulfathaltiges Verfüllmaterial neigt zu Treib- und Korrosionserscheinungen im Material selbst bzw. in den angrenzenden Schichten der Baukonstruktionen oder im Grundwasser. Aus diesem Grund werden gemischte gipshaltige Bauabfälle zurzeit fast ausschließlich deponiert. Dabei ist zu beachten, dass *„Gipsputz, Gipskartonplatten und sonstige gipshaltige Abfälle ... nicht auf Deponien der Klasse 0 abgelagert werden. Sie dürfen auch nicht in Deponieabschnitten abgelagert werden, in denen gefährliche Abfälle oder Abfälle mit mehr als einer geringfügigen Überschreitung des TOC abgelagert sind oder werden.“*⁵⁷

In Abhängigkeit von Stoffkonzentrationen im Material kommen Deponien der Klassen I und II in Frage.⁵⁸ Problematisch ist die Ablagerung von Gipsen und gipshaltigem Material, weil es wasserlöslich ist und so als Sickerwasser ins Grundwasser oder in Vorfluter gelangen kann. Des Weiteren besteht die Möglichkeit der Entstehung von Schwefelwasserstoff.

Technisch werden dringend Verfahren zur wirtschaftlichen Trennung von Gipsputzen oder –estrichen benötigt. Erste Versuche zeigen eher negative Ergebnisse⁵⁹.

56 Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen: Teil II: Technische Regeln für die Verwertung - 1.2. Bodenmaterial (**TR Boden**)
Maximal zulässiger Sulfatgehalt für Z2-Baustoffe liegt bei 600 mg/l im Eluat. (> 600mg/l betonaggressiv)

57 Aus Handlungshilfe - **Neue Deponieverordnung**, Artikel 1 der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts vom 27. April 2009, Erste Verordnung zur Änderung der Deponieverordnung vom 17. Oktober 2011 der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg von April 2012

58 Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (Abfallablagerungsverordnung – AbfAbIV) vom 20.02.2001, Zuordnungswerte Anhang 1, z.B. DK I und II, wenn Sulfatgehalt <2.000 mg/l im Eluat

59 Umweltbundesamt (UBA), Optimierung des Rückbaus/Abbruchs von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung, erschienen in TEXTE 05/2013, bearbeiten von: Dr.-Ing. Karin Weimann, Dipl.-Ing. Jan Matyschik, Dr.-Ing. Christian Adam Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Dipl.-Ing. Tabea Schulz, Dr.-Ing. Elske Linß, Prof.Dr.-Ing. habil. Anette Müller, Bauhaus-Universität Weimar, Februar 2013, Internetlink: <http://www.uba.de/uba-info-medien/4430.html>, abgerufen am 19.07.2018

In Abbildung 8 ist der Stoffkreislauf dieser Produktgruppe veranschaulicht.

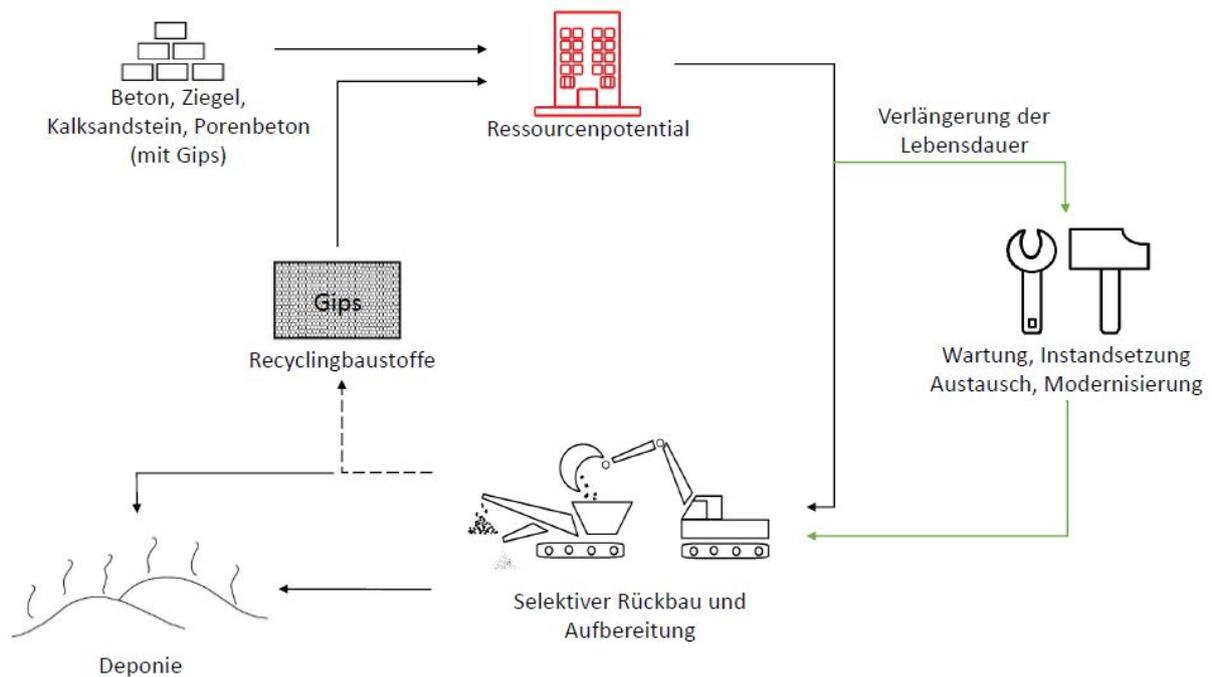


Abbildung 8: Stoffkreislauf mineralische Materialien mit Gips

3.7 Gipskartonplatten und andere Gipsplatten

Gipskartonplatten können technisch zu 100% aufbereitet und als Rohstoffe für neue Produkte eingesetzt werden. Das Recycling von Gipskartonplatten ist in Deutschland bereits heute schon in weiten Regionen möglich und wird voraussichtlich in naher Zukunft ganz Deutschland abdecken.

In Deutschland gibt es dafür drei Recyclinganlagen, MUEG Sachsen in Großpösna und STRABAG Baden-Württemberg in Deißlingen/Lauffen und New West Gypsum Germany GmbH, Pulheim, Nordrhein-Westfalen. Die technischen Voraussetzungen zur Herstellung von Recycling-Gips (RC-Gips) sind demnach gegeben. Der RC-Gips wird zurzeit ausschließlich in der Gipsindustrie verwendet. Verwendungsmöglichkeiten in der Zementindustrie sind vorstellbar, stehen aber noch in Konkurrenz zum REA-Gips aus der Kohleverstromung. Mit der zu erwartenden Reduzierung der Kohleverstromung ist anzunehmen, dass sich das Angebot von REA-Gips deutlich verringern und damit die Nachfrage nach RC-Gips erheblich steigen wird.

Technische Möglichkeiten, um den Karton mit entsprechenden Verunreinigungen durch Oberflächenbeschichtungen und Metalle von den Gipskartonplatten zu trennen, sind vorhanden. Der Karton selbst wird durch Siebung vom Gips getrennt.

Das vorhandene stoffliche Verwertungspotential⁶⁰ könnte weiter erhöht werden, wenn durch deutschlandweite Logistiksysteme, die rückgebauten Materialien dem Recyclingunternehmen zuge-

60 „Nach Aussagen der gipsverarbeitenden Industrie liegt der Einsatz von RC-Gipsen in der Produktion in Deutschland aktuell bei 1%. Vorstellbar ist eine schrittweise Erhöhung dieses

führt werden würden. Alternativ gibt es auch die technische Möglichkeit, mobile Aufbereitungsanlagen zu nutzen. Dadurch würden die Transportkosten von der Baustelle zum Recyclingwerk entfallen.

Vor diesem Hintergrund strebt das Land Berlin an, die in Berlin anfallenden und bisher ausschließlich deponierten Gipskartonplatten - entsprechend den Vorgaben des KrWG - zeitnah einer hochwertigen stofflichen Verwertung zuzuführen. Sowohl das Potential an sortenrein anfallenden Gipskartonplatten als auch die Nachfrage der Recyclingindustrie sind bezogen auf das Land Berlin in ausreichendem Maße vorhanden. *Aktuell plant die Firma Berlin Recycling GmbH gemeinsam mit der MUEG Mitteldeutsche Umwelt- und Entsorgung GmbH die Errichtung und den Betrieb einer Recyclinganlage für gipshaltige Abfälle im Raum Berlin/Brandenburg bis Mitte 2019. Gleichzeitig soll den Berliner Entsorgungsunternehmen bereits heute die Möglichkeit zu geben werden, durch eine wirtschaftliche Andienung an die Gipsrecyclinganlage Großpösna, ihre gipshaltigen Abfälle zu einer stofflichen Verwertung zuzuführen.*⁶¹

Das größte Problem ist die bisher geringe Auslastung der Produktionskapazitäten der vorhandenen Recyclinganlagen. Die Notwendigkeit einer funktionierenden Logistik rund um die Recyclingtechnik wird an diesem Beispiel deutlich.

In Abbildung 9 ist der Stoffkreislauf dieses Produktes veranschaulicht.

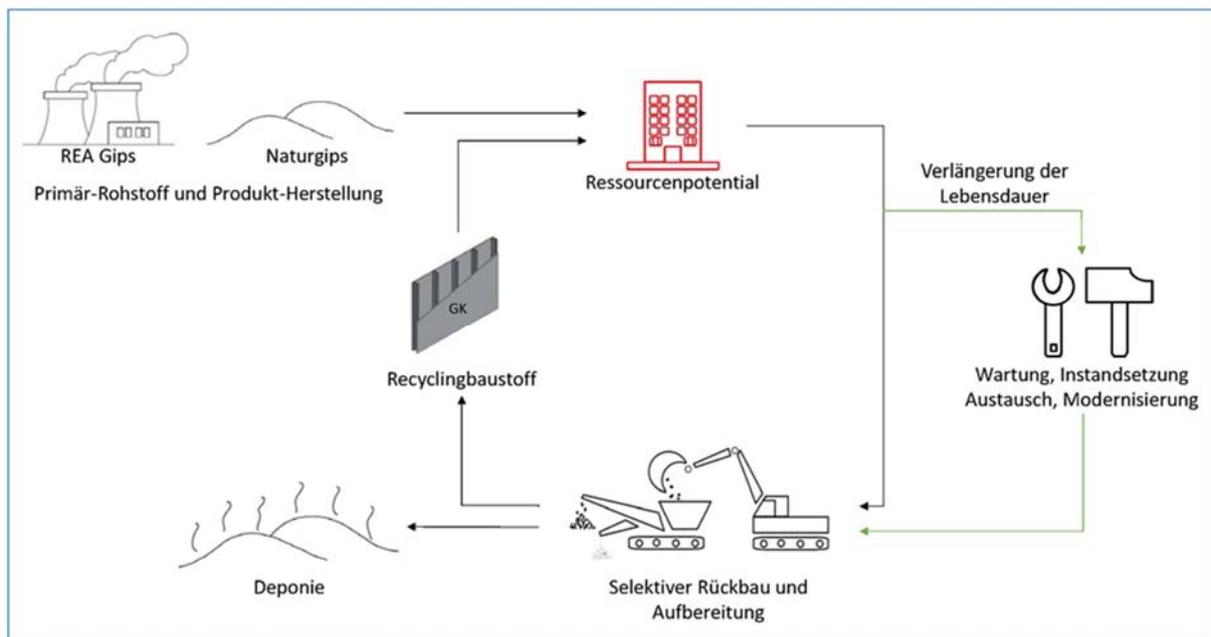


Abbildung 9: Stoffkreislauf Gipskartonplatten

Anteils auf maximal bis zu 20% RC-Gips Einsatz in der Produktion über alle gipsverarbeitenden Industriezweige.“ [aus „**Ökobilanzielle Betrachtung des Recyclings von Gipskartonplatten**“ Texte 33/2017 Umweltbundsamt]

61 Informationen aus einem Schreiben der MUEG an die Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, Fachbereich: Kreislaufwirtschaft und umweltverträgliche Beschaffung, Herrn Thomas Schwillig

Neben reinen Gipskartonplatten gibt es Gipsplatten für unterschiedlichste Einsatzmöglichkeiten. Häufig enthalten diese organische Fasern, Stützkern oder Phase-Change-Materials PCM. Dieser i.d.R. organische Anteil ist zu hoch für ein Recycling zu Gipskartonplatten. Aufgrund der derzeit noch geringen Nachfrage nach RC-Gips seitens der Gipsindustrie, findet ein Recycling dieser Materialien nicht statt.

3.8 Kunststoffe

Zu dieser Produktgruppe zählen alle Kunststoffe, die im Hochbau überwiegend in Form von Dämmstoffen, Abdichtungen sowie Fenster- und Türrahmen eingesetzt werden⁶².

In Abbildung 10 ist der Stoffkreislauf dieser Produktgruppe veranschaulicht.

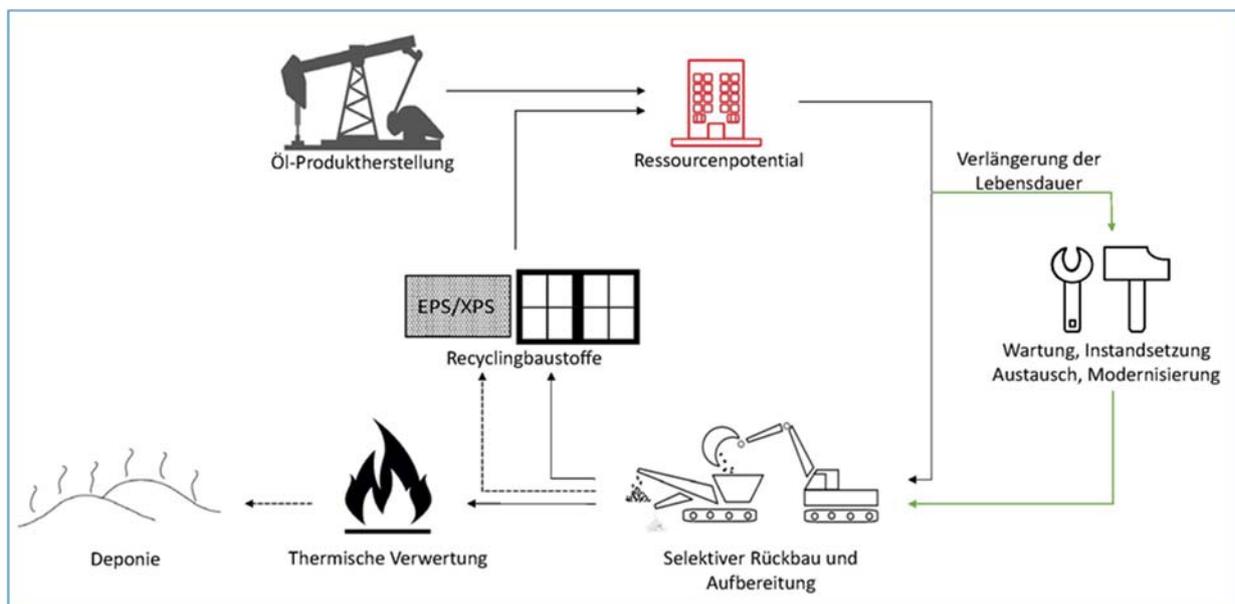


Abbildung 10: Stoffkreislauf Kunststoffe

3.8.1 Kunststoffe (ohne Dämmstoffe)

Kunststoffe lassen sich hinsichtlich ihrer chemischen-physikalischen Zusammensetzung unterscheiden. Dazu zählen für die Anwendung im Bauwesen insbesondere:

- PVC (Polyvinylchlorid)
- HD-PE (Polyethylen mit hoher Dichte)
- LD-PE (Polyethylen mit geringer Dichte)
- PP (Polypropylen),

62 Nicht berücksichtigt werden an dieser Stellen, Produkte der technischen Gebäudeausstattung (z.B. Kabel, Rohre, Sanitärelemente usw.) sowie Innenausbauten (z.B. Bodenbeläge)

- PA (Polyamid)
- ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol)
- EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Monomer)
- PF (Phenoplate)

Den größten Anteil (2007 ca. 70%)⁶³ im Bauwesen besitzen Produkte aus PVC (Polyvinylchlorid). Sie finden sich im Hochbau in Form von Bauelementen, wie Fenster- und Türrahmen oder Abdichtungsbahnen (siehe auch Kapitel 3.8.23.8.2) aber auch als Kabelisolierungen und Rohre wieder.

In Deutschland haben sich Recyclinginitiativen für PVC gut etabliert. Dazu gehören für PVC-Fensterrahmen (Rewindow), PVC-Dach- und Abdichtungsabdichtungen (RoofCollect), PVC-Kunststoffrohre (KRV) und PVC-Bodenbeläge (AgPR). Ziel diese Initiativen ist es, rückgebautes Material, zu sammeln und in Kooperation mit PVC-Verarbeitungsunternehmen, z.B. Fensterhersteller, wieder dem Herstellungsprozess zuzuführen.

„Neue PVC-Fensterprofile mit Rezyklatanteil werden üblicherweise im Co-Extrusionsverfahren produziert. Das saubere, sortenreine PVC-Rezyklat wird hierbei für den Profilkern verwendet, während die äußere, sichtbare Deckschicht des Fensterprofils aus Neu-PVC besteht. Hersteller nennen unterschiedlich hohe Rezyklatanteile von 40 bis zu 75% in ihren Produkten, höhere Anteile wären technisch möglich. Wie bei den Rezyklaten für Bodenbelagsprodukte bilden aber geminderte Farbeigenschaften gegenüber Neuware ein begrenzendes Kriterium. Der Einsatzanteil hängt aber auch von der Herstellungstechnologie ab, dabei wird im Bereich der Fensterprofile bspw. zwischen Kern-, Schicht- und Mischtechnologie unterschieden.“⁶⁴

Kunststoffe mit grenzwertüberschreitenden Gehalten an Cadmium oder Chlor scheiden für das Recycling, aber auch für die thermische Verwertung aus.

Von der Gesamterfassungsmenge aller Kunststoffe werden ca. 70% thermisch verwertet, 25% recycelt und 5 % deponiert. Vormalig baulich verarbeitete Kunststoffe (RC-Kunststoffe) werden auch für die Herstellung nichtbaulicher Produkte verwendet.⁶⁵

3.8.2 Dach- und Wandabdichtungen

Dach- und Wandabdichtungen können bitumen- oder kunststoffbasiert sein. Sie können weiter als Bahn lose oder verklebt verlegt werden oder direkt als Beschichtung aufgebracht werden.

63 CONSULTIC MARKETING & INDUSTRIEBERATUNG GMBH, Vortrag „Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2007 Kurzfassung“ vom 21.11.2008

64 BBSR, Forschung für die Praxis, Band 06, Materialströme im Hochbau- potenziale für eine Kreislaufwirtschaft, 2017, S. 45

65 BBSR, Forschung für die Praxis, Band 06, Materialströme im Hochbau- potenziale für eine Kreislaufwirtschaft, 2017, S. 44

Bei rückgebauten auf dem Untergrund verklebten PVC-Abdichtungsbahnen können anhaftende Dämmstoff- oder Bitumenreste zum Problem werden. Sind die Verunreinigungen zu groß, scheiden sie aus dem Wertstoffkreislauf aus.

Lose verlegte Dachbahnen werden an den Dachrändern zur Windsogsicherung mechanisch auf dem Untergrund befestigt oder durch eine Kiesschüttung in der Lage gesichert. Ansonsten werden sie nur an den Überlappungen verschweißt oder verklebt.

Diesbezügliche Klebereste von PVC-Bahnen führen zu keiner Beeinträchtigung des Materials für das Recycling.

PVC-Bahnen können zu 100% aus Rezyklat hergestellt werden. Praktisch ist von einem Anteil von 80%⁶⁶ auszugehen.

Bitumendachbahnen sind Verbundmaterialien aus Bitumen und Trägereinlage. Die Trägereinlagen können bestehen aus Glas-oder Polyestervlies, Glasgewebe, Glasvlies-Polyester-Kupferfolienverbund oder Kupferband. Ein Recycling ist wirtschaftlich nicht interessant, da genügend Recyclingbitumen aus dem Straßenbau vorhanden ist.

Beschichtungen werden vollflächig auf dem Untergrund aufgetragen. Diese können nur durch Fräsen oder manuelles Abschaben entfernt werden. Ansonsten verbleiben sie auf dem Trägermaterial und werden gemeinsam verwertet oder beseitigt. Beschichtungen können gesundheits- oder umweltgefährdende Stoffe enthalten, die die Verwertungsmöglichkeiten einschränken.

3.8.3 Dämmstoffe (Polystyrolbasis)

Da erdölbasierte Materialien einen hohen Heizwert besitzen (ca. 40 MJ/kg), müssen sie thermisch verwertet werden. Für Polystyrole mit HBCD ist die thermische Verwertung bisher der einzig zugelassene Entsorgungsweg. Verbrennungsrückstände werden deponiert.

Für Dämmstoffe aus EPS und XPS existiert ein Recyclingverfahren (CreaSolv), das ab 2019 in einer industriellen Pilotanlage im niederländischen Terneuzen zur Anwendung kommen wird. Dort ist geplant 3.000 Tonnen Polystyrol pro Jahr zu rezyklieren.⁶⁷

Mit dem Creasolv-Verfahren ist auch eine Abtrennung des als gefährlichen Abfall eingestuftes Flammschutzmittels Hexabromcyclododekan (HBCD) vom Polystyrol möglich (siehe Abbildung 11).

66 BBSR, Forschung für die Praxis, Band 06, Materialströme im Hochbau- potenziale für eine Kreislaufwirtschaft, 2017, S. 46

67 <https://polystyreneloop.org>



Abbildung 11: PS-Stoffkreislauf mit Creasolv⁶⁸

3.9 Baumaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen

Zu dieser Produktgruppe zählen Bauhölzer und Holzwerkstoffe sowie Dämmstoffe z.B. aus Holzfaser, Hanf oder Zellulose.

3.9.1 Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen

Das Recycling von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen findet in der Praxis nur bei Produktionsrückständen (Verschnitte o.ä.) statt. Hersteller befürchten Verunreinigungen in rückgebauten Materialien, die die Qualität der neuen Produkte mindern würde. Bei Hanf und Holzfaser besteht ein Risiko durch Schimmelpilzbelastungen im rückgebauten und unsachgemäß gelagertem Material, das ausgeschlossen werden muss. Auch die Verwendung unterschiedlicher Flammschutzmittel bzw. Biozide ist ein Grund für den Ausschluss des Recyclings. Der Rohstoff für Zellulosedämmstoffe ist Altpapier, das derzeit noch sehr günstig bezogen werden kann, sodass ein nochmaliges Recycling derzeit nicht wirtschaftlich ist (siehe auch Tabelle 24). Auch bei Zellulosedämmung erfolgt der Einsatz von Flammschutzmitteln bzw. Bioziden.

Auf Grund ihrer hohen Heizwerte (18-20 MJ/kg), werden diese Materialien überwiegend thermisch verwertet. Verbrennungsrückstände werden deponiert.

3.9.2 Holz

Die Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz hat den Einsatz von Holz aus nachhaltiger Holzwirtschaft für Neubauvorhaben in Berlin maßgebend mitgestaltet.⁶⁹ Demnach

68 PolyStyreneLoop ; The circular economy in action, CLOSED-LOOP RECOVERY OF POLYSTYRENE FOAM AND BROMINE

69 Siehe Spezifische Beschaffungshinweise für Holz im Rahmen der umweltverträglichen Beschaffung in Berlin

dürfen z.B. nur noch Holz und Holzprodukte verbaut werden, wenn sie „nachweislich aus legaler und nachhaltiger Waldbewirtschaftung stammen“⁷⁰.

Neben der Herkunft des Holzes sind für die spätere Verwertung von Holz folgende Hinweise zu beachten. Die Verwertung von Altholz ist in der Altholzverordnung geregelt.

Holz aus dem Gebäuderückbau stammt zum einen aus dem Innenausbau

- Fußböden, Bekleidungen, Türen

zum anderen aus den statisch, konstruktiven Bereichen oder dem Außenbereich von Gebäuden

- z.B. Dachstühle, Konstruktionshölzer, Stiele und Riegel von Holzrahmenelementen, Fachwerke, Fenster, Türen.⁷¹

Ein uneingeschränktes Potential zum Recycling haben A1-Hölzer. Diese fallen jedoch beim Gebäuderückbau selten an. Hölzer aus dem Innenausbau gehören meist zur Kategorie A2 und können stofflich in der Spanplattenindustrie genau wie A1 Hölzer verwertet werden, wenn Lackierungen und Beschichtungen durch eine Vorbehandlung entfernt wurden. Die durchschnittliche Einsatzquote von Recyclingspänen in der Spanplattenindustrie betrug 2012 ca. 20%.⁷² Hölzer der Kategorie A3 sind selten in Gebäuden verbaut. Dazu gehören z.B. Möbel und ähnliche Produkte, die als Sperrmüll entsorgt werden müssen. Hölzer aus den statisch, konstruktiven Bereichen oder dem Außenbereich von Gebäuden gehören der Kategorie A4 an und werden stofflich nicht verwertet.

In Abbildung 12 ist der Stoffkreislauf dieser Produktgruppe veranschaulicht.

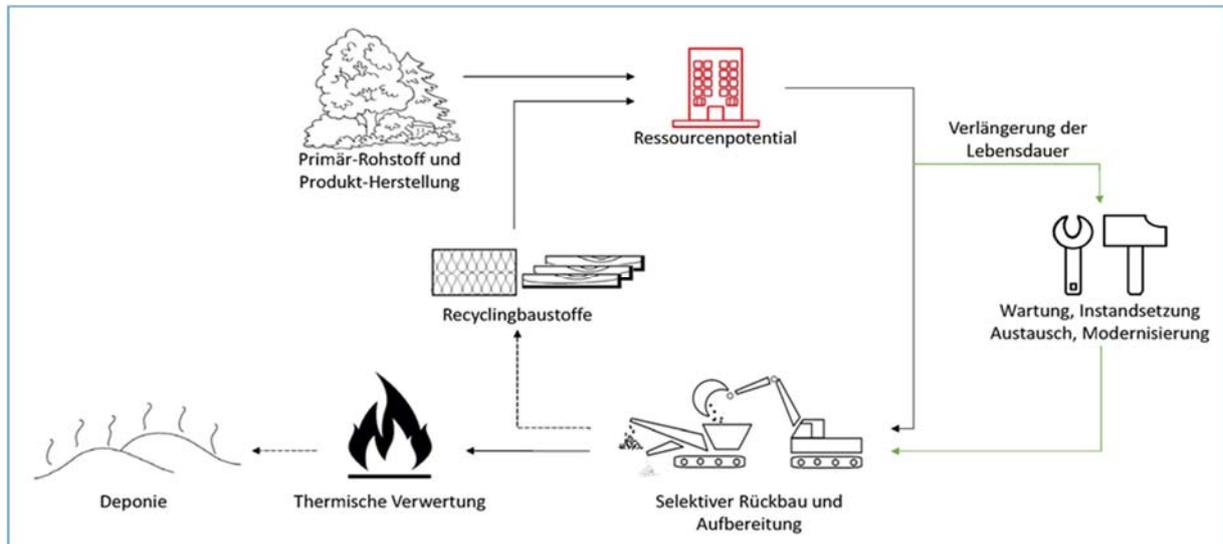


Abbildung 12: Stoffkreislauf Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen

70 Erste Verwaltungsvorschrift zur Änderung der Verwaltungsvorschrift für die Anwendung von Umweltschutzanforderungen bei der Beschaffung von Liefer-, Bau- und Dienstleistungen (Verwaltungsvorschrift Beschaffung und Umwelt – VwVBU) vom 23. Februar 2016, Abschnitt 4, Punkt 13

71 Siehe Altholzverordnung Anhang VI

72 BBSR, Forschung für die Praxis, Band 06, Materialströme im Hochbau- potentiale für eine Kreislaufwirtschaft, 2017, S. 39

3.9.3 Dämmstoffe (allgemein)

Das Recyclingpotential von Dämmstoffen hängt wesentlich von der Art ihres Einbaus ab. Lose eingebaute Dämmstoffe aus dem Wand- und Dachbereich sind als sortenrein zu betrachten und können problemlos wieder in den Herstellungsprozess neuer Dämmstoffe zurückgeführt werden. Zum Beispiel bieten für eingebaute Dämmstoffe aus dem Dachbereich die Firmen Rockwool und ThermoNatur eine Rücknahme eigener Produkte an.

Besonders Dämmstoffe im Außenwandbereich, die in Form von Verbundsystemen verbaut sind, lassen sich technisch nicht oder nur mit höherem technischen Aufwand sortenrein und unverschmutzt zurückbauen. Ein Ansatz für eine Trennung von Putz und Dämmung ist das sogenannte „Strippen“, bei dem das Gewebe einschließlich Putz von der Dämmung abgezogen wird. Bleiben jedoch größere mineralische Anhaftungen zurück, ist eine thermische Verwertung bei brennbaren Dämmmaterialien ungünstig.

Das Erschließen des stofflichen und thermischen Verwertungspotentials von Dämmstoffen gilt im Allgemeinen als ambitioniert (siehe Tabelle 19 und Tabelle 24).

Beispielhaft für die beiden am häufigsten eingesetzten Dämmmaterialien Mineralwolle und Polystyrol-Hartschaum, werden im Kapitel 3.5.5 am Beispiel von Steinwolle und in Kapitel 3.8.3 am Beispiel von Polystyrol, stoffstromoptimierte Transformationsprozesse vorgestellt, die zukünftig ein Dämmstoffrecycling auf hohem Niveau ermöglichen sollen.

3.10 Metalle

Metalle besitzen ein sehr hohes Potential der stofflichen Verwertung, da finanzielle Erlöse die Kosten des Gebäuderückbaus senken (siehe Abbildung 13). Flächendeckende Sammel- und Verwertungssysteme sind vorhanden.

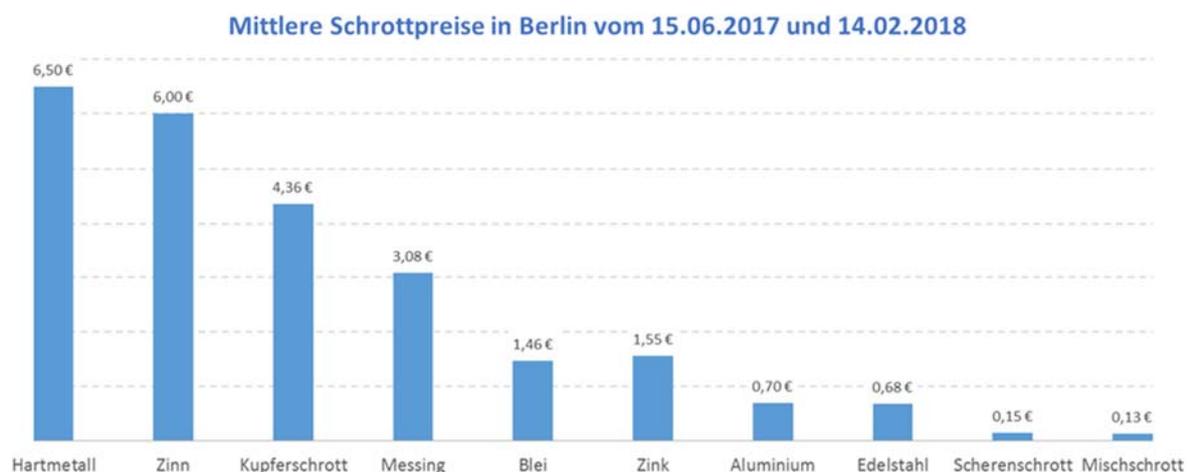


Abbildung 13: Schrottpreise in Berlin [Quelle: <https://www.schrottpreis.org/>]

Im Baubereich kann z.B. das A.U.F. - Aluminium Sammel- und Recycling- System, eine Initiative von Aluminiumprofil-verarbeitenden-Firmen, die dafür sorgen, dass Aluminiumschrott aus der Produktion und dem Rückbau im Kreislauf geführt wird, als vorbildliches Sammelsystem genannt

werden (siehe Tabelle 22). Bei Aluminium ist es dabei wichtig, die unterschiedlichen Legierungen getrennt zu halten. A.U.F übernimmt die Sammellogistik und sorgt dafür, dass nur Profialuminium dem Schmelzprozess zugeführt wird. Aktuell kann ca. 1/3 der Profialuminiumproduktion mit in Deutschland gesammeltem Sekundäraluminium gedeckt werden.

3.11 Sonstige Verwertungspotentiale

3.11.1 Stoffliche Verwertung im ungebunden Einbau

Mineralische Abbruchabfälle aus rein zementgebundenen sowie kalk- oder tonhaltigen Materialien, wie z.B. Betone, Putze, Mörtel, oder Ziegelmaterialien sind in der Regel unproblematisch hinsichtlich ihrer Entsorgung und bieten ein hohes Potential für eine Aufbereitung und Verwendung als Verfüllmaterial im Tiefbau oder als Frostschuttschicht im Straßen- und Wegebau. Die Verwendung von rezyklierten Gesteinsmaterial in ungebundener Form ist im Bauwesen etabliert. Verunreinigungen durch Gips⁷³ oder gefährliche Stoffe⁷⁴ dürfen in diesen Materialien nicht vorliegen.

Das Recyclingpotential der Dämmstoffe ergibt sich aufgrund ihrer Primärrohstoffe.

Platten-Dämmstoffe aus Schaumglas können als Schaumglasschüttung aufbereitet und verwendet werden. Schaumglasschüttungen benötigen für den Einbau eine bestimmte Korngröße und -Zusammensetzung. Beim Verdichten entstehen geringere Korngrößen, so dass sich das Material nur noch bedingt zum erneuten Wiedereinbau eignet.

3.11.2 Energetische Verwertung

Die energetische Verwertung findet immer dann statt, wenn eine stoffliche Verwertung nicht möglich oder rechtlich nicht zulässig ist. Gemäß der Abfallhierarchie § 6 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ist die stoffliche Verwertung (Recycling) der energetischen Verwertung stets vorzuziehen.

Das energetische Potential ergibt sich allgemein aus dem Heizwert des rückgebauten Materials bzw. Materialgemischs. Zum Beispiel besitzen mineralische Materialien keinen Heizwert und damit kein

73 „Wird ... gipshaltiger RC-Baustoff aus Beton als Tragschichtmaterial eingebaut, reagiert der Sulfatanteil der Gipsreste mit Al₂O₃ sowie CaO aus den Hydratphasen des Zements und/oder aus reaktiven Ziegel- sowie Bodenbestandteilen. Da ein Wasserzutritt nicht auszuschließen ist, steht auch Wasser als weiterer Reaktionspartner zur Verfügung. Die Reaktionen zur Ettringit-beziehungsweise Thaumasilbildung können ... ablaufen. Sie werden noch zusätzlich begünstigt, da beim Zerkleinern des Betonbruchs eine relativ große Reaktionsoberfläche geschaffen wurde.“[Anette Müller, RECYCLING Magazin 22, 2012, S.26-29]

74 Gefährliche Stoffe dürfen aus umweltrechtlicher Sicht bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten. Die Höhe der Grenzwerte ist abhängig von der angestrebten Verwendung des RC-Materials. Eine Fremdüberwachung des Materials ist erforderlich. Siehe Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20, Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen, S.72-75 und 78-80

energetisches Verwertungspotential. Hingegen haben alle Materialien, auf Erdölbasis hergestellt sind, einen hohen Heizwert und damit ein hohes energetisches Verwertungspotential.

Die energetische Verwertung erfolgt in Verbrennungsanlagen, die nach BImSchV zugelassen sind. Idealerweise wird die erzeugte Energie in Form von Fernwärme und zur Stromerzeugung genutzt.

In Müllverbrennungsanlagen wird Material mit hohem Heizwert wie Holz oder Kunststoffe, das nicht für ein Recycling in Frage kommt, dem vorhandenen Brenngut als **Ersatzbrennstoff**⁷⁵ zugemischt, um einen relativ konstanten Heizwert von 9-11 MJ/kg während der Verbrennung zu erzielen. In Verbrennungsanlagen der energieintensiven Industrie (z.B.: Zementwerke) wird Material mit hohem Heizwert als **Sekundärbrennstoff** verwendet.

Verbrennungsrückstände: Bei der Verbrennung entstehen ca. 30 Masse-% Asche und Schlacke. Diese Verbrennungsrückstände besitzen immer noch Verwertungspotentiale. Eisenmetalle und Nichteisenmetalle werden sortiert und gelangen zurück in ihre Wertstoffkreisläufe (ca. 13%). Die Hauptverwendung der restlichen Stoffe findet im Deponie- und Straßenbau statt. Nur 10% gelangt entsprechend ihrem Schadstoffpotential zur Ablagerung auf Deponieren.⁷⁶

Über 60% aller Kunststoffe (66 % im Jahr 2011) werden thermisch verwertet.⁷⁷

3.12 Fügetechniken, Trennbarkeit und Recycling

Prinzipiell ist davon auszugehen, dass Gebäude in umgekehrter Reihenfolge ihrer Errichtung zurückgebaut werden. Der organisatorische, zeitliche und technisch-personelle Aufwand für den selektiven Rückbau hängt zum einen von der Bauart des Gebäudes, zum anderen von der Fügetechnik der einzelnen Baukonstruktionen ab.

Unter dem Aspekt des selektiven Rückbaus mit dem Ziel einer stofflichen Verwertung ist die Trennbarkeit von Bauteilen in einzelne Stofffraktionen in Abhängigkeit von ihrer Fügetechnik während ihrer Errichtung zu betrachten.

Fügetechniken lassen sich hinsichtlich ihrer Lösbarkeit modellhaft nach Abbildung 14 einteilen.

75 Ersatzbrennstoffe (EBS) sind Brennstoffe, die aus der Behandlung (z. B. Schreddern und Dehydrieren) fester Siedlungsabfälle gewonnen werden. Es sind Stoffe, die in vorgeschalteten Aufbereitungsanlagen, zum Beispiel durch die mechanisch-biologische Abfallbehandlung konfektioniert werden. Dabei werden die Abfallfraktionen entsprechend den verfahrensbedingten Anforderungen der mit verbrennenden Anlagen sortiert bzw. entmischt.

76 Quelle: VDI 3925 Blatt 1: 2016-09

77 BBSR, Forschung für die Praxis, Band 06, Materialströme im Hochbau- potentiale für eine Kreislaufwirtschaft, 2017, S. 44

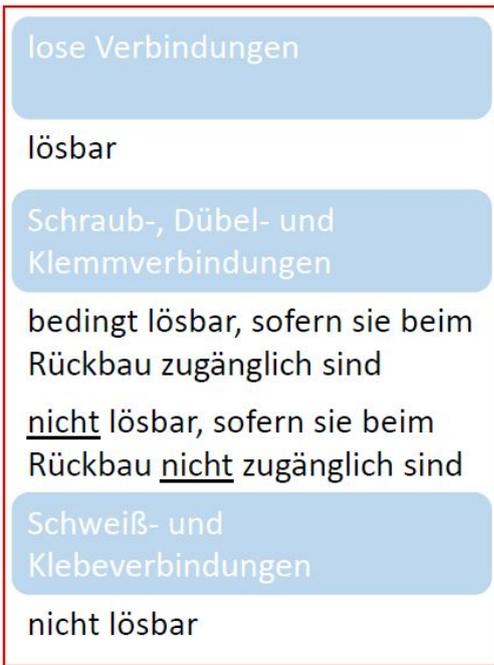


Abbildung 14: Einteilung der Fügetechniken hinsichtlich ihrer Lösbarkeit

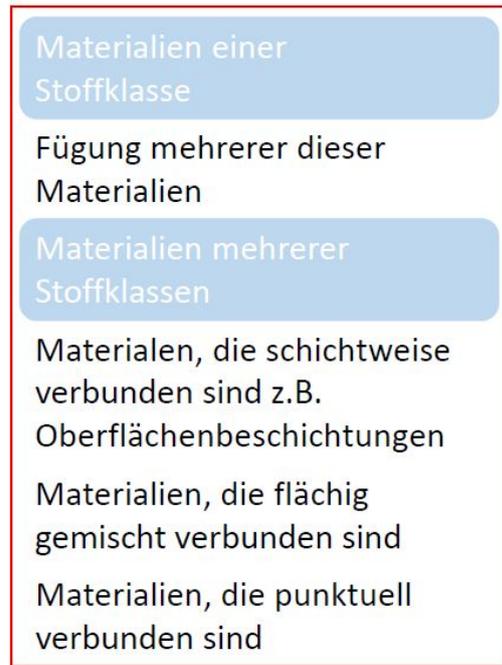


Abbildung 15: Einteilung der Materialien hinsichtlich ihrer Stoffreinheit

In der Regel sind baukonstruktive Verbindungen bedingt oder schwer lösbar, da bisher die Standsicherheit und nicht der Rückbau im Vordergrund standen. Eine sortenreine zerstörungsfreie Trennung stellt eher die Ausnahme dar.

Dabei können die verwendeten Bauprodukte /Bauelemente aus Materialien einer Stoffklasse (z.B. Ziegel, Porenbeton, Kalksandstein) oder aus Bauprodukten mit mehreren miteinander verbundenen Stofffraktionen bestehen (z.B. Gipsfaserplatten, Trockenestriche, Akustikdecken). In Abbildung 15 ist dazu eine vereinfachte Systematisierung vorgenommen worden. Als Stofffraktion wird hier ein Material/Bauprodukt verstanden, für das es mindestens einen Verwertungsweg gibt, auch wenn es verschiedene Bestandteile besitzt (z.B. Gipskartonplatte aus Gips und Papier).

Die Zugänglichkeit und Trennbarkeit der Schichten bzw. Materialien auf der Baustelle erhöht die Wahrscheinlichkeit einer stofflichen Verwertung.

Der Ansatz wird in Tabelle 16 wie folgt bewertet.

Tabelle 16: Einfluss der Füge-techniken auf das Recyclingpotenzial

Einschätzung	Art der Füge-technik der Materialien bzw. der Schichten und Trennbarkeit auf der Baustelle und daraus resultierender Verwertungsweg	Beispiele
SEHR GERING	nur ein Material vorhanden	Unbewehrtes Betonbauteil
	Looser Verbund	Estrich auf Trennlage
GERING	Trennbarer Materialverbund mit etablierten Verwertungswegen	Stahlbeton, Gipskarton
	geschraubt und zugänglich	Unterkonstruktion von Wänden mit vorgehängten hinterlüfteten Bekleidungen
	durch Randverbund	Massives Flachdach mit PVC-Folien-Beschichtung ohne vollflächige Verklebung mit der Tragkonstruktion (Verklebung nur im Randbereich), Verklebung im Überlappungsbereich der Bahnen, Kiesschüttung als Auflast
MITTEL	Geschraubt und nicht zugänglich	Gipskartonwand mit überspachtelten Schrauben
HOCH	Nicht mehr trennbarer flächiger Verbund, der <u>nicht</u> zur Deponierung der Materialgemisches führt	Kalkzementputz auf mineralischem Wandbildner
SEHR HOCH	Nicht mehr trennbarer flächiger Verbund, der zur Deponierung des Materialgemisches führt	Gipsputz auf mineralischem Wandbildner

Bauprodukte aus Materialverbänden

Produkte ohne stoffliche Wertstoffkreisläufe

Viele Bauprodukte, insbesondere mit speziellen Eigenschaften, bestehen aus einer Kombination von Materialien. Für die meisten dieser Produkte gibt es derzeit keine stofflichen Wertstoffkreisläufe, da die Materialbestandteile nicht trennbar sind. Liegt ein relevanter Heizwert vor, können die Materialien besten Falls thermisch verwertet werden. In der Regel findet die Beseitigung jedoch auf Deponien statt.

Tabelle 17: Beispiele für Bauprodukte mit speziellen (z.B. bauphysikalischen) Eigenschaften

Bauphysikalische Eigenschaft		Bauprodukte	Vorteil
Wärme- schutz	Erhöhung der Wärmespeicherkapazität	Phase-Change-Materials (Gipsputze oder Gipsplatten mit Paraffinen)	Verhinderung bzw. Verzögerung der Aufheizung der Räume im Sommer
	Verringerung der Wärmeleitfähigkeit	Wärmedämmputze (Außenputze mit Dämmstoffzusätzen)	Bei geringen Anforderungen ggf. keine zusätzlichen Dämmstoffe erforderlich
Feuchte- schutz	Bauwerksabdichtungen	Abdichtungsbahn aus Bitumen und Trägereinlage (z.B. Glas-oder Polyestervlies, Glasgewebe, Glasvlies-Polyester-Kupferfolienverbund, Kupferband)	Dauerhaftigkeit,
	Feuchte- und Frostbeständigkeit	Zementgebundene, glasfaserbewehrte Leichtbetonplatte als Sandwichelement (Kern mit Zuschlägen aus Blähton oder RC-Schaumglasgranulat) auch Holzzementplatten, Hydropanel	Trockenbauweise, hohe Druck- und Biegezugfestigkeit, gute Brandschutzeigenschaften
Schall- schutz	Hohe Schalldämm-Maße	Akustik-Decken-Systeme (aus porösen gipshaltigen Platten auf Metallunterkonstruktion mit Mineralwolleauflage)	Installationsraum für Leitungen der Haustechnik im Zwischenraum Rohdecke / Akustikdecke, Geringes Gewicht
	Erhöhte Schallabsorptionseigenschaften		

Produkte mit dem Potenzial zur Einbindung in stoffliche Wertstoffkreisläufe

Die Ausgangsmaterialien vieler Bauprodukte aus Materialverbänden lassen sich am Lebensende technisch durch mehrere Brech- und Sortierschritte wieder zurückgewinnen. Wirtschaftliche Gründe können dennoch dazu führen, dass diese Produkte aus dem Wertstoffkreislauf ausscheiden. Aus diesem Grund besitzen sie derzeit ein mittleres Recyclingpotenzial.

Gründe dafür sind:

- Produkte bestehen aus Stoffen, von denen nur einer der Bestandteile wirtschaftlich für ein Recycling interessant wäre. Für die Entsorgung oder Verwertung der anderen Bestandteile würden Kosten entstehen.
- Mineralische Dämmstoffe, Mauerwerk, sulfathaltige Stoffe oder auch Kunststoffe können bei der Herstellung von RC-Gesteinskörnungen bzw. Verfüllmaterial Störstoffe sein, die nicht oder nur in geringen Mengen enthalten sein dürfen.
- RC-Materialien stehen in Konkurrenz mit ausreichend verfügbaren qualitativ gleichwertigen Produkten

4. Übersicht der Recyclingeffizienzeigenschaften ausgesuchter Baumaterialien

In Tabelle 18 bis Tabelle 27 werden exemplarisch wesentliche Baumaterialien hinsichtlich der Recyclingqualität, der Technologieverfügbarkeit, des Rückbau- Aufbereitungsaufwands beschrieben.

Tabelle 18: Beton

Tabelle 19: Mauerwerk

Tabelle 20: Putze und Mörtel

Tabelle 21: Glas

Tabelle 22: Metalle

Tabelle 23: Gipshaltige Baumaterialien

Tabelle 24: Dämmstoffe

Tabelle 25: Kunststoffe

Tabelle 26: Holz /Holzwerkstoffe

Tabelle 27: Bitumen

4.1 Tabelle 18: Beton

Beton		Rückbauaufwand / Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologie- verfügbarkeit
Normalbeton, unbewehrt oder bewehrt	Sortenreines Material	Sortenrein maschinell rückbaubar, Bewehrungsstahl kann gut aussortiert werden, Stofffraktionen: <ul style="list-style-type: none"> • grober Betonsplitt verschiedener Körnung • Kies • Feinkorn, sogenannter Brechsand • Zementstein 	Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
			Recyclingbeton – Zugabe von gebrochenem Beton als Recycling- Gesteinskörnung, Weiterführender Link: http://www.rc-beton.de/ Bewehrungsstahl siehe Tabelle 22	Schottermaterial: Verwendung im Straßenbau, z.B. als Frostschuttschicht und Schottertagschicht 0/45 Betonbrechsand: Einsatz in ungebundener Form, Ersatz für Natursand, z.B. Recycling- Vorsiebsand 0/12 Sekundärrohstoff bei der Portlandklinkerherstellung	Nicht relevant	Siebreste und evtl. Feinkorn unter 2 mm DK 0 oder DK I	Standard flächen- deckend vorhanden
	nicht sortenreines Material (andere mineralische Materialien außer Gips, z.B. Zementputz, Ziegel mit Zementmörtel)	Braucht nicht getrennt zu werden, gemeinsame Verwertung					Siebreste und evtl. Feinkorn unter 2 mm DK 0 oder DK I

Beton		Rückbauaufwand / Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologie- verfügbarkeit
Leichtbeton, unbewehrt oder bewehrt	Beton mit mineralischen Leichtzuschlägen mit geschlossenem Gefüge (optisch wie Normalbeton)	Bewehrungsstahl kann gut aussortiert werden Leichtbetonmauerwerk mit Mörtel und Putzen aus Kalk und Zement braucht nicht getrennt zu werden, gemeinsame Verwertung	Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung DK 0 oder DK I	Derzeit keine Technologie vorhanden Rohstoffliches Recycling im Pilotmaßstab für Ziegelabbruch vorhanden: Evtl. auf Leichtbeton zu übertragen.
	mit haufwerksporigem Gefüge in Form von Mauerwerk mit Mörtel und Putz	Leichtbetonmauerwerk mit Mörtel und Putzen aus Gips können nicht sortenrein zurückgebaut werden. Stoffliche Trennung ist evtl. mit Hilfe von Nachbehandlungsverfahren (Attritionsmethode ⁷⁸) möglich, aber sehr auswendig. <ul style="list-style-type: none"> • grobkörnige Leichtbeton-Partikel • Leichtbeton-Feinkorn • Gips als Feinkornanteil 	Rückführung in den Herstellungsprozess für neue Leichtbetonprodukte derzeit nicht möglich	nicht möglich	Nicht relevant	DK I oder DK II	

78 Attritionsmethode: Mechanisches Verfahren zur stofflichen Trennung von Leichtbeton und Gips, erfolgt zusätzlich nach dem Zerkleinern des Rückbaugemisches, mit Hilfe einer Trommel werden die Stoffpartikel abrasiv voneinander getrennt, Methode noch im Versuchsstadium, siehe auch Trennung von Leichtbeton und Gipsputz

Beton		Rückbauaufwand / Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologie- verfügbarkeit
Normal- oder Leichtbeton, bewehrt, Faserbeton	Fertigteile ungedämmt oder mit Kerndämmung aus EPS oder PUR	Auf der Baustelle als Fertigteil rückbaubar, günstig, wenn Bauteil schichtweise getrennt werden kann → sortenreines Erfassen der einzelnen Materialien möglich ungünstig, wenn Schichten durch Bewehrung übergreifend miteinander verbunden sind → Sortierung möglich, aber sehr aufwendig, muss in mehrstufigen Brech- und Sortieranlagen erfolgen, Beton und Fasern sind sehr aufwendig in mehrstufigen Prozessen trennbar, Notwendigkeit ist abhängig vom angestrebten Verwertungsweg	Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	Ungedämmt: Standard
				Nach Nachbehandlung: Leichtbeton-Feinkorn : nicht für Mauersteine, aber für Lärmschutzwände mit höherer Rohdichte grobkörnige Leichtbeton-Partikel: Herstellung neuer Leichtbetonmauersteine	Nicht relevant	DK 0 oder DK I	Mit Dämmung: Derzeit keine effiziente Technologie vorhanden
			Bewehrungsstahl, siehe Tabelle 22 Beton, siehe oben Dämmung, siehe Tabelle 24	Unsortierter Faserbeton als RC-Material nur bedingt geeignet			

4.2 Tabelle 19: Mauerwerk

Mauerwerk		Rückbauaufwand / Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologie- verfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Depo- nierung	
Mauerziegel, Porosier- te Ziegel (auch mit Dämmstofffüllung)	Sortenreiner Ziegelbruch aus der Herstellung, Mauerwerksbruch mit Mörtel- und Putzresten, Deckenziegel, Dachziegel, Pflaster	Mauerwerksbruch mit Mörtel- und Putzresten Sortenrein maschinell rückbaubar (Siebung mit Sieblöffel, Separator) Dämmstoffgefüllte Ziegel	Z.T. als Ziegelmehl dem eigenen Herstellungs- prozess zuführbar Zukünftiges Potenzial: Rohstoff für Leichtgranulat- herstellung	überwiegend Verkehrsflächen und Wege Bodenverbesserung Landschafts- und Deponiebau Rekultivierung (z.B. Dach- und Bauwerksbegrünung, Baumsubstrate, Schotterrasen) Belag für Tennisplätze Zuschläge für Beton und Mörtel Ziegelsplittbeton (siehe Fußnote ³¹) oder Ziegel aus Kalziumsilikat z.B. Schornstein-Mantelsteine, Speicherziegel, Dämmstoff, z.T. möglich siehe (Tabelle 24)	Nicht relevant für organische Dämm- stoffe möglich	DK 0 oder DK I	Rücknahme von Baustellenresten Aufbereitungs- technik vorhanden aber nicht flächig verfügbar. Rohstoffliches Recycling im Pilotmaßstab für Ziegelabbruch vorhanden. ⁷⁹
	Dämmstoff-gefüllte Ziegel (Perlitegranulat, Mineralwoll- stecklingen, Mineralwollgranulat oder Polystyrol)	Sensorgestützte Sortierung von Perlite, EPS- oder Mineralwolle-Dämmung durch Brechen und Windsichten					

79 Alexander Schnell (Bauhaus-Universität Weimar); Anette Müller (IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH); Katrin Rübner (BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin): Entwicklung von Leichtgranulaten aus Mauerwerkbruch für die Betonherstellung, in Innovative Technologien für Ressourceneffizienz in rohstoffintensiven Produktionsprozessen, Förderprogramm FONA, Fördermaßnahme r², S. 300 ff, Fraunhofer Verlag, Karlsruhe, 2013.

Mauerwerk		Rückbauaufwand / Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologie- verfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Depo- nierung	
Kalksandstein	Sortenreine Produktionsreste aus der Herstellung,		Nur sortenreines Material Rückführung in den Herstellungsprozess	Betonzuschlagmaterial siehe Fußnote ³¹ Deponie- und Straßenbau(AiF- Projekt "Kalksandstein- Recycling-Material für den Straßenbau") Weiterführender Link:	Nicht relevant	DK 0 oder DK I	-
	Abbruchmaterial mit Verunreinigungen durch Putz oder Mörtel	Sortenreine Trennung maschinell möglich	Derzeit nicht möglich	KS-Recycling für den Straßenbau https://www.kalksandstein.de/bv_ksi/recycling-material-fuer-den-strassenbau?page_id=80073			

Mauerwerk		Rückbauaufwand / Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologie- verfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Depo- nierung	
Porenbeton	Sortenreine Verarbeitungsreste von der Baustelle	Sammlung während der Verarbeitung	Nur sortenreines Material Rückführung in den Herstellungsprozess	Nur sortenreines Material: Betonzuschlagmaterial siehe Fußnote 31 in der Praxis nicht üblich.	Nicht relevant	Regel- fall für Poren- beton- ab- bruch DK I oder DK II	Xella GmbH, bundesweit, bundesland- spezifisch Berlin: Rückführung zum Werk in Brück
	Nicht sortenreines Material, Porenbeton mit gipshaltigen Mörtel- und Putzresten	Rückbau der gemischten Stofffraktion auf der Baustelle, anschließende mechanische Aufbereitung zur möglichst sortenreinen Trennung	Rückführung der Baustellenreste bei der Materialbestellung über den Baustoffhändler. Sammlung individuell auf der Baustelle in Big Bags. In geringen Mengen für Ölbinder und Katzenstreu				Kauf der Big Bags beim Baustoffhändler für 17,50€/Stk (1t), kostenlose Abholung nach Absprache im Rahmen des Tourenplans

Mauerwerk		Rückbauaufwand / Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologie- verfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Depo- nierung	
Gemisch aus unterschiedlichen Mauerwerksarten	Nicht sortenreines Material, Mauerwerksbruch mit gipshaltigen Mörtel- und Putzresten	Rückbau der gemischten Stofffraktion auf der Baustelle, anschließende mechanische Aufbereitung zur möglichst sortenreinen Trennung Aufbereitungsaufwand sehr hoch. Insbesondere Gipsabtrennung und Trennung nach Arten nur mit sensorgestützter Aufbereitungstechnik möglich	Zukünftiges Potenzial: Rohstoff für Leichtgranulat- herstellung	Bestandteil rezyklierter Gesteinskörnungen ^{80 81} siehe auch Fußnote 31	Nicht relevant	DK I oder DK II	Aufbereitungs- technik vorhanden, wird jedoch bei Bauabfall nicht angewendet. Technologie zur Herstellung von Leichtgranulaten aus Mauerwerksbruch vorhanden, jedoch nicht in der Praxis etabliert ⁸²

80 Gemäß DIN 4226-101:2017-08; Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen, Tabelle 1: Stoffliche Zusammensetzung der Typen rezyklierter Gesteinskörnungen

81 Grenzwerte nach LAGA beachten!

82 „Der Sekundärrohstoff Mauerwerkbruch wird vorzerkleinert, gemahlen, mit einem Blähmittel dotiert und in einem Pelletiermischer granuliert. Bei der anschließenden thermischen Behandlung in einem Drehrohrofen werden die Grüngranulate stabilisiert und gleichzeitig aufgebläht (thermische Behandlung im Drehrohrofen). Die geblähten Granulate werden nach Verlassen des Kühlers klassiert. Während der thermischen Behandlung wird der Gips zersetzt. Das im Feststoff störende Sulfat geht in das Rauchgas über und kann mittels Rauchgasentschwefelung zurückgewonnen werden. Dieser zurückgewonnene Gips ließe sich – ähnlich wie der Rauchgasentschwefelungsgips aus Kohlekraftwerken - wieder als Rohstoff einsetzen.“ [Quelle: Anette Müller, Gipshaltiger Mauerwerkbruch als Rohstoff für die Herstellung von Leichtgranulaten]

4.3 Tabelle 20: Putze und Mörtel

Putze und Mörtel		Rückbauaufwand / Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologie- verfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
Mineralische Putze	Zementgebunden: Kalkzementmörtel Zementmörtel mit Kalkhydrat, Zementmörtel	Verwendung bei der Herstellung von Mauerwerk, auch mit Armierungen aus Metall- Glas- oder Kunststofffaser,	Bisher nicht möglich	In Verbindung mit dem Putzträger vorwiegend in ungebundenen Systemen (siehe Tabelle 18, Normalbeton oder Tabelle 19, Ziegel)	Nicht relevant	DK 0 oder DK I	-
	Kalkgebunden Luftkalkmörtel	Rückbau erfolgt in Verbindung mit Mauerwerk und Armierung.					
	Mörtel mit hydraulischem Kalk	Sortenreine Trennung während des Rückbaus nicht oder nur mit hohem technischen und personellen Aufwand möglich,					
	Mörtel mit Putz- und Mauerbinder (enthält geringe Mengen CaSO ₄) ⁸³	Gipshaltige Stoffe müssen während des Rückbaus vom Putzträger entfernt werden, falls eine stoffliche Verwertung des Putzträgers vorgesehen ist.					
Normalputz, Dämmputz, Leichtputz mit mineralischen Leichtzuschlägen ⁸⁴ ,							
Gipsputze, z.B. Dünnlagenputze, Akustikputze, siehe Tabelle 23	nachträgliche Sortierung der Armierung ist möglich	Siehe Tabelle 23, Putze, Estriche, Mörtel	nicht möglich				

83 CaSO₄ = Calciumsulfat (Anhydrit → Gips)

84 z.B. Bims, Blähton, Blähtonschiefer, Blähschiefer, Blähperlit, Expandiereter Vermiculit, Blähglas, Flugaschen und Hochofenschlacken,

Putze und Mörtel		Rückbauaufwand / Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologie- verfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
Putze mit organischen Bindemitteln ⁸⁵	Kunstharzputz (Dispersionsputz) Silikonharzputz Dispersions-Silikatputz ⁸⁶		nicht möglich	nicht möglich	nicht möglich, organische Anteile zu gering	DK I oder DK II je nach Potential für Schadstofffrei- setzung ⁸⁷	-
	Normalputz, Dämmputz Leichtputz mit organischen Zusschlägen ⁸⁸						

85 Können gefährliche Stoffe enthalten, z.B. Biozide

86 Enthalten 5 % organische Kunstharze

87 Siehe TA Siedlungsabfall vom 29.05.1993

88 z.B. expandiertes Polystyrol

4.4 Tabelle 21: Glas

Glas		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologie- verfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
Flachglas	Fensterglas als Flachglas auch Verbund- oder Drahtglas (keine Hohlgläser)	Sortenreinheit durch Demontage auf der Baustelle vor Ort und beim Entsorger möglich und für ein hochwertiges Recycling erforderlich	Rückführung hochwertiger Scherben in die Glasindustrie für die Flach- und Hohlglasherstellung, Ausgangsstoff für Bläh- und Schaumglasdämmstoffe oder Glaswolle,	in geringen Mengen unproblematisch in mineralischem Baumischabfall	Nicht relevant	Wenn möglich vermeiden	Reiling Unternehmensgruppe mit 12 Standorten in Deutschland, Weiterführen der Link: http://www.reiling.de/de/flachglas Standorte und Kontakte
Verbundglas (Sicherheitsglas)	Aufwendiger Aufbereitungsprozess, um die glasfremden Stoffe (fest verbundene Zwischenschichten) zu entfernen	Glasurmittel für Keramikprodukte	nicht üblich	Nur aussortierte Folien, für Glasanteile nicht möglich			

4.5 Tabelle 22: Metalle

Metalle		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologie- verfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
Stahl	Altschrott, Neuschrott, Schredderschrott, Stahlspäne, Leicht legierter Schrott mit hohem Gehalt an Begleitelementen, Schrott mit hohem Reststoffanteil, Geschredderter Schrott aus der Müllverbrennung	Sortierung: Auf der Baustelle durch Ausbau vor Ort, bei Entsorgungsunternehmen durch sensorgestützte Sortierung Erlöse: je nach Material erzielbar	Wird vollständig dem eigenen Herstellungsprozess zugeführt	-	Nur in Verbindung mit nicht trennbaren Materialien, (kann aber aus Schlacke zurückgewonnen werden)	geringe Mengen aufgrund nicht trennbarer Verbindungen mit anderen zu deponierenden Materialien	-
Nichteisen-Metalle	Aluminium, Blei, Chrom, Chrom-Nickel, Chrom-Nickel-Molybdän, Elektromotoren, Kupfer- und Aluminiumkabel, Kupfer, Messing, Legierungen (Kupfer, Zinn, Zink, Blei), Zink						
Aluminium	Fenster- und Türrahmen, Beschläge, Fassadenelemente, Fertigungsreste						

4.6 Tabelle 23: Gipshaltige Baumaterialien

Gipshaltige Baumaterialien		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologieverfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
Putze, Estriche, Mörtel	Gipsputz, Gipsestrich, Spachtelmassen, Mörtel	sortenreiner Rückbau möglich aber sehr kostenaufwendig (z.B. durch den Einsatz von Fräsen)	Derzeit nicht möglich	Derzeit nicht möglich	Nicht relevant	Ab DK I und II, in Abhängig- keit von der Sulfatkon- zentration im Eluat ⁸⁹	

89 Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (Abfallablagereverordnung – AbfAbIV) vom 20.02.2001, Zuordnungswerte Anhang 1, z.B. DK I und II, wenn Sulfatgehalt <2.000 mg/l im Eluat, Gefahr der Schwefelwasserstoffbildung

Gipshaltige Baumaterialien		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologieverfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
Bauplatten, Spachtel ohne organische Bestandteile	allen Arten von Gipsblöcken und Gipsplatten mit oder ohne: Papierbeschichtung der Gipsplatte Tapeten Nägeln und Schrauben Farbe	Verschnittreste ⁹⁰ , Überwiegend sortenrein auf der Baustelle erfassbar, aber auch sortierfähig, Vorsortierter des Bauabfall mit überwiegend Gipskartonplatten, vorhandene Störstoffe: • direkte Anhaftungen wie Tapeten und geklebte Fliesen, Verbindungsmittel (Metall-Profilreste, Schrauben) • alle anderen Materialien, z.B. Mineralien, Kunststoffe, Holz, Verbundbaustoffe	Einsatz von aufbereiteten Gipsabfällen: Herstellung neuer Gipsbauprodukte,	in der Zementindustrie (Abbinde-regler für Zement) Herstellung gipshaltiger mineralischer Spezialprodukte (Düngemittel für die Landwirtschaft)	nur organische Anhaftungen nach Sortierung, z.B. Papier	Ab DK I und II, in Abhängigkeit von der Sulfatkonzentration im Eluat ⁸⁹	Gipsrecycling A/S Verwendung spezieller grüne Abfallsammelbehälter Farbe auf Sammelhöfen, Nutzung mobiler Recyclinganlagen MUEG Sachsen, seit 03.07.2014, drei Sammelstellen der MUEG in Sachsen, Weiterführender Link: http://www.mueg-gipsrecycling.de/ STRABAG-Baden-Württemberg seit 21.11.2014, Weiterführender Link: http://www.strabag-umwelttechnik.com/

90 Beim Einbau von Gipskarton-Platten auf der Baustelle entstehen ca. 15 % Verschnittreste, die sich gut für das Gipsrecycling eignen und deshalb zu sammeln und einer entsprechend Verwertung zuzuführen sind.

Gipshaltige Baumaterialien		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologieverfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
Bauplatten, Spachtel mit organische Bestandteilen	Gipsfaserplatten (auch mit Dampfbremse), Verbundplatten mit Dämmstoff- Beschichtung,	Ausbau der Produkte möglich sortenreine Trennung der Verbundmaterialien nicht wirtschaftlich, Kennzeichnungen der Zusammensetzung!	Technisch möglich, aber nicht vorhanden	Derzeit nicht möglich	Nicht relevant	Ab DK I und II, in Abhängig- keit von der Sulfatkonzen- tration im Eluat ⁸⁹	
	Trockenestriche						
	Dachbodenelemente						
	Brandschutzplatten						
	Decken- und Akustikdecken- systeme						

4.7 Tabelle 24: Dämmstoffe

Dämmstoffe		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologieverfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
Expandiertes Polystyrol (EPS)	WDVS aus EPS unabhängig vom Vorhandensein von HBCD (dennoch mit möglichst geringen Verunreinigungen)	Sortenreine Trennung während des Rückbaus technisch nicht möglich ⁹¹	CreaSolv-Verfahren zur Rückführung in den Herstellungsprozess in Erprobung	nicht möglich	übliches Vorgehen nach erfolgter Sortierung Heizwert: 39,9 MJ/kg Entsorgung HBCD-haltiger EPS-Abfälle	nicht zulässig	CreaSolv-Verfahren in Erprobung
	Sortenreine	Sammeln während der	Rückführung in den	Verwendung:	übliches Vor-	nicht	Firmengebundene

91 keine Maschinen auf dem Markt, die einen selektiven Rückbau vor Ort auf der Baustelle wirtschaftlich vertretbar ermöglichen, theoretisch Rückbau von 3 Stofffraktionen (Putz mit Dämmstoffanhaftungen, Dämmung, Material der Tragkonstruktion mit Dämmstoffanhaftungen), praktisch maschineller Rückbau von 2 Stofffraktionen (Dämmung mit Anhaftungen aus Putz, Material der Tragkonstruktion mit Dämmstoffanhaftungen) oder 1 Stofffraktion aus Putz, Dämmung, Tragkonstruktion, Sortierung (sortenreine Trennung) erfolgt soweit technisch möglich in Abwägung wirtschaftlicher Gesichtspunkte in stationären Anlagen der Entsorgungsbetriebe in 2 Stofffraktionen (Mineralik, Organik)

Dämmstoffe		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologieverfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
Expandiertes Polystyrol (EPS)	Baustoffreste ohne HBCD mit Polymer-FR	Verarbeitung Fallen beim Rückbau nicht an,	Herstellungsprozess Löseverfahren Creasolv nicht erprobt.	gemahlen als Leichtzuschlag für Mörtel, Beton, und Dämmputze Zuschlagstoff zur Porenbildung in Ziegeln Aufschmelzen und Verdichten zur Herstellung von PS-Spritzgussteilen Wärmedämmende Ausgleichschüttung	gehen nach erfolgter Sortierung Heizwert: 39,9 MJ/kg	zulässig	Sammelsysteme-Rücknahme eigener Produkte ⁹² Isobouw RYGOL DÄMMSTOFFE Bachl Kunststoffverarbeitung NAFAB Foams Berlin: WKI Isoliertechnik
Expandiertes Polystyrol	HBCD-haltiges Material	Sortenreine Trennung während des Rückbaus technisch nicht	Keine, außer CreaSolv-Verfahren	nicht möglich	Siehe oben	nicht	CreaSolv-Verfahren in

- 92 Isobouw Kosten 100 - 250€/Rücknahme (<http://www.isobouw.de/unternehmen/news/isobouw-eps-daemmstoff-abfall.html>)
Rygol Kosten 100 - 150€/Rücknahme+ 2€/Sack a'2m³ (<http://www.rygol.de/downloads/nachhaltiges-recycling-von-daemmstoffen-aus-eps.html>)
Bachl Kosten 50 - 120€/Rücknahme+ 2€/Sack a'2m³ (<http://www.bachl.de/index.php/umwelt-und-recycling/eps>)
NAFAB Kosten 45 - 125€/Rücknahme+ 3,50€/Sack a'2,5m³
In Berlin: WKI Kostenlos bei Selbstanlieferung, variable Kosten bei Abholung

Dämmstoffe		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologieverfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
(EPS)	Einstufung als nicht gefährlicher Abfall (seit 08/2017)	möglich	(siehe oben)			zulässig	Erprobung
Extrudiertes Polystyrol (XPS)	nur Rücknahme von sortenreinen Baustoffresten ohne HBCD, FCKW- und HFCKW-freie Polyurethan-Hartschäume (Problem FCKW ⁹³ und HFCKW ⁹⁴ geschäumt)	Fallen beim Rückbau nicht an	Rückführung in den Herstellungsprozess möglich	nicht möglich	übliches Vorgehen nach erfolgter Sortierung Heizwert: 47 MJ/kg	Nicht zulässig	Firmengebundene Rücknahmesysteme z.B. Bachl ⁹⁵
Polyurethan	Sortenreines	Sortenreine Trennung während	nicht möglich	nicht üblich	übliches Vor-	nach ther-	-

93 Problem: FCKW würde bei der Zerkleinerung von XPS freigesetzt werden und gelangen als Treibhausgas in die Atmosphäre, Strategie: getrennte Sammlung und Entsorgung von XPS (Verbrennungsanlage bei der das FCKW mit verbrannt wird)

94 HFCKW enthält deutlich weniger FCKW

95 Bachl nimmt nur eigene Produkte zurück nach Prüfung der Sortenreinheit

Dämmstoffe		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologieverfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
PUR / PIR	oder nicht sortenreines Material aus Dach- oder Wanddämmung	des Rückbaus technisch nur bei ungebunden eingebautem Material möglich			gehen nach erfolgter Sortierung Heizwert: 25 MJ/kg übliches Vorgehen nach erfolgter Sortierung Heizwert: 25 MJ/kg	mischer Vorbehandlung	
	sortenreine, nicht verunreinigte, FCKW- und HFCKW-freie Polyurethan-Hartschäume	Fallen beim Rückbau meist nicht an	nicht möglich	Herstellung von Klebe-pressplatten (Purenit) als spanplatten-ähnliche Bauplatte		nach thermischer Vorbehandlung	Firmengebundene Rücknahmesysteme z.B. Puren GmbH
Steinwolle	Rockwool-Flachdachprodukte aus Baustellen-	Sortenreiner Rückbau manuell	Rückführung in den Herstellungsprozess vor Ort,	Herstellung von Porosierungs-mitteln für Ziegel	Nicht relevant	DK I und DKII, verpackt in Ballen-	Firmengebundene Rücknahme: Rockcycle (Deutsche

Dämmstoffe		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologieverfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
	verschnitt und alte Steinwolle-Dämmstoffe aus der Sanierung, kein WDVS					form gepresst, überdeckt mit mineralischen Abfällen	Rockwool)
Glaswolle	Dämmung aus dem Dachbereich, kein WDVS		Rückführung in den Herstellungsprozess nur für saubere Produktionsreste	nicht möglich	Nicht relevant		Firmengebundene Rücknahme: Ursa
Steinwolle / Glaswolle	Verunreinigte Abfälle, z.B. aus WDVS		Nicht vorhanden für Glaswolle, möglich für Steinwolle	nicht möglich	Bedingt vorhanden	Nachthermischer Vorbehandlung	Derzeit keine verfügbar Für Steinwolle Laborstadium erreicht
Schaumglas Blähglas-	Schaumglas-schotter	Liegt beim Rückbau sortenrein vor ⁹⁶ , wenn in Geotextil	Rückführung in den Herstellungsprozess	Zerkleinert, als Füll- und Schüttmaterial	Nicht vorhanden	DK I	-

96 Vermischungsmöglichkeit mit Beton der Bodenplatte, wenn Bodenplatte im Sägeverfahren rückgebaut wird

Dämmstoffe		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologieverfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
granulat		verlegt, ist Material sehr sauber und wiederverwendbar, nach Ausbau Ausgangskörnung kleiner, aber dennoch verdichtbar	nicht getestet, weil Altglas derzeit noch ausreichend günstig zur Verfügung steht	im Tiefbau / Straßenbau ⁹⁷			
	Dämmplatten verbaut in Trockenbauweise	Sortenreiner Rückbau möglich	Rückführung in den Herstellungsprozess nicht üblich				
	Dämmplatten verbaut in Heissbitumen (erdberührte Bodendämmung) oder bituminöser Kaltkleber (erdberührte Wanddämmung,	Sortenreiner Rückbau nicht möglich		nicht möglich	Vorhanden, wenn bituminösen Anhaftungen (zu klären ab welchen Bitumengrad Pflicht!)	nach thermischer Vorbehandlung,	-

97 Die Korngröße von Schaumglaschotter wird durch das Verdichten immer kleiner. Eignung prüfen!

Dämmstoffe		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologieverfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
	Kerndämmung, Dachdämmung)						
Perlite	Dämmplatte (gebunden mit Bitumen oder Kunstharz) oder als lose Schüttung	Schüttung sortenrein erfassbar	Verwendung als Bodenauflockerer, als Zuschlagstoff (leichte Gesteinskörnung) für Mörtel und Beton	nicht üblich	Nicht vorhanden	DK I	-
		Dämmplatten sortenrein nach losen Einbau	nicht möglich	nicht möglich		nach ther- mischer Vorbe- handlung,	
Hanf als Dämmplatte Stopfhanf	Sortenreine Hanf- Dämmstoffe ohne borhaltige		Rückführung in den Herstellungsprozess, Kompostierung, wenn Produkt natürliche	nicht möglich	vorhanden, Heizwert: 16,9 MJ/kg	nach ther- mischer Vorbe-	Firmengebundene Rücknahme, z.B. Thermo Natur - Kostenlose

Dämmstoffe		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologieverfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
	Flammschutzmittel (ab Herstellung 2013, z.B. aus Dachdämmungen)		Stützfasern besitzt			handlung	Rücknahme bei individuelle Anlieferung zum Werk nach Nördlingen (500 km von Berlin)
	Hanf-Dämmstoffe mit borhaltigem Flammschutzmittel (Besorgnis erregender Stoff) oder nicht sortenreines Material ⁹⁸	Bei WDVS ⁹⁸	nicht möglich				-
Holzfaserdämmung	Sortenreines oder nicht sortenreines Material	Aus dem Dachbereich sortenrein manuell rückbaubar,	Keine Rückführung in den Herstellungsprozess ⁹⁹	nicht möglich	Vorhanden Heizwert: 18MJ/kg	nach thermischer Vorbehandlung	-

98 Hanf-Dämmstoff als WDVS noch ohne bauaufsichtliche Zulassung

99 nur Frischholz für die Herstellung, Gefahr Schimmelkontamination

Dämmstoffe		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologieverfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
	(borhaltig)						
Zellulose	Dämmplatten, Einblasdämmung (Flocken)	Dämmplatten z.B. aus Leichtmetallständerwänden liegen sortenrein vor, Flocken aus Hohlraumdämmung können sortenrein maschinell abgesaugt werden	Nicht vorhanden	nicht möglich	übliche Entsorgung Heizwert Dämmplatte: 17 MJ/kg, Flocken: 24,7 MJ/kg	nach thermischer Vorbehandlung	-

4.8 Tabelle 25: Kunststoffe

Kunststoffe		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologie- verfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponie- rung	
Polyvinyl- chlorid (PVC) – Kunststoff - Dach- und Dichtungs bahnen	Unkaschierte, lose verlegte oder punktförmig befestigte PVC Dach- und Dichtungsbahnen, Schwimmbad- und Teichfolien, Vlieskaschierte und / oder verklebte Dach- und Dichtungsbahnen aus PVC	Lose verlegte Bahnen, z.B. unter Gründächern: sortenrein auf der Baustelle erfassbar Verklebte Bahnen: auf der Baustelle sortenrein rückbauen, Anhaftungen von Kleber sind unproblematisch, sonstige Materialien, z.B. Holz, Metall, Dämmstoffe sind vollständig zu entfernen	Vinyloop PVC-Recycling- Verfahren: Herstellung eines PVC-Compound- Mikrogranulat (R-PVC), Ausgangsstoff für neue PVC- Produkte	nicht möglich	Problematisch wegen des Anteils an Weichmachern, giftige Rauchgasent- wicklung sowie gefährliche Rückstände Heizwert: 25 MJ/kg	Nicht erlaubt	ROOFCollect in Kooperation mit geschulten Dachdecker- unternehmen Weiterführender Link: http://www.roofcollect.com/ Restart Recycling-System der Fa. Tarkett https://boden.objekt.tarkett.de/content/tarkett-recycling-system
PVC– Kunststoff -Fenster- Profile	Fensterrahmen und Flügel, Rollladenpanzer, Türen aus PVC	Ausbau auf der Baustelle, Entfernen von Verglasung, Dichtungen, Beschlägen	Rewindow (Fenster- Recycling Service). Gut recyclebar, wenn sortenrein vorliegt und Weichmacheranteil bekannt ist; 50 % alte PVC- Rahmen werden wieder zu Fensterrahmen	nicht möglich	Siehe oben Heizwert: 18 MJ/kg	Nicht erlaubt	kostenpflichtiges bundesweites Holsystem durch Partner-Recycling- Unternehmen von verschiedenen Standorten, Weiterführender Link: http://www.rewindo.de/

Kunststoffe		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologie- verfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponie- rung	
Polyolefine:	Dichtungsbahnen, Dampfbremsen HD-PE (Polyethylen mit hoher Dichte) LD-PE (Polyethylen mit geringer Dichte) PP (Polypropylen), PA (Polyamid), ABS (Acrylnitril- Butadien-Styrol), EPDM (Ethylen- Propylen-Dien- Monomer) PF (Phenoplaste)	Wie PVC – Kunststoff - Dach- und Dichtungsbahnen (siehe oben)	Granulate: sortenrein aber auch gemischt möglich	nicht möglich	Optimaler Entsorgungsweg bei Verunreinig- ungen Heizwert: 40 MJ/kg	Nur minera- lische Verbren- nungs- rück- stände in der Schlacke, sonst nicht	-
	Glasfaser mit organ- ischen Bestand- teilen	Gewebe bei WDVS	Materialgemisch aus Gewebe mit Putz- und Klebmörtel als Rückbauprodukt bei WDVS	Nicht vorhanden	nicht möglich	Kunststoffe mit geringem Heizwert	Nach ther- mischer Vor- behandl ung

4.9 Tabelle 26: Holz /Holzwerkstoffe

Holz / Holzwerkstoffe ¹⁰⁰		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologieverfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
A1 – Holz	unbehandeltes Holz, Rinden, Sieb- und Schleifstäube, Sägespäne, Schnittreste	Sortenreine Erfassung auf der Baustelle	Wiederverwendung möglich	Uneingeschränkt vorhanden, Holzspäne für die Herstellung von Holzwerkstoffen, Kompostierung	Aufbereitung zu Holzhackschnitzeln Idealerweise in Biomassefeue- rungsanlagen zur Strom- und Wärmezeugung, Heizwert: 16 bis 19 MJ/kg (bei einer Feuchte von u=12 %)	Nicht relevant	-
A2- Holz	verleimtes, gestrichenes, beschichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel (ohne schädliche Verunreinigungen) z.B. Dielen, Fehlböden, Bretterschalungen aus dem Innenausbau, Türblätter und Zargen von Innentüren, Profilblätter für die Raumausstattung, Deckenpaneele, Zierbalken usw. (ohne schädliche Verunreinigungen), Bauspanplatten.	Entfernen von Lackierungen oder Beschichtungen		Holzspäne für die Herstellung von Holzwerkstoffen, mineralisch gebundene Holzwerkstoffe, z.B. Gips- oder Zementspanplatten oder Holzwolleleichtbauplatten (HWL)			

100 A3-Hölzer sind selten Bauhölzer. Dazu gehören z.B. Möbel, die über den Sperrmüll erfasst werden.

Holz / Holzwerkstoffe ¹⁰⁰		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologieverfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
A4 – Holz	Holz mit Holzschutzmitteln oder PCB (polychlorierte Biphenyle), z.B. Konstruktionshölzer für tragende Teile, Holzfachwerk und Dachsparren, Fenster, Fensterstöcke, Außentüren, imprägnierte Bauhölzer aus Außenbereich, Hölzer mit schädlichen Verunreinigungen	Getrenntes Erfassen und Ausbauen ist zwingend erforderlich	nicht zulässig	nicht zulässig	In Verbrennungsanlagen mit Zulassung nach BImSchG Berlin: siehe Entsorgungsanlagen		über SBB – Sonderabfallgesellschaft Berlin Brandenburg durch nach BImSchG zugelassene Entsorgungsbetriebe
Holzwoolleichtbauplatten (HWL)	Holzspäne und Zement oder Magnesit als Akustikplatten unverputzt als Putzträgerplatten verputzt oder mit Fliesen belegt	Von der Tragkonstruktion sortenrein zu trennen, Putze sind vom HWL-Untergrund nur bedingt trennbar	Nicht möglich	Nicht möglich	Heizwert: 6,5 MJ/kg	Nach thermischer Vorbehandlung	in Deutschland nicht bekannt ¹⁰¹

101 In Dänemark vorhanden, siehe Troldekt

Holz / Holzwerkstoffe ¹⁰⁰		Rückbauaufwand/ Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologieverfügbarkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
Zementgebundene Spannlatten	Ca. 60 Vol-% Holzspäne mit ca. 40 Vol-% Zement und Anorganik. Verwendung als Bauplatte mit hohen Anforderungen an den Witterungsschutz und Brandschutz.	Abhängig von der Schichtenkombination mit anderen Baumaterialien	Nicht möglich	Nicht möglich	Nicht sinnvoll	DK I	-

4.10 Tabelle 27: Bitumen

Bitumen		Rückbauaufwand / Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologieverfüg- barkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
Abdichtungsbahnen ¹⁰²	Polymerbitumen- Schweißbahnen	Verklebte Bahnen: sortenreiner Rückbau meist schwierig,	wirtschaftlich nicht interessant	nicht möglich	Optimale Entsorgung, gemeinsam mit organischen Stoffen Heizwert: 40 MJ/kg	Nur mineralische Verbren- nungsrückstände in der Schlacke, sonst nicht	-
	Bitumen- Dachdichtungsbahn en	Rückbau in Verbindung mit sonstigen Materialien, z.B. Holz, Metall, Dämmstoffen					
	Bitumen- Dichtungsbahnen						
	Bitumen- Dachbahnen	Lose verlegte Bahnen: sortenreiner Rückbau möglich, aber Produkt ist ein Verbundmaterial aus Bitumen und Trägereinlage (Glas- oder Polyestervlies, Glasgewebe, Glasvlies- Polyester- Kupferfolienverbund, Kupferband)					

Bitumen		Rückbauaufwand / Aufbereitungsaufwand	Recyclingqualität				Technologieverfüg- barkeit
			Recycling	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung	Deponierung	
Abdichtungsanstriche bzw. -beschichtungen	Bituminöse Anstriche, Flüssigfolien	Sortenreiner Rückbau kaum möglich, wenn doch, sehr kostenaufwendig (z.B. durch den Einsatz von Fräsen)	Grundsätzlich möglich, aber möglich je nach Gestein – Anhaftung, Patent „Verfahren zum Recycling von bitumenhaltigen Reststoffen“ ¹⁰³ vorhanden	Derzeit nicht möglich	Nur in Verbindung mit organischen Materialien	Als organischer Anteil im mineralischen Abfall, DK I und DK II (Grenzwerte beachten!)	-

103 Siehe <http://www.patent-de.com/20071031/DE102005040244B4.html>, (zuletzt gesichtet am 15.12.2017)

5. Begleitende Studien

Parallel zur Entwicklung der Erstversion des Bewertungssystems wurden bereits umfangreiche Voruntersuchungen - zum einen an typischen Baukonstruktionen und zum anderen auf Gebäudeebene am Beispiel des UBA2019-Gebäudes - vorgenommen. Insbesondere auch diese Studien zeigten, dass die Erstversion des Bewertungssystems einer Weiterentwicklung (siehe Kapitel 6) bedurfte, da Konstruktionen mit bekanntermaßen gutem Recyclingpotenzial - wie z.B. Stahlbeton - in Einzelfällen methodisch bedingt zu ungünstig eingestuft wurden.

Da einerseits die Bewertung in diesen Studien noch auf Grundlage der im Weiteren verworfenen Erstversion beruht, andererseits die über diese Bewertung hinausgehenden Ergebnisse jedoch für weiterführende Arbeiten hilfreich sein können, werden die Studien als Anlagen zur Verfügung gestellt.

Dabei handelt es sich um folgende Arbeiten:

1. Koç, Altunay Bilge: Validieren von Bewertungsalgorithmen zum Erfassen der ökologischen und ökonomischen Qualität sowie des End-of- Life von Bauteilkonstruktionen, Masterarbeit an der TU Berlin, September 2017, [104]
2. Validieren von Bewertungsalgorithmen zum Erfassen der ökologischen und ökonomischen Qualität sowie des End-of-Life von Bauteilkonstruktionen, Masterarbeit an der TU Berlin, Dezember 2018, [105]
3. UBA2019 – Nachhaltigkeitsstudien am Gebäude: Untersuchungen zum Einfluss verschiedener massiver Außenwandkonstruktionen gleichen Energiestandards auf Ökologie und Ökonomie und Verwertungspotential am Nutzungsende, Masterarbeit an der TU Berlin, März 2018, [106]

Zusammenfassung der Ergebnisse zur ersten Arbeit

Die grundlegenden Ziele der Arbeit waren es, Baukonstruktionen zu erstellen und sie hinsichtlich ihres Lebenszyklus und ihrer Recyclingfähigkeit zu analysieren. Dabei wurde der Schwerpunkt auf das End-of-Life der Bauteile gelegt.

Bei den ausgewählten Baukonstruktionen handelt es sich um Bauteile aus der Gebäudehülle. Die Auswahl der Bauteile wurde eingegrenzt auf massive Bauteile unter Verwendung des Energiestandards des UBA2019 Gebäudes. Einige wenige Außenwandbauteile erreichten den hochgesetzten U- Wert von $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nicht. Daher wurden für die Betrachtung der ökologischen Qualitäten die Dämmschichtdicken dieser Bauteile an den U- Wert angepasst, auch wenn diese Dicken baupraktisch nicht umgesetzt werden könnten. Hierbei handelt es sich dann um theoretische Werte.

Bei der Untersuchung der globalökologischen und ökonomischen Auswirkungen liegt der Fokus auf den Szenarien Herstellung, Nutzung (hauptsächlich Instandsetzung) und Entsorgung. Die Rückbaukosten in der Entsorgungsphase konnten nicht berücksichtigt werden. Der Grund dafür ist, dass die Rückbaukosten mit vielen Variablen verbunden sind und deshalb nicht durch eine Rechenmethode vereinfacht dargestellt werden können. Was die ökonomische Qualität betrifft, so ist festzustellen, dass die Umweltkriterien GWP und PENRT in der Herstellungsphase bei allen Bauteilen dominieren. Bei Fenstern entstehen die höchsten Umweltauswirkungen in der Nutzungsphase. Grund dafür ist der Reinigungs- und Instandsetzungsaufwand. In der Entsorgungsphase wird das Szenario Abfallaufbereitung und wenn nötig die Deponierung betrachtet.

Um die Bauteile nach ihrer Recyclingfreundlichkeit quantitativ einschätzen zu können, wurden hierfür zwei Bewertungssysteme des End- of- Lifes (EOL) angewendet und verglichen. Bereitgestellt werden die Systeme von der TU Berlin (Anfangsversion) und vom BBSR, wobei das Bewertungssystem der BBSR im BNB bereits integriert und veröffentlicht ist. Beide Systeme befinden sich noch in der Erprobungszeit und wurden in dieser Studie ausführlich behandelt. Auch wenn beide Systeme das EOL durch die Kategorien Rückbau, Trennung und Verwertung verwenden, ergeben sich in einigen Fällen stärker abweichende Ergebnisse zwischen den Systemen. Die Gründe werden im Folgenden geschildert.

Im anfänglichen TU Berlin- Bewertungssystem steht in der Kategorie Rückbau das gesamte Gebäude im Vordergrund. Dazu war es nötig anzugeben, welche Gebäudehöhe das rückzubauende Gebäude hat, in was für einer Umgebung es steht und welche Bauweise für das Dach, die Geschosse und die Untergeschosse vorliegen. Ebenfalls wurde nach der Art der Bauteile unterschieden. Da kein Gebäude betrachtet wurde, musste man hier Annahmen treffen und mit den Bauteilen hypothetisch ein Gebäude erstellen. Die Bewertungsergebnisse liegen dicht beieinander. Möchte man die Ergebnisse des TU Berlin- Bewertungssystems der dynamischeren Ergebnisse des BNB- Bewertungssystems angleichen, so sind Veränderungen in der Gewichtung der Punktevergabe oder in der Berechnungsformel des TU Berlin- Systems vorzunehmen.

Die stärksten Abweichungen zwischen den Bewertungssystemen treten bei den Außenwänden in der Kategorie der Trennung auf. Das TU Berlin- Bewertungssystem konzentriert sich bei der Trennung auf die Aspekte: Anzahl der Schichten, Verbindungsart und dessen Material sowie Menge der Verbindungen. Bei der Analyse des TU- Berlin Systems wurden in der Arbeit Verbesserungspunkte vorgeschlagen.

Bei der Verwertung arbeiten beide Systeme nach derselben Berechnungsart. Dadurch konnten die Punktevergaben im Detail aufgezeigt werden. Auffallend waren hierbei vor allem die unterschiedlichen Bewertungsergebnisse für Außenputz.

Zudem geht aus der Betrachtung hervor, dass der Rückbau und die Trennung in den Systemen unterschiedliche Bilanzgrenzen haben. Im BNB- System erfolgt eine erste Trennung in der Kategorie Rückbau. Getrennt werden hier Bauteile in Abbruchfraktionen. Eine weitere Trennung erfolgt auf Sammel- und Lagerstellen in der Kategorie Trennung. Hier werden die Fraktionen von Störstoffen befreit und ggf. aufbereitet. Das TU Berlin- Bewertungssystem hingegen befasst sich in der Kategorie Trennung mit der grundlegenden Trennung der Bauteilschichten.

Das BNB- Bewertungssystem geht bei allen drei Kategorien (Rückbau, Trennung, Verwertung) auf die Materialien und deren Eigenschaften im Bauteil ein, sowie auf den technischen Aufwand, der im jeweiligen Prozess aufgebracht werden muss. Des Weiteren erfolgt jeweils ein Vergleich zwischen den Bauteilen und anderen möglichen Bauteilaufbauten, die der Bauart des begutachteten Bauteils entsprechen. Damit ist das BNB- Bewertungssystem genauer auf das Bauteil abgestimmt, wodurch sich auch die starken Schwankungen zwischen den Bauteilgruppen und den Ergebnissen der Erstversion des Bewertungssystems der TU Berlin ergeben. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Bewertungssysteme Bauteile als recyclingfreundlich bewerten, die:

- leicht lösbare Verbindungstechniken wie mechanische Verbindungen haben.
- Materialien beinhalten, die stofflich verwertet werden können. Idealerweise werden sie in den eigenen Stoffkreislauf mit einer hohen Quote (wie z.B. Metalle) rückgeführt.
- wenig Materialvielfalt haben.

Insgesamt fallen die Bewertungen der Bauteile gut aus, weil für massive Materialien größtenteils Verwertungswege bestehen. Die synthetisch hergestellten Materialien wie die Dämmstoffe sowie Verklebungen, Verbundstoffe und Zusätze verschlechtern eher die Gesamtbewertung. Doch nur für wenige Verbundstoffe wie z.B. Wärmeschutzverglasung oder Stahlbeton gibt es Aufbereitungswege, in denen die Stoffe relativ sortenrein wiedergewonnen und ihren Wertstoffkreisläufen zugeführt werden können. Eine andere Herausforderung stellen Verbundbaumaterialien bzw. Bauteile dar, die mineralische und organische Anteile besitzen.

Bei der Gegenüberstellung der GWP- Anteile, PENRT- Anteile, der Kosten und der Ergebnisse der EOL- Bewertungssysteme wird Folgendes deutlich:

- Das zweischalige Mauerwerk mit Steinwolle- Dämmung (2MW-PZ300-SW) ist kostengünstig, energiearm wie auch emissionsarm im Vergleich zu den anderen Außenwänden. Ausschlaggebend ist die lange Lebensdauer dieser Konstruktion, wodurch Materialerneuerungen in der Nutzungsphase vermieden werden. Auch die Trennung dieses Bauteils in ihre einzelnen Schichten ist sehr einfach, da die Schichten mechanisch miteinander verbunden sind. Jedoch verunreinigt der Fugenmörtel den Ziegel. Dennoch kann der gemischte Ziegel eine stoffliche Verwertung finden im Gegensatz zur Steinwolle- Dämmung, die derzeit noch deponiert werden muss.
- Das Bauteil mit porösem Ziegel als Dämmstoff (AW-Haus2226) ist kostengünstig und emissionsarm wie das obige Bauteil, jedoch erreicht es nicht den gewünschten U-

Wert von $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Seine sortenreine Trennung ist durch die Mörtel- und Putzhaftungen nur teilweise möglich.

- Das Bauteil mit vorgehängter hinterlüfteter Bekleidung (VHB-BT200-ESt) ist das kostenaufwendigste und emissionsstärkste Außenwandbauteil, es schneidet dafür aber im EOL immer gut ab. Sicherlich wird dieses Bauteil viel besser in der Ökonomie und Ökologie bewertet, wenn der Austausch der Steinwolle-Dämmung von 40 auf 50 Jahre erweitert wird. Damit müsste die teure Komponente, die Unterkonstruktion, nicht erneuert werden.
- Die Außenwände mit WDVS fallen wegen den variierten Baumaterialien in ihrer Bewertung unterschiedlich aus. Allgemein ist festzuhalten, dass Kork als Biomasse GWP- Werte gutgeschrieben werden und daher in der Bilanz weniger GWP hat als Steinwolle und EPS. Dafür ist EPS der günstigere Dämmstoff. Kork und EPS werden am Ende ihres Lebenszyklus verbrannt, weshalb sie in der Verwertung besser eingestuft werden als Steinwolle. Bei den Tragschichten ist zwar der Stahlbeton die teurere Variante, hat aber eine höhere Verwertungsquote im Vergleich zum Hohlziegel, Kalksandstein und Porenbeton. Die Verwertung von Porenbeton und Kalksandstein wird derzeit noch als problematischer angesehen.
- Die erdberührten Bauteile mit Abdichtung werden in jeder Hinsicht ungünstiger bewertet als die ohne Abdichtung.
- Die variierten, geklebten Flachdachabdichtungen bringen keine sonderlichen Unterschiede.
- Fenster sind allgemein mit hohen Kosten verbunden, besonders Stahlfenster. Außerdem entstehen in ihrer Nutzungsphase - insbesondere bedingt durch den erforderlichen Austausch - höhere Emissionen und Energieaufwendungen. Nach dem BNB- System zu urteilen, sind sie sehr recyclingfreundlich. Differenziert wird hierbei jedoch nur nach den Materialrahmen.

Damit allgemeingültige Aussagen von Bauteilen in Bezug auf ihre ökologischen und ökonomischen Qualitäten sowie Recyclingfreundlichkeiten getroffen werden können, müssen die Ergebnisse auf Plausibilität untersucht und daraufhin der Bewertungsansatz verbessert werden. Ein iteratives Vorgehen scheint hier geboten, da die Zusammenhänge komplex sind.

Zusammenfassung der Ergebnisse zur zweiten Arbeit

Das im Rahmen des „Urban Mining“-Projekts entwickelte Erst-Verfahren zur Bestimmung des Abfallentstehungspotentials dient der Einschätzung der Recyclingfreundlichkeit von Bauteilen am Lebenszyklusende und hilft das Potential von Gebäuden als urbane Minen besser einzuschätzen.

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf Baukonstruktionen mit hohem Holzanteil.

Die Anwendung des Verfahrens auf ausgewählte Konstruktionen zeigte dabei, dass ähnliche Bewertungsergebnisse bereits mit dem EOL-Bewertungsverfahren des BNB erzielt werden konnten. Anders als beim BNB-Verfahren werden jedoch alle einzelnen Bauteilschichten systematisch erfasst und bewertet, sodass Schichten, die sich schlecht auf die Rückbaubarkeit, Sortenreinheit oder Verwertbarkeit auswirken, viel leichter identifiziert und gegebenenfalls ersetzt werden können. Beim BNB-Verfahren wird ein Bauteil im Gesamten betrachtet, wobei die Bewertung allein vom bewertenden Planer abhängt, da es keine detaillierten Anweisungen bei der Nachweisführung gibt. Die BNB-Methode ist somit subjektiver und weniger systematisch als die TUB-Methode.

Des Weiteren ist eine feinere Differenzierung zwischen den Recyclingpotentialen der Bauteile möglich als bei der BNB-Methode. Beim BNB-Verfahren werden einem Bauteil zwischen 0 bis 10 Punkten zugewiesen. Dies stellt ein recht begrenztes Bewertungsspektrum dar, sodass feine Unterschiede zwischen ähnlichen Bauteilen nicht auffallen. Bei der TUB-Methode wird hingegen ein konkreter Wert für die Bauteile systematisch berechnet, wobei bislang keine obere Grenze gegeben ist. Auf diese Weise können genauere Werte ermittelt werden und ähnliche Bauteile besser miteinander verglichen werden.

Insgesamt brachte die Anwendung der TUB-Methode auf Holzkonstruktionen die Erkenntnis, dass diese über eine gute Rückbaubarkeit und Verwertbarkeit verfügen und somit als potentielle urbane Minen genutzt werden können. Dabei erreichen die betrachteten Holzwände im Vergleich zu ihren massiven Mitstreitern zwar höhere Primärenergieverbräuche, dafür sind jedoch die Emissionen an die Umwelt sowie die gebäudebezogenen Kosten geringer. Die zweischalige Mauerwerkswand aus Kalksandstein wies ebenso ein hohes Potential als urbane Mine auf. Da bei massiven Konstruktionen die verhältnismäßig hohen Masseneinsätze pro m²-Wand einen großen Einfluss auf Emissionen und Kosten beim derzeitigen Bewertungsansatz einnehmen, kann über „schlanke“ Konstruktionen die Bewertung verbessert werden. Dieser Ansatz ist jedoch zu hinterfragen, da er sich bei Eigenschaften, die nicht im Recyclingbewertungssystem direkt betrachtet werden, negativ auswirken kann, wie z.B. beim Schallschutz oder beim sommerlichen Wärmeschutz. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Bewertung des Recyclingpotentials grundsätzlich in die BNB-Gesamtwertung zu integrieren.

Nachteilig an massiven Konstruktionen ist zudem die Tatsache, dass sie geringe wärmedämmende Eigenschaften besitzen und somit in der Regel nicht auf eine zusätzliche Dämmschicht verzichtet werden kann. Je nach Materialeinsatz werden die Ergebnisse dadurch sehr negativ beeinflusst. Z.B. WDVS, die sich nicht sortenrein von der darunter liegenden Schicht trennen lassen schneiden schlecht ab.

Die EOL-Bewertung zeigte, dass mit Holzrahmenkonstruktionen auch ohne WDVS gute U-Werte und hohe Recyclingpotentiale erreicht werden können.

Weiterhin hat sich ergeben, dass der Einfluss von Bitumenschichten in Dachaufbauten relativ groß Einfluss auf die Verwertung hat, während er in Bodenplatten aufgrund des geringen Massen- bzw. Volumenanteils am Gesamtbauteil untergeht.

Innerhalb weiterer Studien sollte die Anwendung des TUB-Ansatzes auf weitere Bauteile in anderen Bauweisen erfolgen, um die Eignung des Verfahrens weiter zu erproben. In dieser Arbeit stellten die hohe Systematik bei der Vorgehensweise der Methode sowie die Betrachtung aller einzelnen Schichten einen Vorteil gegenüber der BNB-Methode dar. Insbesondere die Betrachtung einzelner Schichten ist für die Förderung des Urban Mining notwendig, um frühzeitig kritische Materialien identifizieren zu können. Es muss sich jedoch durch weitere Anwendungen zeigen, wie aussagekräftig dieses Verfahren ist und ob möglicherweise für jede Bauteilart ein anderer Bewertungsmaßstab (z.B. Referenzwert) gewählt werden muss.

Zusammenfassung der Ergebnisse zur dritten Arbeit

In dieser Arbeit wurde der Einfluss unterschiedlicher Außenwandkonstruktionen auf die Nachhaltigkeitsbewertung eines Gebäudes untersucht. Bei dem untersuchten Gebäude handelt es sich um ein Bürogebäude in Holzbauweise für eine Forschungseinrichtung des Umweltbundesamts in Berlin Marienfelde. Das Gebäude UBA2019 wurde im Plusenergiestandard errichtet. D.h. es erzeugt mehr Energie im Jahresmittel, als es für seinen Betrieb benötigt. Nach EU-Gebäuderichtlinie soll dieser Standard für alle Neubauten im öffentlichen Bereich ab dem Jahr 2019 umgesetzt werden. Im Rahmen der Errichtung wurde eine Nachhaltigkeitsbewertung nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) vorgenommen und der Gold-Standard erreicht.

Da das Gebäude als reiner Holzbau konzipiert und ausgeführt wurde, stellte sich die Frage nach dem Einfluss von anderen Außenwandtypen. Insbesondere mineralische Konstruktionen waren hier von Interesse. Die Untersuchung beinhaltete die ökologischen als auch die ökonomischen Kriterien. Auf Basis einer IST-Analyse des gesamten Gebäudes, einschließlich der Innenbauteile wurden Variantenvergleiche mit der Software eLCA durchzuführen. Zu beachten ist, dass für die unterschiedlichen Varianten keine angepassten Heizwärmeberechnungen durchgeführt werden konnten. Für die Gebäudetechnik wurden jedoch plausible Annahmen getroffen. Weiterhin wurde das Urban-Mining-Potenzial nach BNB 4.1.4 sowie die Bewertung der Bauteile nach der Verwertungspotential-Referenzmethode (VRM) der TU-Berlin durchgeführt.

Folgende Varianten wurden betrachtet:

1. Außenwand mit WDVS
2. Außenwand mit vorgehängter hinterlüfteter Bekleidung
3. Zweischalige Außenwand mit Kerndämmung
4. Außenwand ohne zusätzlicher Dämmung

Alle anderen Bauteile sowie die Gebäudetechnik blieben unverändert.

Hinsichtlich der Außenwandvarianten konnte bezüglich der Untersuchungsparameter keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, welche am vorteilhaftesten bzw. am ungünstigsten ist. Die Komplexität der verschiedenen Konstruktionen und der unterschiedlichen Materialien ermöglicht keine eindeutige Einschätzung bzgl. der Nachhaltigkeitskriterien. Eine große Rolle spielte dabei die Gebäudekubatur des UBA 2019, das mit nur zwei Vollgeschossen ein eher untypisches Verwaltungsgebäude repräsentiert. Die Masse und Fläche der Außenwände zum Gesamtgebäude ist zu gering um einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis zu haben.

Für die weiterführende Bearbeitung dieser Fragestellung wird empfohlen, den Untersuchungsrahmen auf das Gesamtgebäude zu legen. Dazu sind Gebäude zu wählen, die besser dem Typus von Büro- und Verwaltungsgebäuden entsprechen. Die massive Bauweise ist auch auf die übrigen Bauteile des Gebäudes zu übertragen. Weiterhin sind die technischen Anlagen auf die jeweiligen Gebäudevarianten realitätsnah anzupassen, Da sich durch die massive Bauweise der Kühl- und Heizbedarf und demzufolge die Kennwerte der Anlagentechnik ändern, was wiederum Einfluss auf die ökologischen und ökonomischen Faktoren hat.

6. Bewertungsmethodik zur Recyclingeffizienz

6.1 Veranlassung

Die Frage der Recyclingeffizienz ist im Spannungsfeld weiter Anforderungen zu sehen.

Baukonstruktionen sollen

- vielfältige - teilweise konkurrierende - technische Anforderungen erfüllen (z.B. Standsicherheit, Brandschutz, Wärmeschutz, Schallschutz, Feuchteschutz, etc.),
- kostengünstig in der Erstellung sowie im Unterhalt sein,
- über den gesamten Lebenszyklus eine geringe Ressourceninanspruchnahme und geringe Umweltwirkungen gewährleisten und
- eine der angestrebten Nutzungsdauer des Gebäudes angepasste technische Lebensdauer aufweisen.

Die Erfüllung dieser Anforderungen wird im Bewertungssystem nachhaltiges Bauen BNB im Variantenvergleich auf Gebäudeebene durch quantitative und qualitative Bewertungsmethoden geprüft. Da die Recyclingeffizienz nicht losgelöst betrachtet werden kann, wird vorgeschlagen, mittelfristig einen Indikator „Ressourceneffizienz“ zu entwickeln, der - wie in Abschnitt 1.4 beschrieben - den bisherigen Kriteriensteckbrief 4.1.4 Rückbau-Trennung-Verwertung fortschreibt.

Baukonstruktionen

- werden nach unterschiedlichen Konstruktionsprinzipien entworfen
 - Prinzip „Funktionstrennung“: Jeder Bauteilschicht wird die Anforderung zugeordnet, die sie am besten erfüllen kann (z.B. massive Tragschicht für die Standsicherheit, den Schallschutz und den sommerlichen Wärmeschutz sowie die Dämmung für den winterlichen Wärmeschutz),
 - Prinzip „monolithisch Bauen“: Erfüllung der Anforderungen im Kompromiss,
- bestehen aus vielfältigsten Materialien (z.B. mineralisch, metallisch, organisch erdölbasiert, organisch nachwachsend) und
- werden verschiedenartig gefügt (z.B. im Verbund wie bei Stahlbeton, vollflächig oder teilflächig verklebt wie Wärmedämm-Verbundsysteme, punktuell mechanisch fixiert wie bei vorgehängten hinterlüfteten Bekleidungen, lose verlegt wie hochpolymere Flachdachabdichtungen unter Auflast).

Bezüglich des in vorliegendem Forschungsbericht angesetzten Betrachtungszeitraums vom Rückbau bis zur Verwertung ergeben sich weitere Parameter, die das Ergebnis der Recyclingeffizienz beeinflussen, wie der

- Rückbauaufwand (z.B. sortenreine händische oder einfache maschinelle Entnahme möglich, Spezialtechnik erforderlich)
- Transportaufwand (z.B. Material als Gemenge oder als einzelne Fraktionen)
- Aufbereitungsaufwand (z.B. ohne Aufbereitung direkt verwertbar, mehrstufige Verfahren erforderlich)

Als Grundlage wird der Effizienzansatz verwendet. Effizienz wird als Verhältnis von Nutzen zu Aufwand definiert. Um die Effizienz des Recyclingprozesses zu beschreiben sind die signifikanten Faktoren, die den Nutzen und den Aufwand beschreiben, zu ermitteln.

6.2 Entwurf des Indikators „Recyclingeffizienz“

Um die Erfüllung der Zielsetzung nicht-recyclingfähiger Baumaterialien zu vermeiden und insbesondere auch im Variantenvergleich bewerten zu können, wird eine quantifizierende Beurteilung angestrebt. Hierbei wird - wie bereits in Kapitel 5.1 beschrieben - der klassische Effizienzansatz gewählt und die Recyclingeffizienz R bestimmt.

Da im Bauwesen sowohl Baustoffe mit hoher Rohdichte – wie z. B. Stahlbeton – als auch sehr geringer Rohdichte – wie z. B. Wärmedämmstoffe – Anwendung finden, wird neben dem üblichen massebezogenen Ansatz R_m zusätzlich ein volumenbezogener Ansatz R_v gewählt. Dieses begründet sich u. a. dadurch, dass

- mit zunehmenden Anforderungen an den Wärmeschutz der Anteil von Materialien geringer Rohdichte steigen wird (siehe Kapitel 2.1.2),
- Transportaufwendungen großer Volumina gegenüber einer reinen Tonnagebetrachtung maßgeblich werden können und
- die Deponierung leichter Baustoffe zu einem deutlich höheren Verdichtungsaufwand im Vergleich zu schweren Schüttungen führen kann.

Auf der sicheren Seiten liegend ergibt sich die Recyclingeffizienz R als Minimum der beiden Werte.

$$R = \min \{R_m | R_v\}$$

R_m massebezogene Recyclingeffizienz

R_v volumenbezogene Recyclingeffizienz

Zu Beurteilung der Recyclingeffizienz einer Baukonstruktion wird diese zunächst in ihre

n-Bauteilschichten bzw. Materialien zerlegt. Für jede dieser Bauteilschichten bzw. Materialien ergibt sich dann ein massebezogener Anteil $f_{m,i}$ bzw. ein volumenbezogener Anteil $f_{v,i}$ an der entsprechenden Baukonstruktion.

$$f_{m,i} = \frac{m_i}{\sum_{j=1}^n m_j}$$

$$f_{v,i} = \frac{V_i}{\sum_{j=1}^n V_j}$$

n Anzahl der Bauteilschichten / Materialien einer Baukonstruktion

$f_{m,i}$ massebezogener Anteil einer Bauteilschicht / eines Materials an einer Baukonstruktion

$f_{v,i}$ volumenbezogener Anteil einer Bauteilschicht / eines Materials an einer Baukonstruktion

Für jede einzelne Bauteilschicht bzw. für jedes einzelne Material wird die Effizienz durch den Quotienten aus Nutzen durch Aufwand beschrieben. Der Nutzen besteht darin, ein Recyclingprodukt möglichst hoher Qualitätsstufe q_i mit einer bereits etablierten Technologie S_i zu gewinnen. Der Aufwand setzt sich aus dem Rückbau- r_i , Transport- t_i und Aufbereitungsaufwand a_i zusammen.

Damit lässt sich die Recyclingeffizienz einer Baukonstruktion über die Summe der massen- bzw. volumenbezogenen gewichteten Effizienz des Einzelmaterials bzw. der einzelnen Bauteilschicht berechnen.

$$R_{m/v} = \sum_{i=1}^n f_{m/v,i} \cdot \frac{q_i \cdot S_i}{r_i \cdot t_i \cdot a_i}$$

Für den gewählten Bewertungsansatz wird im Rahmen des vorliegenden Forschungsberichts eine erste grobe Abschätzung möglicher Eingangskennwerte vorgeschlagen, die jedoch keinesfalls als finalisiert angesehen werden kann. Wie bei der Festlegung der technischen Nutzungsdauer unterschiedlicher Konstruktionen im Bewertungssystem nachhaltiges Bauen sind auch hier die Eingangskenngrößen mit den beteiligten Akteuren im Konsens zu erarbeiten und anschließend im Rahmen einer Pilotphase zu testen.

q_i Qualitätsstufe des Recyclingprodukts

- Wiederverwendung oder geschlossener Produktkreislauf => höchste Stufe ($q_i = 10$)
- Hochwertige stoffliche Verwertung oder Einsatz als Sekundärbrennstoff ($q_i = 8$)
- Minderwertige stoffliche oder hochwertige thermische Verwertung => ($q_i = 6$)
- Sonstige stoffliche oder minderwertige thermische Verwertung => ($q_i = 4$)
- Energetische Beseitigung oder Deponie bis Deponieklasse I => ($q_i = 1$)
- Energetische Beseitigung mit erhöhtem Aufwand oder Deponieklasse II und höher
=> niedrigste Stufe ($q_i = 0$)

- auf Baukonstruktionsebene in tabellarischer Form - wie in Kapitel 4 - schwer lesbar ist.

Des Weiteren hängt die Recyclingeffizienz ab von

- der erreichbaren Qualitätsstufe des Recyclingprodukts (z.B. geschlossener Produktkreislauf, stoffliche Verwertung, thermische Verwertung, Deponierung), die auch die Vermarktungschancen bestimmt, und
- Technologieverfügbarkeit (z.B. etabliertes System, Pilotstadium, Labormaßstab, keine Technologie verfügbar)

Höhere Qualitätsstufen des Recyclingprodukts führen zu besseren Vermarktungschancen, sind aber in der Regel auch mit höheren Aufwendungen verbunden.

Zusammenfassend ergibt sich aus dem sehr komplexen System die Herausforderung, einen quantifizierenden Indikator zu entwickeln, der die Bewertung der Recyclingeffizienz von Baukonstruktionen für die Phasen Rückbau bis Verwertung ermöglicht.

7. Fazit und Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse dienen als Basis für eine objektive und transparente Einordnung der Recyclingfähigkeit von Baumaterialien und Baukonstruktionen. Der Bericht informiert über abfallarme Gebäudekonstruktionen, für zukünftige Neubauten. Damit trägt der Leitfaden aktiv zum Zero Waste Konzept des Landes Berlin bei.

Das im Leitfaden vorgeschlagene Bewertungssystem zur Einschätzung des Recyclingpotenzials wurde vor dem Hintergrund der Einführung des Leitfadens Nachhaltiges Bauen für öffentliche Baumaßnahmen im Land Berlin entwickelt. Somit dienen die Inhalte in erster Linie für die Weiterentwicklung des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB) für den Neubau von Büro- und Verwaltungsgebäude. Viele Inhalte sind jedoch universell gültig, so dass eine direkte Übertragung auf andere Bau- oder Bewertungsaufgaben im Kontext „Urban Mining“ zu verwenden sind.

Bezüglich des BNB zielt der Bericht auf die inhaltliche Schärfung des Kriteriensteckbriefs 4.1.4 Rückbau, Trennung und Verwertung.

In einem weiteren Schritt sind auf Basis der eingeordneten Materialien und Konstruktionen aus Kapitel 3 und 4 typische Bauteile zusammenzustellen und auf Gebäudeebene nach ihrem Recyclingpotenzial zu untersuchen.

8. Literatur

- [4] Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG, §3 (25), zuletzt geändert am 20.11.2015
- [6] Abfallverzeichnis-Verordnung – AVV, Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis vom 10.12.2001, zuletzt geändert am 17.06.2017
- [10] DIN 68800-2:2012-02, Holzschutz, Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau
- [16] Ausführungsvorschriften zu Sonderbauten und Garagen – AV Sonderbauten – Garagen 2016
- [17] Verwaltungsvorschrift Beschaffung und Umwelt Berlin – VwVUB, Verwaltungsvorschriften für die Anwendung von Umweltschutzanforderungen bei der Beschaffung von Liefer-, Bau- und Dienstleistungen vom 23.02.2016
- [18] Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19.05.2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, Artikel 9, Absatz 1b
- [20] DIN 4109-1:2018-01, Schallschutz im Hochbau, Teil 1: Mindestanforderungen
- [29] Bauordnung für Berlin – BauO Bln vom 29. 09.2005, zuletzt geändert am 17. 06.2016
- [30] Verordnung über Bauvorlagen, bautechnische Nachweise und das Verfahren im Einzelnen (Bauverfahrensverordnung) – BauVerfVO vom 19.10.2006, zuletzt geändert am 04.02.2016
- [33] DIN EN 206:2017-01, Beton, Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [34] BBSR, Forschung für die Praxis, Band 06, Materialströme im Hochbaupotentiale für eine Kreislaufwirtschaft, 2017, S. 31 RC-Beton wird derzeit ohne Ziegelanteile hergestellt, obwohl normativ möglich.
- [35] DIN EN 12620:2008-07, Gesteinskörnungen für Beton
- [36] DIN 1045-2:2008-08, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [37] DIN 4226-101:2017-08, Rezyklierte Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620-101, Typen und geregelte gefährliche Substanzen
- [39] Kreislaufwirtschaft BAU – Eine Initiative der deutschen Bauwirtschaft
- [42] Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen Teil A – VOB/A, Abschnitt 2, §16d EU Wertung, Abs. (2) Nr.1
- [43] DIN 4226-101:2017-08, Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620-101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen, Tabelle 1: Stoffliche Zusammensetzung der Typen rezyklierter Gesteinskörnungen
- [44] DIN 4226-101:2017-08, Tabelle 2 – Höchstwerte der Eluat- und Feststoffparameter
- [45] BBSR, Forschung für die Praxis, Band 06, Materialströme im Hochbau- potentiale für eine Kreislaufwirtschaft, 2017, S. 32 – 33
- [46] UBA Texte 05/2013 - Optimierung des Rückbaus / Abbruchs von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-

Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung, Tabelle A5, S.186

- [48] BBSR, Forschung für die Praxis, Band 06, Materialströme im Hochbau – Potentiale für eine Kreislaufwirtschaft, 2017, Seite 36
- [49] <http://infraleichtbeton.de/>
- [53] www.bauen-neu-denken.de
- [55] Ergebnisse Forschungsbericht „LifeCycle KMF - Optimierung der Stoffströme im Lebenszyklus von Bauprodukten aus künstlichen Mineralfaserdämmstoffen“ gefördert durch Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-14.24)
- [57] Aus Handlungshilfe - Neue Deponieverordnung, Artikel 1 der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts vom 27. April 2009, Erste Verordnung zur Änderung der Deponieverordnung vom 17. Oktober 2011 der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg von April 2012
- [58] Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (Abfallverordnung) – AbfAbIV vom 20.02.2001, Zuwendungswerte Anhang 1
- [59] Umweltbundesamt – UBA, Optimierung des Rückbaus/Abbruchs von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung, erschienen in TEXTE 05/2013, bearbeitet von: Dr.-Ing. Karin Weimann, Dipl.-Ing. Jan Matyschik, Dr.-Ing. Christian Adam Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Dipl.-Ing. Tabea Schulz, Dr.-Ing. Elske Linß, Prof.Dr.-Ing. habil. Anette Müller, Bauhaus-Universität Weimar, Februar 2013, Internetlink: <http://www.uba.de/uba-info-medien/4430.html>, abgerufen am 19.07.2018
- [63] CONSULTIC MARKETING & INDUSTRIEBERATUNG GMBH, Vortrag „Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2007 Kurzfassung“ vom 21.11.2008
- [64] BBSR, Forschung für die Praxis, Band 06, Materialströme im Hochbau – Potentiale für eine Kreislaufwirtschaft, 2017, S. 45
- [65] BBSR, Forschung für die Praxis, Band 06, Materialströme im Hochbau – Potentiale für eine Kreislaufwirtschaft, 2017, S. 44
- [66] BBSR, Forschung für die Praxis, Band 06, Materialströme im Hochbau – Potentiale für eine Kreislaufwirtschaft, 2017, S. 46
- [67] <https://polystyreneloop.org>
- [70] Erste Verwaltungsvorschrift zur Änderung der Verwaltungsvorschrift für die Anwendung von Umweltschutzanforderungen bei der Beschaffung von Liefer-, Bau- und Dienstleistungen (Verwaltungsvorschrift Beschaffung und Umwelt) – VwVBU vom 23.02.2016, Abschnitt 4, Punkt 13
- [71] Altholzverordnung, Anhang VI
- [72] BBSR, Forschung für die Praxis, Band 06, Materialströme im Hochbau – Potentiale für eine Kreislaufwirtschaft, 2017, S. 39

- [76] VDI 3925, Blatt 1:2016-09
- [77] BBSR, Forschung für die Praxis, Band 06, Materialströme im Hochbau – Potentiale für eine Kreislaufwirtschaft, 2017, S. 44
- [79] Alexander Schnell (Bauhaus-Universität Weimar); Anette Müller (IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH); Katrin Rübner (BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin): Entwicklung von Leichtgranulaten aus Mauerwerkbruch für die Betonherstellung, in Innovative Technologien für Ressourceneffizienz in rohstoffintensiven Produktionsprozessen, Förderprogramm FONA, Fördermaßnahme r², S. 300 ff, Fraunhofer Verlag, Karlsruhe, 2013.
- [80] DIN 4226-101:2017-08, Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen, Tabelle 1: Stoffliche Zusammensetzung der Typen rezyklierter Gesteinskörnungen
- [89] Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (Abfallablagerungsverordnung) – AbfAbIV vom 20.02.2001, Zuordnungswerte Anhang 1
- [102] DIN V 20000-201
- [103] <http://www.patent-de.com/20071031/DE102005040244B4.html>, (zuletzt gesichtet am 15.12.2017)
- [104] Koç, Altunay Bilge: Validieren von Bewertungsalgorithmen zum Erfassen der ökologischen und ökonomischen Qualität sowie des End-of- Life von Bauteilkonstruktionen, Masterarbeit an der TU Berlin, September 2017
- [105] Thanh Van Dinh Thi: Validieren von Bewertungsalgorithmen zum Erfassen der ökologischen und ökonomischen Qualität sowie des End-of-Life von Bauteilkonstruktionen, Masterarbeit an der TU Berlin, Dezember 2018
- [106] Muchow, Julia Olivia: UBA2019 – Nachhaltigkeitsstudien am Gebäude: Untersuchungen zum Einfluss verschiedener massiver Außenwandkonstruktionen gleichen Energiestandards auf Ökologie und Ökonomie und Verwertungspotential am Nutzungsende, Masterarbeit an der TU Berlin, März 2018