

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

IBP-Bericht UHS-041/2023

Ressourcen der Zukunft für Dämmsysteme, Putze und Mörtel

**Detaillierte wissenschaftliche Darstellung des Status Quo zu Rückbau, Recycling,
Kreislaufverhalten der Produktgruppen der VDPM-Mitgliedsunternehmen**

Durchgeführt im Auftrag des
Verbands für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V.
Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

Der Bericht umfasst
141 Seiten Text
8 Tabellen
32 Abbildungen

Christoph Schwitalla
Regina Schwerd
Anian Trettenhann
Susanne Lehmann-Brauns

Valley, 15. September 2023

Abteilungsleiter

Bearbeiter

Dr.-Ing. Christian Scherer

Dipl.-Ing. Christoph Schwitalla

Zusammenfassung	4
1 Einführung	9
1.1 Gegenstand der Studie	11
1.2 Ziel der Studie	11
1.3 Methodik	12
1.4 Kurzer Überblick zu Branche und Produkten in Deutschland	13
1.5 Aufbau von WDVS	14
1.6 Glossar	16
1.6.1 Recycling	17
1.6.2 Circular Economy/Kreislaufwirtschaft	17
1.6.3 Ende der Abfalleigenschaft im Bauwesen	19
2 Regulatorik	22
2.1 Produktrecht	23
2.2 Bauordnungsrecht	27
2.3 Abfallrecht	29
2.4 Chemikalienrecht	38
2.5 Zusammenfassung der regulatorischen Anforderungen und Formulierung produktbezogener Maßnahmen	40
3 Produktverhalten	42
3.1 Entwicklung des Gebäudesektors	42
3.2 Entwicklung des Gesamtmarktes für Putze, Mauermörtel und Estrichmörtel	44
3.3 Entwicklung des WDVS-Gesamtmarktes	47
3.4 Rohstoffeinsatz in Deutschland (Stoffströme)	52
3.5 Haltbarkeit und Dauerhaftigkeit	54
3.6 Bau- und Abbruchabfälle	58
3.7 Sekundärrohstoffe	61
4 Aktuelle Ansätze zum nachhaltigkeitsorientierten Umgang mit Material und Produkt	64
4.1 Handlungsfeld 1: Produkte neu denken	64
4.1.1 Ressourcenschonendes Konstruieren (Bauen): „Design for Sustainability“ (D4S)	65
4.1.2 Ressourcenschonendes Konstruieren (Rückbau): „Design for Disassembly“ (DfD)	66
4.1.3 Modulares Bauen	67

4.1.4	Reversible Klebstoffe für Materialverbünde	68
4.2	Handlungsfeld 2: Wiederverwendung	69
4.3	Handlungsfeld 3: Reparatur	72
4.4	Handlungsfeld 4: Recycling	74
4.4.1	Rückbau	74
4.4.2	Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen	78
4.4.3	Einflussfaktoren zur Erhöhung der Verwertungsquoten von Sekundärrohstoffen	81
4.4.4	Recyclingverfahren	81
4.5	Handlungsfeld 5: Abfallvermeidung und Aufbereitung	86
4.6	Handlungsfeld 6: Reststoffe	88
4.7	Handlungsfeld 7: Umweltauswirkungen und Langzeitverhalten	91
4.7.1	HBCD (1,2,5,6,9,10-Hexabromcyclododecan)	93
4.7.2	Biozide und ihre Transformationsprodukte	95
4.7.3	Schwermetalle und Spurenelemente	96
4.7.4	Bewertung von Umweltwirkungen	96
5	Schlussfolgerungen	99
5.1	Quoten und Konzepte	99
5.2	Hemmnisse	100
5.3	Notwendige Entwicklungen	102
6	Abkürzungsverzeichnis	106
7	Literaturverzeichnis	110
A.1	Anhang	132
A.1.1	Begriffsklärungen unter Einbezug relevanter Normen	132
A.1.2	Glossar	136

Zusammenfassung

Die Europäische Kommission veröffentlichte im März 2020 einen neuen Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft [EU-Kommission 2020a]. Er soll einen maßgeblichen Beitrag zur Erreichung der Klimaneutralität der EU bis 2050 innerhalb des „Green Deals“ leisten [EU-Kommission 2019a]. Ein Ziel besteht darin, die kreislaforientierte Wiederverwendung von Materialmengen bis 2030 zu verdoppeln. Als Schlüsselbereich des Aktionsplans werden nachhaltige Produkte genannt. Im Bausektor sehen die von der Kommission angekündigten Maßnahmen u. a. die Überarbeitung der **Bauproduktenverordnung**, die Einführung von Anforderungen an den Rezyklatanteil, Prüfung sowie die Überarbeitung und Festlegung von Zielvorgaben für die stoffliche Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen vor. Bei langlebigen Produkten wie **Putzen, Mauermörteln und Estrichmörteln bzw. Verbundsystemen wie WDVS** (Wärmedämm-Verbundsysteme) besteht die große Herausforderung in der Entwicklung von technologischen Lösungen, die in den Bereichen Wiederverwendung, selektiver Rückbau, Verwertung und Recycling bei Produkten unterschiedlicher Generationen ansetzen. Gleichzeitig sollen alle Maßnahmen genutzt werden, die zur Verlängerung der Nutzungszeit von Materialien, Komponenten oder Systemen im Bestand beitragen.

Die vorliegende **Studie** bildet aktuelle regulatorischen Rahmenbedingungen und Stoffströme ab und gibt einen Überblick über den Stand des Wissens zu verschiedenen, vorab definierten Handlungsfeldern [Geissdoerfer 2020; DIN, DKE, VDI 2023]). Zu diesem Zweck wurde eine umfassende **Literaturrecherche** durchgeführt. Die Studie stellt die Basis für die Erarbeitung einer Roadmap dar. Daraufgehend sollen Ansatzpunkte und Handlungsempfehlungen für Industrie und Politik abgeleitet werden.

Der zusammengestellte **rechtliche Rahmen** umfasst die wichtigsten Vorschriften für den Einsatz von recycelten Baustoffen. Die Bestimmungen erstrecken sich über den gesamten Lebenszyklus von Bauteilen, einschließlich deren Wiedereingliederung in den Kreislauf, der Vermarktung und der Nutzung. Daher müssen über den gesamten Lebenszyklus hinweg verschiedene Rechtsgebiete (Produkt-/ Bauordnungs-/ Abfall-/ Chemikalienrecht) und einzelne regulatorische sowie normative Vorschriften berücksichtigt werden. Besondere Bedeutung hat die Entwicklung von **Maßnahmen und Instrumenten zur Stärkung des Recyclings** sowie von **Anreizen zur Verwendung von recycelbaren Materialien** für den Bereich Dämmsysteme, Putze, Mauermörtel und Estrichmörtel.

Bei der Beurteilung der **Dauerhaftigkeit** muss grundsätzlich unterschieden werden, ob bzw. inwiefern rein optische Veränderungen oder ausschließlich Beeinträchtigungen der technischen Leistungsfähigkeit der Produkte in eine Bewertung einfließen. Eine gründliche Planung und einwandfreie technische Ausführung vorausgesetzt, sind z. B. für WDVS vor allem in gemäßigten Klimazonen lange Standzeiten von > 50 Jahren erreichbar. Bei regelmäßiger sach- und

fachgerechter Wartung der Systeme ist die Lebensdauer analog zum Gesamtgebäude zu erwarten.

Verschiedene Quellen lieferten Daten zu relevanten **Stoffströmen**. Betrachtet wurden sowohl der Gesamtmarkt für Putze, Mauermörtel und Estrichmörtel, der WDVS-Gesamtmarkt, die Entwicklung des Gebäudebestands, die Mengen an Bau- und Abbruchabfällen sowie der Einsatz von Sekundärrohstoffen.

Die **Handlungsfelder** wurden in Anlehnung an [Geissdoerfer 2020] und [Kadner 2021] definiert.

Handlungsfeld 1: Produkte neu denken

Zu den grundlegenden Prinzipien des ressourcenschonenden Bauens gehören nach [Asam 2018]:

- die Wahl von recyclingfähigen und verwertungsverträglichen Materialien,
- die Planung mit lösbaren Verbindungen,
- die Planung von Verwertungsclustern und modularen Bauwerkselementen, die schonend aus der Konstruktion gelöst und separat behandelt (ausgetauscht, repariert) werden können.

Dies wird durch die Konzepte „Design for Sustainability“ (D4S) und „Design for Disassembly“ (DfD) aufgegriffen. Auch Ansätze zum modularen Bauen oder die Entwicklung reversibler Klebetechniken für WDVS sind hier zu nennen.

Handlungsfeld 2: Wiederverwendung

Wiederverwendet nach KrWG werden Putze, Mauermörtel, Estrichmörtel, Dämmstoffe sowie WDVS im Bestand. Bei rückgebauten oder demontierten Putzen, Mauermörteln, Estrichmörteln, Dämmstoffen sowie WDVS erfolgt eine **Vorbereitung zur Wiederverwendung**.

Teilbereiche der Wiederverwendung bzw. der Vorbereitung zur Wiederverwendung sind u. a.:

- das Versetzen von Gegenständen, Produkten und Systemen in ihren ursprünglichen Zustand,
- eine qualitative Aufarbeitung und Aufrüstung von Gegenständen,
- sowie die Modernisierung und der Ausbau.

Die Reparatur, Instandsetzung, Aufarbeitung, Modernisierung und Aufrüstung der genannten Systeme im Bestand werden in der Branche praktiziert. Dadurch

wird die Nutzungsphase von Produkten verlängert. Eine Maßnahme der Wiederverwendung von z. B. Wärmedämm-Verbundsystemen ist das **Aufdoppeln**.

Handlungsfeld 3: Reparatur

Das Wiederherstellen oder Instandsetzen eines Produkts ist die naheliegende Entscheidung gegen das Wegwerfen und somit für die Reduzierung des Abfallaufkommens und für einen sinnvollen Umgang mit knapper werdenden Ressourcen. Für die Renovierung und Reparatur von WDVS werden von den Systemherstellern unterschiedliche Produkte für diverse Fragestellungen angeboten. Trotz des wachsenden Bewusstseins für Nachhaltigkeit wird die Umsetzung geeigneter Instandhaltungsstrategien häufig noch vernachlässigt. Dabei spielen **Maßnahmen zur Reparatur und Instandhaltung** eine maßgebliche Rolle und können die **Lebensdauer erheblich verlängern**.

Handlungsfeld 4: Recycling und Rückgewinnung

Für eine Bereitstellung von Rezyklaten durch einen Recycling-Prozess sind Abfälle unabdingbar. Ohne **Abfälle** gibt es keine Rezyklate. Bei den gegenwärtig genutzten Einsatzgebieten ersetzen die Recycling-Baustoffe in der Regel die natürlichen Baustoffe. Um Bauprodukt-Abfälle für ein anschließendes Recycling zu gewinnen, existieren mit konventionellem, teils selektivem und selektivem Rückbau unterschiedliche Ansätze. Die resultierenden Abfälle bzw. Fraktionen weisen **unterschiedliche Homogenität** auf und müssen ggfs. zerkleinert, klassifiziert, sortiert und aufbereitet werden. Dazu gibt es bereits unterschiedliche Ansätze oder auch Verfahren, die für Dämmstoffe, Putze, Mauermörtel und Estrichmörtel angewendet werden können. Auch gibt es bereits erste Entwicklungen von Produkten aus Sekundärrohstoffen. Bedingt durch jährliche Rückbauquoten von unter 10 % fehlen die Stoffströme, um standardisierte Produkte gleichbleibender Qualität zu gewährleisten.

Handlungsfeld 5: Abfallvermeidung und Aufbereitung

Aus technologischer Sicht kann das **Abfallaufkommen reduziert**, aber nicht vermieden werden, da zwischen Produkt und Abfall eine direkte Abhängigkeit besteht. Nur durch den Verzicht auf ein Produkt wird auch Abfall vermieden.

Für ein Unternehmen ist Abfallvermeidung oder **Abfallreduzierung** kein rein ökologisches Thema, sondern das Grundprinzip des unternehmerischen Handelns. Maßnahmen, die eine Verschmutzung oder Querkontamination verhindern, tragen direkt zur Abfallvermeidung bei. Auch durch **Rückführung** und Aufbereitung von Wertstoffen aus **Produktions- oder Baustellenverschnitt** werden nicht nur Entsorgungskosten eingespart, sondern auch indirekt ein Beitrag zur Reduzierung des Abfallaufkommens geleistet. Ein weiterer Ansatz sind **Rücknahmesysteme** einzelner Hersteller oder Herstellervereinigungen. Für die Aufbereitung spielen vor allem Trenn- und Sortierverfahren eine wichtige Rolle.

Handlungsfeld 6: Reststoffe

Für die Baustoffindustrie sind Sekundärrohstoffe wie z. B. **Schlacken, Aschen und REA-Gips** von Bedeutung, die als industrielle **Nebenprodukte bzw. Reststoffe in großtechnischen Prozessen** anfallen. Durch politische Vorgaben werden die zur Verfügung stehenden Mengen zukünftig teilweise jedoch sinken. Für die Verwertung von **Reststoffen aus Putzen, Mauermörteln, Estrichmörteln und Dämmsystemen wie WDVS** müssen die daran gestellten Anforderungen quantitativ beschrieben werden, damit die notwendigen Aufbereitungsprozesse gezielt ausgerichtet werden können. Während bei vielen Verwertungsverfahren der Fokus bisher auf Dämmstoffen lag, vor allem aus expandiertem Polystyrol (EPS), da diese den größten Marktanteil einnehmen, müssen auch für die übrigen Fraktionen eines WDVS, wie Putze, Armierungsgewebe und Mörtel, ressourceneffiziente Entsorgungswege gefunden werden. Diese Fraktionen weisen häufig einen Anteil an organischen Bestandteilen (hauptsächlich in Form von Polymeren) zwischen 5 % und 20 % auf, was bislang eine Kreislaufführung im mineralischen Bereich erschwert [Heller 2018].

Handlungsfeld 7: Umweltauswirkungen und Langzeitverhalten

Da den Bestandteilen einer Gebäudehülle komplexe Rezepturen zugrunde liegen und die Produkte – je nach Verwendungszweck – aus einer Vielzahl von Komponenten bestehen, können verschiedenste Inhaltsstoffe auf der Außenfläche von Gebäuden prinzipiell durch Feuchtigkeit mobilisiert und durch abfließendes Regenwasser aus der Fassade ausgewaschen werden. Nicht zu unterschätzen ist, dass organische Verbindungen wie z. B. organische Bindemittel oder Zusatzmittel durch z. B. Bearbeitung, Temperatur und UV-Licht degenerieren und in niedermolekulare Bruchstücke zerfallen können. Um den Übergang von Schadstoffen in das Grundwasser zu vermeiden, muss bei der Verwendung von Recycling-Baustoffen ebenso wie bei der Verwendung von industriellen Nebenprodukten die wasserwirtschaftliche Unbedenklichkeit nachgewiesen werden. Es existieren bereits **Lösungsansätze** für den Umgang mit verschiedenen Schadstoffen oder auch **umweltfreundliche Alternativen**.

Schlussfolgerungen

Die Forderungen des **Green Deal** sehen vor, zum einen den Rezyklatanteil in Produkten zu erhöhen und zum anderen die Menge des Abfalls zu reduzieren. Hieraus ergibt sich ein Dilemma. Sinkt die Menge an recyclingfähigem Abfall, sinkt im gleichen Maße die Menge an Rezyklaten.

Die vollständige Substitution von Primärrohstoffen eines Produktportfolios durch Rezyklate ist nicht möglich. Branchenübergreifend sind **Recyclingquoten** von maximal 10 bis 20 % realistisch. Für einzelne Produkte oder Produktgruppen werden zukünftig höhere Werte möglich sein. Derzeit werden ca. 13 % des Gesamtbedarfs an Rohstoffen im Bausektor mit Sekundärrohstoffen aus Bau- und Abbruchabfällen gedeckt.

Nach [Ghaffar 2020] wird der Einsatz von Bau- und Abbruchabfällen als Sekundärrohstoffe durch **Hemmnisse** wie z. B. Logistik, Kosten, Zeitaufwand, Regulatorik und Unterschiede zwischen Angebot und Nachfrage auf dem Recyclingmarkt erschwert. Zu den wichtigsten **Strategien zur Förderung** von Circular Economy-Ansätzen gehören [Bär 2021; DIN, DKE, VDI 2023]:

- die Optimierung der Verwertungsziele für Abfälle und deren Verwendung als Sekundärrohstoffe,
- die Schaffung eines regulatorischen Rahmens mit dem Ziel, „dass rezyklierte Baustoffe und Primärstoffe bei gleicher Eignung gleichwertig eingesetzt werden können“ [Asam 2018],
- die Reduktion des Rohstoffeinsatzes beim Neubau,
- die verstärkte Verwendung von Recyclingmaterialien,
- die Wiederverwendung von beim Umbau und Abbruch gewonnenen Bauteilen und Materialien,
- die Verbesserung der Dauerhaftigkeit und Anpassungsfähigkeit von Gebäuden im Laufe der Zeit,
- die Verlängerung der Lebensdauer durch nachhaltige Nutzung und Ertüchtigung der bestehenden Bausubstanz.

Methoden wie Design for Sustainability (D4S) oder Design for Disassembly (DfD) befassen sich hauptsächlich mit der Entwicklung von ressourcenschonenden Bauweisen und rückbaufreundlichen Gebäuden der Zukunft. Eine große Herausforderung wird jedoch sein, die vorhandenen anthropogenen Lager wie z. B. Gebäude, Industriebrachen oder Deponien als Quelle von Sekundärrohstoffen für die Bauwirtschaft zugänglich zu machen.

Nach dem Positionspapier der Kommission für nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt (KNBau) [Asam 2018] werden „...große Anteile der Stoffströme aus dem Rückbau und Abbruch bestehender Bauwerke bereits heute rezykliert. Das technische Niveau sollte durch Innovationen in Zukunft aber verbessert werden. Gleichzeitig müssen die Wirtschaftlichkeit, die notwendige Logistik und die Akzeptanz unter den Bauschaffenden wirksam gefördert werden...“

1 Einführung

Natürliche Ressourcen, insbesondere Rohstoffe, sind wesentliche Produktionsfaktoren und damit Grundlagen unseres Wohlstands. Der weltweite Primärmaterialeinsatz hat sich seit 1970 mehr als verdreifacht. Er stieg von circa 27 Milliarden Tonnen im Jahr 1970 auf rund 92 Milliarden Tonnen im Jahr 2017 an. Im Jahr 2060 wird die auf bis zu zehn Milliarden Menschen wachsende Weltbevölkerung schätzungsweise zwischen 143 und 190 Milliarden Tonnen Mineralien, Erze, fossile Brennstoffe und Biomasse in Anspruch nehmen. Das ist sowohl unter wirtschaftlichen als auch unter ökologischen und sozialen Gesichtspunkten eine große Herausforderung. Steigende und schwankende Rohstoffpreise sowie Versorgungsrisiken belasten die deutsche Wirtschaft. Einige wichtige Rohstoffe, wie Erdöl, Kobalt und schwere, seltene Erden sind immer weniger aus leicht zugänglichen Quellen zu beschaffen. Gleichzeitig bringt aber die Nutzung von Rohstoffen über die gesamte Wertschöpfungskette Umweltbeeinträchtigungen mit sich, die von der Freisetzung von Treibhausgasen über Schadstoffeinträge in Luft, Wasser und Boden bis zur Beeinträchtigung von Ökosystemen und Biodiversität reichen können. Schon jetzt übersteigt die Nutzung von natürlichen Ressourcen die Regenerationsfähigkeit der Erde deutlich [BMUV 2022].

Ein schonender und gleichzeitig effizienter Umgang mit natürlichen Ressourcen wird daher eine Schlüsselkompetenz zukunftsfähiger Gesellschaften sein. Wachstum und Wohlstand müssen so weit wie möglich vom Einsatz natürlicher Ressourcen entkoppelt werden. Ziel ist es, die Wettbewerbsfähigkeit zu stärken, den Ressourceneinsatz zu senken und die daraus entstehenden Umweltbelastungen zu verringern [BMUV 2022].

Die Bundesregierung hat 2012 ein umfassendes strategisches Konzept zur Steigerung der Ressourceneffizienz beschlossen, das dazu beitragen soll, das Ziel der Nachhaltigkeitsstrategie zu erreichen: das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess). Seit 2016 ist darin das Ziel verankert, die Gesamtrohstoffproduktivität zu steigern. Dieser Indikator zeigt vereinfacht gesagt an, welcher Geldwert je Tonne eingesetzter Rohstoffe erwirtschaftet wird. Entwickelt sich der Indikator positiv, so zeigt dies eine relative Abnahme des Rohstoffeinsatzes. Die Gesamtrohstoffproduktivität stieg von 2010 bis 2018 um knapp 8 % [BMUV 2022].

Das Thema "Ressourceneffizienz" ist auch auf Ebene der G7 und G20 verankert. Die G7 Präsidenschaften veranstalten Treffen der G7-Ressourceneffizienz-Allianz und Workshops zum Erfahrungsaustausch. Bei den G20 verstetigen sich die unter deutscher Präsidenschaft initiierten G20 Ressourceneffizienzdialoge ebenfalls zu einer kontinuierlichen Veranstaltungsreihe. Diese internationalen Prozesse werden durch wissenschaftliche Handlungsempfehlungen des Weltressourcenrats, sowie der OECD unterstützt. Auf EU-Ebene spielt Ressourceneffizienz eine zunehmend wichtige Rolle in der Umwelt- und Wirtschaftspolitik. Im Rahmen des EU-Aktionsplans Kreislaufwirtschaft wurden zahlreiche Maßnahmen zur Stärkung der Ressourceneffizienz umgesetzt [BMUV 2022].

Der Wandel beziehungsweise die politisch und gesellschaftlich geforderte Transformation begleitet die Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) seit ihren Anfängen in den frühen 1950-iger Jahren als bauphysikalische Maßnahme zur Vermeidung der Tauwasserbildung an Gebäude-Innenflächen bis zur Geburtsstunde als WDVS Ende der 1950-iger Jahre über die Energiekrise und Baukrise in den 1970-iger Jahren und ihre Hochzeit ab den 1980-iger Jahren [Eicke-Hennig 2017].

Die Europäische Kommission hat im März 2020 einen neuen Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft veröffentlicht [EU-Kommission 2020a]. Der Aktionsplan ist das wichtigste Dokument der aktuellen europäischen Ressourcenschonungs- und Kreislaufwirtschaftspolitik. Er soll einen maßgeblichen Beitrag zur Erreichung der Klimaneutralität der EU bis 2050 innerhalb des „Green Deals“ leisten [EU-Kommission 2019a]. Ein Ziel sieht vor, die kreislaforientierte Wiederverwendung von Materialmengen bis 2030 zu verdoppeln. Als Schlüsselbereich des Aktionsplans werden nachhaltige Produkte genannt. Die Nachhaltigkeit zielt hier vor allem auf Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer von Produkten (zum Beispiel Reparierbarkeit), zur Erhöhung des Rezyklatanteils in Produkten und zum Verbot der Vernichtung von unverkaufter nicht verderblicher Ware [Langsdorf 2021].

Im Bausektor sehen die von der Kommission angekündigten Maßnahmen die Überarbeitung der Bauproduktenverordnung, die Einführung von Anforderungen an den Rezyklatanteil, Prüfung, Überarbeitung und Festlegung von Zielvorgaben für die stoffliche Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen vor, sowie Förderung der Entwicklung von digitalen Gebäude-Logbüchern [Langsdorf 2021].

Diesem Transformationsprozess stellt sich auch der VDPM. Bei langlebigen Produkten wie Putzen, Mauermörteln, Estrichmörteln bzw. daraus bestehenden Verbundsystemen wie WDVS besteht die große Herausforderung, um die angestrebten Ziele der EU-Kommission zu erreichen, in der Entwicklung von technologischen Lösungen, die die Lücken im Bereich Wiederverwendung, selektiver Rückbau, Verwertung und Recycling bei Produkten unterschiedlicher Generationen schließen.

Die Herausforderung besteht in der Entwicklung von technologischen Lösungen für Produkte im Bestand als auch für aktuelle und zukünftige Produktlinien (Lösungen nach der Methode des Design for Disassembly). In beiden Fällen werden Wege gesucht, um den Zeitpunkt des Statuswechsels vom Produkt zum Abfall möglichst nach hinten zu verschieben. Des Weiteren müssen Wege aufgezeigt werden für praktikable Verfahren zum selektiven Rückbau von Bestandsgebäuden. Schlussendlich sind Lösungen für die Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus rückgebauten Produkten und Ansätze für deren Wiederverwendung in neuen Rezepturen und Produkten erforderlich.

1.1 Gegenstand der Studie

Gegenstand dieser Studie sind Produkte und Systeme von Herstellern, die durch den Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V. (VDPM) vertreten werden. Im Einzelnen handelt es sich um:

- Dämmsysteme, z. B. Fassadendämmsysteme und Innendämmsysteme,
- Putze, z. B. Außenputz, Innenputz, Wärmedämmputz und Renovierungsputz,
- Mauermörtel, z. B. Normalmauermörtel, Dünnbettmörtel, Leichtmauermörtel und Mörtel für Verblendungsmauerwerk sowie Estrichmörtel.

1.2 Ziel der Studie

Die Europäische Kommission hat im März 2020 einen Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft (circular economy action plan, CEAP) verabschiedet [EU-Kommission 2020a]. Dieser stellt einen der wichtigsten Bausteine der neuen europäischen Agenda des Europäischen Green Deals für das nachhaltige Wachstum dar. Mit dem Übergang/Transformation der EU zu einer Kreislaufwirtschaft sollen der Abbau von natürlichen Ressourcen verringert, das EU-Ziel der Klimaneutralität bis 2050 erreicht, der Verlust der biologischen Vielfalt gestoppt und nachhaltiges Wachstum auf dem Arbeitssektor erreicht werden. Nach Angaben der EU-Kommission fließen ca. 50 % der gewonnenen Rohstoffe in den Bausektor. Gleichzeitig entfallen 35 % des gesamten Abfallaufkommens in der EU auf das Baugewerbe. Nach Schätzungen der EU-Kommission liegt der Anteil an den gesamten Treibhausgasemissionen für die Rohstoffgewinnung und Herstellung von Bauprodukten für die Errichtung und die Renovierung von Gebäuden bei ca. 10 %. Somit soll die Bewirtschaftung von Bau- und Abbruchabfällen aus dem Bausektor im Hinblick auf die Erreichung der politischen Ziele bezüglich Klima, Energie- und Ressourceneffizienz eine Schlüsselrolle übernehmen.

Im Rahmen der Überarbeitung der Zielvorgaben für die Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen legt die EU-Kommission ein besonderes Augenmerk auf die wachsenden Abfallströme. Bei der Neufassung der Bauproduktenverordnung werden von Bauprodukten Nachhaltigkeitsleistung und die Einführung von Rezyklatanteilen unter Berücksichtigung der Sicherheit und Funktionalität eingefordert. Deswegen ist es im Sinne von Abfallvermeidung und Ressourcenschonung dringend erforderlich, auf Herstellerseite Strategien für den Umgang mit WDVS, Putzen, Mauermörteln und Estrichmörteln nach der Nutzungsphase zu entwickeln und für die Umsetzung notwendige politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen rechtzeitig zu adressieren. Gleichzeitig sollen alle Maßnahmen genutzt werden, die zur Verlängerung der Nutzungszeit von Materialien, Komponenten oder Systemen im Bestand beitragen. Zu verstehen sind hier u. a. Maßnahmen zur Instandhaltung, Reparatur und Modernisierung.

Um dieses Ziel zu erreichen, soll die vorliegende Studie:

- einen Überblick über die Branche und ihre Produkte geben,
- relevante Begrifflichkeiten in Form eines Glossars zusammentragen,
- relevante regulatorische Rahmenbedingungen aufzeigen,
- aktuelle Stoffströme darstellen,
- den Stand des Wissens anhand verschiedener, vorab definierter Handlungsfelder abbilden (in Anlehnung an [Geissdoerfer 2020; DIN, DKE, VDI 2023]):
 - o Handlungsfeld 1: Produkte neu denken,
 - o Handlungsfeld 2: Wiederverwendung,
 - o Handlungsfeld 3: Reparatur,
 - o Handlungsfeld 4: Recycling und Rückgewinnung,
 - o Handlungsfeld 5: Abfallvermeidung und Aufbereitung,
 - o Handlungsfeld 6: Reststoffe,
 - o Handlungsfeld 7: Umweltauswirkungen und Langzeitverhalten.

Die Studie stellt die Basis für die Erarbeitung einer Roadmap für die Kreislauf-führung der hier betrachteten Bauprodukte dar. Darauffolgend können ggfs. Ansatzpunkte und Handlungsempfehlungen für Industrie und Politik abgeleitet werden.

Klimaneutralität und der Umgang mit Verpackungsmitteln wie Kunststoffei-mern, Säcken, Folien, Kartonagen etc., die bei der Herstellung, Produktion oder Transport der genannten Produkte oder Systeme anfallen, sind nicht Bestand-teile dieser Studie.

1.3 Methodik

Für die Erarbeitung der vorliegenden Studie wurde eine umfassende Literatur-recherche durchgeführt.

Recherchiert wurde v. a. über die Fraunhofer-eigene Suchmaschine „ELib“. ELib bietet einen einfachen und schnellen Zugang zu wissenschaftlicher Fachlitera-tur. Sie kann fast 300 verschiedene Datenbanken durchsuchen und ermöglicht so den Zugang zu ca. 100 Millionen Zeitschriftenaufsätzen, Büchern, Konfe-renzberichten, Reports und weiteren digitalen Objekten.

Der Index enthält:

- Nachweise aus Scopus, Web of Science, TEMA und anderen Datenbanken,
- eBooks und Journals von Springer, Wiley und Elsevier,
- Nachweise und Volltexte von Fraunhofer-Publica und Fraunhofer ePrints,
- Den kompletten Katalog der IBP-Bibliothek mit Buch- und Zeitschriftenbestand sowie Volltexten der IBP-Veröffentlichungen.

Zusätzlich wurden eBooks und Journals der Verlage Science, IOP-Publishing, MDPI, Ernst & Sohn, Hindawi und SAGE, sowie zur Marktrecherche Datenbanken wie DESTATIS und Frost & Sullivan genutzt.

Die Recherche von relevanten Gesetzestexten erfolgte auf nationaler Ebene über das Bundesgesetzblatt (Online-Archiv der amtlichen Verkündungen von Bundesgesetzen und Rechtsverordnungen: www.bgbl.de und www.recht.bund.de). Rechtsvorschriften der Europäischen Union wurden über das Rechtsinformationssystem EUR-Lex (www.eur-lex.europa.eu) recherchiert.

Die Recherche von Normen und Richtlinien erfolgte über das Portal des Beuth Verlags (www.beuth.de). Erhältlich sind dort über 600.000 Dokumente aus über 60 nationalen, europäischen und internationalen Regelwerken.

Besonderer Fokus wurde bei der Suche auf Publikationen aus den Jahren 2013 bis 2023 gelegt.

Verwendet wurden verschiedene Schlagworte bzw. Verknüpfungen von Suchbegriffen, z. B. Wärmedämm-Verbundsystem, WDVS, Wiederverwendung, Rückbau, Verwertung, Wiederverwertung, Schadensfall, Schadensfreiheit, Wartung, Recycling, Kreislaufwirtschaft, ... und die englischsprachigen Entsprechungen, z. B. ETICS, reuse, disassembly, ... Nach Neuveröffentlichungen bereits bekannter Autoren wurde gezielt mit Namen gesucht.

Durch den Auftraggeber wurden produktbezogene Fachinformationen und Branchendaten zur Verfügung gestellt.

1.4 Kurzer Überblick zu Branche und Produkten in Deutschland

Im Jahr 2021 existierten nach Angaben von [VDZ 2022a] 21 in der Zementindustrie tätige Unternehmen bzw. 41 im Bereich „Herstellung von Zement“ tätige Betriebe [Destatis 2022d] und 54 in der Zementindustrie tätige Werke [VDZ 2022b]. Die Autoren der Roadmap zur Klimaneutralität für Dämmsysteme, Putz und Mörtel [Geres 2023] gehen von 133 Frischmörtelwerken, 86 Trockenmörtelwerken und 6 Nassproduktionswerken aus. Laut den Quartalsberichten über

die Produktionsmengen von Werk trockenmörtelprodukten, die von der B+L Marktdaten GmbH in Bonn erhoben wurden [B+L 2022], wird der Markt in sechs Produktionsgruppen unterteilt. Im Einzelnen sind dies folgende Produktgruppen:

- Produktgruppe 1: Putzmörtel,
- Produktgruppe 2: Mauermörtel,
- Produktgruppe 3: Estrichmörtel,
- Produktgruppe 4: Fliesenchemie,
- Produktgruppe 5: Trockenbeton/Spritzbeton,
- Produktgruppe 6: Mörtel für Garten- und Landschaftsbau.

Eine detailliertere Aufschlüsselung der Stoffströme zu den einzelnen Produktgruppen und WDVS findet sich in den Kapiteln 3.2 und 3.3.

Der Umsatz der deutschen Mörtelindustrie stieg im Jahr 2022 um 112,3 Mio. Euro (+9,05 %) auf den bisherigen Höchststand von insgesamt 1.353,8 Mio. Euro [Destatis 2023b]. Auch die Beschäftigtenzahl stieg um 2,92 % auf einen Höchststand von 4.304 [Destatis 2023c].

1.5 Aufbau von WDVS

Eine Definition für „Wärmedämm-Verbundsystem“ wird im Folgenden in der Übersetzung nach [Heller 2022] in [ETAG 004 2013] gegeben: „Die Systeme bestehen aus einem vorgefertigten Wärmedämmstoff, der auf eine Wand geklebt oder mit Hilfe von Dübeln, Profilen, Spezialteilen usw. mechanisch befestigt wird, oder aus einer Kombination von Kleber und mechanischen Befestigungen. Der Wärmedämmstoff ist mit einem Putz versehen, der aus einer oder mehreren (auf der Baustelle aufgetragenen) Schichten besteht, von denen eine mit einem Armierungsgewebe bewehrt ist. Der Putz wird direkt auf die Dämmplatten ohne Luftzwischenraum oder Trennschicht aufgebracht“.

Ein typischer WDVS-Aufbau ist in Bild 1 exemplarisch dargestellt.



Bild 1:
Typischer WDV-Aufbau nach Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V. (VDPM) [VDPM 2023a]

Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit die Lebenszeit eines Wärmedämm-Verbundsystems durch Aufdoppeln zu verlängern. Das Grundprinzip des mehrschichtigen Aufbaus ist im folgenden Bild 2 dargestellt.

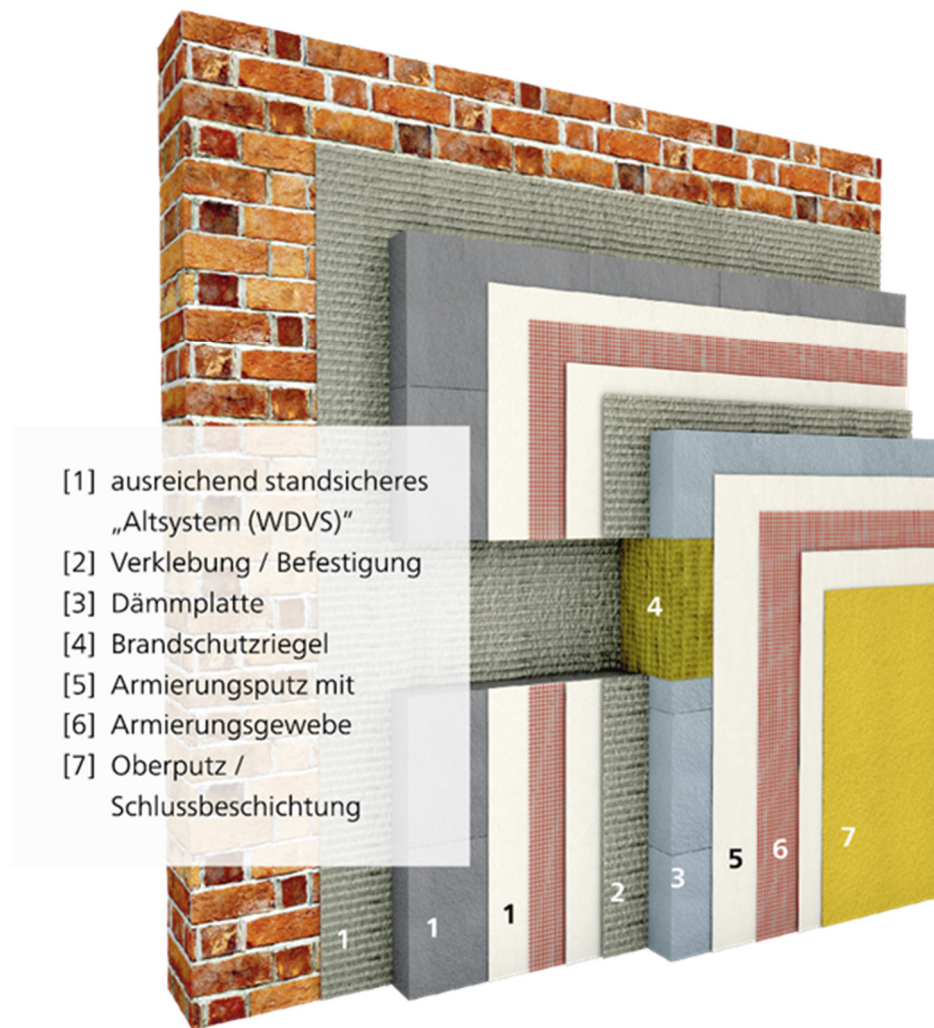


Bild 2:
Beispiele für die Aufdopplung eines Wärmedämm-Verbundsystems nach Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V. (VDPM) [VDPM 2023a].

Definitionen technischer Begriffe (z. B. Putz, Putzmörtel, Oberputz,...) unter Einbezug relevanter Normen finden sich im Anhang (Kapitel A.1.1).

1.6 Glossar

Ein Glossar, in dem relevante Begriffe z. B. aus dem Kreislaufwirtschaftsgesetz [KrWG 2023], der Bauproduktenverordnung [EU 2011], der „Deutschen Normungsroadmap Circular Economy“ [DIN, DKE, VDI 2023] oder der „Circular Economy Initiative Deutschland“ [Kadner 2021] zusammengestellt sind, findet sich im Anhang (Kapitel A.1.2).

Wegen ihrer zentralen Bedeutung werden hier nur die Begriffe Recycling, Circular Economy / Kreislaufwirtschaft sowie Ende der Abfalleigenschaft näher behandelt.

1.6.1 Recycling

Der Begriff Recycling ist im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) definiert und beschreibt Verwertungsverfahren, durch die Abfälle und Rückstände zu Produkten und Materialien entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden [KrWG 2023]. Im engeren Sinn bedeutet Recycling die Rückführung eines Abfallstoffs in einen Produktionsprozess.

Recycling leistet einen bedeutenden Beitrag zum Umwelt- und Ressourcenschutz. Die Verwendung von Recyclingrohstoffen oder Sekundärrohstoffen bietet gegenüber der Nutzung primärer mineralischer Rohstoffe folgende Vorteile:

- Verringerung des Einsatzes primärer Rohstoffe,
- Verminderung der Importabhängigkeit von primären Rohstoffen (bei inländischem Recycling),
- Schonung von natürlichen Ressourcen und Verringerung der Umweltauswirkungen des primären Abbaus,
- In den meisten Fällen eine Verringerung des Energiebedarfs und damit eine Senkung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zur Primärproduktion,
- Verringerung der zu deponierenden Reststoffmengen.

Im Gegensatz zu den Metallrohstoffen ist eine echte Kreislafrückführung bei den Nichtmetallrohstoffen in den meisten Fällen nicht möglich, weil sich viele dieser nichtmetallischen Rohstoffe im Zuge des Herstellungsprozesses eines Produkts unwiederbringlich verändern. Die Rohstoffe gehen dauerhaft neue chemische Verbindungen ein und bilden neue Minerale und Mineralgemenge, die ganz andere Eigenschaften als der Ursprungsrohstoff aufweisen. Das schränkt ihre Recyclingfähigkeit ein bzw. macht Recycling gar unmöglich. So wird z. B. Ton zu Ziegeln gebrannt, aus denen jedoch niemals wieder Ton hergestellt werden kann. Weitere Beispiele sind Kalksteine, die zu Zement oder Branntkalk verarbeitet worden sind, oder Kaolin und Feldspat, die zur Herstellung von Keramik verwendet wurden. Die meisten nichtmetallischen Rohstoffe sind im strengen Sinn daher nicht recycelbar. Häufig lassen sich jedoch die aus ihnen hergestellten Produkte als Substitute für primäre Rohstoffe wieder in den Wirtschaftskreislauf einbringen (Recyclingrohstoffe/Sekundärrohstoffe). Prominente Beispiele hierfür sind Glas und Baumaterialien [BGR 2021].

1.6.2 Circular Economy/Kreislaufwirtschaft

Geissdoerfer et al. [Geissdoerfer 2020] haben in ihrer Studie 114 Definitionen des Begriffs Circular Economy (Kreislaufwirtschaft) überarbeitet und angepasst. Sie definieren Circular Economy (Kreislaufwirtschaft) als ein Wirtschaftssystem, in dem Ressourceninput und Abfall, Emissionen und Energieverluste durch Kreisläufe, Erweiterung, Intensivierung und Dematerialisierung von Material-

und Energiekreisläufen minimiert werden. Erreicht werden kann dies durch Digitalisierung, Servitization (Änderung eines Angebotsportfolios weg von reinen Sachgütern hin zu einer Kombination von Sachgütern und Dienstleistungen), Sharing-Lösungen, langlebiges Produktdesign, Wartung, Reparatur, Wiederverwendung, Aufarbeitung, Überholung und Recycling. Das Modell der Circular Economy nach [Geissdoerfer 2020] ist in Bild 3 dargestellt.

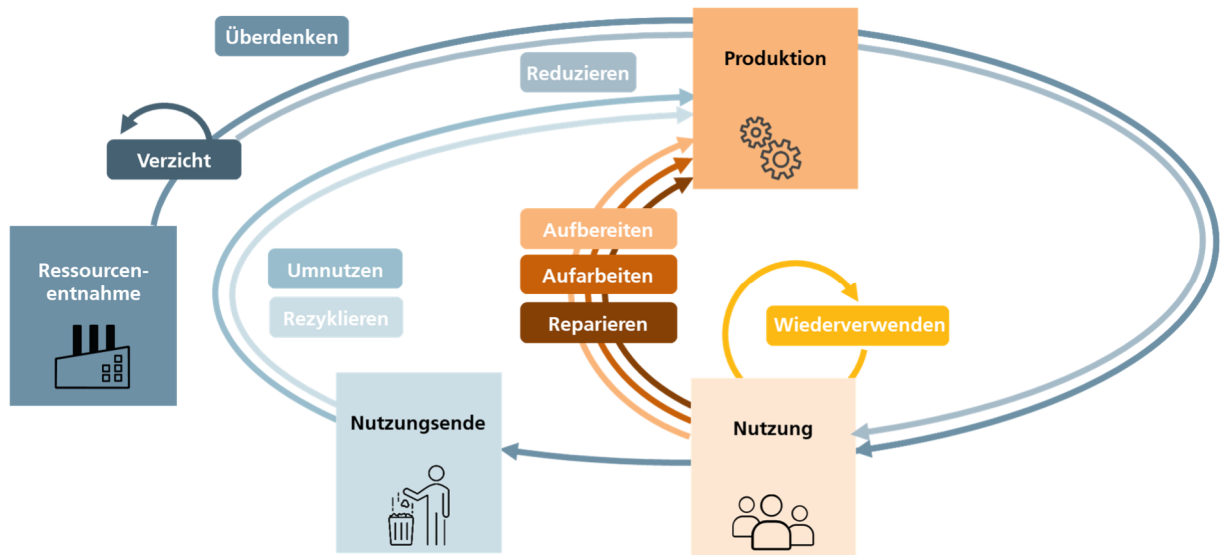


Bild 3:
Modell der Circular Economy (Kreislaufwirtschaft) nach [Geissdoerfer 2020].

Für das Europäische Parlament [EU-Parlament 2023] ist die Kreislaufwirtschaft ein Modell der Produktion und des Verbrauchs, bei dem bestehende Materialien und Produkte so lange wie möglich geteilt, geleast, wiederverwendet, repariert, aufgearbeitet und recycelt werden. Auf diese Weise wird der Lebenszyklus der Produkte verlängert. In der Praxis bedeutet dies, dass Abfälle auf ein Minimum reduziert werden. Nachdem ein Produkt das Ende seiner Lebensdauer erreicht hat, verbleiben die Ressourcen und Materialien so weit wie möglich in der Wirtschaft. Sie werden also immer wieder produktiv weiterverwendet, um weiterhin Wertschöpfung zu generieren.

Zu betonen ist insbesondere die **Abgrenzung** von dem in Deutschland genutzten Konzept der „Kreislaufwirtschaft“, welches bis dato vielmehr eine reine **recyclingorientierte Abfallwirtschaft** ist [Kadner 2021].

Seit einigen Jahren ist nun „Urban Mining“ in aller Munde, die quasi bergmännische Rohstoffgewinnung im urbanen Raum – in der Stadt wie auch in der Kommune. Genauer betrachtet verbergen sich dahinter bislang jedoch häufig nur Konzepte einer erweiterten Siedlungsabfallwirtschaft. Aber im Gegensatz zu dieser mit ihren recht kurzen und damit leicht erfass- und prognostizierbaren Materialumlaufzeiten erfordert eine generationenübergreifende Aufgabe wie

Urban Mining weit umfangreichere Instrumente und eine weit vorausschauende Strategie zum Stoffstrommanagement. Für derart große Materialmengen, die erst nach langen Zeiträumen auf die Wirtschaft zukommen, braucht es ein Bewirtschaftungskonzept mitsamt einer prospektiven Wissens- und Entscheidungsbasis für die Sekundärrohstoffwirtschaft und für die Kommunalpolitik. Hierfür werden z. B. Datenbank-basierte, dynamische und kreisscharfe Prognosemodelle benötigt, um die Potenziale des Urban Mining zum Ressourcenschutz ausschöpfen zu können [Müller 2017]

1.6.3 Ende der Abfalleigenschaft im Bauwesen

Der § 5 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) [KrWG 2023] beschreibt Voraussetzungen, die erfüllt werden müssen, damit die Abfalleigenschaft eines Stoffs oder Gegenstands nach dem Durchlaufen eines Recycling- oder eines anderen Verwertungsverfahrens endet. Im Einzelnen sind es folgende Voraussetzungen:

- Die Verwendung erfolgt für bestimmte Zwecke,
- es besteht ein Markt oder eine Nachfrage,
- die für die jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse werden erfüllt,
- die Verwendung führt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt.

Nach § 5 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) [KrWG 2023] wird die Bundesregierung ermächtigt nach Anhörung der beteiligten Kreise (§ 68) durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates unter Maßgabe der oben genannten Anforderungen die Bedingungen zu bestimmen, unter denen die Abfalleigenschaft für bestimmte Stoffe und Gegenstände endet. Zum einen sollen die Bedingungen ein hohes Maß an Schutz für Mensch und Umwelt sicherstellen und zum anderen eine umsichtige, sparsame und effiziente Verwendung der natürlichen Ressourcen ermöglichen. Folgendes soll durch die Rechtsverordnung geregelt werden:

- Welche Abfälle dürfen der Verwertung zugeführt werden?
- Welche Behandlungsverfahren und -methoden sind zulässig?
- Regelung von Qualitätskriterien und soweit erforderlich auch Schadstoffgrenzwerten, für Stoffe und Gegenstände nach dem Durchlaufen eines Recycling- oder eines anderen Verwertungsverfahrens. Die Qualitätskriterien müssen im Einklang mit den geltenden technischen Anforderungen, Rechtsvorschriften oder Normen für Erzeugnisse stehen.

- Regelung von Anforderungen an Managementsysteme, mit denen die Einhaltung der Kriterien für das Ende der Abfalleigenschaft nachgewiesen wird, einschließlich der Anforderungen
 - an die Qualitätskontrolle und die Eigenüberwachung
 - und an eine Akkreditierung oder sonstige Form der Fremdüberwachung der Managementsysteme, soweit dies erforderlich ist
 - sowie das Erfordernis und die Inhalte einer Konformitätserklärung.

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz legt damit den Fokus auf Wiederverwendbarkeit und Recycling und nicht auf Dauerhaftigkeit und Langlebigkeit der Produkte.

Das Bauwesen belegt in der Abfallwirtschaft einen besonderen Rang. Bauwerke sind in der Regel sehr langlebige anthropogene Materiallager mit einem enormen Ressourcenverbrauch bei ihrer Herstellung. Der Fokus liegt dabei auf dem mineralischen Anteil, insbesondere bei den Baustoffen Beton und Ziegel. Allein in Deutschland wird die Menge an verbauten Baustoffen auf ca. 15 Mrd. t geschätzt, das ist nahezu das 40-fache an Rohstoffen im Vergleich zu den übrigen Kapital- und Konsumgütern. Diese Zahlen spiegeln sich auch in den Abfallstatistiken. Mehr als die Hälfte der jährlich anfallenden nationalen Abfälle sind Bau- und Abbruchabfälle. Die Potenziale durch eine hochwertige Nutzung dieser Ressourcen werden aber nicht ausgeschöpft. Ein Beispiel dafür ist die Gewinnung und Weiterverarbeitung von Beton- und Stahlbeton [DIN, DKE, VDI 2023].

Eine direkte Wiederverwendung ganzer Bauteile ist aus konstruktiven Gründen häufig nicht möglich. Bei der alternativlosen Zerkleinerung, zumindest für die in der Vergangenheit gebauten Bauwerke, der Beton- und Stahlbetontragkonstruktionen und deren Separation werden zwar die Bewehrungen nahezu vollständig in den Rohstoffkreislauf zurückgeführt, der mineralische Anteil aber vorzugsweise nur für Verfüllungen im Straßen- und Tiefbau eingesetzt. Hinzu kommt, dass ein nennenswerter Anteil wegen inerter oder nicht inerter Schadstoffbelastungen unbehandelt zur Deponierung gelangt. Dieses Downcycling führt zum Ausschleusen der Abfälle aus dem Rohstoffkreislauf. Gründe dafür sind insbesondere das Fehlen von Standards im Umgang mit diesen Ressourcen, die einerseits die Verfahrensweisen eindeutig beschreiben und andererseits deren Umsetzung durch Beachtung und Nachverfolgung in den Genehmigungsverfahren sicherstellen [DIN, DKE, VDI 2023].

Mit den „Leitlinien für Abbruch- und Umbauarbeiten an Gebäuden vorgeschaltete Abfallaudits“ [EU 2018] als eine der drei Maßnahmen im Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft [EU-Kommission 2020a] bietet die EU ein Bewertungssystem zur methodischen Bewertung aller Abfallmengen und -ströme beim Abbruch an. Der Verbleib der Stoffe in den Rohstoffkreisläufen wird damit nicht gesichert. Diese Leitlinien regeln aber nicht, welche der ermittelten und bewerteten Baustoffe unmittelbar nach dem Anfallen auf der Baustelle die Abfalleigenschaften verlieren und als Sekundärrohstoffe in den Kreislauf zurückgeführt

werden sollen. Sie verweisen auch nicht darauf, dass durch technische Prozesse eine Produktion von Sekundärrohstoffen aus den Abfällen möglich und zwingend zu beachten ist [DIN, DKE, VDI 2023].

Das bei der Zerkleinerung der Betonkonstruktionen anfallende Rezyklat sollte zwingend als Rohstoff bei der Betonherstellung eingesetzt und nur in Einzelfällen für andere Einsätze oder für eine Deponierung zugelassen werden. Mit den wenigen, zum Teil überholten nationalen Standards lässt sich dies jedoch nicht verwirklichen. Nach z. B. der Trockenbeton-Richtlinie [DAfStb 2005] dürfen rezyklierte Gesteinskörnungen für Trockenbeton und Trockenmörtel nicht verwendet werden. Notwendig sind Standards, die den Einsatz des Rezyklates als Rohstoffersatz sicherstellen, beispielsweise durch Vorgaben zur Beimischung bei der Verwendung natürlicher Rohstoffe, oder technische Standards zur Abfallvorbehandlung bei inerten und nicht inerten Schadstoffen. Gerade die sichere Bindung durch den Zement ist eine Verfahrensweise bei der Immobilisierung an Altlastenstandorten. Eine Gleichstellung der anthropogenen Schadstoffbelastungen im Rezyklat mit den geogenen Belastungen im Rohstoff ist technisch sinnvoll und einzufordern. Ziel dieser Regeln und Verfahrensweisen ist die Sicherstellung des Verbleibs der Stoffe im Rohstoffkreislauf und die Definition des Zeitpunktes, ab dem ein Abbruchstoff seine Abfalleigenschaften verliert [DIN, DKE, VDI 2023].

2 Regulatorik

In diesem Kapitel werden die vielfältigen regulatorischen Aspekte beleuchtet, die im Zusammenhang mit Dämmsystemen, Putzen, Mauermörteln und Estrichmörteln als Produkte und als Abfall eine wichtige Rolle spielen.

Die Struktur des Kapitels zur Regulatorik folgt dabei dem gesamten Lebenszyklus von Bauteilen, einschließlich der Herstellung, der Nutzung, der Vermarktung und der Wiedereingliederung in den Kreislauf. Daher müssen während der verschiedenen Phasen des Lebenszyklus auch unterschiedliche Rechtsgebiete (Produkt-/ Bauordnungs-/ Abfall-/ Chemikalienrecht) berücksichtigt werden.

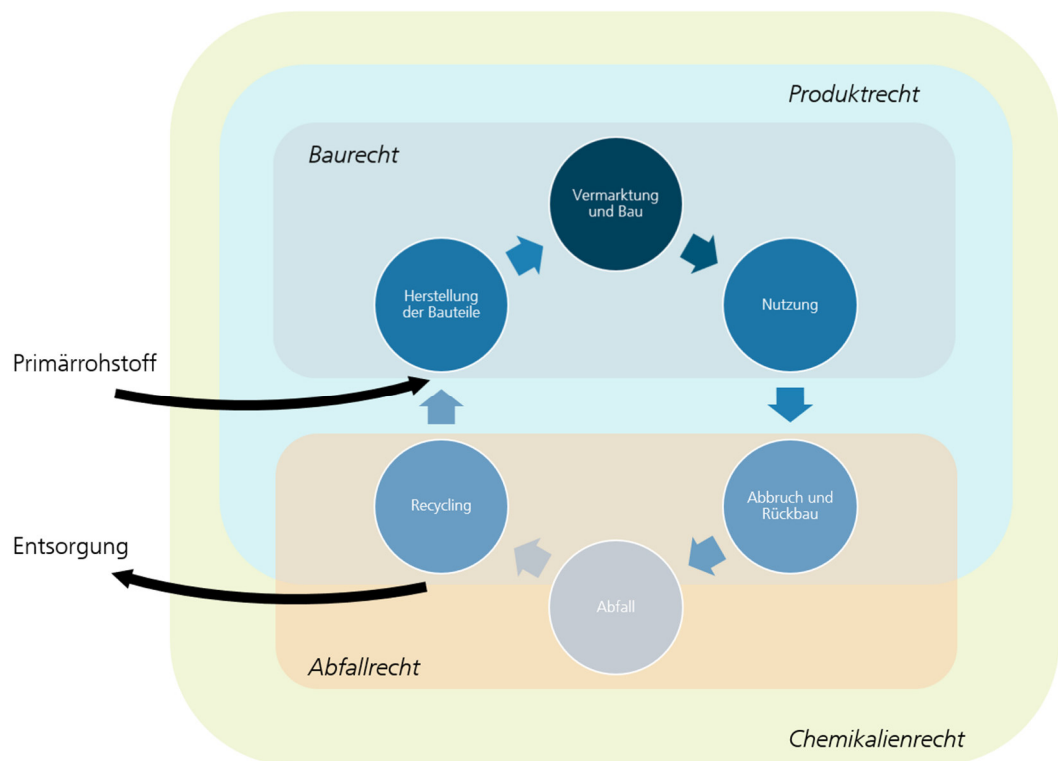


Bild 4:
Vereinfachte Darstellung des Lebenszyklus von Bauprodukten und relevanten Rechtsbereichen. Eigene Darstellung in Anlehnung an [UBA 2021; HVDB 2022].

Die im folgenden beschriebenen Rechtsbereiche enthalten eine Reihe unterschiedlicher Gesetze. Diese legen maßgebliche Prinzipien, Rechte und Pflichten fest. Umgesetzt werden die gesetzlichen Vorgaben durch Normen, die ebenfalls Bestandteil der regulatorischen Analyse sind. Normen sind spezifische Regeln und Standards, die von Expertengruppen oder Organisationen entwickelt werden, um die Vorgaben der Gesetze in praxisnahe Anweisungen umzusetzen.

2.1 Produktrecht

Das Produktrecht bildet den Ausgangspunkt der Betrachtung. Es umfasst die rechtlichen Bestimmungen, die Hersteller, Händler und Verbraucher beim Inverkehrbringen und der Verwendung von Dämmsystemen, Putz- und Mörtelprodukten beachten müssen. Eine wichtige Rolle spielen hierbei Aspekte wie Sicherheitsstandards, Kennzeichnungspflichten und Konformitätsbewertungsverfahren. Durch die Berücksichtigung dieser Vorschriften kann beispielsweise eine hohe Qualität und Zuverlässigkeit der Baustoffe gewährleistet werden.

Maßgebend für nahezu alle Produktgruppen ist die neue Verordnung für nachhaltige Produkte (**Ecodesign Requirements for Sustainable Products Directive, ESPR**). Die bisherige Ökodesign-Richtlinie wird nach dem Beschluss des EU-Rates im Mai 2023 umfassend modernisiert. Künftig müssen Produkte energieeffizient und darüber hinaus langlebig, reparierbar, wiederverwendbar und recycelbar sein, um auf dem EU-Binnenmarkt angeboten zu werden [EU-Kommission 2022b]. Die neue Verordnung gibt der EU-Kommission das Recht, für fast alle Produktgruppen detaillierte Standards für Nachhaltigkeit in Form von delegierten Rechtsakten festzulegen. Der angenommene Entwurf selbst enthält keine Ökodesign-Anforderungen, sondern setzt den Rahmen für die Definition von zukünftigen nachhaltigkeitsbezogenen Produkthanforderungen. Eine Veränderung der Rechtslage für die vom Ökodesign betroffenen Produkte gibt es somit erst mit neuen Produktverordnungen. Die vorgeschlagene **ESPR** ist ein Instrument der Europäischen Kommission, um beispielsweise Primärenergie in einer Größenordnung von 132 Mio. Tonnen (entspricht ca. 150 Mrd. Kubikmeter Erdgas) einsparen zu können und somit die ambitionierten Klimaschutzziele des **EU Green Deal** zu erreichen [EU-Kommission 2023].

Ein für die Baubranche zentrales Regelwerk ist die **EU-Bauproduktenverordnung** (Verordnung EU 305/2011, engl.: Construction Products Regulation, CPR) [EU 2011]. Ziel der Verordnung ist, dass harmonisierte technische Spezifikationen zu EU-weit einheitlichen Produkt- und Prüfstandards und damit harmonisierten Leistungsangaben bei Bauprodukten führen sollen. Die **BauPVO** regelt die Bedingungen für das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Bauprodukten auf dem Markt und legt Anforderungen an die Leistungserklärung und die CE-Kennzeichnung fest. Damit soll der freie Warenverkehr von Bauprodukten und der Abbau technischer Handelshemmnisse im EU-Wirtschaftsraum erreicht werden.

Die Verordnung legt Grundanforderungen an Bauwerke fest, die die Basis für die Ausarbeitung von harmonisierten technischen Spezifikationen (europäische Normen, die aufgrund eines Mandats der EU-Kommission entwickelt wurden) für Bauprodukte bilden. Die sieben Grundanforderungen lauten:

1. Mechanische Festigkeit und Standsicherheit
2. Brandschutz
3. Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz
4. Sicherheit und Barrierefreiheit bei der Nutzung
5. Schallschutz
6. Energieeinsparung und Wärmeschutz
7. Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen

Im Vergleich zur aufgehobenen Bauproduktenrichtlinie erfuh die Grundanforderung Nr. 3 eine wesentliche Erweiterung. Laut **BauPVO** ist nun der gesamte Lebenszyklus des Bauwerks zu betrachten. Zu berücksichtigen sind hierbei nun u. a. auch die Freisetzung gefährlicher Stoffe in das Trinkwasser und die Freisetzung klimarelevanter Stoffe (z. B. Treibhausgase). Die Grundanforderung Nr. 7 wurde 2011 neu aufgenommen. Sie zielt darauf ab, dass ein Bauwerk so zu entwerfen und zu errichten ist, dass die eingesetzten natürlichen Ressourcen nach dem Rückbau wiederverwendet oder recycelt werden können.

Im Jahr 2020 leitete die Europäische Kommission mehrere Konsultationen zur Überarbeitung der **EU-BauPVO** ein und veröffentlichte im März 2022 einen Entwurf zur Novellierung der **CPR** [EU-Kommission 2022c]. Laut EU-Kommission sei die derzeitige Verordnung nicht für die Umsetzung weiter gefasster politischer Prioritäten, insbesondere im Hinblick auf den **Europäischen Green Deal**, geeignet. Darüber hinaus soll die Einführung und Verbreitung digitaler Technologien beschleunigt werden [EU-Kommission 2022d]. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der vorliegenden Studie befindet sich der Entwurf in Verhandlungen.

Primär soll die novellierte Verordnung die Verbesserung der Nachhaltigkeitsleistung von Bauprodukten sicherstellen. Hersteller sollen Umweltinformationen über den Lebenszyklus ihrer Produkte bereitstellen. Darüber hinaus müssen sie mehrere Verpflichtungen erfüllen, so beispielsweise:

- Produkte und ihre Verpackung so gestalten und herstellen, dass ihre ökologische Nachhaltigkeit insgesamt dem Stand der Technik Rechnung trägt,
- rezyklierbaren Materialien und durch Recycling gewonnenen Materialien den Vorzug geben,
- Die Mindestanforderungen an den Recyclinganteil und andere Grenzwerte in Bezug auf Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit einhalten,

- Gebrauchs- und Reparaturanleitungen für die Produkte in Produktdatenbanken bereitstellen,
- Produkte und ihre Verpackung so gestalten, dass ihre Wiederverwendung, Wiederaufarbeitung und ihr Recycling erleichtert werden.

Im Sinne einer Kreislaufwirtschaft sind aus der Aufbereitung von Bauabfällen hergestellte Recycling-Baustoffe zum Teil als Bauprodukte im Sinne der aktuell gültigen **EU-Bauproduktenverordnung** zugelassen. Dies gilt für RC-Baustoffe, die durch eine harmonisierte Norm erfasst sind. Die DIN EN 12620 legt die bautechnischen Eigenschaften der Gesteinskörnungen zur Herstellung von konstruktiven Betonen im Hochbau sowie die Voraussetzungen für deren erforderliche CE-Kennzeichnung fest. Gemäß der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ dürfen nur rezyklierte Gesteinskörnungen verwendet werden, wenn diese keine umweltschädlichen Auswirkungen haben. Der Nachweis der Umweltverträglichkeit ist nach DIN 4226-101 „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen“ zu erbringen und die Qualitätskontrolle rezyklierter Gesteinskörnung ist in der DIN 4226-102 „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 102: Typprüfung und Werkseigene Produktionskontrolle“ geregelt [DAfStb 2010]. Nach diesen Richtlinien ist für die Herstellung von RC-Beton die sortenreine Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung aus Betonsplitt (Typ 1) und Bauwerkssplitt (Typ 2) mit einer Mindestkorngroße von 2 mm zulässig. Typ 1 der RC-Gesteinskörnung muss mindestens 90 % Beton oder ungebundene Gesteinskörnung (Betonprodukte, Mörtel oder Mauersteine aus Beton) enthalten, während Typ 2 zu mindestens 70 % aus Beton und ungebundener Gesteinskörnung besteht (bis zu 30 Gew.-% Mauerziegel, Kalksandstein oder Porenbeton zulässig). Demnach dürfen für Beton nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 nur rezyklierte Gesteinskörnungen des Typs 1 und des Typs 2 verwendet werden. Dieses Beispiel zeigt, dass für bestimmte Produkte bereits Regularien existieren, um diese als RC-Baustoffe wiederverwenden zu können. In Ausschreibungen sollen möglichst einfach und möglichst viele wiederverwendete Bauteile sowie qualitätsgesicherte recycelte Baumaterialien Anwendung finden. Deshalb ist es wichtig Normen und Standards, auch für andere Produktgruppen wie z. B. Dämmstoffe, Putze, Mauermörtel und Estrichmörtel zu erarbeiten, die den Übergang vom Abfall zum Produkt (End-of-Waste) eindeutig beschreiben und zugleich Mindestqualitäten im Hinblick auf Eignung und Gewährleistung sicherstellen [DIN, DKE, VDI 2023].

Eine Reihe an harmonisierten Normen [EU-Kommission 2022a] für Bauprodukte, wie z. B. Putze, Mauermörtel, Estrichmörtel und Dämmstoffe existieren bereits:

- DIN EN 998-1 Teil 1: Putzmörtel,
- DIN EN 998-2 Teil 2: Mauermörtel,

- DIN EN 12004 Mörtel und Klebstoffe für keramische Fliesen und Platten,
- DIN EN 13162 MW Mineralwolle,
- DIN EN 13163 EPS Polystyrol-Hartschaum,
- DIN EN 13164 XPS Polystyrol-Hartschaum,
- DIN EN 13165 PUR Polyurethan-Hartschaum,
- DIN EN 13166 PF Phenolharz-Hartschaum,
- DIN EN 13167 CG Schaumglas,
- DIN EN 13168 WW Produkte aus Holzwolle,
- DIN EN 13169 EPB Platten aus Bläherlite,
- DIN EN 13170 ICB Expandierter Kork,
- DIN EN 13171 WF Holzfaser-Dämmstoffe,
- DIN EN 13813 Estrichmörtel, Estrichmassen und Estriche,
- DIN EN 15824 Außen- und Innenputze mit organischen Bindemitteln.

Die aufgezeigte Normenreihe beschreibt die jeweiligen Produkteigenschaften und enthält die Prüfverfahren und Festlegungen für die Konformitätsbewertung, die CE-Kennzeichnung und die Etikettierung. Jedoch werden sowohl wiederverwendete/ recycelte Dämmstoff-, als auch Mörtelprodukte aktuell durch fehlende Regularien oder zusätzlich notwendige Analysen und Testverfahren gegenüber Standardneuprodukten benachteiligt. In der Praxis könnte die Umsetzung von Satz 2 Nr. 3 § 45 **KrWG** erheblich verbessert werden, darin heißt es: „[...] Die Verpflichteten nach Absatz 1 haben, insbesondere unter Berücksichtigung der §§ 6 bis 8, bei der Gestaltung von Arbeitsabläufen, bei der Beschaffung oder Verwendung von Material und Gebrauchsgütern, bei Bauvorhaben und sonstigen Aufträgen, ohne damit Rechtsansprüche Dritter zu begründen, Erzeugnissen den Vorzug zu geben, die:

- in rohstoffschonenden, energiesparenden, wassersparenden, schadstoffarmen oder abfallarmen Produktionsverfahren hergestellt worden sind,
- durch Vorbereitung zur Wiederverwendung oder durch Recycling von Abfällen, insbesondere unter Einsatz von Rezyklaten, oder aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt worden sind,

- sich durch Langlebigkeit, Reparaturfreundlichkeit, Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit auszeichnen oder im Vergleich zu anderen Erzeugnissen zu weniger oder schadstoffärmeren Abfällen führen oder sich besser zur umweltverträglichen Abfallbewirtschaftung eignen“ [DIN, DKE, VDI 2023].

Das Hemmnis für den Einsatz von RC-Baustoffen fällt, wenn standardisierte und verbindliche Erklärungen über diese Produkteigenschaften, die sich zudem auf harmonisierte Normen nach der Verordnung EU 305/2011 unter Berücksichtigung von Anhang 1, Nr. 7 „Nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen“ beziehen, erarbeitet werden würden. Das Produktrecht muss im Sinne einer Kreislaufwirtschaft umgesetzt werden. Produktnormen müssen Leistungsanforderungen an die CE-Kennzeichnung festschreiben, die Auskunft über Dauerhaftigkeit, Wiederverwendbarkeit, Recyclingfähigkeit, Umweltverträglichkeit und Rezyklateinsatz geben. Darüber hinaus bedarf es an Prüfnormen, die Verfahren zur Prüfung von Bauteilen oder Bauteilkomponenten ermöglichen. Über Produktnormen lassen sich dann Anforderungen an Bauteile oder Bauteilkomponenten beschreiben, wodurch entschieden werden kann, ob eine Wiederverwendung stattfinden kann. Materialspezifische Rezyklatnormen geben darüber Auskunft, mit welchen verfahrenstechnischen Mitteln der Aufbereitungsprozess erfolgreich durchgeführt werden kann. Solche Rezyklatnormen, die Prüfverfahren und Qualitätskriterien für Werkstoffe beinhalten, die ein Recyclingverfahren durchlaufen haben, sieht die aktuell gültige **EU-Bauproduktenverordnung** nicht vor [DIN, DKE, VDI 2023], ist jedoch Bestandteil der aktuellen Diskussion rund um die Novelle der **EU-BauPVO** [EU-Kommission 2022b].

2.2 Bauordnungsrecht

Zur Zeit werden die Anforderungen der Kreislaufwirtschaft an Dämmsysteme, Putze, Mauermörtel und Estrichmörtel durch das deutsche Bauordnungsrecht nicht berücksichtigt.

Um die Bauvorschriften der Bundesländer im Baugewerbe zu vereinheitlichen, haben die 16 Bundesländer eine **Musterbauordnung (MBO)** erstellt. Diese wurde im Jahr 2002 eingeführt und zuletzt 2022 überarbeitet. Die **MBO** dient als Leitfaden für die landesspezifische Bauordnungsgesetzgebung und hat keinen Gesetzesstatus [DIBt 2022].

Die **Landesbauordnungen (LBO)** regeln die Planung, Berechnung und Ausführung von Bauwerken sowie die Verwendung von Bauteilen. Sie enthalten auch spezifische Anforderungen der einzelnen Bundesländer, wie beispielsweise die Notwendigkeit einer Abrissgenehmigung. Die Landesbauordnungen orientieren sich grundsätzlich an der **Musterbauordnung**.

Im Zuge der Aktualisierung der **Musterbauordnung** wurden technische Bestimmungen (gemäß § 85a MBO) in einer **Muster-Verwaltungsvorschrift Technischer Baubestimmungen (MVV TB)** zusammengefasst [UBA 2021].

Diese Bestimmungen umfassen Vorgaben für Bauwerke, Bauteile und Bauprodukte, einschließlich der anzuwendenden Gesetze, Normen, etc. [DIBt 2023].

Auch Bauteile für Außenwände aus Beton, der unter Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung hergestellt wird, dürfen nur eingebaut werden, wenn die rezyklierte Gesteinskörnung bestimmte Anforderungen erfüllt (siehe MVV TB Anhang 10, Kap. 5.1.1).

Mit der Verwertung mineralischer Abfälle befasst sich die Mitteilung 20 der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen – Technische Regeln“ [LAGA 2003] und wird aktuell in den meisten Bundesländern angewandt. Diese unterscheidet drei Einbauklassen beim Einbau mineralischer Abfälle in bauliche Anlagen. Handelt es sich um den Einsatz von Abfällen in Produkten, beispielsweise als Zuschlagstoff zur Herstellung von (Bau-) Produkten, müssen diese mindestens die Zuordnungswerte der Einbauklasse 2 erreichen und die grundsätzlichen Anforderungen der Mitteilung 20 der LAGA erfüllen. Eine Verschleppung von Schadstoffen muss ausgeschlossen werden [LAGA 2003]. Die Mitteilung 20 der LAGA bildet weder eine bundeseinheitliche noch eine rechtsverbindliche Grundlage [UBA 2021]. Ab dem 1. August 2023 werden ihre Regelungen zukünftig durch die **Ersatzbaustoff-Verordnung (ErsatzbaustoffV)** [ErsatzbaustoffV 2021] ersetzt. Die ErsatzbaustoffV legt spezifische Vorgaben für die sichere Verwendung und den Vertrieb mineralischer Ersatzbaustoffe fest, die aus Bautätigkeiten, industriellen Fertigungsprozessen oder Aufbereitungsanlagen stammen. Diese Regelungen betreffen die Annahme von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen (Abschnitt 2, ErsatzbaustoffV), die Herstellung von mineralischen Ersatzbaustoffen (Abschnitt 3, ErsatzbaustoffV), den Einbau mineralischer Ersatzbaustoffe (Abschnitt 4, ErsatzbaustoffV) sowie die getrennte Sammlung von mineralischen Abfällen (Abschnitt 5, ErsatzbaustoffV) [ErsatzbaustoffV 2021].

Von der Einführung der Ersatzbaustoffverordnung betroffen sind insbesondere Hersteller und Nutzer mineralischer Ersatzbaustoffe. Dazu zählen einerseits u. a. stationäre und mobile Aufbereitungsanlagen für Recycling-Baustoffe, metallzeugende Industriebetriebe und Abfallverbrennungsanlagen, andererseits vor allem der Straßen- und Schienenverkehrswegebau. Der Betreiber der Aufbereitungsanlage hat den mineralischen Ersatzbaustoff unverzüglich nach der Bewertung der Untersuchungsergebnisse nach § 10 Absatz 1 in eine Materialklasse einzuteilen. Recycling-Baustoffe werden in drei Klassen unterteilt. Die Zuordnung erfolgt mittels Materialwerttabellen (Anlage 1 ErsatzbaustoffV) [ErsatzbaustoffV 2021]. In Tabelle 1 ist eine Auswahl an Materialwerten für geregelte Ersatzbaustoffe dargestellt.

Tabelle 1:
Auswahl an Materialwerten für geregelte Ersatzbaustoffe (Anlage 1 ErsatzbaustoffV) [ErsatzbaustoffV 2021].

Parameter	Mineralischer Ersatzbaustoff RC-1	Mineralischer Ersatzbaustoff RC-2	Mineralischer Ersatzbaustoff RC-3
pH-Wert [-]	6 – 13	6 – 13	6 – 13
Elektrische Leitfähigkeit [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	2500	3200	10000
Sulfat [mg/L]	600	1000	3500
PAK15 [$\mu\text{g}/\text{L}$]	4,0	8,0	25
PAK16 [mg/kg]	10	15	20
Chrom, ges. [$\mu\text{g}/\text{L}$]	150	440	900
Kupfer [$\mu\text{g}/\text{L}$]	110	250	500
Vanadium [$\mu\text{g}/\text{L}$]	120	700	1350

Je nach Materialklasse unterscheiden sich die Einsatzmöglichkeiten von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken nach (Anlage 2 ErsatzbaustoffV) [ErsatzbaustoffV 2021]:

- Recycling-Baustoff der Klasse 1 (RC-1): nahezu uneingeschränkte Einsatzmöglichkeiten des RC-Baustoffes innerhalb und außerhalb von Wasserschutzbereichen,
- Recycling-Baustoff der Klasse 2 (RC-2): eingeschränkte Einsatzmöglichkeiten des RC-Baustoffes, beispielsweise zur Verwendung in Frostschutzschicht,
- Recycling-Baustoff der Klasse 3 (RC-3): stark eingeschränkte Einsatzmöglichkeiten des RC-Baustoffes, beispielsweise zur Verfüllung von Baugruben unter gebundener Deckschicht innerhalb von Wasserschutzgebieten.

Ziel der Ersatzbaustoffverordnung ist es Potenziale zur weiteren Steigerung des Recyclings von Bau- und Abbruchabfällen für den Einsatz in technischen Bauwerken zu erschließen. Auf diese Weise können insbesondere bisher noch in der Verfüllung von Abgrabungen und Tagebauen eingesetzte Bau- und Abbruchabfälle höherwertig verwertet werden.

2.3 Abfallrecht

Mit dem **Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)** [KrWG 2023] wurde die **EU-Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 2008/98/EG, AbfRRL)** [EU 2008b] in deutsches Recht umgesetzt und das bestehende deutsche Abfallrecht umfassend modernisiert. Ziel des Gesetzes ist eine nachhaltige Verbesserung des Umwelt- und Klimaschutzes sowie der Ressourceneffizienz in der Abfallwirtschaft durch Stärkung der Abfallvermeidung und des Recyclings von Abfällen.

Die zentralen Inhalte des Gesetzes sind:

- EU-rechtlich harmonisierte Begriffsbestimmungen (§ 3 KrWG),
- Regelungen zu den praxisrelevanten Fragen der Abgrenzung von Abfall und Nebenprodukt (§ 4 KrWG),
- Regelungen zum Ende der Abfalleigenschaft (§ 5 KrWG),
- die fünfstufige Abfallhierarchie (§ 6 KrWG) und ihre Umsetzung (§§ 6 bis 8 KrWG),
- Getrennthalten von Abfällen zur Verwertung, Vermischungsverbot (§ 9 KrWG),
- Regelungen zur Produktverantwortung (§§ 23 ff KrWG).

In § 3 KrWG sind die Begriffe Abfall, Verwertung, Recycling und Beseitigung wie folgt, definiert:

Abfälle im Sinne dieses Gesetzes sind alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Abfälle zur Verwertung sind Abfälle, die verwertet werden; Abfälle, die nicht verwertet werden, sind Abfälle zur Beseitigung [KrWG 2023].

Verwertung im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis die Abfälle innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie entweder andere Materialien ersetzen, die sonst zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder indem die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen. Anlage 2 enthält eine nicht abschließende Liste von Verwertungsverfahren [KrWG 2023].

Recycling im Sinne dieses Gesetzes ist 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 [KrWG 2023].

Beseitigung im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verfahren, das keine Verwertung ist, auch wenn das Verfahren zur Nebenfolge hat, dass Stoffe oder Energie zurückgewonnen werden. Anlage 1 enthält eine nicht abschließende Liste von Beseitigungsverfahren [KrWG 2023].

Der Kern des Gesetzes zur Kreislaufwirtschaft liegt in der fünfstufigen Abfallhierarchie gemäß § 6 KrWG und ihrer Umsetzung im Grundpflichtenmodell gemäß §§ 6 bis 8 KrWG. Die neue Hierarchie legt eine grundsätzliche Reihenfolge

fest, beginnend mit Abfallvermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstiger (energetischer) Verwertung von Abfällen und schließlich Abfallbeseitigung. Die Kreislaufwirtschaft zielt konsequent auf Abfallvermeidung und Recycling ab, ohne bewährte, umweltfreundliche Entsorgungsmethoden zu gefährden.



Bild 5:
Die fünfstufige Abfallhierarchie nach KrWG [KrWG 2023].

Nachdem die Abfallvermeidung als Stufe mit der obersten Priorität angesehen wird, steht die Vorbereitung zur Wiederverwendung an zweiter Stelle. Gemäß § 3 Abs. 24 des **Kreislaufwirtschaftsgesetzes** umfasst dies jegliche „Verwertungsverfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur [...], bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile von Erzeugnissen, 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.“

Das Recycling wird auf der dritten Stufe der Abfallhierarchie eingestuft. Es fällt unter die Kategorie der Verwertungsmaßnahmen gemäß § 3 Abs. 23 KrWG, d. h. dass „als deren Hauptergebnis die Abfälle innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie entweder andere Materialien ersetzen, die sonst zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder indem die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen.“

„Recycling im Sinne dieses Gesetzes ist 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 (§ 3 Abs. 25 Satz 1 KrWG).“ Verfüllungen können demnach nicht als Recycling gewertet werden.

Die Umsetzung der Hierarchie in den Stufen Vermeidung, Verwertung, Beseitigung ist bereits durch das Gesetz vorgegeben. Die Festlegung des Vorrangs einer Verwertungsart (Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling und sonstiger, u. a. energetischer Verwertung) gegenüber den Abfallerzeugern und -besitzern wird in erster Linie durch abfallspezifische Rechtsverordnungen erfolgen (siehe unten - **GewAbfV**). Die Kriterien, wann Abfall beispielsweise als Brennstoff oder als anderes Mittel der Energieerzeugung (energetische Verwertung) verwendet werden darf, sind in Anlage 2 des KrWG festgehalten.

Die Abfallvermeidung am Ende der Nutzungsdauer eines WDVS lässt sich z. B. durch das Aufdoppeln eines bestehenden Systems mit einer weiteren Lage WDVS realisieren. Durch den obsoleten Rückbau fällt kein WDVS-Abfall an. Mit der Aufdopplung (siehe dazu Kapitel 4.2) wird die oberste Stufe der fünfstufigen Abfallhierarchie, die Abfallvermeidung, umgesetzt.

Laut § 5 Abs. 1 KrWG endet die Abfalleigenschaft eines Stoffes oder Gegenstandes, sofern er ein Verwertungsverfahren durchlaufen hat und so beschaffen ist, dass

- er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,
- ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,
- er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt,
- seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt.

Besonderes Augenmerk gilt insbesondere Kriterium 3, das die Erfüllung allgemeiner und spezifischer Produktanforderungen verlangt und somit eine Verbindung zum Produktrecht herstellt (siehe dazu Kapitel 2.1). Kriterium 4 erfordert eine vergleichende Sicherheitsbetrachtung. Hier muss geprüft werden, ob ein vergleichbares Sicherheitsniveau außerhalb des Abfallregimes erreicht wird. Ist dies zusätzlich zu Kriterium 1-3 gegeben, kann das Ende der Abfalleigenschaft erreicht werden. Während es für bestimmte Abfallströme wie bestimmte Arten von Bruchglas, Eisen- und Kupferschrott harmonisierte Vorschriften für das Ende der Abfalleigenschaft gibt, existieren für Bauabfälle bislang keine spezifischen Bestimmungen. Die Ersatzbaustoffverordnung tritt dem entgegen und

enthält spezifische Regelungen für Nebenprodukte und das Ende der Abfalleigenschaft für mineralische Ersatzbaustoffe.

Die **Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV)** enthält spezifische Pflichten und Vorschriften bezüglich des Umgangs mit Bau- und Abbruchabfällen. Gemäß § 8 Abs. 1 Satz 1 der GewAbfV sind Erzeuger und Besitzer von Bau- und Abbruchabfällen verpflichtet, mindestens die folgenden Abfallfraktionen getrennt zu sammeln, zu transportieren und vorrangig zur Wiederverwendung oder zum Recycling vorzubereiten: Glas, Kunststoff, Metalle, Holz, Dämmmaterialien, Bitumengemische, Baustoffe auf Gipsbasis, Beton, Ziegel sowie Fliesen und Keramik. Dabei sollte der Anteil an Fehlwürfen und Verunreinigungen 5 % der Masse nicht überschreiten (Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 34, S. 21) [LAGA 2019]. Diese Verpflichtung entfällt, wenn eine getrennte Sammlung aus technischen Gründen nicht möglich oder wirtschaftlich unzumutbar ist (§ 8 Abs. 2 GewAbfV) [GewAbfV 2022]. Grundsätzlich enthält die GewAbfV Anforderungen, die durch die Mitteilung 34 der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) weiter konkretisiert werden. Zum Beispiel kann eine technische Unmöglichkeit vorliegen, wenn für die Aufstellung von entsprechenden Behältern nicht genügend Platz vorhanden ist oder wenn eine getrennte Sammlung von mineralischen Abfällen aus „rückbaustatischen und rückbautechnischen Gründen“ ausscheidet. Weitere Fälle der technischen Unmöglichkeit könnten bei Brand- oder Wasserschäden oder bei Verbundstoffen auftreten (Mitteilung 34 der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), S. 51–52). Eine wirtschaftliche Unzumutbarkeit liegt vor, wenn die Kosten für die getrennte Sammlung im Vergleich zur gemeinsamen Sammlung und anschließenden Vorbehandlung oder Aufbereitung unverhältnismäßig hoch sind. Dies könnte zum Beispiel bei sehr geringen Abfallmengen einer Fraktion (Richtwert bis 1 m³) oder einer hohen Verschmutzung (z. B. durch Anhaftungen, Störstoffe, Verklebungen) der Fall sein (Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 34, S. 52–53). Die GewAbfV erlaubt ausdrücklich die Sammlung weiterer Abfallfraktionen und die zusätzliche getrennte Sammlung innerhalb einer Fraktion (§ 8 Abs. 1 Satz 2 GewAbfV).

Falls aus den oben genannten Gründen eine Getrennthaltung nicht möglich ist, müssen diese Materialien als Mischungen entweder einer Vorbehandlungsanlage oder einer Aufbereitungsanlage zugeführt werden. Wenn es sich hauptsächlich um Kunststoffe, Metalle oder Holz handelt, werden sie einer Vorbehandlungsanlage (Sortierung) zugeführt. Enthalten sie hauptsächlich Beton, Ziegel, Fliesen oder Keramik, werden sie einer Aufbereitungsanlage (zur Herstellung von Gesteinskörnungen) zugeführt (gemäß § 9 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 und Nr. 2 GewAbfV). Es gibt jedoch Ausnahmen, wenn es technisch unmöglich oder wirtschaftlich unzumutbar ist (gemäß § 9 Abs. 4 Satz 1 GewAbfV).

Die Betreiber von Aufbereitungsanlagen müssen sicherstellen, dass die entstehenden Gesteinskörnungen den öffentlich-rechtlichen Vorschriften, geltenden DIN-Normen und Qualitätsstandards entsprechen. Sie müssen dies den Herstellern und Besitzern bestätigen (gemäß § 9 Abs. 2 GewAbfV, siehe auch Mittei-

lung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 34, S. 66). Die Betreiber von Vorbehandlungsanlagen müssen insbesondere die ordnungsgemäße technische Ausstattung nachweisen (gemäß § 6 Abs. 1 GewAbfV) und die Sortier- und Recyclingquoten einhalten (gemäß § 6 Abs. 3 bis 6 der GewAbfV).

Darüber hinaus gibt es umfangreiche Dokumentationspflichten auf jeder Stufe der Verwaltung von gewerblichen Siedlungsabfällen und Bau- und Abbruchabfällen gemäß der Gewerbeabfallverordnung.

Die **Abfallverzeichnisverordnung (AVV)** ist eine Verordnung in Deutschland, die der Umsetzung der Entscheidung der EU-Kommission 2000/532/EG vom 3. Mai 2000 dient und das Abfallverzeichnis gemäß § 17 des **Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG)** [KrWG 2023] enthält. Sie dient der Klassifizierung und Einstufung von Abfällen [AVV 2001]. Bau- und Abbruchabfälle werden unter Kap. 17 der AVV gelistet. Auch die verschiedenen Bestandteile eines WDVS und die damit verbundene Entsorgung und Klassifizierung der anfallenden Abfälle werden durch die AVV geregelt.

Die jeweilige Abfallart ist einer sechsstelligen Schlüsselnummer zugeordnet, die nach dem Europäischen Abfallkatalog (EAK) als EAK-Abfallschlüssel bezeichnet wird. Die EAK-Abfallschlüssel sind seit 01.01.1999 gültig und ersetzen die bis dahin gültigen Abfallschlüsselnummern der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), die sogenannten LAGA-Abfallschlüsselnummern [Frederichs 2023].

Die Abfälle werden nach einem sechsstelligen Code, der sich aus drei zweistelligen Codes zusammensetzt, herkunftsbezogen klassifiziert, wobei die Abfallherkunft von den Kapitelüberschriften hin zu den einzelnen Codes immer präziser beschrieben wird. Deshalb dürfen die im EAK aufgeführten Abfälle auch nicht unabhängig von ihrer jeweiligen Kapitelüberschrift betrachtet werden. Die numerische Kennzeichnung der zusammengehörigen Abfallkategorien ist nicht fortlaufend, sondern enthält Fehlstellen für die Fortschreibung des Katalogs. Tabelle 2 verdeutlicht die Klassifizierung von Abfällen und die Zuweisung der EAK-Abfallschlüssel.

Abfälle, die als gefährlich eingestuft werden, tragen in der Abfallverzeichnis-Verordnung eine Kennzeichnung mit einem *. Als gefährlich gilt ein Abfall, sobald er eine oder mehrere Eigenschaften aufweist, welche in Anhang III der AbfRRL gelistet sind [EU 2008b].

Tabelle 2:
Zuordnung von Abfällen und Abfallschlüsseln.

Kategorie		Beispiel EAK Abfallschlüssel-Nr.	
Obergruppe	2-stellige-Nr.	17	Bau- und Abbruchabfälle
Gruppe	4-stellige-Nr.	17 01 17 06	Beton, Ziegel, Fliesen, Keramik usw. Dämmmaterialien und asbesthaltige Dämmstoffe
Abfallart	6-stellige-Nr.	17 01 01 17 06 04	Beton Dämmmaterial mit Ausnahme desjenigen, das unter 17 06 01* (Asbest) und 17 06 03* (gefährliche Stoffe) fällt

Die Herkunft des Abfalls ist grundlegend bei der Zuordnung von Abfällen zu Schlüsselnummern des EAK [DIN, DKE, VDI 2023]. Abfälle aus EPS-Dämmstoff fallen zurzeit unter die EAK-Abfallschlüsselnummer 17 06 04 Dämmmaterialien. In der folgenden Tabelle 3 sind die wesentlichen Bestandteile eines Wärmedämm-Verbundsystems den einzelnen EAK-Abfallschlüsselnummern zugeordnet.

Tabelle 3:
Zuordnung zu EAK-Schlüsselnummern.

Produkte	Abfallschlüssel	Abfallbezeichnung
Putz,-Mauer- und Estrichmörtel auf Zementbasis	17 01 01	Beton
Putz,-Mauer- und Estrichmörtel auf Zementbasis	17 01 07	Gemische aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 01 06* (gefährliche Stoffe) fallen
Putz,-Mauer- und Estrichmörtel auf Zementbasis mit Dämmmaterialresten	17 09 04	gemischte Bau- und Abbruchabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 09 01* (Quecksilber), 17 09 02* (PCB) und 17 09 03* (gefährliche Stoffe) fallen
Putz- und Estrichmörtel auf Calciumsulfatbasis	17 08 02	Baustoffe auf Gipsbasis mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 08 01* (gefährliche Stoffe) fallen
Putz- und Estrichmörtel auf Calciumsulfatbasis	17 09 04	gemischte Bau- und Abbruchabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 09 01* (Quecksilber), 17 09 02* (PCB) und 17 09 03* (gefährliche Stoffe) fallen

Produkte	Abfallschlüssel	Abfallbezeichnung
Armierungsgewebe	10 11 03 17 02 03 17 04 05	Glasfaserabfall Kunststoff Eisen und Stahl
Dämmmaterial	17 06 04	Dämmmaterial mit Ausnahme desjenigen, das unter 17 06 01* (Asbest) und 17 06 03* (gefährliche Stoffe) fällt
Dübel	17 02 03	Kunststoff
Schienen	17 02 03	Kunststoff
Schrauben/Nägel	17 04 05	Eisen und Stahl

Diese Abfallschlüsselnummern dienen dazu, die verschiedenen Arten von Abfällen aus Putzen, Mauermörteln, Estrichmörteln und Dämmsystemen wie WDVS zu identifizieren und eine entsprechende Entsorgung vorzunehmen. Je nach Art und Menge des Abfalls gelten spezifische Vorschriften für Sammlung, Transport, Lagerung und Entsorgung gemäß den geltenden Umweltvorschriften.

Die Erzeuger, Besitzer, Sammler, Beförderer und Entsorger von gefährlichen Abfällen müssen den ordnungsgemäßen Entsorgungsnachweis für gefährliche Abfälle erbringen (§ 50 des KrWG in Verbindung mit § 2 der Verordnung über die Nachweisführung bei der Entsorgung von Abfällen (Nachweisverordnung, NachwV) [NachwV 2006]). Insbesondere kann die Einstufung von Abfällen als gefährlich ein Hindernis für Recyclingaktivitäten darstellen, da eine entsprechende Genehmigung durch den Abfallbehandler erforderlich ist. Das Abfallrecht im Allgemeinen betrachtet Recyclingaktivitäten bei gefährlichen Abfällen mit Skepsis, da sie zu einer Anreicherung gefährlicher Substanzen im Stoffkreislauf führen können (siehe derzeit § 6 Absatz 2 Satz 2 Nummer 4 des KrWG). Die Abfallrahmenrichtlinie regelt diesbezüglich in Artikel 10 Absatz 5: „Falls (...) zur Erleichterung oder Verbesserung der Verwertung erforderlich ist, treffen die Mitgliedstaaten die notwendigen Maßnahmen, um vor oder während der Verwertung gefährliche Stoffe, Gemische oder Bestandteile aus gefährlichen Abfällen zu entfernen um sie anschließend im Einklang mit Artikel 4 und 13 zu behandeln.“

Die **EU-POP-Verordnung** verfolgt das Ziel, gemäß dem Vorsorgeprinzip persistent organische Schadstoffe (POPs) und Abfälle, die POPs enthalten, aus dem Kreislauf zu entfernen (Artikel 1 der EU-POP-Verordnung) [EU 2019]. Wenn Abfälle Konzentrationen über den relevanten Grenzwerten (Anhang IV und V der EU-POP-Verordnung) aufweisen, gelten die Verpflichtungen gemäß Artikel 7 dieser Verordnung. Gemäß Anhang der AVV führt das Überschreiten der Grenzwerte einiger Stoffe, wie zum Beispiel PCB, automatisch zur Einstufung des Abfalls als gefährlich. Andernfalls gelten die nationalen Verpflichtungen gemäß der Verordnung über die Getrenntsammlung und Überwachung von nicht

gefährlichen Abfällen mit persistenten organischen Schadstoffen (POP-Abfall-Überwachungs-Verordnung). Diese Verordnung besagt, dass POP-Abfälle zwar nicht als gefährlich eingestuft werden, aber dennoch überwacht werden müssen. Die POP-Abfall-ÜberwV stellt sicher, dass die Abfälle bis zu ihrem endgültigen Abbau oder ihrer unumkehrbaren Umwandlung lückenlos überwacht werden (§§ 4 und 5 der POP-Abfall-ÜberwV). Darüber hinaus konkretisiert die POP-Abfall-ÜberwV in Anlehnung an die Regelungen für gefährliche Abfälle das Gebot der Getrenntsammlung und das Verbot der Vermischung gemäß der EU-POP-Verordnung (§ 3 der POP-Abfall-ÜberwV) [POP-Abfall-ÜberwV 2022].

Die Auswirkungen der Entsorgung von POPs werden anhand eines Beispiels für HBCD (früher als Flammenschutzmittel verwendet, siehe dazu Kapitel 4.7.1) verdeutlicht: Gemäß Anhang IV der EU-POP-Verordnung liegt der Konzentrationsgrenzwert für HBCD-haltige Abfälle bei 100 mg/kg. HBCD-haltige Abfälle mit einer Konzentration über 100 mg/kg müssen daher gemäß Artikel 7 Absatz 2 der EU-POP-Verordnung „ohne unnötige Verzögerung und in Übereinstimmung mit Anhang V Teil I so beseitigt oder verwertet werden, dass die darin enthaltenen persistenten organischen Schadstoffe zerstört oder unumkehrbar umgewandelt werden, damit die verbleibenden Abfälle und Freisetzungen nicht die Eigenschaften persistenter organischer Schadstoffe aufweisen“ [EU 2019]. Gemäß Anhang V Teil 1 der EU-POP-Verordnung umfassen die potenziellen Verfahren zur Behandlung und Verwertung die chemisch/physikalische Behandlung (D9), die Verbrennung an Land (D10), die Hauptverwendung als Brennstoff oder anderer Energieträger mit Ausnahme von PCB-haltigen Abfällen (R1), sowie die Verwertung/Rückgewinnung von Metallen und Metallverbindungen (R4). Unter bestimmten Umständen ist es gestattet, gelistete Abfälle aus Teil 2, Anhang V der EU-POP-Verordnung dauerhaft in sicheren, tief gelegenen Felsformationen, Salzbergwerken oder Deponien für gefährliche Abfälle zu lagern. Dabei dürfen die jeweiligen maximalen Grenzwerte für persistente organische Schadstoffe nicht überschritten werden (Teil 2, Anhang V der EU-POP-Verordnung). Allerdings sind in Deutschland gemäß § 7 Abs. 2 der Verordnung über Deponien und Langzeitlagerung (Deponieverordnung, DepV) keine Abfälle auf oberirdischen Deponien zugelassen, die gemäß Anhang III der EU-Abfallrahmenrichtlinie als explosiv, brandfördernd, entzündbar oder ätzend eingestuft sind [DepV 2021].

Auch Asbest zählt zu den typischen Schadstoffen, die im Baubereich auftreten. Die Technische Regel für Gefahrstoffe 519 (TRGS 519) und die entsprechenden Asbestrichtlinien der einzelnen Bundesländer sind wichtige Leitlinien für den sicheren Umgang mit Asbestprodukten. Die TRGS 519 umfasst die aktuellen Anforderungen in Bezug auf Sicherheit, Arbeitsmedizin, Hygiene und Arbeitswissenschaften im Umgang mit Asbest. Sie enthält spezifische Schutzmaßnahmen für den Umgang mit Asbest und asbesthaltigen Gefahrstoffen während Abbruch-, Sanierungs- oder Instandhaltungsarbeiten, sowie bei der Entsorgung von Asbestabfällen [BAUA 2022]. Die Mitteilung 23 der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) hat die Funktion einer Vollzugshilfe „für den Umgang

mit asbesthaltigen Abfällen bei kontrolliertem Rückbau, Beförderung, Behandlung, Verwertung, Lagerung, Beseitigung und soll zu einem bundeseinheitlichen Vorgehen nach dem Stand der Technik führen“ [LAGA 2015].

Die Beispiele zeigen, dass insbesondere die Unternehmen, die Produkte herstellen und vertreiben, für den gesamten Lebenszyklus dieser Produkte verantwortlich sind. Das sogenannte Konzept der (abfallrechtlichen) Produktverantwortung basiert auf der Idee, dass bei der Entwicklung und Herstellung von Produkten bereits Aspekte der Kreislaufwirtschaft berücksichtigt werden sollten. Viele Maßnahmen im Rahmen der Produktverantwortung sind mit Verpflichtungen beim Markteintritt neuer Produkte verbunden.

Die Produktverantwortung beinhaltet verschiedene mögliche Maßnahmen wie zum Beispiel:

- Vorgaben für die Entwicklung mehrfach verwendbarer, langlebiger und umweltverträglicher Produkte,
- den Einsatz von Sekundärrohstoffen bei der Herstellung neuer Erzeugnisse,
- die Kennzeichnungspflicht schadstoffhaltiger Erzeugnisse, die Hinweise auf Rückgabe-, Wiederverwendungs- und Verwertungsmöglichkeiten bzw. -pflichten,
- die Rücknahme und umweltgerechte Entsorgung nach Gebrauch (§ 23 Abs. 2 KrWG).

Diese Vorschriften stellen allgemeine Pflichten dar, deren Nichtbeachtung keine direkten Konsequenzen nach sich zieht. Die Bundesregierung hat jedoch gemäß § 23 Abs. 4 KrWG die Befugnis, Verordnungen zur Ausgestaltung der Produktverantwortung zu erlassen. Es gibt bereits Regelungen zur Produktverantwortung für verschiedene Abfallströme, wie Verpackungen (**Verpackungsgesetz – VerpackG**) [VerpackG 2023], Fahrzeuge (**Altfahrzeugverordnung – AltfahrzeugV**) [AltfahrzeugV 2020], Batterien (**Batteriegesetz – BattG**) [BattG 2020], Elektro- und Elektronikgeräte (**Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG**) [ElektroG 2022], **Elektro- und Elektronikgeräte-Stoffverordnung – ElektroStoffV** [ElektroStoffV 2021]) sowie (Mineral-) Öle (**Altölverordnung – AltöIV**) [AltöIV 2020]. Bisher wurde jedoch keine spezifische Produktverantwortung für Bau- und Abbruchabfälle gesetzlich festgelegt, so dass die abstrakten Grundpflichten weiterhin gelten [UBA 2021].

2.4 Chemikalienrecht

Das **europäische Chemikalienrecht** (national Teil des Gefahrstoffrechts) mit der **REACH-Verordnung**, der **CLP-Verordnung** sowie der **POP-Verordnung** (mit Anknüpfungspunkten zum Abfallrecht) greift, sobald der Abfall den Abfallstatus verliert und wieder in den Produktkreislauf zurückgeführt wird. Damit unterliegt er als Produkt aus Sekundärrohstoffen den gleichen Bedingungen,

Beschränkungen oder Verboten des Inverkehrbringens und der Verwendung wie auch Produkte aus Primärrohstoffen [UBA 2021].

Die **REACH-Verordnung** bildet die Grundlage des allgemeinen Chemikalienrechts in der Europäischen Union und gilt unmittelbar innerhalb Deutschlands aufgrund ihrer Wirkung als Verordnung. Sie enthält einheitliche Bedingungen für die Herstellung, das Inverkehrbringen und die Verwendung von Stoffen, sei es in reiner Form, in Mischungen oder in Produkten, und ist in allen Mitgliedstaaten der EU gültig [REACH 2006].

Gemäß Artikel 2 Absatz 2 der **REACH-Verordnung** gelten Abfälle nicht als Stoffe, Mischungen oder Produkte im Sinne von Artikel 3 der Verordnung. Das bedeutet, dass die Pflichten der **REACH-Verordnung** von dem Zeitpunkt an, an dem Abfalleigenschaften vorliegen (d. h. wenn einer der Kriterien für die Entsorgung erfüllt ist), bis zum Ende der Abfalleigenschaften keine Anwendung finden.

Bei der Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den Schnittstellen der **REACH-Verordnung** und produktbezogenen Vorschriften (z. B. **BauPVO**) stößt man anfangs auf deutliche begriffliche Unterschiede. Im Chemikalienrecht existiert nämlich kein Konzept des „Produkts“ an sich; stattdessen werden dort Stoffe, Gemische und Erzeugnisse unterschieden.

Gemäß Artikel 6 der **REACH-Verordnung** ist es erforderlich, dass Stoffe, sei es als eigenständige Substanzen oder in Mischungen (und unter den zusätzlichen Bedingungen des Artikel 7 der **REACH-Verordnung** auch Stoffe in Produkten), vor ihrer Markteinführung bei der **Europäischen Chemikalienagentur ECHA** registriert werden müssen. Die Registrierung beinhaltet die Übermittlung eines festgelegten Datensatzes. Gemäß den Bestimmungen des Artikel 2 Absatz 7 Buchstabe d) der **REACH-Verordnung** können recycelte Stoffe von der Registrierungspflicht befreit sein. Die **REACH-Verordnung** sieht die Zulassung für sogenannte besonders besorgniserregende Stoffe („substances of very high concern“, SVHC) vor (Artikel 56 REACH-Verordnung). Diese Stoffe werden zunächst in die Kandidatenliste aufgenommen und anschließend in Anhang XIV der **REACH-Verordnung** aufgeführt. Nach ihrer Aufnahme in Anhang XIV unterliegen diese Stoffe einer Zulassungspflicht, das heißt, sie dürfen nur dann in Verkehr gebracht und verwendet werden, wenn sie von der EU-Kommission ausdrücklich für den jeweiligen Verwendungszweck zugelassen wurden.

Des Weiteren enthält die **REACH-Verordnung** Beschränkungen, d. h. es gibt Verbote oder Einschränkungen hinsichtlich der Herstellung, des Inverkehrbringens oder der Verwendung von Stoffen. Die Beschränkungen sind im Anhang XVII der **REACH-Verordnung** aufgeführt. Einzelne Beschränkungen enthalten spezifische Vorschriften für recycelte Materialien.

Die **CLP-Verordnung** wird neben der **REACH-Verordnung** als eine bedeutende Gesetzgebung im EU-Binnenmarktrecht für Chemikalien betrachtet. Die **CLP-Verordnung** legt verbindliche Einstufungen und Kennzeichnungen von

Stoffen fest, die Auswirkungen auf Informationspflichten, Beschränkungen für Stoffe und deren Verwendungen sowie Einstufungen gemäß der **REACH-Verordnung** haben können [EU 2008a]. Im Bereich der Bauprodukte wird die Pflicht zur Kennzeichnung von gefährlichen Stoffen mit der CE-Kennzeichnung umgesetzt.

Neben den allgemeinen Bestimmungen des Chemikalienrechts gibt es spezielle Regelungen, die die Bedingungen für die Herstellung, den Verkauf oder die Verwendung von Stoffen, Mischungen oder Produkten festlegen. Ein Beispiel dafür sind die Einschränkungen für den Verkauf gemäß der **EU-Verordnung über persistente organische Schadstoffe (POPs)** (siehe dazu Kapitel 2.3).

Zusätzlich können in bestimmten Fällen weitere chemikalienrechtliche Beschränkungen für Stoffe gelten, die auch in Bauprodukten verwendet werden, wie z. B. die Verordnung (EU) 2017/852 über Quecksilber oder die Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase.

2.5 Zusammenfassung der regulatorischen Anforderungen und Formulierung produktbezogener Maßnahmen

Im zweiten Kapitel wurde eine Zusammenfassung des rechtlichen Rahmens erarbeitet, der die wichtigsten Vorschriften für den Einsatz von recycelten Baustoffen abdeckt. Die vorgestellten Bestimmungen erstrecken sich über den gesamten Lebenszyklus von Bauteilen, einschließlich deren Wiedereingliederung in den Kreislauf, der Vermarktung und schließlich der Nutzung. Daher müssen im gesamten Lebenszyklus auch verschiedene Rechtsgebiete (Produkt-/ Bauordnungs-/ Abfall-/ Chemikalienrecht) und einzelne regulatorische, sowie normative Vorschriften berücksichtigt werden.

Maßgebend für nahezu alle Produktgruppen ist die neue Verordnung für nachhaltige Produkte (**Ecodesign Requirements for Sustainable Products Directive, ESPR**). Für die Vermarktung von Bauprodukten ist die **BauPVO** anzuwenden. Die Vorgaben für die Herstellung, den Einsatz und den Ausbau mineralischer Ersatzbaustoffe werden zukünftig durch die **ErsatzbaustoffV** definiert.

Bei der Beachtung des nationalen Bauordnungsrechts müssen sowohl die **Musterbauordnung (MBO)** als auch die darin enthaltenen Technischen Baubestimmungen und die **Landesbauordnungen (LBO)** berücksichtigt werden.

Darüber hinaus gibt es spezifische Normen oder technische Regelungen für bestimmte Stoffe und Produkte.

Das **Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)** spielt eine bedeutende Rolle, sobald Produkte oder Substanzen als Abfall eingestuft werden. Es beinhaltet verschiedene Bestimmungen, die sich auf den Abfallbegriff (§ 3 Abs. 1 KrWG), die Definition von Erzeugern und Besitzern (§ 3 Abs. 8, 9 KrWG), die Abfallhierarchie (§ 6 KrWG) und das Ende der Abfalleigenschaft (§ 5 KrWG) beziehen. Darüber hinaus enthält es Vorschriften zur abfallrechtlichen Produktverantwortung.

Weitere relevante Vorschriften in Bezug auf Abbruch und Rückbau, Abfallmanagement und Recycling umfassen die **Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV)**, die die Pflicht zur getrennten Lagerung bestimmter Baustoffabfälle vorschreibt, sowie die **Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV)**, die die Klassifizierung und Kennzeichnung von Abfällen hinsichtlich ihrer Gefährlichkeit regelt. Je nach Einstufung der Abfälle ergeben sich spezifische Konsequenzen für deren Entsorgung. Insbesondere bei gefährlichen Abfällen, Abfällen, die persistente organische Schadstoffe (POP) enthalten und anderen Schadstoffen ist es daher erforderlich, das politische Ziel der europäischen und nationalen Abfallpolitik zu berücksichtigen, nämlich die Förderung der Kreislaufwirtschaft durch Recycling, um natürliche Ressourcen zu schonen. Dieses Ziel ist im Chemikalienrecht und im Abfallrecht verankert und dient dem Schutz von Menschen und Umwelt, indem schädliche oder gefährliche Abfälle aus dem Kreislauf ausgeschlossen werden.

Sobald der Abfall seinen Abfallstatus verliert und als Produkt aus Sekundärrohstoffen wieder in den Kreislauf eingeführt wird, unterliegt er im Allgemeinen denselben Bedingungen, Beschränkungen oder Verboten hinsichtlich Vertriebs und Verwendung wie Produkte aus Primärrohstoffen (sofern keine speziellen Bestimmungen für recycelte Stoffe gelten). Ab diesem Zeitpunkt greifen daher das Chemikalienrecht (bzw. Gefahrstoffrecht) mit der **REACH-Verordnung**, der **CLP-Verordnung** und der **EU-POP-Verordnung**.

Die vorangegangene Beschreibung von regulatorischen Anforderungen an Dämmsysteme, Putze, Mauermörtel und Estrichmörtel als Produkte und als Abfall veranlasst sowohl auf Seiten des Gesetzgebers als auch auf Seiten der Hersteller über mögliche produktbezogene Maßnahmen und Instrumente zur Stärkung des Recyclings und zur Schaffung von Anreizen zur Verwendung recycelter Materialien nachzudenken.

Dies kann beispielsweise durch eine intensivierte Förderung oder Entwicklung von Strategien zur Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen erfolgen. Zudem sollte die rechtliche Grundlage für den Handel mit Sekundärrohstoffen geschaffen bzw. erweitert werden. Ein Vorschlag lautet hierfür, dass Rechtsvorschriften im Bereich „Umweltmaterialrecht“ vereinheitlicht werden sollten, anstatt der beschriebenen getrennten Regelungen, wie Produktrecht, Abfallrecht und Chemikalienrecht. Regelungsanforderungen für Primär- und Sekundärrohstoffe könnten zudem harmonisiert werden. Die Einführung einer gesetzlichen Mindestquote für Sekundärrohstoffe bei öffentlichen Ausschreibungen würde als Vorbild für andere Vorhaben dienen. Die Verpflichtung zum Einsatz von Recyclingbaustoffen und eine Nachweispflicht für die Notwendigkeit des Einsatzes von Primärrohstoffen nach dem Motto „comply or explain“ (der Einsatz von Primärrohstoffen muss technisch und ökologisch gerechtfertigt werden) steigert das Umweltbewusstsein und damit die Akzeptanz von Sekundärrohstoffen [BMVITO 2019].

3 Produktverhalten

3.1 Entwicklung des Gebäudesektors

[Destatis 2022a] stellt Daten zur Anzahl der pro Jahr fertiggestellten Gebäude zur Verfügung. Über die 2000er Jahre hinweg ist demnach ein Rückgang von insgesamt 303.085 im Jahr 2001 (davon 248.354 Wohngebäude) auf ein Minimum von 168.119 fertiggestellten Gebäuden (davon 125.489 Wohngebäude) im Jahr 2009 festzustellen. Über die 2010er Jahre hinweg folgt dann wieder ein leichter Anstieg, wobei die Anzahl von ca. 200.000 fertiggestellten Gebäuden jährlich kaum mehr überschritten wird. Aktuellste Zahlen für das Jahr 2022 berichten von 192.744 fertiggestellten Gebäuden, davon 155.770 Wohngebäude.

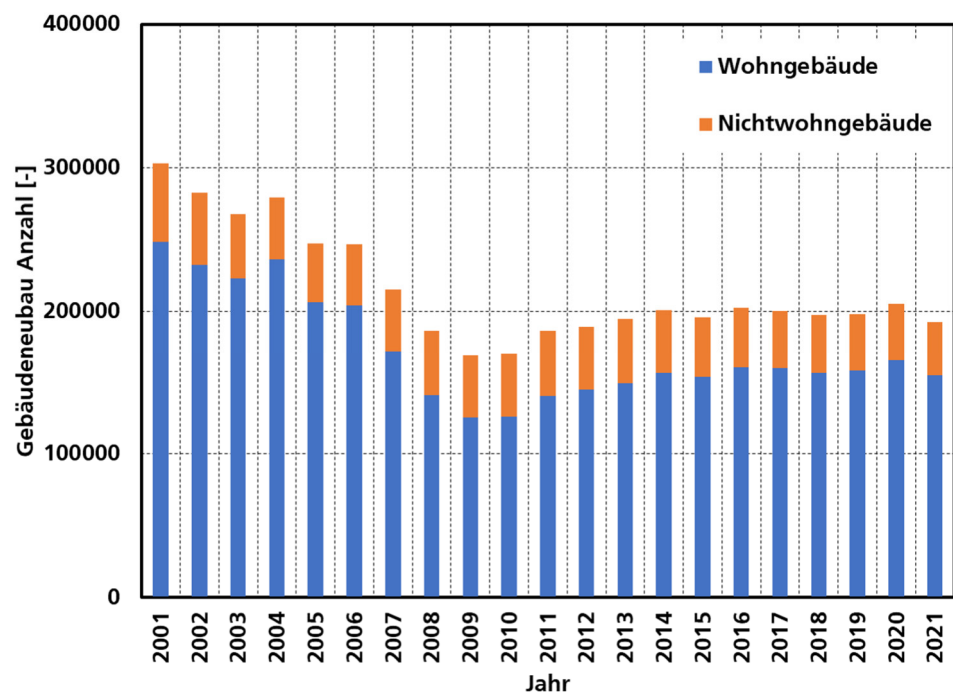


Bild 6:
Fertiggestellte Wohn- und Nichtwohngebäude im Zeitraum 2001 bis 2021 nach Statista [Destatis 2022a].

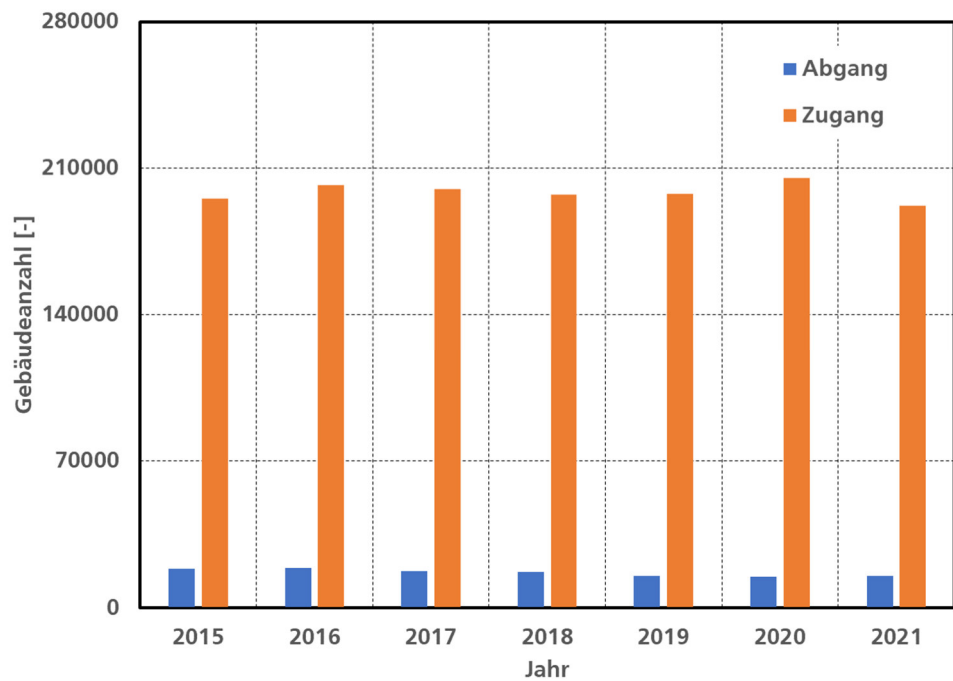


Bild 7:
Zugang und Abgang von Gebäuden/Gebäudeteilen im Hochbau: Deutschland, Jahre 2015 bis 2021 nach Statista [Destatis 2022b].

Die Zu- und Abgänge von Gebäuden und Gebäudeteilen sind in Bild 7 dargestellt. Die Rückbauquote lag in den Jahren 2015 bis 2021 zwischen 7 % und 10 %. Die Angaben beziehen sich rein auf die Anzahl von Gebäuden nicht jedoch auf die Tonnagen von Bauprodukten, die für die Errichtung der Objekte verwendet wurden oder von Bauabbruchabfällen, die beim Rückbau entstanden sind. Aus dem Verhältnis zwischen Neubau und Rückbau wird jedoch erkennbar, dass der Bedarf an Ressourcen für die Errichtung von Gebäuden nur partiell durch Sekundärrohstoffe aus dem Rückbau gedeckt werden kann. Das Verhältnis von 7 bis 10 % gilt auch für den Bereich von Dämmstoffen, Putzen, Mauermörteln und Estrichmörteln. Auch in diesem Marktsegment kann somit nur ein Bruchteil der benötigten Ressourcen durch Sekundärrohstoffe aus dem Rückbau übertragen werden.

Die verfügbaren Daten und Zahlen geben auch keine Auskunft über die Art des Rückbaus (konventionell, teilselektiv oder selektiv vgl. Kapitel 4.4.1).

3.2 Entwicklung des Gesamtmarktes für Putze, Mauermörtel und Estrichmörtel

Die vom VDPM bereitgestellten Quartalsberichte über die Produktionsmengen von Mörtelprodukten wurden von B+L Marktdaten GmbH in Bonn erhoben [B+L 2022]. Sie umfassen den Zeitraum von 2014 bis 2022. Ältere Daten wurden von Marktinformations- und Statistiksysteme GmbH MIS in Ulm über einen Zeitraum von 2011 bis 2016 erhoben [MIS 2017]. Für die Darstellung der Ergebnisse wurde die für Einteilung der einzelnen Produktgruppen die Nomenklatur aus den Quartalsberichten der B+L Marktdaten GmbH übernommen. Im Einzelnen werden folgende Produktgruppen erfasst:

Produktgruppe 1: Putzmörtel

- Außenputze:
 - o Oberputze mineralisch
 - o Oberputze organisch
 - o Klebe- und Armierungsmörtel
 - o Außenunterputze andere
- Innenputze:
 - o Innenputze Gips
 - o Innenputze andere
- WDVS-Absatz

Produktgruppe 2: Mauermörtel

- Normalmauermörtel
- Vormauermörtel
- Leichtmauermörtel
- Dünnbettmörtel

Produktgruppe 3: Estrichmörtel

- Calciumsulfat-Fließestrich-WTM(CAF)
- Zement-Estrich-WTM(CT)

Produktgruppe 4: Fliesenchemie

- Fliesenkleber
- Fugenmörtel
- Ausgleichsmassen

Produktgruppe 5: Trockenbeton/Spritzbeton

Produktgruppe 6: Mörtel für Garten- und Landschaftsbau

Die Marktinformations- und Statistiksysteme GmbH MIS verwendete dagegen eine andere Einteilung der einzelnen Produktgruppen. Ein direkter Vergleich der unterschiedlich erhobenen Datensätze ist somit nicht möglich. Vollständigkeithalber wurde der ermittelte Gesamtabsatz von Mörtelprodukten im Zeitraum von 2011 bis 2016 nach MIS [MIS 2017] in Bild 8 dargestellt.

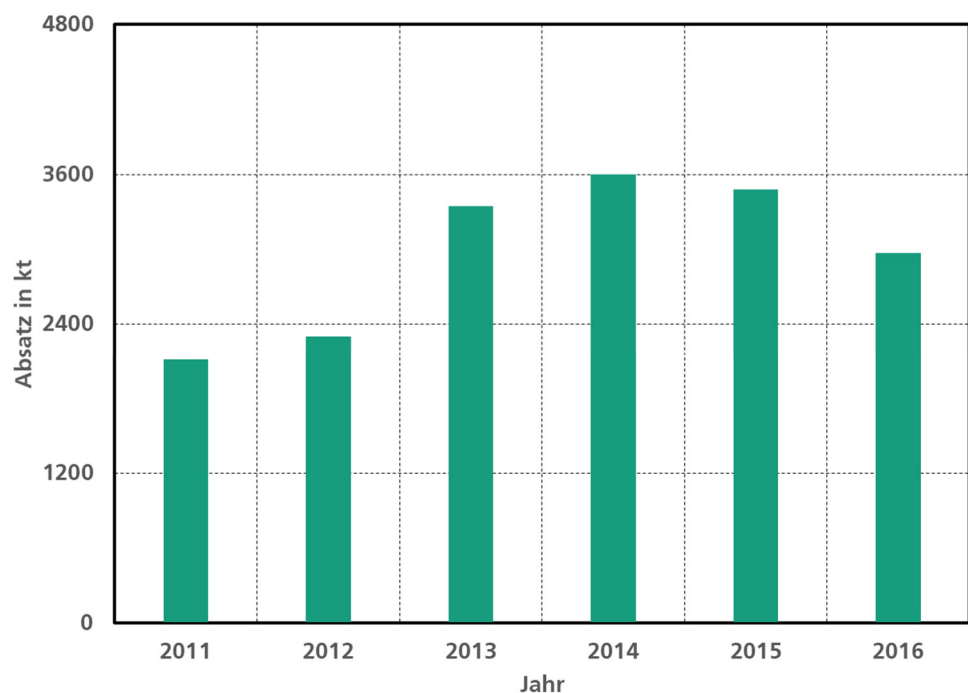


Bild 8:
Gesamtabsatz von Werk trockenmörteln zwischen 2011 und 2016 nach MIS [MIS 2017].

Die Gesamtproduktion von Werk trockenmörtelprodukten betrug im Jahr 2015 7.459 kt. Im Jahr 2021 lag die Produktionsmenge bei 8.820 kt. Die Entwicklung des Gesamtmarkts für Werk trockenmörtelprodukte und der einzelnen Produktgruppen sind in Bild 9 und in der Tabelle 4 nach B+L [B+L 2022] zusammengefasst. Im Bereich der Außenputze wurde in dem genannten Zeitraum eine Zunahme von 400 kt verzeichnet.

Die Daten von MIS und B+L überlappen sich in den Jahren 2015 und 2016. Die vom MIS erhobenen Daten erfassen nur einen Teil der Produktionsmengen von Werk trockenmörtelprodukten.

Diese Daten sind nicht geeignet, um die bereits verbaute Gesamtmenge an Mauermörteln, Estrichmörteln und Putzen im Bestand abzuschätzen.

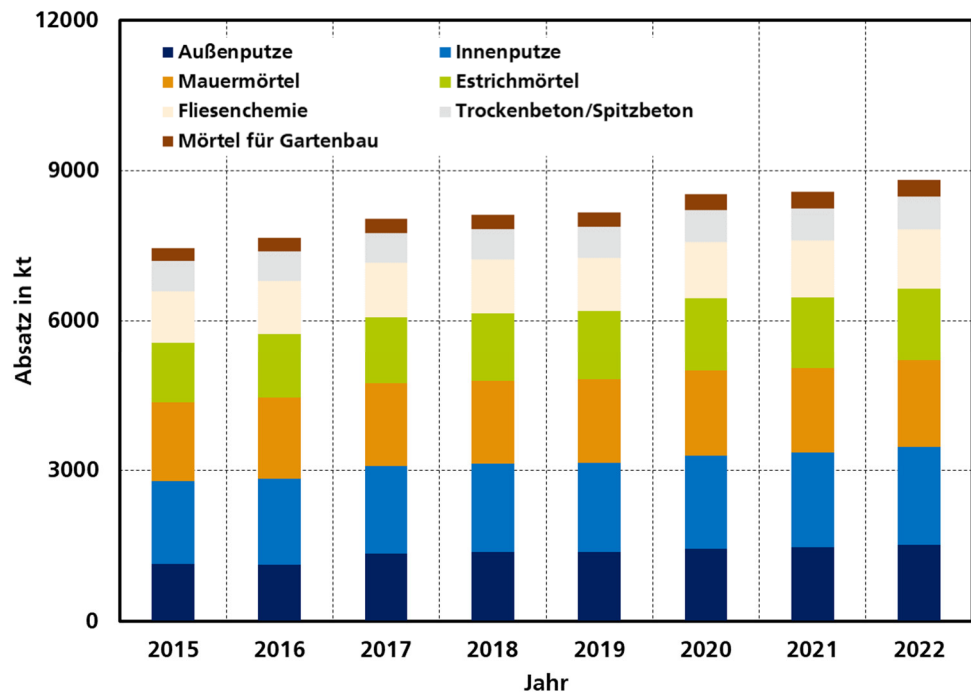


Bild 9:
Produktionsmengen von Werk trockenmörtelprodukten zwischen 2015 und 2022 nach B+L [B+L 2022].

Tabelle 4:
Produktionsmengen von Werk trockenmörtelprodukten zwischen 2015 und 2022 nach B+L [B+L 2022].

Marktsegment	Produktionsmengen von Werk trockenmörtelprodukten in kt in den Jahren							
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Putzmörtel	2795	2844	3099	3134	3163	3301	3360	3476
Außenputze	1142	1122	1353	1379	1385	1452	1479	1527
Oberputze mineralisch			95	97	98	103	105	
Oberputze organisch			150	150	150	156	158	
Klebe und Armierungsmörtel			423	447	438	463	475	
Außenputze andere			685	686	699	730	741	
Innenputze	1653	1722	1746	1755	1778	1849	1881	1949
Innenputze Gips			1305	1312	1331	1386	1411	
Innenputze andere			441	443	447	463	470	
Mauermörtel	1566	1615	1651	1662	1660	1701	1691	1726
Normalmauermörtel			920	917	908	933	927	
Vormauermörtel			475	483	486	495	492	
Leichtmauermörtel			108	109	109	111	111	
Dünnbettmörtel			147	153	157	161	161	
Estrichmörtel	1200	1278	1319	1356	1377	1452	1414	1451
Calciumsulfat-Flieβestrich-WTM (CAF)			716	721	731	750	725	
Zement-Estrich-WTM (CT)			603	635	647	702	689	
Fliesenchemie	1039	1064	1094	1082	1069	1129	1150	1183
Fliesenkleber			717	710	699	743	758	
Fugenmörtel			106	104	103	108	110	
Ausgleichsmassen			271	268	267	277	281	
Trockenbeton/Spritzbeton	596	584	595	602	611	630	639	655
Mörtel für Garten und Landschaftsbau	263	268	276	280	286	314	321	329
Gesamtmarkt	7459	7653	8034	8116	8166	8527	8575	8820

3.3 Entwicklung des WDV-S-Gesamtmarktes

Im Zeitraum von 1960 bis 2022 wurden laut Angaben des FV-WDVS [FV-WDVS 2016] und VDPM [B+L 2023] ca. 1.350.000.000 m² an WDV-S verbaut. Die Produktionsmengen für den Zeitraum von 1960 bis 1976 wurden auf ca. 20.000.000 m² geschätzt [Heller 2022].

In Bild 10 sind die jährlichen Produktionsmengen von WDV-S für die Jahre 1977 bis 2022 dargestellt.

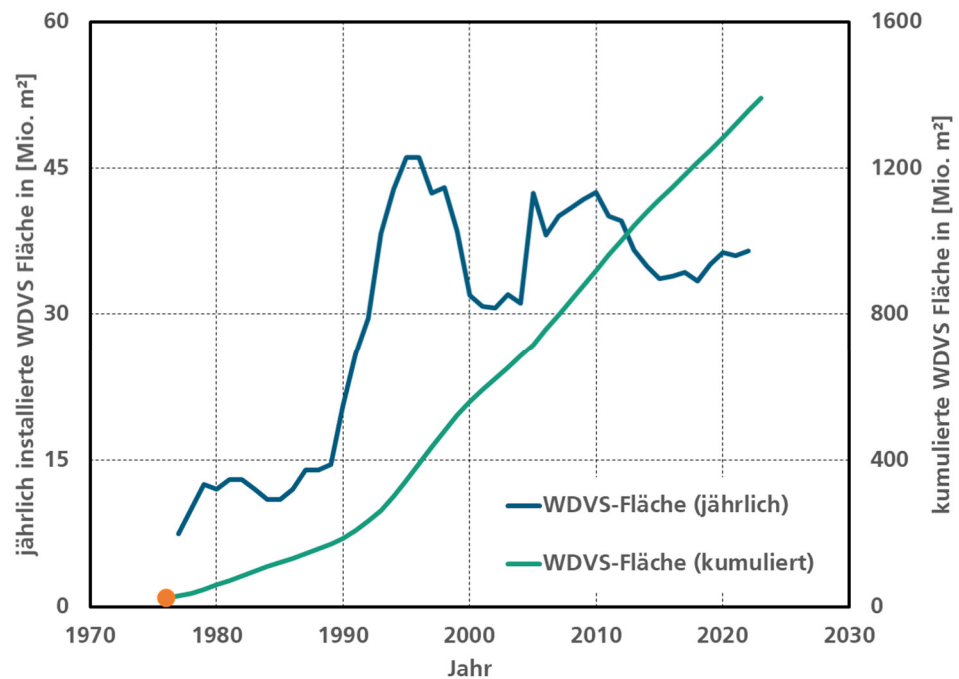


Bild 10:
Entwicklung des WDVS-Gesamtmarkts (Fläche) zwischen 1977 und 2022 [FV-WDVS 2016; VDPM 2018; B+L 2023].

Für die Darstellung und Berechnung des Volumens an installierten Wärmedämmstoffen wurde die Zunahme der mittleren Dämmstoffdicke von ca. 55 mm auf aktuell ca. 127 mm berücksichtigt. Daraus ergibt sich ein kumuliertes Volumen an verbauten Dämmstoffen für WDVS von 132.000.000 m³. Die Entwicklung des WDVS-Gesamtmarkts nach verbautem Volumen zwischen 1977 und 2022 ist in Bild 11 dargestellt.

In den folgenden Bildern ist die Entwicklung des Gesamtmarkts für die häufigsten Dämmstoffe eines WDVS wie EPS, Steinwolle und Holzweichfaser (HWF) bezogen auf die installierte Fläche (Bild 12) bzw. installierte Masse (Bild 13) abgebildet. Für die Berechnung der Tonnage an Dämmstoffen wurde für EPS eine mittlere Dichte von 25 kg/m³, für Steinwolle 85 kg/m³, für HWF 145 kg/m³ und für andere Dämmstoffe 65 kg/m³ angesetzt. Somit wurden nach dieser Berechnung bis 2022 ca. 2.562 kt des Dämmstoffs EPS, ca. 1.989 kt Steinwolle, ca. 343 kt HWF und ca. 271 kt an anderen Dämmstoffen im Bereich WDVS verbaut. Daten für HWF werden erst ab dem Jahr 2020 separat erfasst.

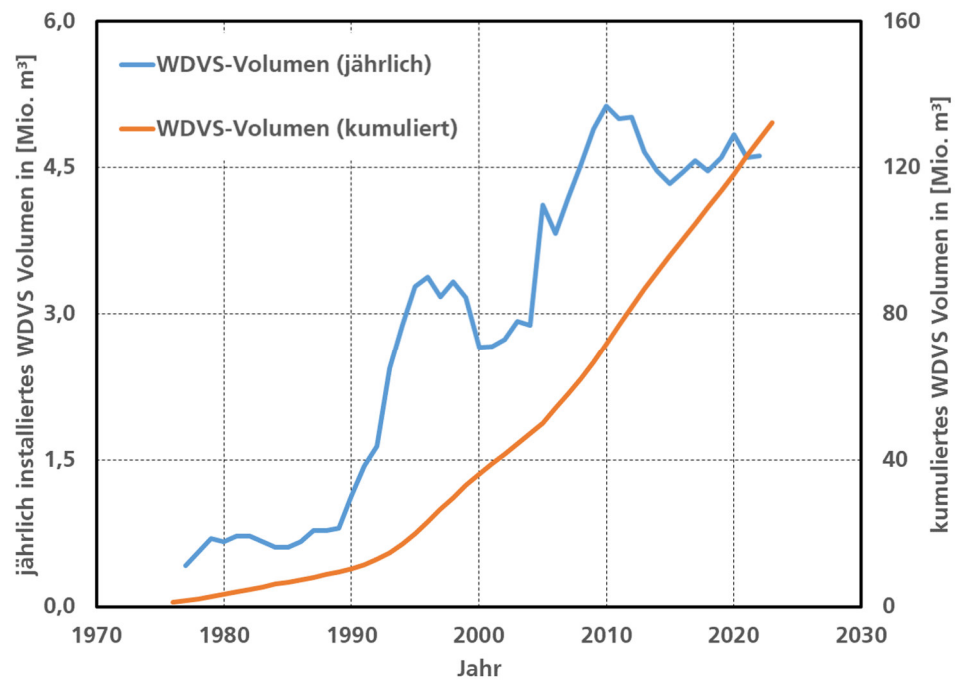


Bild 11:
Entwicklung des WDV-Gesamtmarkts (Volumen) zwischen 1977 und 2022
[FV-WDVS 2016; VDPM 2018; B+L 2023].

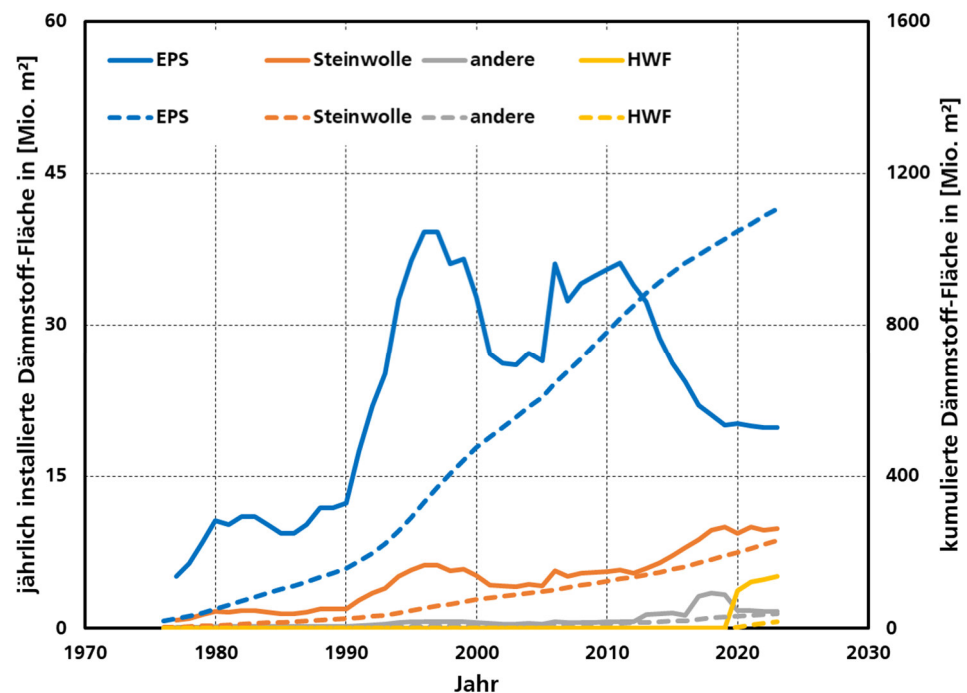


Bild 12:
Entwicklung des WDV-Gesamtmarkts nach Dämmstoffen in m^2 zwischen
1977 und 2022 [FV-WDVS 2016; VDPM 2018; B+L 2023].

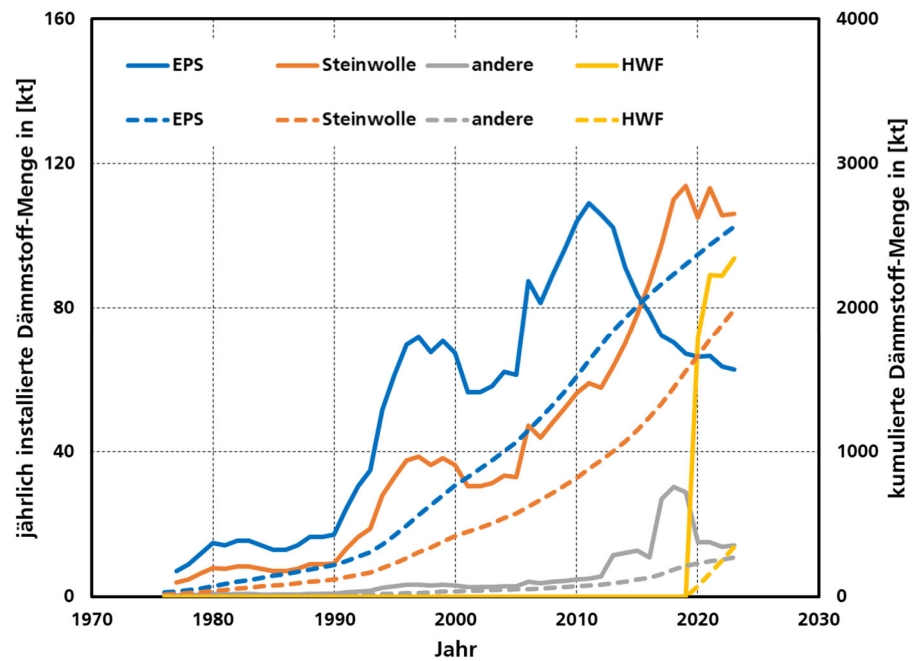


Bild 13:
Entwicklung des WDV-Gesamtmarkts nach Dämmstoffen in kt zwischen 1977 und 2022 nach [FV-WDVS 2016; VDPM 2018; B+L 2023].

Die Entwicklung des WDV-Markts en Detail für den Zeitraum 2014 bis 2023 ist im Bild 14 zusammengefasst. Der Grafik zeigt eine Verschiebung innerhalb des WDV-Marktes weg von EPS und hin zu HWF und Steinwolle.

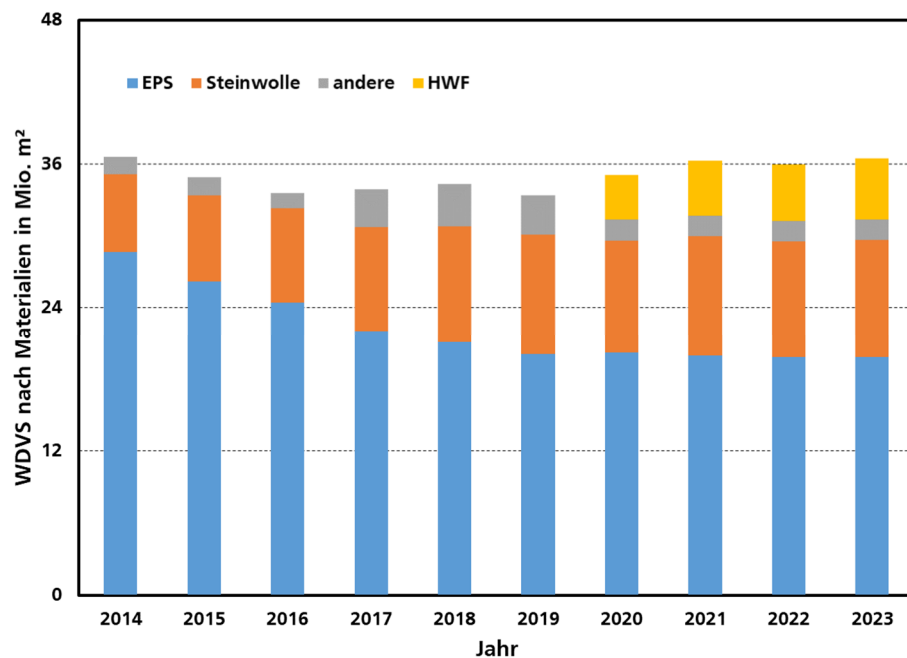


Bild 14:
Entwicklung des WDV-Gesamtmarkts nach Materialart zwischen 2014 und 2023 (Prognose) nach [FV-WDVS 2016; VDPM 2018; B+L 2023].

Ausgehend von der gedämmten Gebäudeoberfläche wurden die Mengen der verbauten WDVS-Komponenten berechnet.

Im Zeitraum von 1960 bis 2022 wurden laut Angaben des FV-WDVS [FV-WDVS 2016] und VDPM [B+L 2023] ca. 1.350.000.000 m² an WDVS verbaut. Die Produktionsmengen für den Zeitraum von 1960 bis 1976 wurden auf ca. 20.000.000 m² geschätzt [Heller 2022].

Bezogen auf die gedämmte Gebäudefläche von 1.350.000.000 m² wurden zusätzlich verbraucht:

- 4.928 kt bis 9.018 kt an Kleber: bei einem Anteil an mineralischen Klebern von 80 % mit einem Verbrauch von 4 kg/m² bis 7 kg/m² und einem Anteil an Dispersionsklebern von 18 % mit einem Verbrauch von 2,5 kg/m² bis 6 kg/m². Der Anteil der mechanischen Befestigung lag bei 2 %.
- 6.075 kt bis 6.750 kt an Armierungsmörtel: bei einem Verbrauch von 4,5 kg/m² bis 5 kg/m²;
- 245 kt Armierungsgewebe bei einem Flächengewicht von 165 g/m² und einer Überlappung von 10 %;
- 2.194 kt bis 4388 kt Oberputz: Der Anteil an mineralischen Oberputzen betrug 65 % mit einem Verbrauch von 2,5 kg/m² bis 5 kg/m² und einem Anteil an organisch gebundenen Putzen von 35 % mit einem Verbrauch von 2 kg/m² bis 6 kg/m².

Bei 60 % der gedämmten Gebäudefläche wurden zusätzlich Dübel als Befestigungsmittel eingesetzt. Im Mittel wurden nach Angaben der EJOT Baubefestigungen GmbH 6,2 Dübel/m² verwendet. Dies entspricht einem Verbrauch von 5.022.000.000 Dübeln. Bei einem angenommenen Gewicht von 20 g pro Dübel ergibt sich ein Gesamtgewicht von 100,4 kt. Bei einem Gewichtsverhältnis Metall/Kunststoff von 7:1 ergibt sich Gewichtsanteil an Metall von 87,9 kt und ein Kunststoffanteil von 12,5 kt. Davon entfallen 95 % oder 11,9 kt auf die Polyolefine PE/PP und 5 % oder 0,6 kt auf glasfaserverstärktes Polyamid (PA). In Bild 15 sind diese Daten graphisch aufbereitet dargestellt.

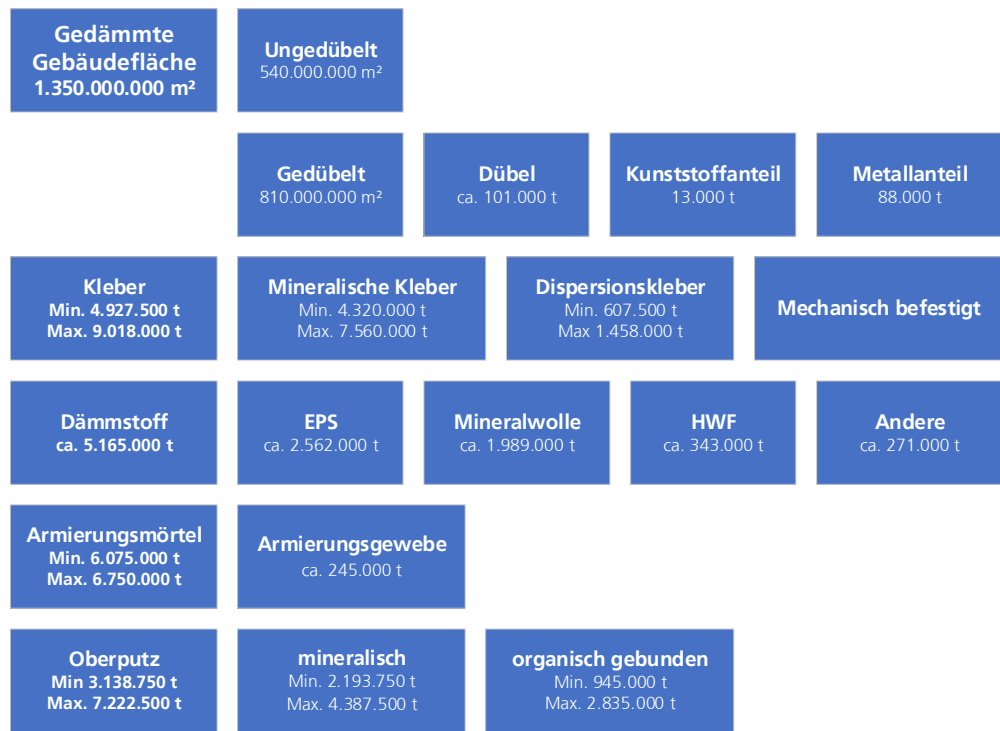


Bild 15:
Mengen an verbauten WDV-Komponenten im Zeitraum von 1960 bis 2022.

3.4 Rohstoffeinsatz in Deutschland (Stoffströme)

Der Rohstoffeinsatz der Wirtschaft in Deutschland betrug im Beispieljahr 2019 2.536 Mio. t, davon entfielen auf nicht-metallische Mineralien 826 Mio. t (siehe Bild 16) [Lutter 2022].

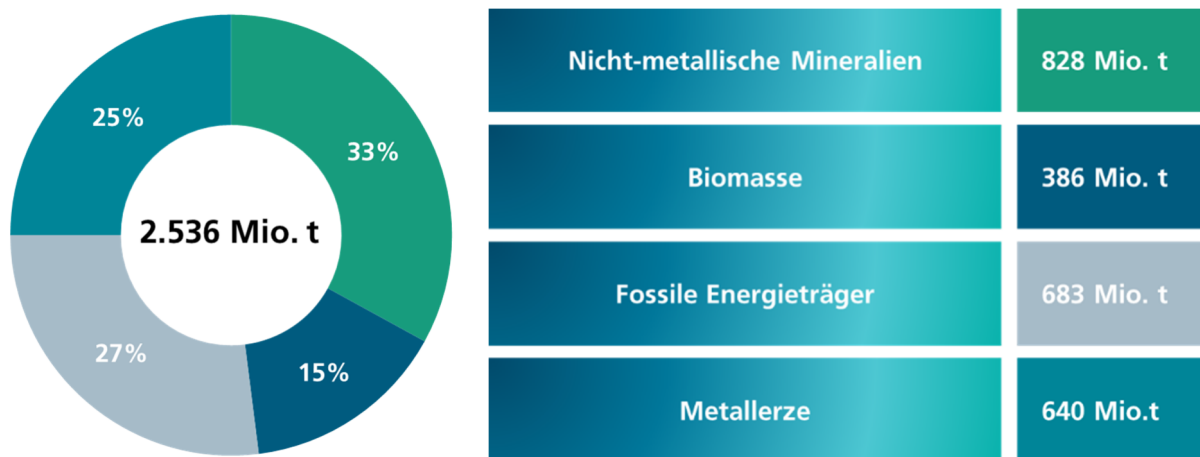


Bild 16:
Rohstoffeinsatz der Wirtschaft in Deutschland 2019 nach [Lutter 2022]

Laut einer Studie des Bundesverbands Baustoffe – Steine und Erden e.V. lag die Gesamtförderung an nichtenergetischen mineralischen Primärrohstoffen 2019 in Deutschland bei ca. 570 Mio. t. Davon entfielen 85 % der geförderten Mengen an nichtenergetische mineralische Rohstoffe auf Sand und Kies sowie Natursteine für die Produktion von Baustoffen [Stoll 2022].

Die Fördermenge von Sand und Kies betrug im Zeitraum von 2005 bis 2019 durchschnittlich 247 Mio. t pro Jahr. Im Basisjahr der Studie 2019 wurden 259 Mio. t gewonnen. **2,4 % der Fördermenge an Sand und Kies oder 6,2 Mio. t** entfielen 2019 auf die **Herstellung von Mörtel und Estrichen** [Stoll 2022].

Das Produktionsniveau von Naturstein lag im Zeitraum von 2005 bis 2019 bei einer durchschnittlichen Größenordnung von 216 Mio. t pro Jahr. Der **Anteil an Natursteinen** für die **Herstellung von Mörtel und Estrichen** lag im Jahr 2019 bei **0,3 % dies entsprach 0,6 Mio. t** [Stoll 2022].

5,8 % der ungebrannten Produkte aus Kalk- und Dolomitstein fanden ihre Verwendung in der Herstellung von Mörtel und Estrichen. 2019 waren es 0,6 Mio. t. Die Gesamtproduktionsmenge von Kalk- und Dolomitstein im Jahr 2019 lag bei 9,7 Mio. t. Im gleichen Jahr wurden für die Branntkalk und Dolomitmalkherstellung 10,9 Mio. t an **Kalk- und Dolomitstein** verbraucht. Auf die **Herstellung von Mörtel und Estrich entfielen davon 2,1 % oder 0,2 Mio. t** [Stoll 2022].

Im Jahr 2019 wurden 39,5 Mio. t. **Kalkstein für die Zementherstellung** verwendet. Auf die **Herstellung von Mörtel und Estrich entfielen 3 % oder 1,2 Mio. t** [Stoll 2022].

Somit wurden im Jahr 2019 ca. **8.200 kt** an nichtenergetischen mineralischen **Primärrohstoffen für die Herstellung von Mörtel und Estrichen** verbraucht (vergleiche Tabelle 4).

Nach Schätzung des Umweltbundesamts [Schiller 2015] entstand zwischen den Jahren 1960 und 2010 ein Nettobestandszuwachs des anthropogenen Lagers von langlebigen Gütern in der Größenordnung von 42,3 Mrd. t. Die UBA-Studie geht von mittleren jährlichen Zuwachsraten von 820 bis 830 Mio. t pro Jahr aus. Somit beträgt der Zuwachs der letzten zwölf Jahre ca. 10 Mrd. t. Auf den Bausektor entfielen in der Basisperiode 1960 bis 2010 ca. 28 Mrd. t an langlebigen Gütern. Der Anteil an mineralische Materialien wurde auf 93 % beziffert.

[Heinrich 2022] ermittelte am Fallbeispiel von München-Freiham die stoffliche Zusammensetzung des Wohngebäudebestands nach Baustoffgruppen. Der Bestand umfasste ca. 2.400 Gebäude und betrug ca. 2,2 Mio. t. 50 % der gebundenen Gesamtmasse entfiel auf Mehrfamilienhäusern der Baualtersklassen 1958 – 1968 (31 %) und 1969 – 1978 (19 %). Die Baustoffgruppe mit dem größten Massenanteil von 48 % war Beton gefolgt von Mauersteinen mit

24 %. Der **Anteil an Putzen, Mörteln und Estrichen wurde mit 16 %** angegeben. Der **Massenanteil an Wärmedämmstoffen lag bei 1 %**.

3.5 Haltbarkeit und Dauerhaftigkeit

Eine eindeutige Definition der Lebensdauer von WDVS ist nach [Heller 2022] nicht möglich. So sei anzunehmen, dass heutige Systeme längere Standzeiten erreichen als technisch unausgereifte WDVS aus der Anfangszeit.

Die „Leitlinie für Europäische Technische Zulassungen für außenseitige Wärmedämm-Verbundsysteme mit Putzschicht“ gibt unter der Voraussetzung, dass die Objekte angemessen genutzt und gewartet werden, eine Nutzungsdauer von 25 Jahren an [ETAG 004 2013].

In der vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung (BBSR) [BMWSB 2017] herausgegebenen Tabelle für Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach dem „Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen“ (BNB) finden sich für Putze/Mörtel, Dämmung als WDVS und Estriche folgende Angaben bezüglich der Dauerhaftigkeit (Tabelle 5). Die Materialien, die an der Gebäudehülle zum Einsatz kommen, schützen während dieser Zeit das Gebäude vor Umwelteinflüssen wie Regen, Feuchte, Extremtemperaturen, Wind und UV-Strahlung.

Tabelle 5:
Nutzungsdauern von ausgewählten Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) [BMWSB 2017].

Produkt	Nutzungsdauer in Jahren
Putz/Mörtel	30 bis 45
WDVS	40
Estrich	50

Umfangreiche Daten zur Dauerhaftigkeit von WDVS in Deutschland bieten die Untersuchungen von Lengsfeld et al. [Lengsfeld 2015; Lengsfeld 2023]. Die erste wissenschaftliche Begutachtung von Gebäuden mit WDVS erfolgte 1975. Insgesamt wurden 93 Gebäude in Deutschland, Österreich und der Schweiz be-
sichtigt. Eine erste Wiederholung erfolgte 1983 an 87 Gebäuden. Ab 1989 wurden neben Wärmedämm-Verbundsystemen mit dem Dämmstoff EPS auch Objekte mit mineralischen Dämmstoffen bewertet. Weitere Kontrolluntersuchungen erfolgten in den Jahren 1995, 2004 und 2014. 2022 erfolgte eine Erweiterung des WDVS-Spektrums um Dämmplatten auf der Basis von Holzfasern (HFD)- und Polyurethan (PUR/PIR). Die Anbringung dieser WDVS lag zu diesem Zeitpunkt bereits 23 bis 44 Jahre zurück.

Die meisten der untersuchten Systeme sind seit ca. 20 Jahren nicht überarbeitet worden. Nur vereinzelt traten optische Beeinträchtigungen in Form von Rissen

und Blasenbildungen auf. Bei der letzten Begutachtung von 11 mehrgeschossigen Wohngebäuden war das älteste WDVS 53 Jahre alt. Es zeigte sich:

- die meisten Fassaden waren technisch schadensfrei,
- eine deutliche Vergrauung der Fassaden (v. a. bei Ausrichtung nach Norden und Westen) war sichtbar,
- Dämmstoff-Befestigungsdübel bzw. einzelne Plattenstöße können sich sowohl in der Fläche und an Gebäudeecken abzeichnen,
- teilweise war eine Verwitterung bzw. Abwitterung der Anstriche feststellbar,
- an keinem der begutachteten Gebäude war übermäßig starker Algenaufwuchs zu erkennen (Ausnahme: Busch- und Baumbestand in unmittelbarer Gebäudenähe).

Objekte mit WDVS-Aufdopplung zeigten zum Zeitpunkt der Begutachtung keine Beeinträchtigungen. Allerdings wiesen Fassaden mit Aufdopplung von WDVS wie bereits 2014 dokumentiert in Bodennähe eine höhere Neigung zum Aufwuchs mit Algen auf. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass der Wartungsaufwand von WDVS aufgrund von Mängeln sehr gering ist. Bei Verwendung der richtigen Materialkombinationen und gelegentlicher Überarbeitung (neuer Anstrich) sind WDVS dauerhaft mangelfrei [Lengsfeld 2015; Lengsfeld 2023].

[Heller 2022] führt noch Erkenntnisse aus einer österreichischen Studie [Eibenstein 2016] auf: Nichtwohngebäude erreichen demnach „eine mittlere Dämmungsnutzung von 37 Jahren, gewerbliche Wohngebäude von 43 Jahren und private Wohngebäude von 51 Jahren“.

Dies passt zu Daten des Marktforschungsinstituts Conversio [Lindner 2020] (s. auch [Heller 2022]): für gewerbliche Immobilien wird hier von einer WDVS-Lebensdauer von 40 – 50 Jahren ausgegangen, bei Wohngebäuden von 70 – 80 Jahren.

Für das entferntere europäische Ausland stehen vor allem für Portugal, Estland und Norwegen Studien zur Verfügung. Für die unterschiedlichen Studien wurden voneinander abweichende Schadensbilder bzw. „Schadenskategorien“ oder Bewertungsmaßstäbe definiert, auch die Zielstellungen waren unterschiedlich und variierten von bloßen Datenerhebungen bis hin zur Entwicklung von Prognosetools bis hin zu Wartungsstrategien. Eine Zusammenstellung findet sich in Tabelle 6 (hier sind auch einige Quellen dargestellt, die reine Zahlenwerte liefern und im Text daher nicht erwähnt werden).

Für Portugal, wo WDVS erst seit den 1990er Jahren eingesetzt werden, prognostizieren Silva et al. Eine Lebensdauer von ungewarteten WDVS von 24 bis

28 Jahren [Silva 2009]. [Amaro 2013] entwickelte ein System zur Zustandserhebung und untersuchte damit 146 Fassaden. Dabei wurde festgestellt, dass Schäden unterschiedlicher Art v. a. im Zeitraum von 10 bis 20 Jahren nach Anbringen der WDVS auftreten können. 170 bis zu 23 Jahre alte Fassaden wurden von Ximenes et al. untersucht [Ximenes 2015]. Farbliche Veränderungen durch ablaufendes Wasser oder Aufwuchs durch Mikroorganismen wurden bei 98 % aller Fassaden festgestellt, Defekte beim „Verbund“ jedoch nur in 6 % aller Fälle. Feuchte wurde als der Faktor mit dem größten Einfluss auf die Dauerhaftigkeit von WDVS identifiziert. Berechnungen ermittelten eine mittlere Dauerhaftigkeit („reference service life“) von 17 Jahren. Als Konsequenz empfehlen die Autoren Begutachtungen 10 Jahre nach der Errichtung eines WDVS zur Feststellung eventueller Mängel und entsprechender Planung von Wartungsmaßnahmen. Marques et al. beziehen sich in ihrer Arbeit auf 274 Objekte in Portugal [Marques 2018] und entwickelten darauf basierend eine Methode zur Vorhersage der Lebenszeit von WDVS. Verschiedene Faktoren (z. B. Art des WDVS, Farbe, Standort, Ausrichtung der Fassade, ...) werden mit einbezogen und gewichtet. Durch Anwendung dieser Methode ergab sich eine mittlere Dauerhaftigkeit von WDVS von 21 Jahren. Allerdings war keines der betrachteten Objekte älter als 31 Jahre. Auch Tavares et al. [Tavares 2020] untersuchten in ihrer Studie den Einsatz von zwei Berechnungsmethoden beruhend auf künstlichen neuronalen Netzen und Fuzzy-Logik-Systemen zur Vorhersage der Lebensdauer von Wärmedämm-Verbundsystemen. Beruhend auf einer Stichprobe von 378 Objekten wurde mit den verwendeten Modellen eine durchschnittliche Lebensdauer von 21 Jahren für WDVS in Portugal ermittelt. Ferreira et al. analysierten anhand der gleichen Stichprobe den Einfluss von verschiedenen Wartungsstrategien auf die Dauerhaftigkeit von WDVS [Ferreira 2021]. Dabei zeigte sich, dass je nach Rahmenbedingungen eine regelmäßige Wartung die Lebenszeit eines WDVS um Zeiträume von 15 bis 27 Jahren verlängern kann. Somit kann durch Wartung die Lebensdauer von WDVS auf 36 bis 48 Jahre verlängert werden.

Bemerkenswert sind Erkenntnisse aus Estland. Hier untersuchten Sulakatko et al. 51 Objekte mit WDVS und fanden insgesamt 886 (unterschiedliche) Defekte. 64 % dieser Defekte konnten dabei auf die Herstellung bzw. Errichtung der WDVS zurückgeführt werden [Sulakatko 2015]. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen Liisma et al. Bei der Analyse von 30 Objekten in Tallinn, erbaut zwischen 1950 und 1990, mit WDVS, die erst nach 2009 angebracht wurden [Liisma 2016]. Als Ursachen für die gefundenen Defekte (v. a. Risse und Verfärbungen) wurden im wesentlichen Feuchte, Kälte, aber auch fehlerhafte Applikation (z. B. Aufbringen der Schlussbeschichtung bei Temperaturen unter 5 °C) identifiziert.

Für Norwegen liegen Erkenntnisse aus Bewitterungsexperimenten in Labor und Freiland vor [Kvande 2018]. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass WDVS „befriedigend“ funktionieren, sofern sie gut geplant und sorgsam errichtet wurden, attestieren aber gleichzeitig eine große Schadensanfälligkeit, wenn Fehler bei Planung und Applikation gemacht werden. Zudem stellen sie, v. a. wenn bereits Defekte vorliegen, eine große Anfälligkeit zu Durchfeuchtung in

feuchten Klimazonen mit heftigen Schlagregenereignissen fest und raten als Konsequenz in solchen Gebieten von der Verwendung von WDVS ab.

Die von der britischen Regierung gegründete Zulassungsstelle für die Bauindustrie British Board of Agrément (BBA) stellt seit 1966 Zertifikate für diverse Produktbereiche wie z. B. Dämmsysteme aus. Für WDVS unterschiedlicher Anbieter gibt die BBA eine Dauerhaftigkeit von mindestens 30 Jahren an. Bei Einhaltung eines entsprechenden Inspektions- und Wartungsplans kann die Dauerhaftigkeit von WDVS auf 60 Jahre verlängert werden [BBA 2023].

Tabelle 6:
Zusammenstellung von Quellen mit Angaben zur Dauerhaftigkeit von WDVS.

Quelle	Land	Dauerhaftigkeit / „Service Life“	Bemerkung
[ETAG 004 2013]	--	> 25 Jahre	Bei regelmäßiger Wartung
[Lengsfeld 2023]	Deutschland	> 50 Jahre	Auch bei Wartungsintervallen > 20 Jahre nur vereinzelt technische Mängel
[Künzel 2006]	Deutschland	> 20 Jahre	Wartungsempfehlung nach 20 Jahren
[Lindner 2020]	Europa	40 – 50 Jahre bei gewerblichen Immobilien 70 – 80 Jahre bei Wohngebäuden	--
[Eibensteiner 2016]	Österreich	Ø 37 Jahre bei Nichtwohngebäuden Ø 43 Jahre bei gewerblichen Wohngebäuden Ø 51 Jahre bei privaten Wohngebäuden	--
[CSTB 1981]	Frankreich	≥ 30 Jahre	--
[Silva 2009]	Portugal	24 bis 28 Jahre	Ohne Wartung
[Ximenes 2015]	Portugal	17 Jahre	Rechnerisch ermittelt. Wartung nach 10 Jahren empfohlen.
[Marques 2018]	Portugal	21 Jahre	Rechnerisch ermittelt
[Tavares 2020]	Portugal	21 Jahre	Rechnerisch ermittelt
[Ferreira 2021]	Portugal	Keine Aussage zur „Grunddauerhaftigkeit“, aber Verlängerung der Dauerhaftigkeit um bis zu 15 bis 27 Jahre, wenn „umstandsbaasierte“ Wartung erfolgt	--
[Amaro 2013]	Portugal	Keine Aussage zur „Grunddauerhaftigkeit“	Schäden innerhalb von 10 bis 20 Jahren
[Sulakatko 2015]	Estland	Keine Aussage zur „Grunddauerhaftigkeit“	Ursache für Schäden v. a. klimatische Bedingungen

Quelle	Land	Dauerhaftigkeit / „Service Life“	Bemerkung
			und mangelhafte Ausführung
[Liisma 2016]	Estland	Keine Aussage zur „Grunddauerhaftigkeit“	Schäden innerhalb der ersten 6 Jahre, Ursache v. a. klimatische Bedingungen und mangelhafte Ausführung
[Kvande 2018]	Norwegen	Keine Aussage zur „Grunddauerhaftigkeit“	Ursache für Schäden v. a. mangelhafte Planung und Ausführung. Deswegen keine Eignung für Gegenden mit starker Schlagregenbelastung.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei der Beurteilung der Dauerhaftigkeit grundsätzlich unterschieden werden muss, ob bzw. inwiefern rein optische Defekte oder v. a. Beeinträchtigungen der technischen Leistungsfähigkeit in die Bewertung einfließen. Eine gründliche Planung und einwandfreie technische Ausführung vorausgesetzt, sind demnach vor allem in gemäßigten Klimazonen lange Standzeiten > 50 Jahren erreichbar.

3.6 Bau- und Abbruchabfälle

Das Abfallaufkommen der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 2011 bis 2020 lag zwischen 380 und 417 Mio. t. Das Aufkommen an Bau- und Abbruchabfällen im Bausektor lag in dem genannten Zeitraum zwischen 199 und 231 Mio. t [Destatis 2022c]. Im Jahr 2020 lag das Abfallaufkommen bei 414 Mio. t (siehe Bild 17). Das heißt, das sind die maximalen Mengen an Abfällen, die in Deutschland als sekundäre Rohstoffe wieder verwertet werden können.

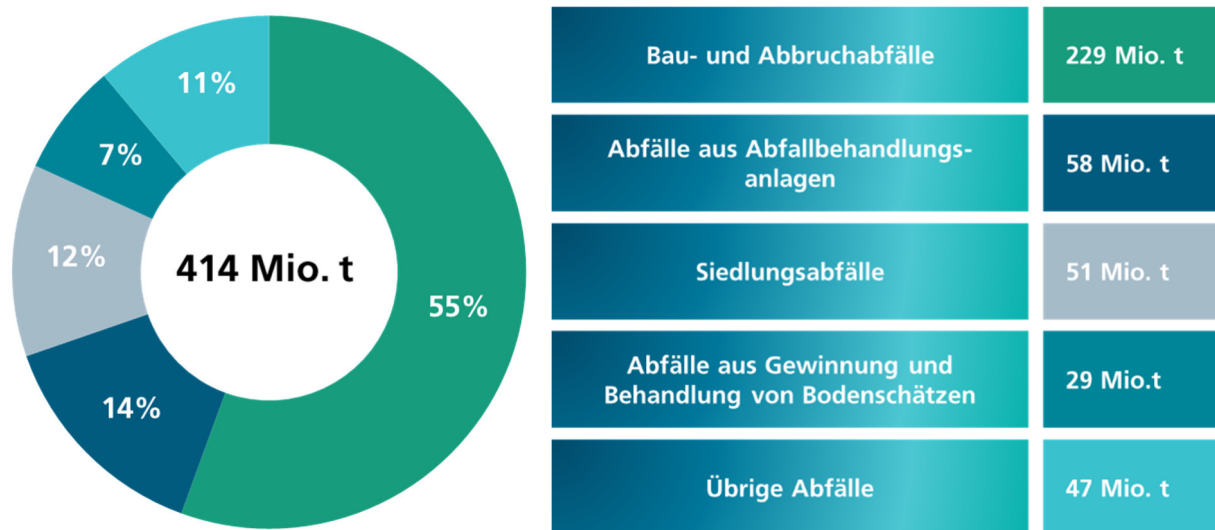


Bild 17:
Abfallaufkommen in Deutschland 2020 nach [Destatis 2022c].

Nach Angaben des Statistischen Bundesamts [Destatis 2022c] lag das Abfallaufkommen an Bau- und Abbruchabfällen im Jahr 2020 bei 229 Millionen Tonnen. In der Abfallbilanz finden sich gesonderte Angaben zum Abfallaufkommen an Boden, Steinen und Baggergut, Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik, sowie Bitumengemischen, Kohlenteer und teerhaltigen Produkten. Angaben zum Abfallaufkommen von Dämmstoffen werden an dieser Stelle nicht erhoben. Die Aufteilung des Abfallaufkommens auf die einzelnen Fraktionen ist in Bild 18 dargestellt.

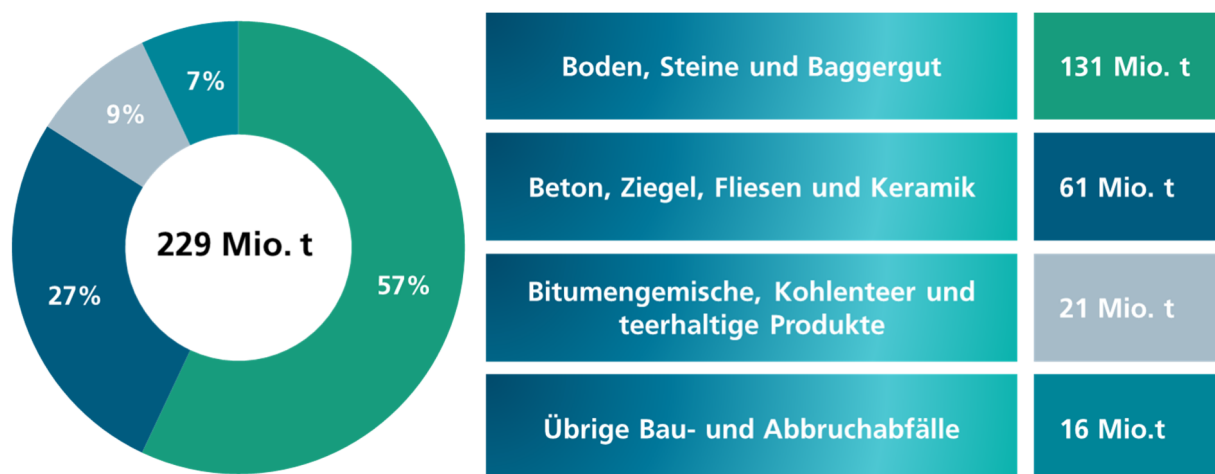


Bild 18:
Abfallaufkommen an Bau- und Abbruchabfällen im Jahr 2020 nach [Destatis 2022c].

Im Jahr 2021 wurden laut Statistischem Bundesamt [Destatis 2023a] 11.600 t Dämmmaterialien mit der EAV 170604 (Dämmmaterial mit Ausnahme desjenigen, das unter 170601* und 170603* fällt) und 190.900 t Dämmmaterialien

mit der EAV 170603* (anderes Dämmmaterial, das aus gefährlichen Stoffen besteht oder solche Stoffe enthält) entsorgt. Eine explizite Aufschlüsselung nach den einzelnen Dämmmaterialien wie z. B. Steinwolle, EPS, HWF oder PUR erfolgt jedoch nicht.

Die Deutsche Umwelthilfe e.V. geht in ihrer Studie von 200.000 t Dämmstoffabfällen, die in Deutschland jährlich insgesamt anfallen. Darunter entfielen 2020 ca. 49.000 t auf HBCD haltige EPS- und XPS-Abfälle aus dem Abbruch. Bis 2050 werden ca. 100.000 t HBCD haltige EPS- und XPS-Abfälle prognostiziert. [DUH 2021]. Die Studie des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik [Albrecht 2015] erwartet WDVS-Rückbaumengen von 50.000 t EPS pro Jahr bis 2050. Die Prognosen von Heller [Heller 2022] gehen von einem Abfallaufkommen an WDVS mit EPS bei einer mittleren Rückbaurrate von 88.000 t im Jahr 2020 und einem Anstieg auf 155.000 t im Jahr 2030. Der EPS-Dämmstoffanteil am Abfallaufkommen liegt bei dieser Prognose bei 8 % bis 12 %.

In der aktuellen für den Industrieverband Hartschaum e.V. erstellten Studie [Lindner 2023] wird das Abfallaufkommen im Baubereich mit bis 105.000 t EPS bis 2050 prognostiziert. Ausgehend von der Aufteilung der Herstellungsmengen von EPS auf die Anwendungsbereiche Flachdachdämmung zu 40 % und Wärmedämm-Verbundsysteme zu 30 % ist mit rückgebauten Mengen an WDVS von ca. 30.000 t bis 2050 zu rechnen.

Putze, Mauermörtel und Estrichmörtel ohne Schadstoffe fallen gemeinsam mit Mauerwerk unter die EAV 17 01 07 Gemische aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 01 06* fallen. Unter die EAV 17 01 06* werden Gemische aus oder getrennte Fraktionen von Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik, die gefährliche Stoffe enthalten gesammelt hierzu gehören auch Putze, Mauermörtel und Estrichmörtel mit Verunreinigungen zum Beispiel durch Farbanstriche, Klebstoffreste etc. Asbest-haltige Putze, Mauermörtel und Estrichmörtel der EAV 17 06 05* Asbest-haltige Baustoffe zugeordnet.

Von den angefallenen 13,8 Mio. t Baustellenabfällen wurden 0,2 Mio. t (1,6 %) recycelt und 13,4 Mio. t (97,0 %) einer sonstigen Verwertung zugeführt. Lediglich 0,2 Mio. t (1,4 %) wurden auf Deponien beseitigt [Frederichs 2023].

Die angefallenen Baustellenabfälle bestanden zu rund 50 % (6,9 Mio. t) aus Eisen und Stahl, zu rund 20 % (2,8 Mio. t) aus Altholz und zu rund 5 % (0,7 Mio. t) aus Glas, Kunststoff, Metall und Dämmstoffen. Mineralische Bestandteile wie Putze, Mauermörtel und Estrichmörtel sind insbesondere in den gemischten Bau- und Abbruchabfällen enthalten, die etwa 25 % (3,5 Mio. t) der Baustellenabfälle ausmachen [Frederichs 2023].

3.7 Sekundärrohstoffe

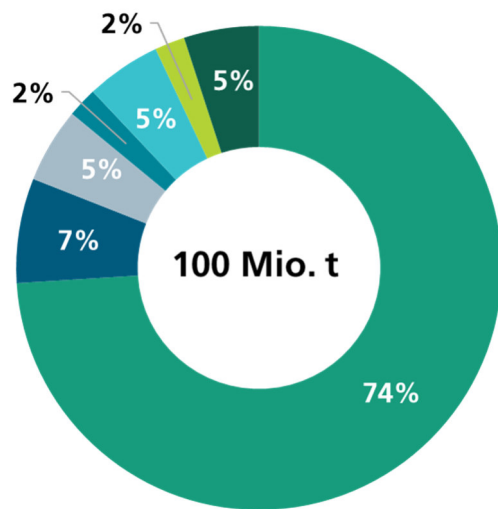
Nach den Angaben aus der Deloitte-Studie betragen in Deutschland die Einsatzquoten von Sekundärrohstoffen bezogen auf den Bausektor aktuell ca. 13 %. Bis 2030 werden Quoten von über 35 % erwartet, unter der Voraussetzung, dass das Rohstoffaufkommen generell sinkt [Deloitte 2021].

Die ungebundene Tragschicht im Straßenbau ist der wichtigste Einsatzgebiet für RC-Baustoffe. 2020 wurden 38,7 Mio. t an Recycling-Baustoffen im Straßenbau und 17,7 Mio. t im Erdbau eingesetzt. Von den rezyklierten Baustoffen fanden nur 15 Mio. t eine hochwertige Verwendung als Gesteinskörnung in der Asphalt- und Betonherstellung [Frederichs 2023]. Der Bedarf an Gesteinskörnungen lag 2020 bei 584,6 Mio. t. Nur 13,2 % des Gesamtbedarfs (76,9 Mio. t) wurden durch Recycling-Baustoffe gedeckt. Der Anteil der hochwertigen Verwendung als Gesteinskörnung in der Asphalt- und Betonherstellung lag somit bei 2,5 %. Die Einsatzfähigkeit von Recycling-Baustoffen wird maßgeblich durch die Umweltverträglichkeit bestimmt.

Nach [Frederichs 2023] werden als Recycling-Baustoffe Gesteinskörnungen bezeichnet, die durch Aufbereitung mineralischer Bauabfälle hergestellt werden. Im Jahr 2020 betrug der Anfall mineralischer Abfälle der Fraktionen Bauschutt und Straßenaufbruch insgesamt 76,9 Mio. t. Daraus wurden 63,0 Mio. t Recycling-Baustoffe hergestellt. Unter Berücksichtigung der rezyklierten Gesteinskörnungen, die bei der Aufbereitung der Fraktion Boden und Steine (13,7 Mio. t) und der Aufbereitung der Fraktion Baustellenabfälle (0,2 Mio. t) angefallen sind, wurden im Jahr 2020 insgesamt 76,9 Mio. t Recycling-Baustoffe hergestellt. Damit deckten die Recycling-Baustoffe einen Anteil von 13,2 % des Bedarfs an Gesteinskörnungen.

Im Jahr 2020 wurden insgesamt 584,6 Mio. t Gesteinskörnungen produziert. Neben den Recycling-Baustoffen wurden 262,0 Mio. t (44,8 %) Kiese und Sande, 223,0 Mio. t (38,1 %) Natursteine und 22,7 Mio. t (3,9 %) industrielle Nebenprodukte (z. B. Aschen und Schlacken) hergestellt.

Nach den Angaben aus der Studie des Bundesverbands Baustoffe – Steine und Erden e.V. [Stoll 2022] betrug das Gesamtaufkommen im Jahr 2019 an Sekundärrohstoffen in Deutschland 100 Mio.t. Davon entfielen 74 Mio. t auf RC-Baustoffe, 12 Mio. t auf Schlacken, 7 Mio. t auf Aschen, 5 Mio. t. auf REA-Rips und 2 Mio.t. auf Gießerei-Altsande. In Bild 19 ist das Aufkommen der Sekundärrohstoffe nach den einzelnen Fraktionen graphisch dargestellt. In Tabelle 7 sind die Verwendungen für Sekundärrohstoffe den einzelnen Fraktionen gegenübergestellt.



RC-Baustoffe	74 Mio. t
Hochofenschlacken	7 Mio. t
Stahlwerksschlacken	5 Mio. t
Steinkohlenflugaschen	2 Mio. t
sonstige Aschen (HMVA)	5 Mio. t
Gießerei-Altsande	2 Mio. t
REA-Gips	5 Mio. t

Bild 19:
Aufkommen an Sekundärrohstoffen im Jahr 2019 nach [Stoll 2022].

Tabelle 7:
Aufkommen an Sekundärrohstoffen im Jahr 2019 und ihre Verwendung nach [Stoll 2022].

Verwendung für Sekundärrohstoffe	Sekundärrohstoffe						
	RC-Baustoffe	REA-Gips	Hochofenschlacke	Stahlwerks- schlacken	Steinkohlenflug- aschen	Sonstige Aschen (HMVA)	Gießerei-Altsande
	74 Mio. t	5 Mio. t	7 Mio. t	5 Mio. t	2 Mio. t	5 Mio. t	2 Mio. t
Tiefbau	58 Mio. t		0,4 Mio. t	3,1 Mio. t	0,1 Mio. t	1,8 Mio. t	1,0 Mio. t
Asphaltherstellung	15,5 Mio. t						
Sonstige Baubereiche						2,7 Mio. t	
Gipserzeugnisse für den Bau		3,6 Mio. t					
Ortbeton, Betonbauteile	0,5 Mio. t				1,7 Mio. t		
Zementherstellung		0,2 Mio. t	5,3 Mio. t		0,2 Mio. t		0,5 Mio. t
Landwirtschaft				0,6 Mio. t			
Eisen- und Stahlindustrie				0,8 Mio. t			
Übrige Sektoren		0,2 Mio. t				0,5 Mio. t	0,5 Mio. t
Export		1,0 Mio. t	1,3 Mio. t	0,5 Mio. t			

4 Aktuelle Ansätze zum nachhaltigkeitsorientierten Umgang mit Material und Produkt

Die Handlungsfelder wurden in Anlehnung an [Geissdoerfer 2020] und [Kadner 2021] definiert.

4.1 Handlungsfeld 1: Produkte neu denken

Nach dem Positionspapier der Kommission für nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt (KNBau) [Asam 2018] gehören zu den grundlegenden Prinzipien des ressourcenschonenden Bauens:

- die Wahl von recyclingfähigen und verwertungsverträglichen Materialien,
- die Planung mit lösbaren Verbindungen,
- so wie die Planung von Verwertungsclustern und modularen Bauwerkselementen, die schonend aus der Konstruktion gelöst und separat behandelt (ausgetauscht, repariert) werden können.

Eine wesentliche Rolle spielt hier die Planung. Das planerische Expertenwissen beginnt mit der Erstellung eines recyclinggerechten Neubauplanung, geht über in begleitende Planung des Wartungsbedarfs und der Zugänglichkeit bei Revision, Reparatur und Instandsetzung von Gebäudeteilen während der Nutzungsphase und endet mit der Abbruchplanung nach der Nutzungsphase [Asam 2018].

Allein die Gebäudeplanung und die daraus resultierenden Optimierung bei Wartung, Instandhaltung und Umbau von Gebäude führt bereits zu wirtschaftlichen und organisatorischen Vorteilen. Dadurch wird der erhöhte Aufwand während der Planungsphase kompensiert [Asam 2018].

Beim recyclinggerechten Konstruieren erfolgt die Planung mit hohen Anteilen und Qualitäten an Sekundärrohstoffen. Diese Anteile und Quoten sind auch für gut rezyklierbare Materialien wie z. B. Glas für hochwertige Verglasungssysteme aus z. B. ausgebautem Flachglas nicht erreichbar. In diesem Fall ist der Materialkreislauf hin zum ursprünglichen Produkt nicht geschlossen, wohl aber für Produkte mit geringeren Anforderungen an das Ausgangsmaterial wie Behälterglas, Profilglas, Blähglas oder Schaumglas [Asam 2018].

Durch die Verknappung bzw. Verteuerung von Primärrohstoffen stellen Altprodukte für die Hersteller eine interessante Rohstoffquelle dar. Liegen die Bestandteile in der benötigten Qualität vor, so ist die Rückführung in die Produktion möglich. Einige Hersteller von Bauprodukten wie Teppichböden, Gipskartonplatten oder Heizungspumpen praktizieren dies. Damit verbaute Stoffe nach dem Rückbau sortenrein einer Wiederverwendung oder Verwertung zugeführt werden können, bedarf es Maßnahmen zur Kennzeichnung und zur Dokumentation. Dies kann beispielsweise durch eine umfassende Baudokumentation auf

Grundlage von BIM-Ansätzen erfolgen. Unter der Annahme, dass die Dokumentation nicht durchgängig über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes gepflegt wird, sind Maßnahmen wie eine einfache Konstruktion mit bekannten Materialien und die Reduktion der Materialvielfalt entscheidend für den späteren Rückbau [Asam 2018]. Die Alternative sind aufwendige Stoff- und Materialanalysen.

Verbundmaterialien und integrierte Konstruktionen sind nur zu verwenden, wenn Technologien, Infrastrukturen und ggf. Rücknahmesysteme existieren, die die spätere Verwertung absichern [Asam 2018].

4.1.1 Ressourcenschonendes Konstruieren (Bauen): „Design for Sustainability“ (D4S)

Crul, Diehl et al. 2009 [Crul 2009] schlagen zwei Wege vor, um ein Produkt nach dem „D4S“ (Design for Sustainability) Prinzip neu zu denken und zu gestalten:

- a) Vorgehensweise „in-the-box“,
- b) Vorgehensweise „out-of-the-box“.

Bei Vorgehensweise a) erfolgt die nachhaltige Umgestaltung eines Produkts entlang der bestehenden Produktionskette. Bei der Vorgehensweise b) wird ein Produkt vollständig neu konzipiert und entwickelt. Bei beiden Konzepten ist wichtig, dass die nachhaltige Produktweiter- oder Produktneuentwicklung nach dem drei Säulenprinzip (Bild 20) unter der Einhaltung von sozialen, ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten erfolgt.



Bild 20:
Drei-Säulenprinzip nach [Crul 2009].

Zusätzlich wird als Vorgehensweise das Anbieten von Serviceleistung vorgeschlagen, die zur Verlängerung der Nutzungsdauer von einem Produkt beitragen. Dies können u. a. Inspektionsmaßnahmen und Reparaturen sein (s. auch „Servitization“: Änderung eines Angebotsportfolios weg von reinen Sachgütern hin zu einer Kombination von Sachgütern und Dienstleistungen, Kapitel 1.6.2).

4.1.2 Ressourcenschonendes Konstruieren (Rückbau): „Design for Disassembly“ (DfD)

Definitionsgemäß ist Design for Disassembly der Entwurf von Gebäuden, der künftige Änderungen und den Rückbau (ganz oder teilweise) zur Wiederverwertung von Systemen, Komponenten und Materialien erleichtert. Damit wird gewährleistet, dass das Gebäude/Gebäudeteile am Ende seiner Lebensdauer so effizient wie möglich recycelt werden kann [Digitalwerk 2022]. Als Basis für diese Methodik können u. a. die im Jahr 1993 zurückgezogene Norm VDI 2243 „Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte“ und die Guidelines der Manchester Metropolitan University herangezogen werden [Dowie 1994]. Obwohl hier das Hauptaugenmerk auf Produkten aus Kunststoffen lag, sind die Grundprinzipien der Wiederverwendung und Recyclings von Materialien während der Herstellung, der Nutzung und nach dem Lebensende eines Produkts auch auf den Bausektor übertragbar.

Für Städte und Kommunen ist die Rückbaubarkeit ein Kriterium bei der Planung von Gebäuden. Dies spiegelt sich in den Nachhaltigkeitszertifizierungen von LEED, BREEAM und DGNB wider, die bei der Berücksichtigung des Rückbaus im Gebäudeentwurf dafür Punkte vergeben.

Hindernisse für die DfD-Methode sind u. a. die fehlenden Normen und Regelungen für recycelte Materialien sowie die Qualität und Quantität der verwendeten Materialien.

Die Methode des Design for Disassembly wird momentan im Bereich der Verbundwerkstoffe wie z. B. WDVS noch nicht verfolgt. Diese Thematik ist hauptsächlich im Bereich von modularem Bauen auf der Ebene von strukturellen Komponenten wie Stahl, Holz, Beton, Bodenbelägen wie z. B. Teppichen, Parkett, Dacheindeckungen sowie Elementen wie Fenster, Türen, Stufen etc. angesiedelt [O’Grady 2021; O’Grady 2022]. Salama zeigt in seiner Arbeit am Beispiel von Betonbauteilen, dass die Planung, Entwicklung und Herstellung von rückbaubaren Komponenten untrennbar mit einer Vorfertigung Hand in Hand gehen. Der Rückbau von Fertigbauteilen wird jedoch durch die konventionelle Bauweise mit Ortbetonanschluss behindert [Salama 2017].

Mit Dämmstoffen, Putzen, Mauermörteln und Estrichmörteln bewegt man sich eher auf der Ebene von Materialien. Ein WDVS als eine modulare Komponente wurde bis jetzt noch nicht erprobt. Deutlich weiter ist diese modulare Vorgehensweise bei Aufbauten wie der hinterlüfteten und vorgehängten Fassade. Teile wie Fassadenplatten und die Unterkonstruktion können hier problemlos rückgebaut und wiederverwendet werden.

4.1.3 Modulares Bauen

Nach [Heusler 2019] haben Gebäude bis heute meist einen „Unikat-Charakter“, was sich auf den gesamten Lebenszyklus vom Entwurf bis zum Rückbau auswirkt. In der Planungsphase würden Computer und Software häufig nur als digitales Zeichenbrett genutzt, während in der Ausführung, bei Wartung, Instandhaltung und Rückbau dem Handwerk eine zentrale Rolle zugesprochen wird. Ursachen wären demnach häufig regional geprägte Märkte und eine auf individuelle Kundenbedürfnisse zugeschnittene, dezentrale Wertschöpfung.

Aktuelle und zukünftige Entwicklungen werden laut [Heusler 2019] von folgenden Aspekten geprägt:

- Modulare Strukturen sind bei allen Schritten von Planung bis Rückbau vorteilhaft. Dabei erfolgt eine Unterscheidung zwischen Funktions- und Montagemodulen.
- Eine Digitalisierung der Bauprozesse wird in einer geschlossenen digitalen Kette und auf Basis einer integrierten Datenplattform erfolgen. Zentral ist ein „Digitaler Zwilling“, der ab Inbetriebnahme aktuell gehalten wird über mit Sensoren erfasste Betriebs-, Zustands- und Prozessdaten. Entscheidungsfindungen bzw. Optimierungen werden künftig durch künstliche Intelligenz (KI) unterstützt, mit Einfluss auf gesamte Prozesskette inkl. Logistik.
- Darüber hinaus kommt es zu einer Digitalisierung der Fassade, also zu smarten Fassaden mit Sensoren, Aktoren, Mikrocontrollern und Kommunikationssystemen. Es resultieren vernetzte Systeme mit dezentraler Datenhaltung.

Mittelfristig bis ca. 2030 wäre demnach folgende Entwicklung zu erwarten:

- Größere Firmen übernehmen die Gesamtverantwortung vom Entwurf bis zum Rückbau. Der Fokus liegt auf dem langfristigen Gesamtoptimum, angeboten werden marktorientierte Produkt-Service-Pakete --> Top-Down-Ansatz mit Weiterentwicklung der bestehenden industriellen Wertschöpfung.
- Kleinere Firmen, einzelne Experten, Entwicklungspartner und Kunden agieren eher als Schwarmorganisationen mit Schwarmintelligenz, die einzelnen Wertschöpfungsschritte werden dezentralisiert. Es resultieren verstärkte Regionalisierung und Kundenorientierung verbunden mit höherer Flexibilität und Innovationskraft --> Bottom-Up-Ansatz mit Ausbildung postindustrieller Wertschöpfungskonstellationen [Heusler 2019].

4.1.4 Reversible Klebstoffe für Materialverbünde

Der ökonomische Vorteil von Wärmedämm-Verbundsystemen ist die kostengünstige Befestigungsart durch Kleben. Aus ökologischer Sicht sind alle Arten von Materialverbundwerkstoffen problematisch, da beim nicht angepassten Rückbau von Verbundwerkstoffen nicht nur das gewünschte adhäsive Versagen zwischen den einzelnen Materiallagen eintritt, sondern beim Großteil der verwendeten Materialien auch ein kohäsives Versagen in den einzelnen Materiallagen die Regel ist [Albrecht 2015]. Die Bruchstücke bestehen dann nicht wie gewünscht aus definierten einzelnen Materialfraktionen, sondern aus einem Materialgemisch. Im „worst case“ ist dies ein Gemisch aus anorganischen und organischen Bestandteilen. Die anschließende Auftrennung ist aufwendig oder gar unmöglich. Was dazu führt, dass oft solche Mischfraktionen verbrannt werden.

Ein Ansatz bei WDVS besteht in der Entwicklung von reversiblen Verklebungen. Durch einen externen Impuls kann die Adhäsion zwischen den einzelnen Materiallagen so geschwächt werden, dass eine spontane Ablösung eintritt. Erste Untersuchung mit reversiblen Haftmaterialien befassten sich mit der Schwächung der Adhäsion zwischen Mauerwerk und Dämmstoff. Auch in anderen Bereichen werden Prozesse und physikalische Prinzipien untersucht, die reversible Verklebungen ermöglichen.

Im Projekt „WDVS-Deaktiv“ entwickelten Mitarbeiter des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie (ICT) [Sims 2019] einen Klebstoff auf der Basis von ionischen Flüssigkeiten für WDVS. Die Enthftung des WDVS vom Mauerwerk wurde durch Mikrowellen induziert. Nächster avisierte Schritt der Entwickler ist die Übertragung des Funktionsprinzips auf mineralische Klebstoffe.

Verbundwerkstoffe bestehen aus organischen, anorganischen und metallischen Komponenten. Ermöglicht werden die komplexen Strukturen durch die Verwendung von Klebstoffen. Das Lösen der Verbindungen zwischen den einzelnen Materiallagen ist zeitaufwändig, oft ineffizient und erfordert den Einsatz von Lösungsmitteln, Pyrolyse oder Zerkleinerung. Dies stellt die Demontage und das Recycling von Verbundwerkstoffen vor beträchtliche Herausforderungen.

Mulcahy et al. 2022 [Mulcahy 2022] präsentieren in ihrer Publikation eine Vielzahl von neuartigen Methoden und Techniken, um die Klebeverbindung zwischen Materiallagen aktiv zu lösen. Durch folgende Behandlung wurden die Klebeverbindungen wieder gelöst:

- induziert durch Lichtstrahlung,
- thermisch induziert,
- magnetisch induziert,
- elektrisch induziert,

- Ultraschall induziert,
- chemisch induziert,
- reversible Adhäsion.

Diese Publikation zeigt, dass eine Nachfrage nach solchen Systemen existiert und speziell in hochpreisigen Segmenten wie Batterietechnologie, Solartechnologie, Automobil bereits kommerzielle Produkte erhältlich sind. Momentan konzentrieren sich die Entwicklungen auf Systeme mit licht- oder thermisch induzierten Enthaftung. Für den Bausektor lassen sich daraus noch keine Lösungen ableiten.

Die Recherche nach Untersuchungen zum Einsatz von Mischfraktionen bestehend aus organischen Binder und anorganischen Zuschlag als Sekundärrohstoff oder Tertiärrohstoff lieferte keine Treffer. Ein mögliches Einsatzfeld für solche Hybrid-Fraktionen können neben organisch modifizierten Bindemitteln auch Polymerbetone sein, wie sie zum Beispiel für die Herstellung von Maschinenteilen, Sportartikeln oder Bauprodukten und Ersatz für Sandsteinskulpturen im Sakralbau Verwendung finden.

4.2 Handlungsfeld 2: Wiederverwendung

Eine Abgrenzung zwischen den Begriffen Wiederverwendung und Vorbereitung zur Wiederverwendung findet in vielen Publikationen nicht statt. Häufig werden beide Begriffe synonym verwendet, obwohl beide Begriffe durch das KrWG definiert werden.

Wiederverwendung im Sinne des KrWG [KrWG 2023] „ist jedes Verfahren, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile, die **keine Abfälle** sind, wieder für denselben Zweck verwendet werden, für den sie ursprünglich bestimmt waren.“

Vorbereitung zur Wiederverwendung im Sinne des KrWG [KrWG 2023] „ist jedes Verwertungsverfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur, bei den Erzeugnissen oder Bestandteilen von Erzeugnissen, 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.“

Wiederverwendet nach KrWG werden somit Putze, Mauermörtel, Estrichmörtel, Dämmstoffe sowie Wärmedämm-Verbundsysteme im Bestand. Bei rückgebauten oder demontierten Putzen, Mauermörteln, Estrichmörteln, Dämmstoffen sowie Wärmedämm-Verbundsystemen erfolgt eine Vorbereitung zur Wiederverwendung.

Teilbereiche der Wiederverwendung bzw. der Vorbereitung zur Wiederverwendung sind u. a.:

- das Versetzen von Gegenständen, Produkten und Systemen in ihren ursprünglichen Zustand,
- eine qualitative Aufarbeitung und Aufrüstung von Gegenständen,
- sowie die Modernisierung und der Ausbau.

Die Reparatur, Instandsetzung, Aufarbeitung, Modernisierung und Aufrüstung der genannten Systeme im Bestand werden in der Branche praktiziert. In Broschüren der Hersteller finden sich diverse Lösungen (siehe Kapitel 4.3 zum „Handlungsfeld 3: Reparatur“). Durch die genannten Maßnahmen wird die Nutzungsphase von Produkten verlängert.

In der Normungsroadmap Circular Economy [DIN, DKE, VDI 2023] wird ein System vorgeschlagen, um die realistische Nutzungserwartung von Produkten in Form von Nutzungszyklen oder eines Nutzungszeitraums zu erfassen. Ziel ist ein Konformitätsbewertungssystem, inklusive einer Zertifizierung, das den Zustand der Kernfunktionalität von gebrauchten Produkten nach der Reparatur, Renovierung, Sanierung oder Überarbeitung an potenzielle Wiederverwender kommuniziert, um somit für die notwendige Transparenz und das Vertrauen bzgl. Funktionalität und Qualität von wiederverwendeten Produkten steigert.

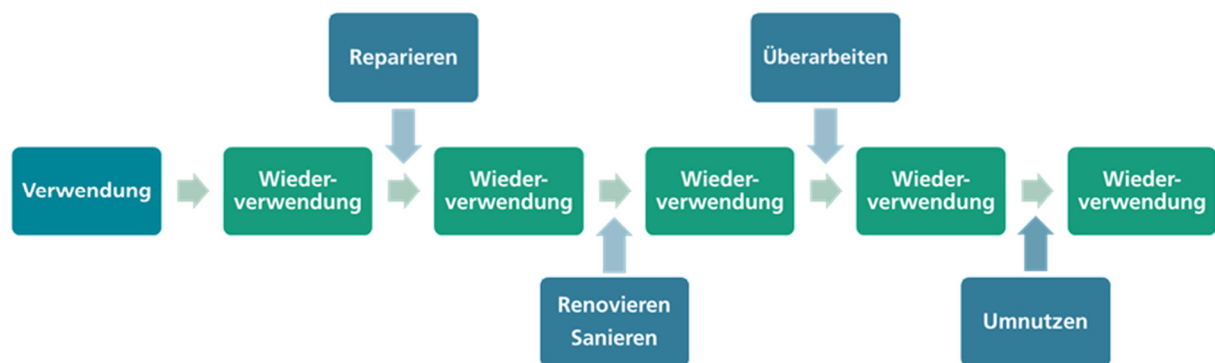


Bild 21:

Maßnahmen, die die Lebenszeit eines Produkts verlängern nach [DIN, DKE, VDI 2023].

Grundlage für eine Konformitätsbewertung von Wärmedämm-Verbundsystemen liefern z. B. Reihenuntersuchungen des Fraunhofer Instituts für Bauphysik [Lengsfeld 2023] für den VDPM e.V. Daraus ergibt sich ein Maßnahmenkatalog für die Wiederverwendung von z. B. WDVS (Bild 22).



Bild 22:
Vorschlag zum Übertrag der Maßnahmen zur Wiederverwendung von WDVS.

Eine weitere Maßnahme der Wiederverwendung ist das **Aufdoppeln**.

Aufdoppeln bedeutet, dass ein neues WDVS auf ein altes aufgebracht wird. Der Untergrund muss dafür ausreichend tragfähig sein, da das Eigengewicht des WDVS und die Windlasten auf das bestehende System übertragen werden.

Mit der Aufdoppelung alter WDVS setzen sich intensiv Clausnitzer et al. auseinander [Clausnitzer 2017]. Demnach gelten folgende Randbedingungen für Aufdoppelungen: „Wenn der Wärmeschutz des Alt-WDVS nicht zukunftsfähig ist, sollte das Alt-WDVS aufgedoppelt werden. Als nicht zukunftsfähig sind Alt-WDVS anzusehen, deren Dämmschichtdicke bei einer Wärmeleitfähigkeit von $0,40 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ weniger als 10 cm oder bei denen der Wärmedurchgangskoeffizient der Außenwand mehr als $0,35 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ beträgt. Solche Alt-WDVS sollten so aufgedoppelt werden, dass U-Werte von höchstens $0,20 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ erreicht werden. Ist vorher ein Alt-WDVS mit einer Dämmschichtdicke von 6 cm auf üblichem Mauerwerk vorhanden, so wird diese U-Wert-Anforderung bei einer Aufdoppelung mit einer 10-cm-Dämmschicht bei einer Wärmeleitfähigkeit von $0,035 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ erreicht. Gute Zeitpunkte für die Aufdoppelung sind die, bei denen ohnehin etwas an der Fassade verändert werden muss oder soll, sei es eine Putzausbesserung, eine neue Gestaltung oder ein neuer Anstrich.“ Die Vorgaben der bauaufsichtlichen Zulassungen (z. B. Brandschutz) müssen dabei eingehalten werden. Als Gründe für eine Aufdoppelung wurden im Rahmen einer in der Studie durchgeführten Umfrage vor allem die „Verbesserung des Wärmeschutzes“ angegeben, gefolgt von der „Sanierung des Altsystems“ und der „Verbesserung der Gestaltung“.

Es wird geschätzt, dass in Deutschland ca. 417 Mio. m^2 an Wandfläche aufgedoppelt werden müssten, um zukunftsfähig zu bleiben und einen Beitrag zur Erfüllung der Klimaschutzziele zu leisten. Bei Umsetzung würde bis 2030 eine Energieeinsparung von 9,2 TWh pro Jahr verglichen mit 2015 zu erreichen sein. Als Lebensdauer eines WDVS werden 40 Jahre angenommen [Clausnitzer 2017].

4.3 Handlungsfeld 3: Reparatur

Seit Jahrzehnten wird die Reparatur in vielen Branchen nur ein geringer Stellenwert beigemessen. Dabei ist das Wiederherstellen oder Instandsetzen eines Produkts die naheliegende Entscheidung gegen das Wegwerfen und somit für die Reduzierung des Abfallaufkommens und für einen sinnvollen Umgang mit den knapp werdenden Ressourcen. Erst durch die politisch gesetzten Rahmenbedingungen wurde es den Unternehmen ermöglicht, den ökologischen Umgang mit Ressourcen dem ökonomischen Wachstum unterzuordnen. Die Folge ist das Wegwerfen, weil:

- eine mögliche Reparatur den Preis eines neuen Produkts übersteigt,
- die Ersatzteile nicht verfügbar oder teuer sind,
- oder das Produkt aufgrund der Bauweise nicht repariert werden kann.

Bereits 2013 forderte der Generaldirektor des Deutschen Museums in München Prof. Wolfgang M. Heckel eine „Kultur der Reparatur“ [Heckel 2013]. 2019 wurde durch Förderung des Umweltbundesamtes der Runde Tisch Reparatur (RTR) gegründet, um die Reparatur als Alternative zum Neukauf und zum Wegwerfen bei Politik und Unternehmen wieder attraktiv zu machen. Erklärtes Ziel ist neben der Sensibilisierung von Öffentlichkeit und Politik die Verbesserung der Rahmenbedingungen für Reparatur in Deutschland mit Stärkung und Vernetzung der Akteure [UBA 2019].

Im Baubereich sind Reparatur und Instandsetzung eigene Teilbereiche.

Für die Renovierung und Reparatur von WDVS werden von den Systemherstellern unterschiedliche Produkte für diverse Fragestellungen angeboten (z. B. [CAPAROL 2011; Henkel 2016]). Im Folgenden ist eine Auswahl an Mängeln und Fehlern der Gebäudehülle zusammengestellt, für die von Herstellern Lösungen angeboten werden:

- Entfernung von Verschmutzungen an der Fassade (Entfernung von Staub und Schmutz),
- Reparatur von Haarrissen in der Fassade,
- Beseitigung von biologischen Verschmutzungen durch Algen, Pilze und Moose,
- Reparatur von Fugen und Rissen in der Putzschicht,
- Reparatur von Fugen und Rissen durch die Bewehrung,
- Reparatur von Delaminationen der Dekorschicht,

- Beseitigung von Delaminationen des Oberputzes,
- Reparatur von mechanischen Beschädigungen,
- Reparatur von durch Tiere verursachten Schäden, wie z. B. Nestbau von Spechten,
- Reparatur von Schäden und Delaminationen in den Verbindungen zwischen WDVS und ergänzenden Elementen (z. B. Fensterbänken),
- Beseitigung von sichtbaren Abdrücken von Dämmplatten und Dübeln.

Das wachsende Bewusstsein für Nachhaltigkeit und der Wunsch, den Energieverbrauch im Bausektor zu senken, haben in den letzten Jahrzehnten zu einer verstärkten Anwendung von Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS) in Deutschland und Europa geführt. Dennoch wird die Umsetzung geeigneter Instandhaltungsstrategien immer noch vernachlässigt. Ferreira, Silva et al. [Ferreira 2021] haben in ihrer Studie drei Instandhaltungsstrategien analysiert. Die Instandhaltungsstrategien waren:

- vollständiger Austausch,
- Kombination aus geringfügigen Eingriffen und vollständigem Austausch,
- Kombination aus Reinigungsarbeiten, geringfügigen Eingriffen und vollständigem Austausch.

Insgesamt wurden 378 WDVS auf der Grundlage von visuellen Vor-Ort-Inspektionen in Portugal analysiert. Die Ergebnisse zeigten, dass die Instandhaltung eine maßgebliche Rolle bei der Lebensdauer von WDVS spielt und somit ihre Nachhaltigkeit erhöht. Eine regelmäßige Wartung verlängert die Lebensdauer von WDVS um 15 bis 27 Jahre (s. auch Kapitel 3.1).

Das Fraunhofer Institut für Bauphysik begutachtet in regelmäßigen Abständen 12 Wohngebäude mit unterschiedlichen WDVS in Geislingen, München Neumarkt und Nürnberg. Das älteste WDVS ist aus dem Jahr 1969. Es sind Systeme dabei, die seit 29 Jahren keinen Renovierungsanstrich erhielten, aber dennoch keine technischen Mängel in Form von Rissen, Blasenbildungen oder Putzablösungen zeigen. Wie herkömmlich verputzte Fassaden neigt auch WDVS zur Vergrauung durch Verschmutzung. Die Autoren [Lengsfeld 2015; Lengsfeld 2023] stellten eine Verwitterung der Anstriche fest. Zusätzlich traten bei der WDVS-Abzeichnung der Dämmstoffdübel bzw. einzelner Plattenstöße in der Fläche auf. Im Gegensatz zu ungedämmten Hauswänden war eine höhere Neigung zu mikrobiellem Bewuchs sichtbar (s. auch Kapitel 3.1).

4.4 Handlungsfeld 4: Recycling

Nach § 3 Absatz 25 des KrWG [KrWG 2023] ist **Recycling** im Sinne dieses Gesetzes 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.

Gemäß § 3 Absatz 7b des KrWG [KrWG 2023] sind **Rezyklate** im Sinne dieses Gesetzes **sekundäre Rohstoffe**, die durch die **Verwertung von Abfällen** gewonnen worden sind oder bei der Beseitigung von Abfällen anfallen und für die Herstellung von Erzeugnissen geeignet sind.

Für eine Bereitstellung von Rezyklaten durch einen Recycling-Prozess sind somit Abfälle unabdingbar. Ohne Abfälle gibt es keine Rezyklate.

4.4.1 Rückbau

[Rentz 2001] und [Asam 2018] unterscheiden beim Abbruch und Rückbau von Gebäuden drei Vorgehensweisen. Im Einzelnen sind dies:

Konventioneller Rückbau (Abbruch)

Unter Abbruch wird die Entfernung eines Bauwerks ohne ausdrückliche Berücksichtigung seines Materialbestandes verstanden [Asam 2018]. Beim Abbruch wird die Bausubstanz durch Zertrümmern zerstört und in transportierbare Bestandteile zerlegt. Der konventionelle Rückbau durch Abbruch erfolgt hauptsächlich an Objekten, die durch Brand oder Erschütterungen geschädigt sowie einsturzgefährdet sind. Deshalb findet eine Entrümpelung oder Entkernung des Gebäudes nicht statt. Das Resultat sind Abbruchabfälle, die aus einem heterogenen Gemenge von Baustoffen und Ausrüstungsgegenständen bestehen [Rentz 2001].

Eine Vermischung der einzelnen Fraktionen ist für die Entsorgung nachteilig. Zum einen fallen höhere Kosten für Trennung und Sortierung in einer Anlage an, zum anderen kann eine Querkontamination mit Schad- und Störstoffen eine nachträgliche Trennung und Sortierung verhindern. Dies schränkt die Verwertung von Abbruchabfällen nach Abbruch ein [Rentz 2001].

Teilselektiver Rückbau

Der teilselektive Rückbau ist zwischen Abbruch und selektiven Rückbau angesiedelt. In der Regel werden bei heutigen Abbruchaufgaben in Abhängigkeit von der Art des Bauwerks, den Bedingungen am Abbruchort und der angestrebten Verwertung der Abbruch und der selektive Rückbau kombiniert [Asam

2018]. Der teilselektive Rückbau dient dem Ausschleusen von Schad- und Störstoffen und reduziert den Anfall an gemischten Fraktionen von Abbruchabfällen [Rentz 2001].

Selektiver Rückbau

Der selektive, kontrollierte, systematische oder auch recyclinggerechte Rückbau erfolgt schrittweise durch maschinelle Zerlegung eines Bauwerks mit dem Ziel, möglichst unvermischte Materialien zu erhalten [Asam 2018]. Beim selektiven Rückbau wird ein Gebäude vollständig demontiert. Hauptzweck des selektiven Rückbaus ist die Wiederverwendung gut erhaltener Bauteile, die sortenreine Verwertung und Beseitigung der anfallenden Abbruchabfälle sowie die Ausschleusung von Stör- und Fremdstoffen aus den jeweiligen Abbruchabfallfraktionen. Alle Bau-, Konstruktions- und Ausrüstungsteile werden nach ihrer Funktion oder nach ihrer Materialzusammensetzung demontiert. Die Demontage der Gebäude erfolgt beim selektiven Abbruch in umgekehrter Reihenfolge des Auf- und Einbaus [Rentz 2001].

Nach Asam [Asam 2018] sind gesicherte und bekannte Bauteilqualitäten für eine wirtschaftlichen Umsetzung der Bauteilwiederverwendung notwendig. Unter heutigen Bedingungen ist die Wiederverwendung von Bauteilen nur selten wirtschaftlich und organisatorisch umzusetzen. In Zukunft kann eine solche Wiederverwendung durch BIM-basierte Datenbanken und durch die modulare Neubauplanung wirksam unterstützt werden.

Ein wesentlicher Punkt der Vorbereitung zur Wiederverwendung ist der selektive Rückbau von einzelnen Bestandteilen oder Komponenten wie Putze, Mauerermörtel, Estrichmörtel, Dämmstoffe und Wärmedämm-Verbundsysteme.

In Bild 23 ist beispielhaft der maschinelle Rückbau von WDVS abgebildet. Der teilselektive Rückbau wurde an einem Objekt in Ludwigshafen und der selektive Rückbau an Gebäuden des Fraunhofer IBPs in Valley durchgeführt. Beim teilselektiven Rückbau des WDVS entsteht eine Mischfraktion aus Klebern, Wärmedämmstoffen und Putzen. Beim selektiven Rückbau werden die einzelnen Materiallagen nacheinander abgetragen. Eine Vermischung der einzelnen Abfallfraktionen wie Kleber, Wärmedämmstoffe und Putz wird unterbunden. Wie die Bilder zeigen, werden beim maschinellen Rückbau üblicherweise Maschinen und Werkzeuge eingesetzt, die eigentlich für einen anderen Einsatzbereich konzipiert und konstruiert wurden. Ein Greifer oder eine Baggerschaufel sind nicht das perfekte Rückbauwerkzeug. Hier besteht immer noch ein großes Entwicklungspotenzial, da oft durch die Lage eines Objekts innerhalb eines Straßenzugs oder Quartiers die Zugänglichkeit für schwere Maschinen erschwert wird.

In ihrer Dissertation identifizierte [Weber 2020] einen weiteren Forschungsbedarf bei der Entwicklung und Optimierung von Verfahren zum Abtrag von WDVS unter Verwendung von Bürsten.



Teilselektiver Rückbau



Baumischabfall



Selektiver Rückbau



Dämmstoffabfall

Bild 23:

Beispiele für einen maschinellen Rückbau von WDVS. Links: teilselektiver Rückbau eines Objekts in Ludwigshafen mit Baumischabfall, rechts selektiver Rückbau am Gebäude des Fraunhofer IBP in Valley.

Sehr häufig erfolgt deshalb der Rückbau von Putzlagen, Dämmstoffen und Klebern manuell. Der manuelle Rückbau ist dabei zeit- und kostenintensiv. Nach dem Einschneiden der Putzschicht kann diese vom Dämmstoff durch sogenanntes „Strippen“ abgeschält werden. Im nächsten Schritt wird der Dämmstoff vom Kleber getrennt und zum Schluss die Kleber vom Mauerwerk abgeschlagen (Bild 24).



Strippen der Putzschicht



Abschälen des Dämmstoffs



Abschlagen von Kleber

Bild 24:

Manueller selektiver Rückbau von WDVS am Gebäude des Fraunhofer IBP in Valley.

Diese Vorgehensweise ist nicht nur beim Wärmedämmstoff EPS anwendbar, sondern auch bei Dämmstoffen aus Mineralwolle, Polyurethan oder Phenolharz (Bild 25).



EPS



Mineralwolle



Polyurethan



Phenolharz

Bild 25:

Manueller selektiver Rückbau von WDVS mit unterschiedlichen Wärmedämmstoffen an Gebäuden des Fraunhofer IBP in Valley.

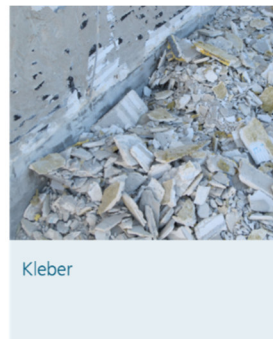
Beim manuellen selektiven Rückbau entstehen sortenreine Fraktionen der einzelnen bei WDVS verwendeten Materiallagen, wie z. B. Kleber, Dämmstoffe und Schlussbeschichtung. Im Bild 26 sind die einzelnen Fraktionen abgebildet.



Putz inklusive
Schlussbeschichtung und
Gittergewebe



Wärmedämmstoff



Kleber



Reststoffe wie Dübel,
Bauschaum etc.

Bild 26:

Manueller selektiver Rückbau von WDVS: die rückgebauten Stofffraktionen.

WDVS bestehen aus mehreren Materialschichten. Die einzelnen Schichten können rein organisch, rein mineralisch (anorganisch) oder aus einem Gemisch von organisch/mineralischen Bestandteilen bestehen. Wie bei anderen Verbundwerkstoffen besteht die Herausforderung beim Rückbau in der selektiven Trennung der einzelnen Lagen. Grundsätzlich konnte gezeigt werden, dass der Rückbau der einzelnen Materialschichten möglich ist. Besonders bei manuellem Rückbau erhält man Einfeldfraktionen mit hoher Reinheit. Bei maschinellm Rückbau geht der zeitliche Vorteil auf Kosten der Reinheit der einzelnen Fraktionen. Bei der Verwertung des Dämmstoffs EPS wird ein Anteil an Verschmutzung von maximal 7 % toleriert [Heller 2020]. Angaben zum Verschmutzungsgrad von mineralischen Fraktionen wie Kleber oder Mörtel mit organischen Bestandteilen sind nicht verfügbar.

Die Arbeitsgruppe um Lublasser [Lublasser 2017] beschäftigte sich in ihrer Forschungsarbeit mit der Entwicklung einer robotergestützten Technologie für den Rückbau von Wärmedämmsystemen mit expandiertem Polystyrol (EPS). Dabei wurden die einzelnen Arbeitsschritte des selektiven manuellen Rückbaus auf die Robotertechnologie übertragen und an kleinförmigen Flächen erfolgreich getestet. Als nächster Schritt ist ein Scale-up des Verfahrens.

Die Deutsche Umwelthilfe e. V. [DUH 2021] beschreibt ein Wärmedämm-Verbundsystem, das sortenrein zurückgebaut werden kann. Die Fixierung der Mineralwolle-Dämmplatten am Mauerwerk erfolgt rein mechanisch mit versenkten Schraubdübeln. Ein Klebemörtel wird nicht verwendet. In die Putzschicht wird ein Separationsgewebe eingearbeitet, welche beim Rückbau die Trennung zwischen Putz und Dämmung ermöglicht. Der Rückbau der in Segmente unterteilten Putzschicht samt Separationsschicht kann maschinell mit einem Bagger erfolgen. Das anschließende Trennen der Putzfraktion vom Gittergewebe erfolgt durch Trommeln und Sichten. Das Dämmmaterial kann im Ganzen von der Wand genommen werden

In DESTATIS finden sich Zahlen wie viele Gebäude pro Jahr in Deutschland rückgebaut werden (s. Kapitel 3.1), aber es fehlen Erhebungen, wie der Rückbau erfolgt und vor allem wie der Rückbau der Gebäudehülle (Fassade) durchgeführt wird. Somit fehlen auch mengenbezogene Daten. Typischerweise erfolgt der Rückbau von Gebäuden selektiv oder teilselektiv.

4.4.2 Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen

Bau- und Abbruchabfälle entstehen in verschiedenen Phasen des Bau-/Abrissprozesses von Wohnhäusern, Geschäftsgebäuden und anderen Bauwerken. Durch strenge Umweltgesetze und die Forderungen nach Reduktion des Abfallaufkommens wird der Einsatz von Sekundärrohstoffen immer wichtiger. Der Einsatz von Sekundärrohstoffen verringert den Bedarf an Primärrohstoffen und reduziert die Umweltauswirkungen.

Die Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen wie des WDVS erfolgt mit Verfahren und Techniken aus dem Bergbau. Nach [Bilitewski 2013] handelt es sich hierbei um Verfahren zur:

- Zerkleinerung,
- Klassierung,
- Sortierung,
- und Aufbereitung.

Die Zerkleinerung der Bau und Abbruchabfälle erfolgt hauptsächlich in Backen-, Prall oder Schlagwalzenbrechern. Die Korngemische enthalten Partikel unterschiedlicher Korngröße. Die Auftrennung (Klassierung) des Materials in unterschiedliche Kornklassen wird u. a. mit Stangen- oder Rollenrosten, sowie diversen Sieben unterschiedlicher Maschenweite durchgeführt. Sowohl nass als auch trocken Verfahren kommen zum Einsatz. Auch bei der Sortierung der Bau- und Abbruchabfälle in einzelne Fraktionen kommen Nass- und Trockenverfahren zum Einsatz. Die Sortierung nach unterschiedlicher Dichte erfolgt zum Beispiel in einem Nassverfahren nach dem Sink-Schwimm-Prinzip. Die Windsichtung ist dagegen ein Trockenverfahren. Weitere Verfahren sind Handsortierung und

Magnetabscheidung. Einen Überblick über die genannten Methoden und Verfahren liefert [Bilitewski 2013].

Die sensorbasierte Sortierung, die in anderen Sektoren der Abfallwirtschaft seit Jahren eingeführt ist, ist bei der Bauabfallaufbereitung noch sehr selten anzutreffen. Sie bietet aber als einziges Verfahren die Möglichkeit verschiedene Baustoffarten voneinander zu trennen [Asam 2018].

Das Ziel des Forschungskonsortium BAUCYCLE der Fraunhofer-Institute IOSB, IBP, IML und UMSICHT ist die Sortierung und Aufbereitung von anfallenden Abbruchmaterialien hin zu der Herstellung von Recycling Baustoffen.

Im Fraunhofer-Projekt „BAUCYCLE“ wird ein Ansatz einer sensorbasierten Sortierung von Bruch bestehend aus Beton, Gips, Kalksandstein und Ziegel. Die verwendete Sensortechnologie basiert auf elektrooptischer Erkennung, sogenanntem Optical Computing (Bild 27).



Bild 27:
Projekt BAUCYCLE unter Beteiligung der Fraunhofer-Institute IOSB, IBP, IML und UMSICHT.

Eine große Bedeutung für die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen aus Bau- und Abbruchabfälle kommt einer wirksamen und zuverlässigen mechanischen Sortiertechnologien zu. Bau- und Abbruchabfälle bestehen in der Regel aus einem Konglomerat an verschiedenen Materialien, wie Holz, Metallen, Kunststoffen und mineralischen Bestandteilen. Die Zusammensetzung der Bau- und Abbruchabfälle variiert mit dem Alter des Gebäudes, regionalen Gegebenheiten und den verwendeten Baumaterialien. Dies ist eine Herausforderung für die Sortierung. Eine Sortieranlage muss in der Lage sein, verschiedene Fraktionen aus vorsortierten Materialgemischen zu trennen. Technisch-wirtschaftlich hängt die Anzahl der zu trennenden Fraktionen von der Rentabilität der Verwertung und den Reinheitsanforderungen an diese Fraktionen ab [Hyvärinen 2020]. Aus wirtschaftlichen Gründen ist es in der Regel nicht sinnvoll, die Frak-

tionen in höchster Reinheit herzustellen. In bestimmten Fällen sind einige Verunreinigungen akzeptabel, z. B. eignet sich ein Gemisch aus Holz und thermoplastischen Kunststoffen für die Herstellung von Verbundwerkstoffen [Hyvärinen 2020].

Die Aufbereitung der Bauabfälle kann in mobilen oder stationären Anlagen erfolgen. In Deutschland gibt es etwa 800 stationäre und 1400 mobile Recyclinganlagen für mineralische Bauabfälle [Asam 2018].

Die Qualität des Sekundärrohstoffs wird durch das Ausgangsmaterial bestimmt. Nur eine hohe Qualität des Bau- und Abbruchabfalls ermöglicht eine entsprechende Qualität des Sekundärrohstoffs. Grundvoraussetzung hierfür ist hier typischerweise der Grad der Sortenreinheit des Ausgangsmaterials vor der Aufbereitung.

Folgende Maßnahmen eignen sich, um die Qualität von Bau- und Abbruchabfällen zu verbessern [Bilitewski 2013]:

- recyclinggerechtes Bauen,
- recyclinggerechte Demontage und Abbruch von Gebäuden,
- Trennung der Abbruch- von der Entsorgungsleistung,
- Getrennte Erfassung von Baustellenabfällen.

Die Belange der Baustoffverwertung müssen in Einklang mit Materialien wie z. B. Anstrichen und Farben, Klebmitteln und jegliche Art von Materialverbünden, die die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen erschweren, gebracht werden.

Das verwendete Rückbauverfahren hat einen maßgeblichen Einfluss auf:

- die Sortenreinheit,
- die Korngrößen,
- die Vermeidung von Verunreinigungen und Kontaminationen,
- und damit den Output einer Recyclinganlage.

4.4.3 Einflussfaktoren zur Erhöhung der Verwertungsquoten von Sekundärrohstoffen

Für die Erhöhung der Akzeptanz von Sekundärrohstoffen und Sekundärprodukten müssen diverse technische, normative, regulatorische und organisatorische Voraussetzungen geschaffen werden [Bilitewski 2013]. Dies sind u. a.:

- Berücksichtigung von Sekundärbaustoffen in Ausschreibung der öffentlichen Träger,
- Förderung der Akzeptanz bei Ausschreibungen im privaten Bereich,
- Verwertungspflicht bei Bautätigkeit und Rückbau,
- Recycling angepasste Bauweise,
- Erfassung von verbauten Baustoffen und Quantifizierung der Massenströme,
- Angepasste Abbruch- und Aufbereitungstechnologie zur Gewährleistung von qualifiziertem und selektivem Rückbau sowie optimierten Stoffselektion,
- Technologien zur Erkennung und Ausschleusung von Störstoffen, sowie Maßnahmen zur Dekontamination,
- Güteüberwachung und Qualitätssicherung von Sekundärrohstoffen und -produkten,
- Entwicklung von neuen Märkten für durch Rückbau entstandene und gewonnene Hybridwerkstoffe (nicht trennbare Mischfraktion aus organischen und anorganischen Bestandteilen wie z. B. organisch modifizierte Putze, Mauermörtel, Estrichmörtel etc.).

4.4.4 Recyclingverfahren

Die Aufbereitung von dämmstoffhaltigen Kompositmaterialien stellt aufgrund ihrer Materialvielfalt hohe Anforderungen an den Recyclingprozess. In den vergangenen Jahren konnten nach Angaben von Wissenschaftlern der TH-Nürnberg [Fehn 2020] erste Chargen an WDVS-Abbruchmaterialien aufbereitet und ein effizienter Recyclingweg entwickelt werden (siehe Bild 28). Hierbei konnte gezeigt werden, dass der energieaufwändigste Prozessschritt der Zerkleinerungsprozess ist und die Verwendung einer Hammermühle das Lösen des WDVS-Materialverbunds begünstigt. Das Anwendungsfeld für die rückgewonnenen Sekundärrohstoffe wird maßgeblich durch die erzielte Partikelgröße bestimmt. Durch Variation der Prozessparameter konnte ein signifikanter Einfluss auf die partikulären Eigenschaften der rückgewonnenen Fraktionen erreicht werden. Die Charakterisierung der Partikelkollektive erfolgte im Rahmen der

durchgeführten Forschungsarbeiten mittels dynamischer Bildanalyse. Die Marktauglichkeit der Sekundärrohstoffe wurde bestätigt. Nach Angaben der Forscher sollen die rückgewonnenen Sekundärrohstoffe in Form von innovativen Hochbauanwendungen, wie Schüttungen für den Wärme- und Schallschutz, Porosierungsmittel oder neuartige Geopolymer-Produkte, in den Markt rückgeführt werden [Fehn 2021b; Fehn 2022].

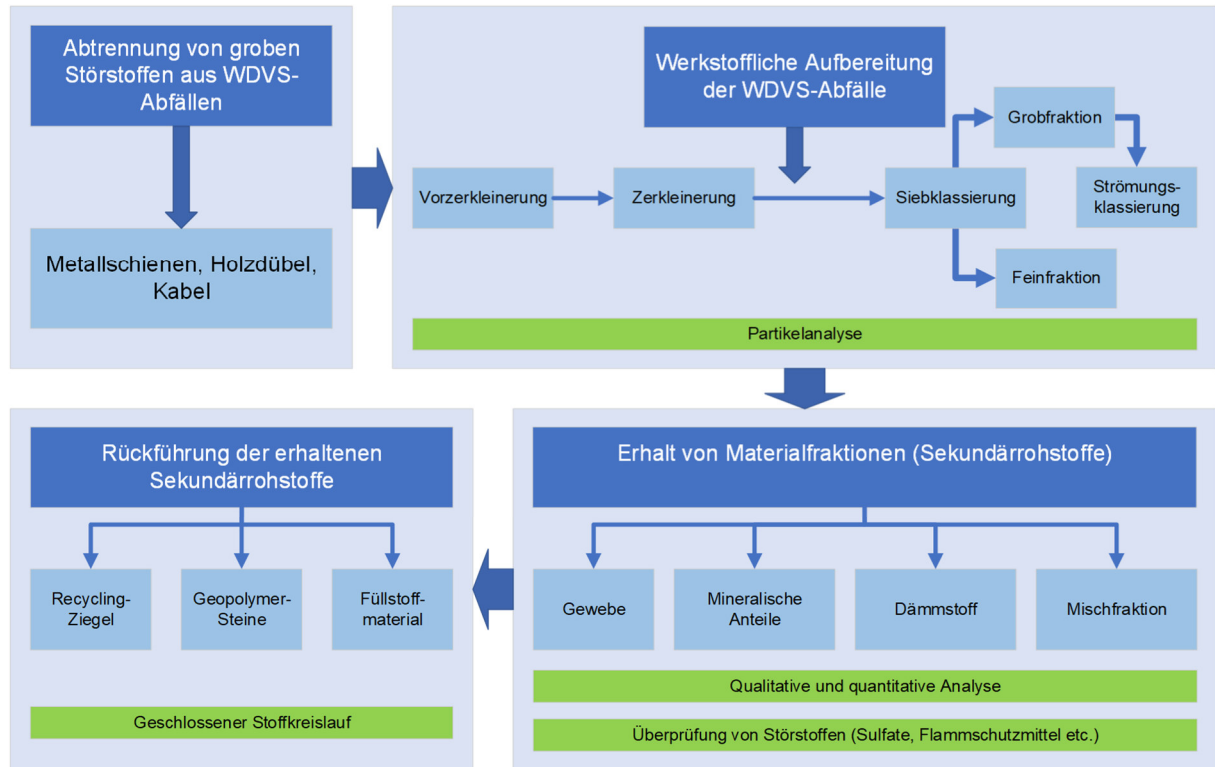


Bild 28:
Recyclingstrategie zur Aufbereitung von WDVS-Abfällen. Eigene Darstellung nach [Fehn 2020].

Weiterführende Untersuchungen befassten sich mit der Reinheit der gewonnenen Fraktionen. Ein Schwerpunkt war der Nachweis des Schadstoffs HBCD, der in allen untersuchten (alten) WDVS nachweisbar war [Fehn 2021a] (s. auch Kapitel 4.7.1).

In dem Baustoffrecycling-Projekt „DeCaBo“ untersuchen die Forschungsgruppen der Fraunhofer-Institute ISC, IBP, ICT, IFAM und IWKS die Methoden einer selektiven Aufschlusszerkleinerung, sensorgestützten Sortierung und Verwertungsmöglichkeiten von WDVS-Komponenten (Bild 29).



Bild 29:
Baustoffrecycling-Projekt „DeCaBo“ unter Beteiligung der Fraunhofer-Institute
ISC, IBP, ICT, IFAM und IWKS.

In Bild 30 sind Beispiele von möglichen Produkten wie Porenbeton, Schallabsorber, Pflanzensubstrat oder anorganisches Bindemittel mit unterschiedlichen Anteilen an Bauschutt abgebildet.



Bild 30:
Beispiele für die Entwicklung von Produkten aus Bauabfall-Fractionen.

Recycling von EPS mit CreaSolv®-Verfahren und Rückgewinnung von Brom

PolyStyreneLoop basiert auf der CreaSolv® Technologie. Das lösungsmittelbasierte Verfahren wurde vom Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV) in Zusammenarbeit mit der CreaCycle GmbH entwickelt. Das Verfahren ermöglicht die gesetzlich vorgeschriebene Entfernung des Flamm-
schutzmittels Hexabromcyclododecan (HBCD) aus dem Polystyrol. Das HBCD

wird nach der Rückgewinnung in einer Bromrückgewinnungsanlage der Firma ICL weiterbehandelt.

CreaSolv® ist ein eingetragenes Warenzeichen der CreaCycle GmbH. Beim CreaSolv®-Prozess werden die geschäumten Polystyrol-Abbruchabfälle zunächst in Tanks mit einem Lösungsmittel aufgelöst. Die festen Verunreinigungen (Schmutz, Mörtel, Putz u. ä.) werden durch Filtration abgetrennt und anschließend verbrannt. Durch Zugabe einer weiteren Flüssigkeit wird das Polystyrol in ein Gel umgewandelt, während der Zusatzstoff (HBCD) in der restlichen Flüssigkeit verbleibt. Das Polystyrol-Gel wird dann von den Prozessflüssigkeiten getrennt. Nach der Reinigung wird dieses Gel zu Polymergranulat verarbeitet, und die Flüssigkeit wird zusammen mit dem Zusatzstoff destilliert und in einem geschlossenen Kreislauf wiederverwendet. Das HBCD verbleibt in dem Schlamm, der in der Bromrückgewinnungsanlage (BRU) der Firma ICL behandelt wird. In Bild 31 ist die PolyStyreneLoop Anlage in Terneuzen, NL abgebildet. Die wesentlichen Merkmale der Anlage sind wie folgt:

- Verwendete Technologie:
Solvolyse nach dem CreaSolv®-Verfahren,
- Jährliche Kapazität der Anlage:
3.300 Tonnen EPS aus Rückbau, HBCD-haltig,
- Jährliche Produktion an PS-Rezyklat:
ca. 3.000 Tonnen,
- Rückgewinnung von Brom aus dem Flammschutzmittel HBCD.



Bild 31:
PolyStyreneLoop Anlage in Terneuzen, NL.

Werktrockenmörtel mit Porenbeton-Bruch

Die MPA Bremen arbeitet seit Jahren zusammen mit der Hochschule Bremen und der Forschungsvereinigung RWB an Verwertungswegen für Porenbeton-Bruch [Hlawatsch 2019]. In mehreren Forschungsprojekten wurden drei Verwertungswege für Porenbeton-Bruch entwickelt:

- Herstellung von leichten **Werktrockenmörteln** aus feinem Porenbetongranulat,
- Herstellung von Leichtmauersteinen aus feinem und mittelgrobem Porenbetongranulat,
- Herstellung von Mauerwerkelementen aus grobem Porenbeton-Granulat und geschäumter Bindemittelmatrix.

In Kooperation mit einem Werk-Trockenmörtel-Hersteller erfolgte in einem durch die Stadt Bremen geförderten Scale Up-Projekt die erste erfolgreiche Erprobung zur Herstellung von RC-Mörtel im industriellen Maßstab. Der hergestellte Recyclingmörtel (Werk trocken-Mauermörtel) besteht zu ca. 37 Gew.-% aus Porenbetonrezyklat und erfüllte die Anforderungen an einen Leichtmauermörtel LM36 gemäß DIN V 18580 [Müller 2019a].

Ein **Recycling von Mörtel** wird aufgrund seiner inhomogenen Qualitäten und Inhaltsstoffe sowie Anhaftung an andere Baustoffe derzeit nicht praktiziert. Mörtel ist aber als Produkt geeignet andere Bauabfallströme wie z. B. Porenbeton aufzunehmen. Dadurch kann Mörtel einen Beitrag zu Reduktion des Bedarfs an Primärrohstoffen leisten [Müller 2019a].

Der hohe Anteil an Zementleim, die Porosität und die damit verbundene hohe Wasseraufnahme machen die Feinfraktion von rezyklierten Betonzuschlägen unattraktiv für eine Wiederverwendung. In ihrer Publikation verwendete Dilberto die rezyklierten Feinfraktionen als Hauptbestandteil mit einer Substitutionsrate von 25 %. Die Aufwertung der Feinfraktion erfolgte durch einen definierten Mahlprozess [Dilberto 2021]. Die Prüfung der mechanischen Festigkeiten der **Mörtel** ergab, dass die gemahlenen feinen Gesteinskörnungen nicht nur als Füllstoffe wirkten, sondern auch eine bindende Eigenschaft hatten.

Recycling von Estrichen

Hecker stellt in seiner Arbeit die ersten Forschungsansätze zur Gewinnung von rezykliertem Thermoanhydrit aus calciumsulfathaltigen Estrichen dar [Hecker 2022]. Als Antrieb für den Forschungsansatz dienen die auf dem Gebiet der ehemaligen DDR verbauten Mengen an Estrichen. Nach der Schätzung des Autors wurden in dem Zeitraum zwischen 1976 und 1989 ca. 6 Mio. m³ Estrich verbaut.

4.5 Handlungsfeld 5: Abfallvermeidung und Aufbereitung

Das in Deutschland genutzte Konzept der „Kreislaufwirtschaft“ ist nach [Kadner 2021] eine rein recyclingorientierte Abfallwirtschaft. Mit der Einführung des Circular Economy Konzepts liegt Fokus auf der Vermeidung und somit auf der obersten Stufe der Abfallhierarchie nach § 6 des KrWG (vgl. Kapitel 2.3, Bild 5).

Aus technologischer Sicht kann das Abfallaufkommen reduziert, aber nicht vermieden werden, da zwischen Produkt und Abfall eine direkte Abhängigkeit besteht. Nach § 3 des KrWG entsteht Abfall erst durch ein Produkt (Stoff oder Gegenstand), dessen sich ein Besitzer entledigen möchte. In der letzten Konsequenz bedeutet dies, dass nur den Verzicht auf ein Produkt auch Abfall vermieden wird.

In § 33 des KrWG ist das Abfallvermeidungsprogramm des Bundes und der Länder definiert. Daraus lassen sich Abfallvermeidungsmaßnahmen in Zusammenhang mit der Abfallerzeugung, Konzeptions-, Produktions- und Vertriebsphase sowie der Verbrauchs- und Nutzungsphase ableiten. Dies können u. a. sein [dejure 2023]:

- Planungsmaßnahmen oder Instrumente zur Steigerung der Effizienz bei der Ressourcennutzung,
- Förderung der Forschung und Entwicklung mit dem Ziel, umweltfreundlichere und weniger abfallintensive Produkte und Technologien zu entwickeln,
- Wirksame und aussagekräftige Indikatoren für Umweltbelastung, Abfallerzeugung und Vermeidung von Abfallerzeugung,
- Einbeziehung von Umweltaspekten in das Produktdesign mit der Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus eines Produkts,
- Ökozeichen,
- Förderung der Wiederverwendung und Reparatur.

Für ein Unternehmen ist Abfallvermeidung oder Abfallreduzierung kein rein ökologisches Thema, sondern das Grundprinzip des unternehmerischen Handelns. Jeder Rohstoff, der nicht verschwendet wird und jedes Produkt, das durch einen sachgemessenen Umgang den Weg in den Markt findet, bedeutet einen unternehmerischen Gewinn.

Der Anfall von Abfall ist für ein Unternehmen eine wichtige Steuergröße, um zum einen zu erkennen, wo durch die Abfallreduzierung die Ressourcen bereits optimal eingesetzt werden, und zum anderen, um in Prozesssträngen mit höheren Abfallaufkommen gegenzusteuern.

Durch folgende grundlegende Maßnahmen kann Abfallaufkommen in vielen Bereichen reduziert werden:

- Herstellungsprozesse einfach gestalten und die Anzahl der darin verwendeten Materialien reduzieren,
- Lagerbestände regelmäßig kontrollieren und Produkte mit z. B. Verfallsdatum nach dem Öffnen von Gebinden vollständig verbrauchen,
- passgenaue Kalkulation des Materialbedarfs mit passender Wahl der Gebindegröße,
- Vermeidung von Verschmutzung und Querkontamination.

Maßnahmen, die eine Verschmutzung oder Querkontamination verhindern, tragen direkt zur Abfallvermeidung bei.

Durch Maßnahmen zur Rückführung und Aufbereitung von Wertstoffen, wie Produktions- oder Baustellenverschnitt, sparen Unternehmen nicht nur Entsorgungskosten, sondern tragen auch indirekt zur Reduzierung des Abfallaufkommens bei.

Produktionsverschnitte

Nach Angaben des Umweltbundesamtes [Potrykus 2020] ist eine werkstoffliche Verwertung von Produktionsverschnitten aus expandiertem oder extrudiertem Polystyrol, die frei von Flammschutzmittel HBCD sind, möglich. Der Verschnitt kann zur Erzeugung von „Re-Granulaten“ aus Polystyrol verwendet werden. Der bei Produktion anfallende Verschnitt ist sortenrein, unverschmutzt und von bekannter homogener Qualität. Ohne großen logistischen Aufwand kann dieser zwischengelagert und in der Produktion verwendet werden.

Beim Vorliegen eines Logistikkonzepts werden auch unverschmutzte, sortenreine Baustellenzuschnitte von den Herstellern zurückgenommen [Potrykus 2020]. In der Herstellung von Fassadendämmplatten aus EPS werden Produktionsabfälle sowie sortenreine und saubere Verschnittabfälle bis zu einem Anteil von 5 % eingesetzt. Für die Anwendung als Fußboden- oder Flachdach-Dämmplatten sind auch höhere Anteile von bis zu 30 % möglich. Bevor der Verschnitt den EPS-Perlen aus Neumaterial zugesetzt und mit diesen unter Wasserdampf verschweißt wird, wird er vermahlen und entstaubt.

Rücknahmesysteme

Eine zunehmende Rolle in der ressourcenschonenden Bauwirtschaft spielen freiwillige oder vorgeschriebene Rücknahmesysteme, in denen Hersteller (bzw. Herstellervereinigungen) rückgebaute Produkte nach der Nutzung ihren Produktionsprozessen wieder zuführen und so den Materialkreislauf schließen. Mit

solchen Rücknahmesystem ist das wirtschaftliche Interesse, wie auch die technische Kompetenz und damit das Innovationspotenzial in einer Hand gebündelt. Entsprechende Rücknahmesysteme bestehen heute zum Beispiel für Photovoltaikanlagen, Elektrogeräte, Steinwolle, PVC-Fenster, Bodenbeläge, Dachbahnen und Porenbeton. Den Baustoffhandlungen sollte hier für die notwendige Logistik von Rücknahmesystemen eine zentrale Rolle zukommen [Asam 2018].

Die Deutsche Umwelthilfe e. V. [DUH 2021] beschreibt Rücknahmesysteme für Mineralwolle-Produkte. Dabei wird die Mineralwolle in Big Bags gesammelt, anschließend im Werk auf Sortenreinheit geprüft, von Verunreinigungen gereinigt und dem Produktionsprozess für neue Dämmstoffe zugeführt. Zum Teil erfolgt dies durch Aufschmelzen. Da bei dem Schmelzprozess die Faserstruktur vollständig zerstört wird, ist es unerheblich, ob alte oder neue Mineralwolle zugeführt wird. Die momentane Auslastung des von DUH genannten Verfahrens liegt bei 20 %. Theoretisch können in dem Prozess bis zu 50 % Altmaterial verarbeitet werden.

4.6 Handlungsfeld 6: Reststoffe

Für die Baustoffindustrie sind Sekundärrohstoffe von Bedeutung, die als industrielle Nebenprodukte in großtechnischen Prozessen anfallen. Im Einzelnen sind dies:

- Schlacken, Stäube, Gießereialtsande aus Eisenhütten- und Stahlindustrie sowie Nichteisen-Metallurgie einschließlich Gießereiindustrie,
- Aschen aus thermischer Abfallbehandlung,
- Aschen aus Energieerzeugung in Braun- und Steinkohlekraftwerken,
- REA-Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen von Kraftwerken.

Schlacken entstehen bei der Produktion von Roheisen, Stahl und Nichteisenmetallen. In ihrer Morphologie ähneln Schlacken natürlichen Gesteinen wie Basalt oder Granit. 2019 wurden rund 5,5 Mio. t Hochofenschlacken als Hütensand im Zementherstellungsprozess eingesetzt. Durch sukzessive Stilllegung von Hochöfen im Zuge der Dekarbonisierung der Eisen- und Stahlherstellung wird laut Prognosen das Aufkommen Hochofenschlacken bis 2040 um ca. 80 % sinken [Stoll 2022].

Aschen entstehen bei Verbrennungs- bzw. Pyrolyseprozessen als Rückstände der mineralischen Bestandteile des Verbrennungsgutes. Als Sekundärrohstoffe für die Herstellung von Zement oder Beton sind zur Zeit nur Steinkohlenflugaschen von Bedeutung. Von den im Jahr 2019 produzierten 2,0 Mio. t Steinkohlenflugaschen wurden 84 % in der Betonherstellung (Zusatzstoff) und 9 % zur Zementherstellung verwendet. Durch den beschlossenen Ausstieg aus der Steinkohleverstromung bis 2030 wird Steinkohlenflugasche als Sekundärrohstoff für die Betonproduktion nicht mehr verfügbar sein [Stoll 2022].

Bei der Rauchgasreinigung im Kalkwaschverfahren in Großfeuerungsanlagen entsteht aus der Reaktion von Kalk und Wasser mit Schwefeldioxid und Luftsauerstoff synthetischer **REA-Gips** (REA = Rauchgasentschwefelungsanlage). Im Jahr 2019 wurden 5,2 Mio. t REA-Gips erzeugt. 72,3 % des erzeugten REA-Gips wurde für Gips-Erzeugnisse im Bau und 3 % für die Zementherstellung verwendet. Wie Steinkohleaschen wird auch REA-Gips nach dem Ausstieg aus der Kohleverstromung als Sekundärrohstoff nicht mehr verfügbar sein [Stoll 2022].

In Deutschland wurden im Jahr 2019 ca. 5,1 Mio. t **Aschen** aus den Hausmüllverbrennungsanlagen und der Verbrennung von Ersatzbrennstoffen (HMVA) produziert. Hauptsächlich werden die HMVA im Tiefbau für den Unterbau von Straßen, Wegen und Plätzen eingesetzt [Stoll 2022].

Die Verwertung von **Giebereialtsanden** als Sekundärrohstoff erfolgt beim Brennprozess in der Zement- und Ziegelindustrie. Im Jahr 2019 fielen 1,7 Mio. t Giebereialtsande an. Davon fanden 28 % eine Verwendung als Sekundärrohstoff in der Zement- und Ziegelindustrie. Laut der Prognose bleibt das Aufkommen an Giebereialtsanden auch über das Jahr 2030 stabil [Stoll 2022].

Nach Angaben der Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V. (ITAD) fallen bei deutschen Hausmüllverbrennungsanlagen unterschiedliche Rückstände oder Reststoffe aus der Verbrennung und Rauchgasreinigung, die nach einer angepassten Behandlung der enthaltenen Schadstoffe u. a. einer geeigneten Verwertung zugeführt werden können.

Bei der Verbrennung von Siedlungsabfällen in einer Hausmüllverbrennungsanlage fallen pro 1000 kg Abfall an:

- 200 bis 300 kg Schlacke (Verbrennungsrückstand aus dem Feuerraum),
- 50 bis 90 kg Flugasche und Filterstäube (aus der Wärmerückgewinnung und der Staubabscheidung),
- 10 bis 30 kg Filterstäube aus trockenen oder quasitrockenen Rauchgasreinigungsverfahren,
- 5 bis 20 kg Filtersalze und schwermetallhaltige Schlämme aus nassen Rauchgasreinigungsverfahren,
- beladene Adsorbentien aus der Rauchgasnachreinigung
 - o 5 bis 15 kg Kieselasche,
 - o 2 bis 5 kg Aktivkohle.

89 Masse-% der aufbereiteten Schlacken werden verwertet und 11 Masse-% deponiert. Verwendung finden die Schlacken im Deponie- (49 %) und im Straßenbau (34 %) sowie im Untertagebau (6 %).

Nach [Granacher 2021] bietet das WDVS aufgrund der deutlich längeren Nutzungsphase wirtschaftliche, gesellschaftliche und ökologische Vorteile. Trotzdem wird aus Sicht des Autors die End-of-Life-Phase derzeit nicht nachhaltig gestaltet. Kreislaufverfahren für Fassadensysteme aus WDVS sind unterentwickelt, was hauptsächlich zur Deponierung der Systeme führt. Als Ansatz wird die Verwendung der rückgebauten Komponenten im Zementwerk angesehen.

Am Institut für Infrastruktur (IWARU) der FH Münster wurden die Möglichkeiten der Verwendung von Aschen aus der Verbrennung von WDVS-Baumischabfall in einer kommunalen Müllverbrennungsanlage zur **Herstellung von Zementklinker** untersucht [Winkelkötter 2023].

Zur Herstellung von Zementklinkern werden Flugaschen aus der Verbrennung von Siedlungsabfällen verwendet. Diverse Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass die gewonnenen Klinker gewöhnlichem Portlandzement ähnlich sind [Saikia 2007]. Je nach Herstellungsparameter und Zugabemengen von Siliziumdioxid, Eisenoxid und Calciumcarbonat werden dabei kritische Elemente, wie z. B. Schwermetalle in den Klinkerphasen, immobilisiert [Fan 2018].

Einen Überblick über Abfallströme und Beiprodukte, die häufig in Beton und Mörtel eingesetzt werden liefert die Publikation von Siddique [Siddique 2008]. Folgende Stoffströme werden verwendet:

- Kunststoffabfälle,
- Altreifen,
- Altglas,
- Flugasche aus Kohle,
- Reishülsenasche,
- Asche aus festen Siedlungsabfällen,
- Holzasche,
- Vulkanasche,
- Zementofenstaub und Gießereisand,
- gemahlene und granuliert Hochofenschlacke,
- sowie Metakaolin.

Für **WDVS** erfordern die zukünftig steigenden WDVS-Abfallmengen im Sinne der Kreislaufwirtschaft **alternative Entsorgungskonzepte**. Neue Verwertungsverfahren werden aktuell entwickelt und stellen dabei Anforderungen an die eingesetzten Abfälle, sodass eine Vorkonditionierung der Stoffströme erforderlich ist. Diese Anforderungen müssen quantitativ beschrieben werden, um die notwendigen Aufbereitungsprozesse gezielt hierauf auszurichten. Erste Versuche an der FH Münster und der RWTH Aachen haben gezeigt, dass mit mechanischen Aufbereitungsschritten weitgehend sortenreine Fraktionen aus einem WDVS-Abfall gewonnen werden können. Die Zerkleinerung hat dabei eine zentrale Bedeutung [Heller 2018].

Während bei vielen Verwertungsverfahren der Fokus bisher auf dem EPS lag, müssen auch für die übrigen Fraktionen eines WDVS, die Putze und Kleber, ressourceneffiziente Entsorgungswege gefunden werden. Diese Fraktionen weisen einen Anteil an organischen Bestandteilen (hauptsächlich in Form von Polymeren) zwischen 5 % und 20 % auf. Dies erschwert bislang eine Kreislaufführung im mineralischen Bereich [Heller 2018].

Das Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT untersucht im Labormaßstab die Eignung von thermokatalytische Aufschlussverfahren (thermocatalytic reforming TCR®) zur Trennung der Polymermatrix vom Zuschlag. Die Herausforderung sind zum einen stör- und schadstofffreie Rückgewinnung von Ölen (z. B. frei von PAK) und zum anderen eine Prozessführung in einem Temperaturbereich, in dem der mineralische Zuschlag nicht verändert wird (z. B. unterhalb der Quarzsprungtemperatur von 573 °C).

4.7 Handlungsfeld 7: Umweltauswirkungen und Langzeitverhalten

Eine eindeutige Definition der **Lebensdauer** von WDVS ist nach [Heller 2022] nicht möglich. So sei anzunehmen, dass heutige Systeme längere Standzeiten erreichen als technisch unausgereifte WDVS aus der Anfangszeit. Eine Übersicht über die aktuelle Studienlage ist in Kapitel 3.1 zusammengestellt. Eine gründliche Planung und einwandfreie technische Ausführung vorausgesetzt, sind demnach vor allem in gemäßigten Klimazonen lange Standzeiten > 50 Jahren erreichbar.

In den letzten 15 bis 20 Jahren wurden an repräsentativen Materialien vieler Baustoffgruppen verschiedenste Untersuchungen zur Auslaugung von Inhaltsstoffen durchgeführt. Während anfangs die Haltbarkeit und Qualitätserhaltung des Bauprodukts im Vordergrund standen, rückten im Laufe der Jahre die möglichen Auswirkungen der freigesetzten **Inhaltsstoffe** auf die Umwelt in den Mittelpunkt des Interesses. Da Mörteln und Putzen komplexe Rezepturen zugrunde liegen und die Produkte – je nach Verwendungszweck – aus einer Vielzahl von Komponenten bestehen, können verschiedenste Inhaltsstoffe auf der Außenfläche von Gebäuden prinzipiell durch Feuchtigkeit mobilisiert und durch abfließendes Regenwasser aus der Fassade ausgewaschen werden. Dies impliziert jedoch nicht automatisch negative Auswirkungen auf die Umwelt.

Nach [Asam 2018] wurden v. a. **Recycling-Baustoffe** jahrzehntelang überwiegend unter dem Schadstoff-Aspekt betrachtet, was negative Auswirkung auf ihr Ansehen als Baustoffe nach sich zog.

Als **Schadstoffe** werden dabei Substanzen mit negativen Folgen für die Gesundheit und die Umwelt bezeichnet, die gegenständlich oder als Bestandteil von Baustoffen vorliegen können. Beispiele sind Asbest, Mineralwolle mit lungengängigen Mineralfasern, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, polychlorierte Biphenyle sowie Schwermetalle. Gegenständliche Schadstoffe oder erkennbar schadstoffhaltige Bauteile müssen selektiv zurückgebaut werden [Asam 2018].

Störstoffe beeinflussen dagegen durch ihre physikalischen oder chemischen Eigenschaften direkt oder in Wechselwirkung mit anderen Stoffen die bautechnischen Eigenschaften und die Verwertbarkeit von Materialfraktionen negativ (z. B. Gipsanteile in Betonbruch oder rezyklierten Gesteinskörnungen, die zu Ettringitbildung führen können) [Asam 2018].

Im Projekt ENSUBA untersucht das Fraunhofer IBP einen mehrstufigen Prozess zur Entsulfatisierung von Bauabfall. In diesem Prozess soll zum einen dem Bauabfall Sulfat entzogen werden und zum andern Gips als Baustoff erzeugt werden. Das Prinzip des Verfahrens ist im Bild 32 dargestellt.



Bild 32:
Projekt ENSUBA: Entsulfatisierung von Bauabfall.

Baustoffe, in den speziellen Materialien für die Gebäudehülle, sind permanent **Umwelteinflüssen** wie Sonnenstrahlung, Temperatur, Regen und Wind ausgesetzt. Dies hat zur Folge, dass Bestandteile von Fassadenmaterialien in die Umwelt gelangen können. Die verantwortlichen Prozesse für den Eintrag in die Kompartimente Luft, Wasser und Boden sind Emission, Elution und Erosion. Diverse Additive, die beispielsweise zur Verbesserung der Verarbeitung, zum Schutz vor mikrobiellen Bewuchs oder als Flammenschutz den verwendeten Materialien zugesetzt wurden, werden unter umwelttechnischen Aspekt kritisch gesehen. In vielen Rezepturen wurde der Gehalt an Additiven, Wirkstoffen

oder Flammenschutzmittels bereits auf das Minimum reduziert oder durch Alternativen wie beim Flammenschutzmittel HBCD (1,2,5,6,9,10-Hexabromcyclododecan, s. auch Kapitel 4.7.1) durch PolyFR (Bromiertes Styrol-Butadien-Copolymer) ersetzt.

Nicht zu unterschätzen ist, dass organische Verbindungen wie z. B. organische Bindemittel oder auch PolyFR durch z. B. Bearbeitung, Temperatur und UV-Licht degenerieren und in niedermolekulare Bruchstücke zerfallen können. Deren Identifikation sowie der Nachweis der Bruchstücke und die mit dieser einhergehenden Wechselwirkung mit der Umwelt steht noch nicht auf der Agenda der Umweltbehörden.

Abrieb von organischen Bestandteilen aus einer Fassade, ob natürlich durch windgetragene Partikel oder Alterung (natürliche Erosion) oder durch Instandsetzungsarbeiten wie Hochdruckstrahlen oder Sand/Pulverstrahlen, erzeugt Partikel, die je nach der Menge an organischem Anteil als Mikroplastik zu werten sind. In den skandinavischen Ländern wurde festgestellt, dass neben Reifenabrieb, Schleifstaub von lackierten Oberflächen von Häusern oder Schiffen die Hauptquellen für urbanes Mikroplastik darstellen [Magnusson 2016].

Um den **Übergang von Schadstoffen in das Grundwasser** zu vermeiden, muss bei der Verwendung von Recycling-Baustoffen ebenso wie bei der Verwendung von industriellen Nebenprodukten die wasserwirtschaftliche Unbedenklichkeit nachgewiesen werden. Der zulässige Gehalt ist dabei umso niedriger, je mehr negative Auswirkungen zu erwarten sind. In gemischten Stoffströmen liegen Schad- und Störstoffe überwiegend in unbedenklichen Konzentrationen vor. Findet selektiver Rückbau statt, können Schad- und Störstoffe in den einzelnen Fraktionen durch die Aufbereitung jedoch angereichert werden [Asam 2018].

Stofffreisetzungen aus intermittierend bewässerten Fassaden sind aufgrund der permanenten Nass-Trocken-Belastung, die ein abweichendes Auslaugungsverhalten der Materialien hervorruft, schwer vorhersehbar und damit auch schwer abzuschätzen [Hecht 2005 und Schoknecht 2009]. Während der Trockenperioden stellt sich ein schneller Kapillartransport ein, wodurch die Verfügbarkeit von Substanzen für die Auswaschung und deren Auswaschung beim nächsten effektiven Regenereignis erhöht wird [Hecht 2005]. Auch Stoffeigenschaften, Kontaktzeit des Materials mit Wasser und die auf die Fassaden aufgebrachte Regenwassermenge beeinflussen die Menge der freigesetzten Stoffe [Weiler 2020a].

4.7.1 HBCD (1,2,5,6,9,10-Hexabromcyclododecan)

Das Flammenschutzmittel HBCD ist seit 2008 klassifiziert als PBT-Stoff (persistent, bioakkumulativ, toxisch) und wurde 2013 in das Stockholmer Übereinkommen über persistente organische Schadstoffe (POP) aufgenommen. Für den Einsatz als Flammenschutzmittel gilt somit seitdem ein weltweites Herstellungs- und Anwendungsverbot. Eine Ausnahmeregel für den Einsatz im Baubereich lief in 2017 aus. In der Umwelt wurde HBCD in allen Kompartimenten und auch in Lebewesen (z. B. Fischen [Fehn 2021a]) nachgewiesen.

Das Umweltbundesamt [UBA 2016] ordnet die Thematik folgendermaßen ein:

„Dämmstoffe aus Polystyrol sind, sofern sie HBCD enthalten, bei Abbruch oder Sanierungsmaßnahmen getrennt zu sammeln. Die POP-Verordnung ((EG) Nr. 850/2004) fordert in Art. 7 (2), dass POP-haltige Abfälle so beseitigt werden, „dass die darin enthaltenen persistenten organischen Schadstoffe zerstört oder unumkehrbar umgewandelt werden“. Diesem Zerstörungsgebot wird bei Entsorgung HBCD-haltiger Abfälle mittels thermischer Behandlung genüge getan. [...].

Ein werkstoffliches Recycling HBCD-haltiger Dämmstoffe wird in Zukunft nur stattfinden können, wenn der entsprechende, seit dem 22. März 2016 geltende Grenzwert von 100 mg/kg aus Anhang I der POP-Verordnung für neu in Verkehr zu bringende Werkstoffe und Erzeugnisse unterschritten wird. [...].

HBCD-freier Verschnitt von expandiertem Polystyrol (EPS) aus Neubau- oder Sanierungs-Aktivitäten, wie z. B. der Anbringung von Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS), kann hingegen werkstofflich recycelt werden. Der in loser oder gepresster Form gesammelte Verschnitt kann nach Zerkleinerung und Extrusion für die Gewinnung von Polystyrol- „Re-Granulat“ verwendet werden.

Bau-EPS aus dem Rückbau von Gebäuden, muss bislang auch deshalb thermisch verwertet werden, da bautypische Anhaftungen das werkstoffliche Recycling unmöglich machen. Verfahren zur Abreicherung von Schadstoffen in Polystyrol-Kunststoffen, mit dem Ziel Verunreinigungen und HBCD aus dem Material selektiv herauszulösen und auszuschleusen, sind in Erprobung (z. B. das CreaSolv®-Verfahren). Zur Unterscheidung zwischen HBCD-frei und HBCD-haltig existiert ein Schnelltest auf Basis der Röntgenfluoreszenzanalyse.“ [UBA 2016]

Momentan wird WDVS hauptsächlich als Mischfraktion rückgebaut und als Baumischabfall entsorgt [Heller 2022]. Ca. 80 % des im Gebäudesektor verbauten WDVS wurde mit EPS als Wärmedämmstoff ausgeführt. Bis 2015 wurde hierbei HBCD als Flammschutzmittel eingesetzt. Die Verwertungs- und Entsorgungswege sind somit vorgezeichnet. Die eleganteste Methode ist die Ausschleusung von HBCD und Rückgewinnung von Brom und Polystyrol im CreaSolv-Verfahren. Zurzeit existiert jedoch nur eine Anlage in den Niederlanden mit einer Kapazität von 3.000 t EPS pro Jahr. Deshalb wird der HBCD haltige Dämmstoff üblicherweise verbrannt. Um die gesetzlichen Auflagen sicher zu erfüllen, erfolgt vor der Verbrennung keine Trennung der einzelnen Fraktionen, sondern das gesamte WDVS wird als Baumischabfall verbrannt. Durch die Mitverbrennung der anorganischen Fraktion, bestehend aus Kleber und Putz, wird gewährleistet, dass der Zielwert von 100 mg HBCD pro kg Abfall erfüllt wird. Die mineralische Fraktion wird dadurch allerdings einer anderweitigen Verwertung entzogen [Heller 2022].

4.7.2 Biozide und ihre Transformationsprodukte

Um Fassaden vor mikrobiologischem Aufwuchs zu schützen, werden Putze und Farben mit Bioziden ausgerüstet. Üblicherweise kommen Kombinationen mehrerer Wirkstoffe (Fungizide und Algizide) zum Einsatz, um ein möglichst breites Spektrum an Zielorganismen zu erreichen. Die Einsatzkonzentrationen betragen dabei je nach Biozid zwischen 500 und 6000 mg/m². [Burkhardt 2023] gibt an, dass in Deutschland im Jahr 2021 zwischen 120 bis 280 t an Bioziden als Filmschutzmittel eingesetzt wurden – damit hätte sich die Menge seit 2012 halbiert. Um von den Organismen aufgenommen werden zu können, müssen die Wirkstoffe eine gewisse Wasserlöslichkeit aufweisen. Allerdings können sie dadurch auch durch von der Fassade ablaufendes Regenwasser aufgenommen werden und in die Umwelt gelangen. Um die Verfügbarkeit für Mikroorganismen sicherzustellen und gleichzeitig die Freisetzung, vor allem aus frisch hergestellten Fassaden, herabzusetzen und die Verweilzeit in der Fassadenbeschichtung zu erhöhen, werden die Wirkstoffe nach aktuellem Stand der Technik durch Mikroverkapselung geschützt.

In Abhängigkeit von ihrer jeweiligen Molekülstruktur und ihren physiko-chemischen Eigenschaften können aus den ursprünglichen Wirkstoffen im Laufe der Zeit und unter der Einwirkung von Umwelteinflüssen auch Transformationsprodukte entstehen. Sowohl die Wirkstoffe als auch manche der daraus entstehenden Transformationsprodukte wurden in unterschiedlichen Konzentrationen in von Fassadenbeschichtungen ablaufendem Wasser und in verschiedenen Umweltkompartimenten nachgewiesen.

Es existieren verschiedene Wirkstoffe, deren Einsatz als „Produktart 7“ („Produkte zum Schutz von Beschichtungen“) über die Biozidprodukteverordnung BPR 528/2012/EC geregelt ist [EU 2012]. Aktuell zugelassen sind noch die

- **Fungizide** 2-n-Octylisothiazolinon (OIT), 4,5-Dichlor-2-n-Octylisothiazolinon (DCOIT), Iodo-2-propynyl-butyl-carbamat (IPBC) und Zink-bis-(2-pyridinethiol-1-oxid) (Zinkpyrithion).
- Bei den **Algiziden** können noch 2-Methylthio-4-tert.butylamino-6-ethylamino-1,3,5-triazin (Terbutryn) und N-(3,4-Dichlorphenyl)-N',N'-dimethylharnstoff (Diuron) eingesetzt werden.

Wirkstoffe wie Carbendazim, Irgarol oder Isoproturon sind für den Einsatz in neuen Fassadenbeschichtungen nicht mehr erlaubt. Es ist davon auszugehen, dass, aufgrund ihrer schnelleren Abbaubarkeit, zukünftig vorwiegend auf die Fungizide als Filmschutzmittel zurückgegriffen werden wird. Viele Hersteller bieten auch biozidfreie Lösungen an.

Die bekanntesten Innovationen in diesem Zusammenhang sind hydrophobe und superhydrophobe Systeme, die auf dem Prinzip des Lotus-Effekts basieren. Das Feuchtemanagement der Produkte kann aber auch durch hydrophile Put-

zeigenschaften gesteuert werden. Andere Entwicklungen zielen auf Dämmputze mit Aerogelen zur besseren Wärmedämmung ab. Des Weiteren kann durch den Einsatz von Zusätzen und Pigmenten die Alkalität einer Rezeptur so angepasst werden, dass der Bewuchs mit Algen und Pilzen verzögert wird.

Diese biozidfreien Lösungen werden aber von Fachbetrieben, wohl vor allem wegen potenzieller Gewährleistungsansprüche, nur zögerlich angenommen. Gleichzeitig existieren z. B. Empfehlungen von Verbänden und aus der Wissenschaft, wie mikrobiologischer Bewuchs auf Fassaden verhindert bzw. damit umgegangen werden kann [Wicke 2021; VDPM 2023b].

Zu Wirkstoffen, Dauerhaftigkeit, Freisetzung, Eintragspfaden, Transformationsprodukten und Auftreten in verschiedenen Umweltkompartimenten liegen zahlreiche Publikationen vor (z. B. [Burkhardt 2012; Wicke 2015; Müller 2019b; Paijens 2019; Uhlig 2019; Vega-Garcia 2020a; Schoknecht 2021; Wicke 2021; Bester 2022; Linke 2022]).

4.7.3 Schwermetalle und Spurenelemente

Anorganische Stoffe können je nach verwendetem Baustoff bei ständigem oder zeitweiligem Kontakt mit Wasser in Form von (Schwermetall- oder Spurenelement-) Salzen ausgewaschen werden. Die alleinige Kenntnis der Rezeptur eines Baustoffs reicht dabei nicht aus, um die Auswaschung vorherzusagen. So ist die Freisetzung von z. B. Chrom, Nickel, Kupfer, Zink und Vanadium aus mineralisch gebundenen Fassadenputzen und -beschichtungen möglich [Clara 2014; Dijkstra 2005; Gasperi 2014; Persson 2001; Scherer 2013; Schiopu 2007; Vollpracht 2010; Weiler 2019; Weiler 2020a; Weiler 2020b; Wicke 2016; Wicke 2022]. Eine Studie in Berlin zeigte, dass die Einleitung von städtischen Regenwasserabflüssen in Flüsse die Konzentration einiger dieser Stoffe um den Faktor 10 erhöhen kann [Wicke 2022].

4.7.4 Bewertung von Umweltwirkungen

In Deutschland [DAfStb 2020] und in den Niederlanden [NEN 7375] liegen **etablierte Verfahren** zur Untersuchung von Bauprodukten im direkten Grundwasserkontakt vor, die die Datengrundlage für behördliche Entscheidungen liefern. Auf europäischer Ebene wurde auf Basis des Mandats M/366 der Europäischen Kommission horizontale Prüfnormen für die Auslaugung von Bauprodukten entwickelt [DIN EN 16637-1 bis -3]. CEN/TC 139 WG10 veröffentlichte bereits im Jahr 2011 eine nicht mandatierte europäische Norm [DIN EN 16105] zur Prüfung des Auslaugungsverhaltens von pastösen Beschichtungen, deren aktuelle Fassung seit April 2023 vorliegt. Alle diese Standards beschreiben nur die Herstellung des Eluats, nicht aber die Analyse der ausgelaugten Bestandteile im Eluat. CEN/TC 351 WG 5 erarbeitet im Rahmen des Mandats M/366 Extraktions-, Aufschluss- und Analysenverfahren für organische und anorganische Inhaltsstoffe von Bauprodukten und Bauprodukteluaten. Entscheidend ist im Anschluss ein Abgleich mit Grenzwerten, die an einem definierten „Ort der Beurteilung“ gelten. Je nachdem, wo dieser Ort der Beurteilung liegt,

müssen zusätzlich noch bestimmte Szenarien und Modellannahmen berücksichtigt bzw. Übertragungsfunktionen gefunden werden [Schoknecht 2022].

Aus Baustoffen können also unterschiedlichste Rezepturbestandteile freigesetzt werden [Vega-Garcia 2023]. Da dabei nicht jeder Stoff überhaupt bekannt ist und vor allem der Analysenaufwand beliebig ausgeweitet werden kann, existiert auch der Ansatz, zunächst **ökotoxikologische Summenwirkungen** von Bauprodukten zu ermitteln und erst bei Auffälligkeiten in einem weiteren Schritt eine Einzelstoffanalytik durchzuführen (z. B. [Heisterkamp 2023]).

Ein ähnliches Konzept ist auch in den „**Grundsätzen zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser**“ des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBt verankert. Es sieht Rezepturanalysen, Ökotoxizitätstests und Auslaugversuche für unterschiedliche Materialien in unterschiedlichen Anwendungsszenarien vor, gilt aber für erdberührte Bauteile, nicht für berechnete Bauteile wie Fassaden [DIBt 2011].

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) fördert den Einsatz ausgewählter **mineralischer Ersatzbaustoffe**, die vorgegebene Anforderungen hinsichtlich der Materialqualität erfüllen, in definierten Einbauweisen (aus Anwendungstabellen). Diese richten sich nach dem höchsten zu erwartenden Grundwasserstand und den darunter liegenden Böden. Es ist keine Zustimmung im Einzelfall nach wasserrechtlichen Anforderungen einzuholen (Vereinfachung des umweltrechtlichen Genehmigungsverfahrens). Für den vereinfachten Ansatz kommt eine Sickerwasserprognose zum Einsatz.

Die **Sickerwasserprognose** ist ein Konzept zur Identifizierung geeigneter Anwendungsszenarien für mineralische Werkstoffe in verschiedenen technischen Bauwerken und dauerhaften Anwendungen. Der Bewertungsprozess besteht aus einer vereinfachten Risikobewertung durch Vergleich von Stoffkonzentrationen („Quellterm“) mit „medienschutzbasierte Einbauwerten“ (ME). Die hierzu verwendeten Stoffkonzentrationen werden üblicherweise mittels standardisierter Laborverfahren, z. B. Säulenperkolations-tests, mit verschiedenen Vertretern einer Produktgruppe erhalten und die jeweils aktuell verfügbare Datengrundlage einer statistischen Auswertung unterzogen. Die medienschutzbasierten Einbauwerte werden stoff- und anwendungsspezifisch mittels eines „Transportterms“ abgeleitet [Susset 2011; Susset 2018] und sind zulässige Höchstkonzentrationen eines Stoffes im Sickerwasser am Ort der Beurteilung, üblicherweise dem Übergangsbereich von der wasserungesättigten zur wassergesättigten Bodenzone. Ziel der ME ist der Schutz von Boden und Grundwasser unter Berücksichtigung technischer Randbedingungen und politischer Konventionen.

Ein Konzept zur **Bewertung der Umwelteigenschaften** von berechneten Putzen und Mörteln wurde von Vega-Garcia et al. entwickelt [Vega-Garcia 2020b; 2021a; 2021b]. Die Ergebnisse zeigten, dass für keinen der mineralisch gebundenen Putze oder Mörtel bei üblichen Anwendungsfällen Grenzkonzentrationen am Ort der Beurteilung überschritten werden [Vega-Garcia 2023].

Für pastöse Putze und daraus freigesetzte Biozide kann das Modell derzeit noch nicht angewendet werden. Gleichzeitig werden die in pastösen Putzen eingesetzten Stoffe bereits über das Biozidrecht geregelt und sind entsprechend für diesen Einsatzzweck zugelassen. Allerdings nimmt die Diskussion, ob das Biozidrecht den Umweltschutz ausreichend berücksichtigt, zunehmend an Fahrt auf [Bester 2022]. Eine Doppelregulierung zusätzlich über das Bauproduktenrecht ist nicht zielführend [Vega-Garcia 2023].

5 Schlussfolgerungen

5.1 Quoten und Konzepte

Die Forderungen des Green Deal sehen vor, zum einen den Rezyklatanteil in Produkten zu erhöhen und zum anderen die Menge des Abfalls zu reduzieren. Hieraus ergibt sich ein Dilemma. Nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz ist Abfall ein Gegenstand, den man nicht mehr haben will und dessen man sich entledigen möchte. Damit man einen Gegenstand recyceln kann, muss dieser den Statuswechsel vom Produkt zum Abfall durchlaufen. Recycelt werden kann nur ein Gegenstand, der zu Abfall geworden und somit Abfall ist. Die Masse an Rezyklaten hängt ergo mit der Masse an recyclingfähigen Abfall zusammen. Sinkt die Menge an recyclingfähigen Abfall, sinkt im gleichen Maße die Menge an Rezyklaten.

Es gilt zu beachten, auf welche Ausgangsmenge eine Quote bezogen wird. Typischerweise bezieht sich die Recyclingquote auf die Menge des Abfalls und bezeichnet nicht die Höhe des Rezyklatanteils in einem neuen Produkt (Rezyklatquote). Momentan und in naher Zukunft sind Rezyklatquoten von über 20 % in Produktportfolios von Herstellern unrealistisch. Einzelne Spezialprodukte können jedoch hohe Rezyklatmengen enthalten. Nach [Asam 2018] sollte zukünftig bei der Angabe von Recyclingquoten „...zwischen den Einsatzgebieten und den Verwertungsstufen des Rezyklats...“ unterschieden werden, um Stoffströme als Grundlage für ein optimiertes Ressourcenmanagement besser aufschlüsseln zu können.

Die vollständige Substitution von Primärrohstoffen eines Produktportfolios durch Rezyklate ist nicht möglich. Momentan fallen in Deutschland ca. 400 Mio. t an Abfall pro Jahr an. Der Bedarf an Rohstoffen liegt bei 2.500 Mio. t. Daraus resultiert eine Lücke von ca. 2.100 Mio. t an Rohstoffen, die nicht durch sekundäre Rohstoffe gedeckt werden kann. Wird der Einsatz von fossilen Energieträgern herausgerechnet und gleichzeitig angenommen, dass der gesamte Abfall recyclingfähig wäre, so sind branchenübergreifend Recyclingquoten von maximal 10 bis 20 % realistisch. Für einzelne Produkte oder Produktgruppen können jedoch zukünftig höhere Werte möglich sein.

Der Gesamtbedarf an Rohstoffen im Bausektor wird zu 13 % durch Sekundärrohstoffe aus Bau- und Abbruchabfällen gedeckt. Nach [Kadner 2021] sind höhere Anteile an Sekundärrohstoffen in Zukunft möglich. Zu berücksichtigen ist, dass sich diese Prognose auf einen geringeren Primärrohstoffbedarf bezieht.

Eine Alternative zur Kreislaufwirtschaft ist das Konzept der Circular Economy. Bei der Kreislaufwirtschaft stehen hauptsächlich die unteren drei Stufen der Abfallhierarchie und somit das Recycling, die Verwertung und die Beseitigung im Vordergrund. Die Circular Economy setzt dagegen verstärkt auf „Vermeidung“ und „Wiederverwendung“.

5.2 Hemmnisse

Nach [Ghaffar 2020] wird der Einsatz von **Bau- und Abbruchabfällen** als Sekundärrohstoffe durch diverse Hemmnisse erschwert. Die Engpässe beim effizienten Recycling bzw. der Wiederverwendung von Bau- und Abbruchabfällen sind auf folgende Umstände zurückzuführen:

- Logistik,
- Kosten,
- Zeitaufwand,
- Arbeitsschutzbestimmung und Regulatorik,
- Fehlen von Normen für das Recycling und die Wiederverwendung von Bau- und Abbruchabfällen,
- Zertifizierung der Recyclingprodukte,
- effektive Sortierung,
- und das fehlende Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage auf dem Recycling- und Wiederverwendungsmarkt.

Die politische Forderung, Abfallmengen zu reduzieren, ist sowohl wichtig als auch richtig. Es muss aber herausgestellt werden, dass diese Forderung einen direkten Einfluss auf die Erzeugung von Sekundärstoffen nehmen wird. Die Quote an bereitgestellten Sekundärrohstoffen oder Rezyklaten steht in direkter Abhängigkeit zur Menge des erzeugten Abfalls.

Auch [DIN, DKE, VDI 2023] stellt fest, dass „...Anforderungen oder zukünftige Normen zur Stärkung der Circular Economy nur schwer in bestehende Normstrukturen integrierbar sind...“ und auf diese Weise in Form paralleler Normstrukturen zu erhöhtem Aufwand auf Kosten der Akzeptanz des Gesamtanliegens führen. Gleichzeitig werden 13 konkrete Ansatzpunkte bzw. Normungsbedarfe formuliert und ein Vorschlag für die Bewertung von Produkteigenschaften gemacht, die eine Klassifizierung von Bauprodukten im Sinne der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen ermöglichen könnte (Tabelle 8).

Tabelle 8:

Ein Vorschlag für Produkteigenschaften, welche zur Erfüllung der wesentlichen Merkmale der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen gemäß Verordnung (EU) 305/2011 beitragen (entnommen aus [DIN, DKE, VDI 2023]).

Wesentliche Merkmale Anhang I, Nr. 7	Produkteigenschaft	Leistung eines Bauprodukts in Stufen und Klassen, Artikel 27
Wiederverwendbarkeit	Selektive Demontierbarkeit	I. Demontierbarkeit A. einfache Demontage B. anspruchsvolle Demontage von z. B. Systemkomponenten C. schwierige Demontage von z. B. Verbundmaterialien II. Empfohlene Wiederverwendbarkeitsprüfung A. Sichtprüfung B. teilweise Wiederholung der Prüfungen nach Norm C. vollständige Wiederholung der Prüfungen nach Norm oder D. Wiederverwendung ausgeschlossen
Recyclingfähigkeit	Materiell Bezeichnung Verfahrensbedingt Standardrecycling- Verfahren Herstellerrücknahme thermische Verwertung oder Deponierung	C. Werkstoffbezeichnung nach Norm II. Kreislauffähigkeit A. Standardrecyclingverfahren B. Herstellerrücknahme C. Beseitigung oder Deponierung
Rezyklatanteil	Massebilanz in %	A. 80–100 % B. 30–80 % C. 0–30 %
Dauerhaftigkeit	Sehr dauerhaft Dauerhaft Wenig dauerhaft	z. B. für Bauteile des Rohbaus A. > 50 Jahre B. 20–50 Jahre C. < 20 Jahre

Auch **Innovationen** in der Wärmedämmung stehen verschiedene politische und regulatorische Hürden gegenüber [DUH 2021].

So gelten für **nachwachsende Rohstoffe** und Holzbaustoffe in Deutschland Beschränkungen aufgrund der Brennbarkeit, was insbesondere ihre Einsatzmöglichkeiten im Hochbaubereich schmälert. Diese aus Sicherheitsgründen angeführten Auflagen werden zwar von einigen Landesbauordnungen wie z. B. in Baden-Württemberg, Berlin, Nordrhein-Westfalen oder Hamburg entschärft,

denn dort ist die Muster-Holzbaurichtlinie umgesetzt, die konstruktive Brandschutzlösungen und sichtbare Holzoberflächen im Hochbau ermöglicht. Nichtsdestotrotz bedarf es einer bundesweiten Regelung zur Verwendung von Holz.

Folgende Ansatzpunkte werden identifiziert [DUH 2021]:

- es fehlen politische Anreize für die Verwendung umweltfreundlicherer Materialien und Verfahren,
- die meisten Landesbauordnungen verbieten die Verwendung von brennbaren Materialien ab der Gebäudeklasse IV,
- Naturdämmstoffe unterliegen bauaufsichtlichen Einschränkungen des Anwendungsbereichs, zum Beispiel im Hochbau, bei der Perimeterdämmung oder bei Gebäuden mit großen Nutzungseinheiten,
- Naturdämmstoffe erfüllen die geforderte Feuerwiderstandsklassen nur in Kombination mit dicken Lagen an Putz,
- die Nutzung **mineralischer Abfälle** als Ersatzbaustoffe ist aktuell in Deutschland nicht geregelt. Dadurch ist Verwendung für die Herstellung neuer Produkte erschwert.

Der Markteintritt in der Baubranche ist zudem für neue, innovationsorientierte Firmen schwierig, da eine Nachfrage nach einem innovativen Produkt nicht gesichert ist. So müssen sich neue Verfahren mit etablierten Produktionsverfahren messen, die über Jahrzehnte optimiert wurden, und die bauaufsichtliche Zulassung von neuen Produkten ist aufwändig sowie zeit- und kostenintensiv. Auch die Logistik mit langen Transportwegen erschwert den Markteintritt [DUH 2021].

5.3 Notwendige Entwicklungen

Auf den Bausektor entfallen 35 % des gesamten Abfallaufkommens in der EU [UBA 2021b]. Circular Economy-Ansätze können somit einen großen Einfluss auf die Nutzung von Abfällen als Sekundärrohstoffe für das (zirkuläre) Bauen in der Zukunft haben. Zu den wichtigsten Strategien zur Förderung solcher Ansätze gehören [Bilitewski 2013; Bär 2021; DIN, DKE, VDI 2023]:

- die Optimierung der Verwertungsziele für Abfälle und deren Verwendung als Sekundärrohstoffe, ggfs. Unter Einführung einer Verwertungspflicht,
- Schaffung eines regulatorischen Umfelds, das die Anforderungen an Sekundärrohstoffen klar definiert,
- Berücksichtigung von Sekundärbaustoffen in Ausschreibung der öffentlichen Träger, Förderung der Akzeptanz bei Ausschreibungen im privaten Bereich,

- Erfassung von verbauten Baustoffen und Quantifizierung der Massenströme,
- Angepasste Abbruch- und Aufbereitungstechnologie zur Gewährleistung von qualifiziertem und selektivem Rückbau sowie optimierten Stoffselektion,
- Aufbau notwendiger Logistik
- Entwicklung von Technologien zur Erkennung und Ausschleusung von Störstoffen, sowie Maßnahmen zur Dekontamination,
- Einführung einer Güteüberwachung und Qualitätssicherung von Sekundärrohstoffen und -produkten,
- die Reduktion des Rohstoffeinsatzes beim Neubau,
- die verstärkte Verwendung von Recyclingmaterialien,
- die Wiederverwendung von beim Umbau und Abbruch gewonnenen Bauteile und Materialien,
- Umsetzung von Recycling-angepassten Bauweisen,
- die Verbesserung der Dauerhaftigkeit und Anpassungsfähigkeit von Gebäuden im Laufe der Zeit,
- die Verlängerung der Lebensdauer durch nachhaltige Nutzung und Ertüchtigung der bestehenden Bausubstanz,
- Entwicklung von neuen Märkten für durch Rückbau entstandene und gewonnene Hybridwerkstoffe (nicht trennbare Mischfraktion aus organischen und anorganischen Bestandteilen wie z. B. organisch modifizierte Putze, Mauermörtel, Estrichmörtel etc.).

Zur Überwindung der vorab aufgeführten Hemmnisse und Hürden formulieren Asam et al. verschiedene Maßnahmen und Forderungen [Asam 2018]. Als zentraler Punkt sind Normen, Richtlinien und technische Zulassungen für Baumaterialien zukünftig so zu formulieren, „dass rezyklierte Baustoffe und Primärstoffe bei gleicher Eignung gleichwertig eingesetzt werden können“. Informationen zu verfügbaren Abbruch- und Aufbereitungs- und Verwertungstechnologien für spezifische Baumaterialien und Bauteile müssen systematisch erstellt und für die relevanten Akteure bereitgestellt werden. Dabei soll v. a. auch die regionale Verfügbarkeit aufgezeigt werden. Als Hilfestellung für Bauherren wird vorgeschlagen, Musterausschreibungen zu entwerfen, mit denen ressourcenschonendes Bauen erleichtert werden kann. Große Bedeutung kommt auch der Aus- und Fortbildung aller beteiligten Akteure und der angemessenen Vergütung bei

erhöhtem Aufwand bei Maßnahmen des ressourcenschonenden Bauens zu [Asam 2018].

Methoden wie D4S oder DfD befassen sich hauptsächlich mit der Entwicklung von ressourcenschonenden Bauweisen und rückbaufreundlichen Gebäuden der Zukunft. Diese Vorgehensweisen sind notwendig, da aktuell ca. 200.000 neue Gebäude pro Jahr entstehen, die auch in Zukunft umgestaltet, umgebaut, umgenutzt oder schlicht rückgebaut werden. Eine große Herausforderung wird jedoch sein, die vorhandenen anthropogenen Lager (Gebäudebestand) an langlebigen Gütern, wie den mineralischen Materialien, als Quelle von Sekundärrohstoffen z. B. durch Urban Mining für die Bauwirtschaft zugänglich zu machen. Damit dies möglich ist, ist eine Inventur der Bestände (Wo?, Was?, Wieviel?) notwendig. Erste Ansätze zur Kartographierung der Bestände gibt es bereits [Schiller 2015]. Des Weiteren sind Datenbanken wie z. B. „Madaster“ [Digitalwerk 2022] notwendig, um die Materialien und Materialmengen im Bestand zu erfassen. Von Bedeutung wird die Entwicklung und Anpassung von Vorortanalysen sein, um unbekannte Materialien zu erkennen und Störstoffe zu erfassen. Durch diese Vorkenntnisse können dann beim Rückbau einzelne Fraktionen selektiver rückgebaut und Störstoffe ohne Vermischung mit anderen Fraktionen gezielt ausgeschleust werden. Zusätzlich müssen die Anforderungen an die rückgebauten Fraktionen für die zukünftige Verwendung als Sekundärrohstoff klar definiert werden.

Auf Grund der örtlichen Gegebenheiten erfolgt der Rückbau in den meisten Fällen als eine Kombination von Abbruch und selektiven Rückbau. Die Qualität eines späteren Produkts hängt jedoch von der Qualität des Ausgangsmaterials ab. Dies kann z. B. durch die gezielte Entwicklung von Maschinen für den selektiven Rückbau erreicht werden. Bei Rückbau von Gebäuden entstehen Mischfraktionen. Ihre Zusammensetzung wird durch das Alter des Gebäudes, verwendete Materialien und lokale Gegebenheiten bestimmt. Eine große Bedeutung kommt hier der Erkennung, Sortierung und Klassierung der einzelnen Fraktionen nach dem Rückbau zu. Ein großes Potenzial bietet hier die Auswahl, Anpassung und Entwicklung von Sensoren zur Erkennung der objektbezogenen Mischfraktion.

Asam et al. stellen fest, dass die Aspekte der Kreislaufführung in der Erstellungs- und am Ende der Nutzungsphase bei der Entwicklung von neuen Bauprodukten als gleichwertig zu berücksichtigen sind und daher auch bei der Produktzulassung bewertet werden sollten [Asam 2018]. In diesem Zusammenhang kommt der Forschung zur Material- und Verfahrensentwicklung für das Baustoffrecycling und der Förderung von Investitionen in innovative Technologien besondere Bedeutung zu [Asam 2018].

Nach dem Positionspapier der Kommission für nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt (KNBau) [Asam 2018] werden „...große Anteile der Stoffströme aus dem Rückbau und Abbruch bestehender Bauwerke heute bereits rezykliert. Das technische Niveau sollte durch Innovationen in Zukunft aber verbessert werden.

Gleichzeitig muss die Wirtschaftlichkeit, die notwendige Logistik und die Akzeptanz unter den Bauschaffenden wirksam gefördert werden...“.

6 Abkürzungsverzeichnis

AbfRRL	Abfallrahmenrichtlinie
AVV	Abfallverzeichnisverordnung
BauPVO	Bauproduktenverordnung
BIM	Engl.: Building Information Modeling
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BPR	Bauproduktenrichtlinie
BREEAM	Engl.: Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology
CEAP	Engl.: circular economy action plan
CG	Schaumglas
CPR	Engl.: construction products regulation, für Bauproduktenverordnung
D4S	Engl.: design for sustainability
DfD	Engl.: design for disassembly
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
DUH	Deutsche Umwelthilfe e. V.
EAK	Europäischer Abfallkatalog
EED	Engl.: Energy Efficiency Directive; Energieeffizienz-Richtlinie
EN	Europäische Norm
EPBD	Engl.: Energy Performance of Buildings Directive; EU-Gebäuderichtlinie
EPS	Expandiertes Polystyrol

ErsatzbaustoffV	Ersatzbaustoff-Verordnung
ESPR	Engl.: Ecodesign Requirements for Sustainable Products Directive
ETAG	Engl.: European Technology Assessment Group
ETICS	Engl.: external thermal insulation composite system; WDVS
EU	Europäische Union
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GewAbfV	Gewerbeabfall-Verordnung
HBCD	1,2,5,6,9,10-Hexabromcyclododecan
HFD	Holzfaserdämmplatten
HMVA	Hausmüllverbrennungsaschen
HWF	Holzweichfaserplatten
IBP	Fraunhofer-Institut für Bauphysik
ICT	Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie
IFAM	Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung
IML	Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
IOSB	Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung
ISC	Fraunhofer-Institut für Silicatforschung
ITAD	Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.
IVV	Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung
IWKS	Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
kt	Kilotonne, 1.000 t oder 1.000.000 kg

LAGA	Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LBO	Landesbauordnung
LEED	Engl.: Leadership in Energy and Environmental Design
MantelV	Mantelverordnung
MBO	Musterbauordnung
ME	Medienschutzbasierter Einbauwert
MVV TB	Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen
MW	Mineralwolle
PAK	Polyaromatische Kohlenwasserstoffe
PBT	persistent, bioakkumulativ, toxisch
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PF	Phenolharz-Hartschaum
PIR	Polyisocyanurat
PolyFR	Polymeres Flammschutzmittel aus bromierten Styrol-Butadien-Copolymer
POP	Engl.: persistent organic pollutant; persistenter organischer Schadstoff
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
RC	Recycling, z. B. RC-1: Recycling-Baustoff der Klasse 1
REA	Rauchgasentschwefelungsanlage
REACH	Abkürzung für die Registrierung, Evaluierung (Bewertung) und Autorisierung (Zulassung) von Chemikalien
RTR	Runder Tisch Reparatur
TRGS	Technische Regel für Gefahrstoffe
UMSICHT	Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik

VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDPM	Verband Dämmsysteme, Putze und Mörtel
WDVS	Wärmedämm-Verbundsystem
WW	Engl.: wood wool
XPS	Extrudiertes Polystyrol

7 Literaturverzeichnis

- [Albrecht 2015] Albrecht, W.; Schwitalla, C. (2015): Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS. Möglichkeiten der Wiederverwertung von Bestandteilen des WDVS nach dessen Rückbau durch Zuführung in den Produktionskreislauf der Dämmstoffe bzw. Downcycling in die Produktion minderwertiger Güter bis hin zur energetischen Verwertung. Hg. V. Fraunhofer IRB Verlag. Forschungsinitiative Zukunft Bau. Stuttgart (F 2932).
- [Al-Salem 2009] Al-Salem, S. M.; Lettieri, P.; Baeyens, J. (2009): Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): a review. In: Waste management (New York, N.Y.) 29 (10), S. 2625–2643.
- [AltfahrzeugV 2020] Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen (Altfahrzeug-Verordnung - AltfahrzeugV).
- [AltöIV 2020] Altölverordnung (AltöIV).
- [Amaro 2013] Amaro, B.; Saraiva, D.; Brito, J.; Flores-Colen, I (2013): Inspection and diagnosis system of ETICS on walls. – Construction and Building Materials 47: 1257 – 1267.
- [Asam 2018] Asam, C.; Keilhacker, T.; Müller, A.; Schwede, D. (2018): Schonung natürlicher Ressourcen durch Materialkreisläufe in der Bauwirtschaft. Position der Kommission nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt (KNBau). Hg. V. Kommission Nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- [AVV 2001] Bundesministerium für Justiz (2001): Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung – AVV). AVV, vom Abfallverzeichnis-Verordnung vom 10.12.2001 (BGBl. I S. 3379), die zuletzt durch Artikel 1 der. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/avv/>, Zugriff am 19. Juni 2023.
- [Bär 2021] Bär, H.; Schrems, I.; Bohnenberger, D. (2021): Introduction to the EU Taxonomy for a Circular Economy. Hg. V. NABU. Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft (FOES).
- [BattG 2020] Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (Batteriegesetz - BattG).
- [BAUA 2022] BAUA (2022): TRGS 519 Asbest: Abbruch-, Sanierungs- oder Instandhaltungsarbeiten.

- [Baunetz Wissen 2023] Baunetz Wissen (2023): CE-Kennzeichnung von Dämmstoffen. Online verfügbar unter <https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/richtlinien-verordnungen/ce-kennzeichnung-von-daemmstoffen-152216> , Zugriff am 26. Juni 2023.
- [BBA 2023] British Board of Agrément (BBA) (2023), Approval Inspection Testing Certification, Technical Approvals for Construction, Beispiele auf www.spsenviro-wall.co.uk, www.struchtherm.co.uk, www.uk.weber
- [Bergmans 2016] Bergmans, J.; Nielsen, P.; Snellings, R.; Broos, K. (2016): Recycling of autoclaved aerated concrete in floor screeds: Sulfate leaching reduction by ettringite formation. In: Construction and Building Materials 111, S. 9–14.
- [Bester 2022] Bester, K. (2022): Overview on the existing knowlege of biocides from building materials. Scientific briefing form DCE – Danish Centre for Environment and Energy.
- [BGR 2021] BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2022): Deutschland – Rohstoffsituation 2021. Hg. V. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover.
- [Bilitewski 2013] Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013): Abfallwirtschaft. Handbuch für Praxis und Lehre. 4. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1620117> , Zugriff am 31. Januar 2023.
- [B+L 2022] B+L Marktdaten GmbH (2018-2022): B+L Quartalsbericht Q3 2022 Mörtelprodukte Deutschland. Absatzentwicklung nach Produkttypen für den VDPM e.V., Bonn, November 2022
- [B+L 2023] B+L Marktdaten GmbH (2018-2023): B+L Quartalsbericht Q4 2018-2022 WDVS Deutschland für den VDPM e.V., Bonn, Februar 2023
- [BMUV 2022] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (08.02.2022): Ressourceneffizienz – Worum geht es? Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/themen/wasser-ressourcen-abfall/ressourceneffizienz/ressourceneffizienz-worum-geht-es> , Zugriff am 10. März 2023
- [BMWSB 2017] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (2017): Nutzungsdauer von Bauteilen – Stand: 24.02.2017. Online verfügbar unter <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/nutzungsdauern-von-bauteilen/> Zugriff am 10.März 2023

- [BMVITO 2019] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie Österreich (2019): Energie- und Ressourceneinsparung durch Urban Mining-Ansätze. Online verfügbar unter https://nachhaltigwirtschaften.at/re-sources/sdz_pdf/berichte/schriftenreihe_2019-14_urban-mining.pdf, Zugriff am 19. Juli 2023.
- [Bundesregierung 2021] Bundesregierung (2021): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/998006/1873516/9d73d857a3f7f0f8df5ac1b4c349fa07/2021-03-10-dns-2021-finale-langfassung-barrierefrei-data.pdf?download=1>, Zugriff am 15. Juni 2023.
- [Burkhardt 2012] Burkhardt, M.; Zuleeg, S.; Vonbank, R.; Bester, K.; Carmeliet, J.; Boller, M.; Wangler, T. (2012): Leaching of biocides from facades under natural weather conditions. *Env. Sci. Technol.* 46, 5497–5503.
- [Burkhardt 2023] Burkhardt, M. (2023): Nachhaltiges Bauen: Ist die Freisetzung von Schadstoffen in die Umwelt relevant? Vortrag im Rahmen der Fachtagung „Biozide in Baumaterialien – von wissenschaftlicher Erkenntnis zu praktischen Handlungsmöglichkeiten“ am Bayerischen Landesamt für Umwelt LfU in Augsburg am 29./30. Juni 2023.
- [CAPAROL 2011] CAPAROL Farben Lacke Bautenschutz GmbH (Hg.) (2011): Renovation of façades ETICS systems. Reworking variants – Procedural steps – Products. Ober-Ramstadt.
- [Clara 2014] Clara, M.; Ertl, T.; Giselbrecht, G.; Gruber, G.; Hofer, T.F.; Humer, F.; Kretschmer, F.; Kolla, L.; Schoknecht, C.; Weiß, S. (2014): SCHTURM—Spurenstoffemissionen aus Siedlungsgebieten und von Verkehrsflächen: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien: BMLFUW.
- [Clausnitzer 2017] Clausnitzer, K.-D.; Fette, M.; Janßen, K.; Lösch, S. (2017): Nachdämmung („Aufdoppelung“) alter Wärmedämmverbundsysteme an Wohngebäuden. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 3006).
- [Crul 2009] Crul, M.; Diehl, J.; Ryan, C. (Hg.) (2009): Design for Sustainability. A Step-by-Step Approach. UNEP; Delft University of Technology. Paris, Delft.
- [CSTB 1981] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). Isolation par l'extérieur. Paris: CSTB magazine, Zusatz zu CSTB Nr. 224.
- [DAfStb 2005] DAfStb (2005) Trockenbeton:2005-06, DAfStb-Richtlinie - Herstellung und Verwendung von Trockenbeton und Trockenmörtel (Trockenbeton-Richtlinie)
- [DAfStb 2010] DAfStb (2010): DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620.

- [DAfStb 2019] DAfStb Beton, rezyklierte Gesteinskörnung Berichtigung 1:2019-09: DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620; Berichtigung 1.
- [DAfStb 2020] DAfStb Freisetzung, Stoffe: 2020-06, Bestimmung der Freisetzung umweltrelevanter Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen in der dynamischen Oberflächenauslaugprüfung, Technische Regel, Beuth Verlag, Berlin, 2020.
- [Dejure 2023] Dejure.org. (2023) Kreislaufwirtschaftsgesetz. Anlage 4 Beispiele für Abfallvermeidungsmaßnahmen nach § 33, online verfügbar unter https://dejure.org/gesetze/KrWG/Anlage_4.html, Zugriff am 8. Mai 2023
- [Deloitte 2021] Deloitte (2021): Zirkuläre Wirtschaft. Herausforderungen und Chancen für den Industriestandort Deutschland. Hg. V. BDI.
- [DepV 2021] Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV).
- [Destatis 2022a] Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022): Branchen und Unternehmen, Bauen. Datenbank GENESIS-Online. Statistik der Baufertigstellungen. Jahre 2002 bis 2021. Tabelle Ergebnis 31121-0001. In Statista. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/_inhalt.html, Zugriff am 8. Mai 2023.
- [Destatis 2022b] Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022): Branchen und Unternehmen, Bauen. Datenbank GENESIS-Online. Statistik des Bauabgangs. Tabelle 31141-0001: Abgang von Gebäuden/Gebäudeteilen im Hochbau: Deutschland, Jahre 2015 bis 2021. In Statista. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/_inhalt.html, Zugriff am 8. Mai 2023.
- [Destatis 2022c] Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022): Abfallbilanz 2020. (Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen).
- [Destatis 2022d] Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022): Anzahl der Betriebe der Baustoffindustrie in Deutschland nach Sektoren im Jahr 2021 [Graph]. In Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/588140/umfrage/betriebe-der-deutschen-baustoffindustrie-nach-sektoren/>, Zugriff am 21. Juli 2023.
- [Destatis 2023a] Statistisches Bundesamt (Destatis) (2023): Statistischer Bericht – Abfallentsorgung 2021. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/_publikationen-abfall.html#_6vhfhfhc1, Zugriff am 7. Juli 2023.

- [Destatis 2023b] Statistisches Bundesamt (Destatis) (2023): Umsatz der deutschen Mörtelindustrie in den Jahren 2006 bis 2022 (in Millionen Euro) [Graph]. In Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/588178/umfrage/umsatz-der-deutschen-moertelindustrie/>, Zugriff am 21. Juli 2023.
- [Destatis 2023c] Statistisches Bundesamt (Destatis) (2023): Anzahl der Beschäftigten in der deutschen Mörtelindustrie in den Jahren 2006 bis 2022 [Graph]. In Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/588228/umfrage/beschaeftigte-der-deutschen-moertelindustrie/>, Zugriff am 21. Juli 2023.
- [Deutscher Bundestag 2020] Deutscher Bundestag (2020): Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz – GEG). Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/BJNR172810020.html>, Zugriff am 23. Juni 2022.
- [DGNB 2022] DGNB (2022): Wegweiser klimapositiver Gebäudebestand. Hg. V. Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. Stuttgart.
- [DIBt 2011] Deutsches Institut für Bautechnik: Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser. Teile I und III in der Fassung vom Mai 2009, Teil II in der Fassung vom September 2011 DIBt Mitteilungen 40(4):116–134.
- [DIBt 2022] DIBt (2022): Musterbauordnung. Online verfügbar unter <https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Rechtsgrundlagen/MBO.PDF>, Zugriff am 19. Juni 2023.
- [DIBt 2023] DIBt (2023): Veröffentlichung der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen 2023/1. Online verfügbar unter https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Referat/P5/Technische_Bestimmungen/MVVTB_2023-1.pdf, Zugriff am 19. Juni 2023.
- [Digitalwerk 2022] Digitalwerk (2022): Design for Disassembly: Rückbaubare Gebäude. Online verfügbar unter <https://www.digitalwerk.io/education/education-blogposts/design-for-disassembly-ruckbaubare-gebaude>, Zugriff am 2. Mai 2023
- [Dijkstra 2005] Dijkstra, J.; Van der Sloot, H.; Spanka, G.; Thilen, G. (2005): How to Judge Release of Dangerous Substances from Construction Products to Soil and Groundwater: CPD-Topic 1. Soil and Groundwater Impact. ECN-C-05-045. Petten (NL): ECN.
- [Diliberto 2021] Diliberto, C.; Lecomte, A.; Aissaoui, C.; Mechling, J.-M.; Izoret, L. (2021): The incorporation of fine recycled concrete aggregates as a main constituent of cement. In: Mater Struct 54 (5).

[DIN 1045-2]	DIN 1045-2:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.
[DIN 4108-2]	DIN 4108-2:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.
[DIN 4226-101]	DIN 4226-101:2017-08: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen.
[DIN 4226-102]	DIN 4226-102:2017-08: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 102: Typprüfung und Werkseigene Produktionskontrolle.
[DIN 18345]	DIN 18345:2019-09: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Wärmedämm-Verbundsysteme.
[DIN 18558]	DIN 18558: 1985-01: Kunstharzputze – Begriffe, Anforderungen, Ausführung. Vornorm, zurückgezogen.
[DIN 55699]	DIN 55699:2017-08: Anwendung und Verarbeitung von außenseitigen Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS) mit Dämmstoffen aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum (EPS) oder Mineralwolle (MW).
[DIN CEN/TS 16637-1]	DIN CEN/TS 16637-1:2014-11, Bauprodukte – Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen – Teil 1: Leitfaden für die Festlegung von Auslaugprüfungen und zusätzlichen Prüfschritten.
[DIN CEN/TS 16637-2]	DIN CEN/TS 16637-2:2014-11, Bauprodukte – Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen – Teil 2: Horizontale dynamische Oberflächenauslaugprüfung.
[DIN CEN/TS 16637-3]	DIN CEN/TS 16637-3:2014-11, Bauprodukte – Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen – Teil 3: Horizontale Perkulationsprüfung im Aufwärtstrom.
[DIN, DKE, VDI 2023]	DIN; DKE; VDI (2023): Normungsroadmap Circular Economy. Hg. V. DIN e.V., DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik und VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. Berlin, Offenbach am Main, Düsseldorf.
[DIN EN 206-1]	DIN EN 206:2021-06: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.
[DIN EN 998-1]	DIN EN 998-1:2017-02: Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 1: Putzmörtel.

- [DIN EN 998-2] DIN EN 998-2:2017-02: Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 2: Mauermörtel.
- [DIN EN 12004-1] DIN EN 12004-1:2017-05: Mörtel und Klebstoffe für keramische Fliesen und Platten - Teil 1: Anforderungen, Bewertung und Überprüfung der Leistungsbständigkeit, Einstufung und Kennzeichnung.
- [DIN EN 12620] DIN EN 12620:2008-07: Gesteinskörnungen für Beton.
- [DIN EN 13162] DIN EN 13162:2015-04: Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW) – Spezifikation.
- [DIN EN 13163] DIN EN 13163:2017-02: Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Polystyrol (EPS) – Spezifikation.
- [DIN EN 13164] DIN EN 13164:2015-04: Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus extrudiertem Polystyrolschaum (XPS) – Spezifikation.
- [DIN EN 13165] DIN EN 13165:2016-09: Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus Polyurethan-Hartschaum (PU) – Spezifikation.
- [DIN EN 13166] DIN EN 13166:2016-09: Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus Phenolharzschäum (PF) – Spezifikation.
- [DIN EN 13167] DIN EN 13167: 2015-04: Wärmedämmstoffe für Gebäude — Werkmäßig hergestellte Produkte aus Schaumglas (CG) — Spezifikation.
- [DIN EN 13168] DIN EN 13168:2015-04: Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzwolle (WW) – Spezifikation.
- [DIN EN 13169] EN 13169:2015-04: Wärmedämmstoffe für Gebäude — Werkmäßig hergestellte Produkte aus Blähperlite (EPB) — Spezifikation.
- [DIN EN 13170] EN 13170:2015-04: Wärmedämmstoffe für Gebäude — Werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Kork (ICB) — Spezifikation.
- [DIN EN 13171] DIN EN 13171:2015-04: Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzfasern (WF) – Spezifikation.
- [DIN EN 13813] DIN EN 13813:2017-03 – Entwurf: Estrichmörtel, Estrichmassen und Estriche - Estrichmörtel und Estrichmassen - Eigenschaften und Anforderungen.
- [DIN EN 15824] DIN EN 15824:2017-09: Festlegungen für Außen- und Innenputze mit organischen Bindemitteln

- [DIN EN 16105] DIN EN 16105:2011-09, Beschichtungsstoffe – Laborverfahren zur Bestimmung der Freisetzung von Substanzen aus Beschichtungen in intermittierendem Kontakt mit Wasser.
- [DIN V 18599-1] Energetische Bewertung von Gebäuden –Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung –Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger.
- [Dowie 1994] Dowie, T.; Simon, M. (1994): Guidelines for designing for disassembly and recycling. Manchester Metropolitan University. Online verfügbar unter <https://1library.net/document/ydx4e96z-guidelines-for-designing-for-disassembly-and-recycling.html> , Zugriff am 5. Juli 2023.
- [DUH 2021] Deutsche Umwelthilfe e.V. (Hg.) (2021): Innovationen in der Wärmedämmung. Eine Broschüre für interessierte Praktiker:innen. Radolfzell, Berlin.
- [Eibensteiner 2016] Eibensteiner, F. (2016): STREC – EPS/XPS Recycling im Baubereich. Zugriff am 27.6.2023, von <https://www.land-oberoesterreich.gv.at/181125.htm>
- [ElektroG 2022] Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz - ElektroG).
- [ElektroStoffV 2021] Verordnung zur Beschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgeräte-Stoff-Verordnung - ElektroStoffV).
- [ErsatzbaustoffV 2021] Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung.
- [ETAG 004 2013] External Thermal Insulation Guideline for European Technical Approval of Composite Systems (ETCS) with Rendering – ETAG 004, Edition 2000, Amended August 2011, Amended February 2013, Europäische Organisation für Technische Zulassungen (Hrsg.), 02/2013.
- [EU 1989] EU (1989): Richtlinie 89/106/EWG des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:31989L0106> , Zugriff am 22.Juni.2023.
- [EU 2008a] EU (2008): Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006.

- [EU 2008b] EU-Kommission (2008): Richtlinie 2008/98/EG. AbfRRL. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:02008L0098-20180705#tocId2>, zuletzt geprüft am 20.07.2023.
- [EU 2011] EU (2011): Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:088:0005:0043:DE:PDF>, Zugriff am 27. Juni 2023.
- [EU 2012] EU (2012): Regulation (EU) No 528/2012 of the European Parliament and of the Council of 22 May 2012 concerning the making available on the market and use of biocidal products. Online verfügbar unter https://health.ec.europa.eu/publications/regulation-eu-no-5282012_en#:~:text=Regulation%20%28EU%29%20No%20528%2F2012%20of%20the%20European%20Parliament,on%20the%20market%20and%20use%20of%20biocidal%20products, Zugriff am 18. Juli 2023.
- [EU 2018] EU (2018): Richtlinie (EU) 2018/844 des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018L0844>, Zugriff am 19. Juni 2023.
- [EU 2019] EU (2019): Verordnung (EU) 2019/1021. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R1021&qid=1689836343007>, zuletzt geprüft am 20.07.2023.
- [EU 2020] EU (2020): Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment, and amending Regulation (EU) 2019/2088. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32020R0852>, Zugriff am 21. Juni 2023.
- [EU-Kommission 2014] EU Kommission (2014): Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission.

- [EU-Kommission 2018a] EUROPÄISCHE KOMMISSION (Hg.) (2018): Leitlinien für Abbruch- und Umbauarbeiten an Gebäuden vorgeschaltete Abfallaudits. Bewirtschaftung von Bau- und Abbruchabfällen in der EU.
- [EU-Kommission 2019a] EUROPÄISCHE KOMMISSION (11.12.2019): MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN EUROPÄISCHEN RAT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN. Der europäische Grüne Deal, vom COM (2019) 640 final. Fundstelle: EUR-Lex. online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>, Zugriff am 21. Juni 2023.
- [EU-Kommission 2019b] EU-Kommission (2019): Umsetzung des europäischen Grünen Deals. Online verfügbar unter https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_de#dokumente, Zugriff am 15. Juni 2023.
- [EU-Kommission 2020a] Europäische Kommission (2020): Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0098#footnote36>, Zugriff am 15. Juni 2023.
- [EU-Kommission 2020b] EU-Kommission (2020): Renovierungswelle: Verdoppelung der Renovierungsquote zur Senkung von Emissionen, zur Ankurbelung der wirtschaftlichen Erholung und zur Verringerung von Energiearmut. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/de/ip_20_1835/IP_20_1835_DE.pdf, Zugriff am 21. Juni 2023.
- [EU-Kommission 2021] EU-Kommission (2021): Vorschlag für eine Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung).
- [EU-Kommission 2022a] Europäische Kommission (2022): Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates (Abl. L 88 vom 4.4.2011, S. 5).
- [EU-Kommission 2022b] EU-Kommission (2022): Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the council establishing a framework for setting ecodesign requirements for sustainable products and repealing Directive 2009/125/EC. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A0142%3AFIN>, Zugriff am 21. Juni 2023.

- [EU-Kommission 2022c] EU-Kommission (2022): Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council laying down harmonised conditions of the marketing of construction products, amending Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Regulation (EU) 305/2011.
- [EU-Kommission 2022d] EU-Kommission (2022): Fragen & Antworten: Überarbeitung der Bauprodukteverordnung. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/de/qanda_22_2121/QANDA_22_2121_DE.pdf, Zugriff am 22. Juni 2023.
- [EU-Kommission 2023] EU-Kommission (2023): Ökodesign für nachhaltige Produkte. Online verfügbar unter https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products-regulation_de, Zugriff am 19. Juli 2023.
- [EU-Parlament 2023] Europäisches Parlament (2023): Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile. Online verfügbar unter <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile>, Zugriff am 2. Juni 2023.
- [Fan 2018] Fan, C.; Wang, B.; Zhang, T. (2018): Review on Cement Stabilization/Solidification of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash. In: Advances in Materials Science and Engineering 2018, S. 1–7.
- [Fehn 2020] Fehn, T.s; Teipel, U. (2020): Werkstoffliche Aufbereitung von Wärmedämm-Verbundsystemen. In: Chemie Ingenieur Technik 92 (4), S. 431–440.
- [Fehn 2021a] Fehn, T.; Kugler, F.; Tübke, B.; Schweppe, R.; Mebert, P.; Krcmar, W.; Teipel, U. (2021): Charakterisierung und Störstoffanalyse von rückgewonnenen Stoffströmen aus Wärmedämmverbundsystemen. In: Chemie Ingenieur Technik 93 (5), S. 771–780.
- [Fehn 2021b] Fehn, T.; Wolf, S.; Schreiber, A.; Teipel, U. (2021): Bestimmung der partikulären Eigenschaften von aufbereiteten Sekundärrohstoffen aus Wärmedämmverbundsystemen. In: Chemie Ingenieur Technik 93 (11), S. 1792–1804.
- [Fehn 2022] Fehn, T.; Elsner, M.; Schweppe, R.; Teipel, U. (2022): Bestimmung der Prozessparameter von Zerkleinerungsprozessen für dämmstoffhaltige Kompositmaterialien. In: Chemie Ingenieur Technik 94 (3), S. 427–439.
- [Ferreira 2021] Ferreira, C.; Silva, A.; de Brito, J.; Dias, I.; Flores-Colen, I. (2021): Condition-Based Maintenance Strategies to Enhance the Durability of ETICS. In: Sustainability 13 (12), S. 6677.

- [Frederichs 2023] Frederichs, M. (2023): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2020. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2020. Hg. V. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. Berlin (Monitoring Bericht, 13).
- [FV-WDVS 2016] Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme (2016): Statistik Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme – Marktentwicklung 1995 – 2015, Februar 2016.
- [Gasperi 2014] Gasperi, J.; Sebastian, C.; Ruban, V.; Delamain, M.; Percot, S.; Wiest, L.; Mirande, C.; Caupos, E.; Demare, D.; Kessoo, M.D.K. (2014): Micropollutants in urban stormwater: Occurrence, concentrations, and atmospheric contributions for a wide range of contaminants in three French catchments. In: Environmental Science and Pollutants Research 21, 5267–5281.
- [Geissdoerfer 2020] Geissdoerfer, M.; Pieroni, M.; Pigosso, D.; Soufani, K. (2020): Circular business models: A review. In: Journal of Cleaner Production 277, S. 123741.
- [Geldsetzer 2021] Geldsetzer F. Rohstoffe, RD-18-01715 (2021) in Böckler F., Dill B., Eisenbrand G., Faupel F., Fugmann B., Gamse T., Matissek R., Pohnert G., Rühling A., Schmidt S., Sprenger G., RÖMPP [Online], Stuttgart, Georg Thieme Verlag, [Februar 2023] Online verfügbar unter <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-18-01715>, Zugriff am 10. Februar 2023.
- [Geres 2023] Geres, R.; Heuer, D.; Weigert S. (2023): Roadmap – Klimaneutralität für Dämmsysteme, Putz und Mörtel. Hg. V. Verband für Dämmsysteme, Putze und Mörtel e.V. Berlin.
- [GewAbfV 2022] Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung – GewAbfV).
- [Ghaffar 2020] Ghaffar, S. H.; Burman, M.; Braimah, N. (2020): Pathways to circular construction: An integrated management of construction and demolition waste for resource recovery. In: Journal of Cleaner Production 244, S. 118710.
- [Granacher 2021] Granacher, D. (2021): Analyzing the Circularity of the Facade Systems EWIS and RSC. Bachelor thesis. Villingen-Schwenningen
- [Hecht 2005] Hecht, M. (2005): Quellstärke ausgewählter Betone in Kontakt mit Sickerwasser. In: Beton Stahlbetonbau 100, 85–88.
- [Heckl 2013] Heckl, W. M. (2013): Die Kultur der Reparatur. München: Hanser.

- [Hecker 2022] Hecker, A.; Schnell, A. R., Ludwig, H.-M. (2022): Forschungsansätze für das Recycling von Calciumsulfat-Fließbestrichen. Thüringer Wertstoffdialog. Thüringer Innovationszentrum für Wertstoffe.
- [Heinrich 2020] Heinrich, M. (2020): Circular Economy Stoffströme im urbanen Wohnungsbau. In: Quartier – Fachmagazin für urbanen Wohnungsbau. Online verfügbar unter <https://www.magazin-quartier.de/article/circular-economy-stoffstroeme-im-urbanen-wohnungsbau/>, Zugriff am 11. Mai 2023.
- [Heisterkamp 2023] Heisterkamp, I.; Gartiser, S.; Schoknecht, U.; Happel, O.; Kalbe, U.; Kretschmar, M.; Ilvonen, O. (2023): Investigating the ecotoxicity of construction product eluates as multicomponent mixtures. In: Environmental Sciences Europe, 2023 35:7.
- [Heller 2018] Heller, N.; Simons, M. (2018): Entsorgung von Wärmedämmverbundsystemen mit EPS. In: recovery Recycling Technology Worldwide (3), S. 16–24. Online verfügbar unter https://www.recovery-worldwide.com/de/artikel/entsorgung-von-waermedaemmverbundsystemen-mit-eps_3187734.html, Zugriff am 19. Juli 2023.
- [Heller 2022] Heller, N. (2022): Entwicklung und Bewertung von Entsorgungsstrategien für Wärmedämmverbundsysteme mit expandiertem Polystyrol. 1. Auflage. Düren: Shaker (Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredlung, 82).
- [Heller 2020] Heller, N.; Flamme, S. (2020): Waste management of deconstructed External Thermal Insulation Composite Systems with expanded polystyrene in the future. In: Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA 38 (4), S. 400–407.
- [Henkel 2016] Henkel CEE Ceresit (Hg.) (2016): Renovation and Repair of ETICS. Wien.
- [Heusler 2019] Heusler, W.; Kadija, K. (2019): Fassaden im digitalen Wandel – Vom Entwurf zum Rückbau. In: ce/papers 3 (1), S. 258–269.
- [Hlawatsch 2019] Hlawatsch, F.; Aycil, H.; Kropp, J. (2019): Neue Recyclingbaustoffe aus Porenbetonbruch: In Werk trockenmörteln für Mauerwerk, in Mauersteinen und in leichten Schaumsteinen. In: Mauerwerk 23 (6), S. 364–377.
- [HVDB 2022] Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. (2022): Roadmap Wiederverwendung von Bauprodukten. Online verfügbar unter https://www.bauindustrie.de/fileadmin/bauindustrie.de/Media/Veroeffentlichungen/Wiederverwendung_Bauprodukte_Roadmap.pdf, Zugriff am 19. Juli 2023.
- [Hyvärinen 2020] Hyvärinen, M.; Ronkanen, M.; Kärki, T. (2020): Sorting efficiency in mechanical sorting of construction and demolition waste. In: Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA 38 (7), S. 812–816.

- [Kadner 2021] Kadner, S.; Kobus, J.; Hansen, E. G.; Akinci, S.; Elsner, P.; Hagelüken, C. et al. (2021): Circular Economy Roadmap für Deutschland. Unter Mitarbeit von aca-tech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, SYSTEMIQ Ltd. Und Circular Economy Initiative Deutschland.
- [KrWG 2023] Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch den Bundesminister der Justiz (02.03.2023): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG); Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>, Zugriff am 4. April 2023.
- [Künzel 2006] Künzel, H.; Künzel, H. M.; Sedlbauer, K. (2006): Long-term performance of external thermal insulation systems (ETICS). *Architectura*, 5(1), 11-24.
- [Kvande 2018] Kvande, T.; Bakken, N.; Bergheim, E.; Thue, J. (2018): Durability of ETICS with Rendering in Norway—Experimental and Field Investigations. In: *Buildings* 8 (7), S. 93.
- [LAGA 2003] LAGA (2003): Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20 - Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/ Abfällen – Technische Regeln. Online verfügbar unter https://www.laga-online.de/documents/m20-gesamtfassung_1643296687.pdf, Zugriff am 19. Juli 2023.
- [LAGA 2015] LAGA (2015): Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 23 - Vollzugshilfe zur Entsorgung asbesthaltiger Abfälle. Online verfügbar unter https://www.laga-online.de/documents/m23_fin_juni_2015_2_1517834576.pdf, zuletzt geprüft am 20.07.2023.
- [LAGA 2019] LAGA (2019): Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 34 - Vollzugshinweise zur Gewerbeabfallverordnung. Online verfügbar unter https://www.laga-online.de/documents/m34_vollzugshinweise_gewabfv_endfassung_11022019_inh-red_aenderung_1554388381.pdf, zuletzt geprüft am 20.07.2023.
- [Langsdorf 2021] Langsdorf, S. (2021): Ressourcenschonungspolitik in der EU. Eine Zusammenschau politischer Strategiepapiere von den Anfängen bis heute. Ecologic Institut. Berlin.
- [Lengsfeld 2015] Lengsfeld, K.; Krus, M.; Künzel, H. M.; Künzel, H. (2015): Beurteilung des Langzeitverhaltens ausgeführter Wärmedämmverbundsysteme. Fraunhofer Institut für Bauphysik. Stuttgart, Valley, Kassel (IBP-Mitteilung, 539).

- [Lengsfeld 2023] Lengsfeld, K.; Krus, M.; Schmidt, S. (2023): Beurteilung der Langzeitbewährung von ausgeführten Wärmedämmverbundsystemen. Durchgeführt im Auftrag des Verbands für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V. Fraunhofer Institut für Bauphysik. Valley (IBP-Bericht HTB 005/2023).
- [Liisma 2016] Liisma, E.; Sepri, R.; Raado, L.-M.; Lill, I.; Witt, E.; Witt, Q. et al. (2016): DEFECT ANALYSIS OF RENOVATED FACADE WALLS WITH ETICS SOLUTIONS IN COLD CLIMATE CONDITIONS. Conference: Central Europe towards Sustainable Building Prague 2016 (CESB16) At: Czech Technical University in Prague. Prague.
- [Lindner 2020] Lindner, C.; Hein, J.; Fischer, E. (2020) Waste generation, waste streams and recycling potentials of HBCD containing EPS/XPS waste in Europe and forecast model up to 2050, Conversio, Mainaschaff, 04/2020.
- [Lindner 2023] Lindner, C.; Fischer, E.; Hein, J. (2023): EPS Stoffstromanalyse Deutschland 2021. Aufkommen und Management von EPS-Abfällen aus dem Baubereich. Hg. v. Industrie Verband Hartschaum e.V. Berlin.
- [Linke 2022] Linke, F.; Olsson, O.; Schnarr, L.; Kümmerer, K.; Preusser, F.; Bork, M.; Leister, H., Lange, J. (2022): Discharge and fate of biocide residuals to ephemeral stormwater retention pond sediments. In: Hydrology Research (2022) 53 (11): 1441–1453.
- [Lublasser 2017] Lublasser, E.; Hildebrand, L.; Vollpracht, A.; Brell-Cokcan, S. (2017): Robot assisted deconstruction of multi-layered façade constructions on the example of external thermal insulation composite systems. In: Constr Robot 1 (1-4), S. 39–47.
- [Lutter 2022] Lutter, S.; Kreimel, J.; Giljum, S.; Dittrich, M.; Limberger, S.; Ewers, B.; Schoer, K. (2022): Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Ressourcenbericht für Deutschland 2022. Spezial: Rohstoffnutzung der Zukunft. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- [Magnusson 2016] Magnusson, K.; Eliasson, K.; Fråne, A.; Haikonen, K.; Hultén, J.; Olshammar, M. et al. (2016): Swedish sources and pathways for microplastics to the marine environment. A review of existing data. Swedish Environmental Protection Agency. Stockholm.
- [Marques 2018] Marques, C.; de Brito, J.; Silva, A. (2018): APPLICATION OF THE FACTOR METHOD TO THE SERVICE LIFE PREDICTION OF ETICS. In: International Journal of Strategic Property Management 22 (3), S. 204–222.
- [MIS 2017] MIS Marktinformations- und Statistiksysteme GmbH (2011-2017): Aggregierte Gesamtmengen der gemeldeten Trockenmörtel-Daten für Industrierverband WerkMörtel e.V. Ulm, Februar 2017

- [Mostert 2021] Mostert, C.; Sameer, H.; Glanz, D.; Bringezu, S.; Rosen, A. (2021): Neubau aus Rückbau. Wissenschaftliche Begleitung der Planung und Durchführung des selektiven Rückbaus eines Rathausanbaus aus den 1970er-Jahren und der Errichtung eines Neubaus unter Einsatz von Urban Mining (RückRat). Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Bonn (BBSR-Online-Publikation, 15/2021).
- [Müller 2017] Müller, F.; Lehmann, C.; Kosmol, J.; Keßler H.; Bolland, T. (2017): Urban Mining. Ressourcenschonung in Anthropozän. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- [Müller 2019a] Müller, F. (2019): Mörtel/Putz. Factsheet. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (FKZ 3716 35 3230).
- [Müller 2019b] Müller, A.; Österlund, H.; Nordqvist, K.; Marsalak, J.; Viklander, M. (2019): Building surface materials as sources of micropollutants in building runoff: A pilot study. In: Science of the Total Environment, 680: 190–197
- [Mulcahy 2022] Mulcahy, K.; Kilpatrick, A.; Harper, G.; Walton, A.; Abbott, A. (2022): De-bondable adhesives and their use in recycling. In: Green Chem. 24 (1), S. 36–61.
- [NachwV 2006] Verordnung über die Nachweisführung bei der Entsorgung von Abfällen (Nachweisverordnung - NachwV).
- [NEN 7375] NEN 7375:2004, Leaching characteristics - Determination of the leaching of inorganic components from moulded or monolithic materials with a diffusion test - Solid earthy and stony materials.
- [O'Grady 2021] O'Grady, T.; Minunno, R.; Chong, H.-Y.; Morrison, G. (2021): Design for disassembly, deconstruction and resilience: A circular economy index for the built environment. In: Resources, Conservation and Recycling 175, S. 105847.
- [O'Grady 2022] O'Grady, T. (2022): Circular Economy of Advanced Prefabricated Buildings. Thesis. Curtin University. Perth.
- [Paijens 2019] Paijens, C.; Bressy, A.; Frère, B.; Moilleron, R. (2019): Biocide emissions from building materials during wet weather: identification of substances, mechanism of release and transfer to the aquatic environment. Environ. Sci. Pollut. Res. 27, 3768–3791.
- [Persson 2001] Persson, D.; Kucera, V. (2001): Release of Metals from Buildings, Constructions and Products during Atmospheric Exposure in Stockholm. In: Water Air Soil Pollution, 1, 133–150.

- [Ragonnaud 2023] Ragonnaud, G. (2023): Strategy for a sustainable built environment. Online verfügbar unter <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/carriage/strategy-for-a-sustainable-built-environment/report?sid=7001>, Zugriff am 19. Juni 2023.
- [POP-Abfall-ÜberwV 2022]. Verordnung über die Getrenntsammlung und Überwachung von nicht gefährlichen Abfällen mit persistenten organischen Schadstoffen (POP-Abfall-Überwachungs-Verordnung – POP-Abfall-ÜberwV).
- [REACH 2006] Europäische Union (2006): Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission, vom 17.12.2002. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32006R1907>, Zugriff am 5. April 2023.
- [Rentz 2001] Rentz, O.; Seemann, A.; Schultmann, F. (2001): Abbruch von Wohn- und Verwaltungsgebäuden. Kreislaufwirtschaft. Handlungshilfe. Hg. v. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe (Kreislaufwirtschaft, 17).
- [Potrykus 2020] Potrykus, Alexander; Zotz, Ferdinand; Aigner, Joachim Felix; Weißenbacher, Jakob; Burgstaller, Maria; Abraham, Veronika et al. (2020): Prüfung möglicher Ansätze zur Stärkung des Recyclings, zur Schaffung von Anreizen zur Verwendung recycelbarer Materialien und zur verursachergerechten Zuordnung von Entsorgungskosten im Bereich der Bauprodukte. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (TEXTE 05/2021).
- [Römpf 2023] RÖMPF-Redaktion, Regenerate, RD-18-00637 (2002) in Böckler F., Dill B., Eisenbrand G., Faupel F., Fugmann B., Gamse T., Matissek R., Pohnert G., Rühling A., Schmidt S., Sprenger G., RÖMPF [Online], Stuttgart, Georg Thieme Verlag, online verfügbar unter <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-18-00637>, Zugriff am 31. Januar 2023.
- [Sadeghi 2022] Sadeghi, M.; Mahmoudi, A.; Deng, X.; Luo, X. (2022): Prioritizing requirements for implementing blockchain technology in construction supply chain based on circular economy: Fuzzy Ordinal Priority Approach. In: Int. J. Environ. Sci. Technol.
- [Saikia 2007] Saikia, N.; Kato, S.; Kojima, T. (2007): Production of cement clinkers from municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash. In: Waste Management 27 (9), S. 1178–1189.

- [Salama 2017] Salama, W. (2017): Design of concrete buildings for disassembly: An explorative review. In: International Journal of Sustainable Built Environment 6 (2), S. 617–635.
- [Scherer 2013] Scherer, C. (2013): Umwelteigenschaften mineralischer Werkmörtel. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Forschungsergebnisse aus der Bauphysik, 12. ISBN 978-3-8396-0470-0.
- [Schiller 2015] Schiller, G.; Ortlepp, R.; Krauß, N.; Steger, S.; Schütz, H.; Fernández, J. (2015): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (83/2015).
- [Schiopu 2007] Schiopu, N.; Jayr, E.; Méhu, J.; Barna, L.; Moszkowicz, P. (2007): Horizontal environmental assessment of building products in relation to the construction products directive (CPD). In: Waste Management 27, 1436–1443.
- [Schoknecht 2009] Schoknecht, U.; Gruycheva, J.; Mathies, H.; Bergmann, H.; Burkhardt, M. (2009): Leaching of Biocides Used in Façade Coatings under Laboratory Test Conditions. In: Environmental Science and Technology 43, 9321-9328. ISSN 0013-936X.
- [Schoknecht 2021] Schoknecht, U.; Mathies, H.; Lisec, J. (2021): Leaching and Transformation of Film Preservatives in Paints Induced by Combined Exposure to Ultraviolet Radiation and Water Contact under Controlled Laboratory Conditions. In: Water 2021, 13, 2390.
- [Schoknecht 2022] Schoknecht, U.; Tietje, O.; Borho, N.; Burkhardt, M.; Rohr, M.; Vollpracht, A.; Weiler, L. (2022): Environmental Impact of Construction Products on Aquatic Systems – Principles of an Integrated Source-Path-Target Concept. In: Water, 14, 228.
- [Siddique 2008] Siddique, R. (2008): Waste materials and by-products in concrete. With 174 tables. Berlin, Heidelberg: Springer (Engineering materials).
- [Silva 2009] Silva, J. M. D.; Falorca, J. (2009). A model plan for buildings maintenance with application in the performance analysis of a composite façade cover. In: Construction and Building Materials, 23, 3248-3257.
- [Sims 2019] Sims, S.; Urban, H.; Stier, C. (2019): Deaktivierbare Klebstoffe zur Wiederverwertung von Wärmedämmverbundsystemen. WDVS-Deaktiv. Hg. v. Fraunhofer IRB Verlag. Forschungsinitiative Zukunft Bau. Stuttgart (F 3165).
- [Stoll 2022] Stoll, D.; Schwarzkopp, F.; Loyen, S.; Blazejczak, J.; Gornig, M. (2022): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2040 in Deutschland. Hg. v. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. Berlin.

- [Sulakatko 2015] Sulakatko, V.; Lill, I.; Liisma, E. (2015). Analysis of on-site construction processes for effective external thermal insulation composite system (ETICS) installation. In: Procedia Economics and Finance, 21, 297-305.
- [Susset 2011] Susset, B.; Grathwohl, P. (2011): Leaching standards for mineral recycling materials – A harmonized regulatory concept for the upcoming German Recycling Decree. In: Waste Management, 2011, 31 (2), 201-214.
- [Susset 2018] Susset, B.; Maier, U.; Finkel, M.; Grathwohl, P. (2018): Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge. Texte 26/2018. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- [Tavares 2020] Tavares, J.; Silva, A.; de Brito, J. (2020): Computational models applied to the service life prediction of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS). In: Journal of Building Engineering 27, S. 100944.
- [UBA 2016] Umweltbundesamt (2016): Wie werden HBCD-haltige Dämmstoffe entsorgt und können sie recycelt werden? Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-werden-hbcd-haltige-daemmstoffe-entsorgt>, Zugriff am 18. Juli 2023.
- [UBA 2019] Umweltbundesamt (2019): Runder Tisch Reparatur – Fair Repair. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/das-uba/was-wir-tun/foerdern-beraten/verbaendefoerderung/projektfoerderungen-projekttraeger/runder-tisch-reparatur-fairrepair>, Zugriff am 20. Juli 2023.
- [UBA 2021a] Umweltbundesamt (2021): Prüfung möglicher Ansätze zur Stärkung des Recyclings, zur Schaffung von Anreizen zur Verwendung recycelbarer Materialien und zur verursachergerechten Zuordnung von Entsorgungskosten im Bereich der Bauprodukte. Texte 05/2021. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021_01_11_texte_05-2021_bauprodukte_recycling.pdf, Zugriff am 19. Juli 2023.
- [UBA 2021b] Umweltbundesamt (2021): Recycling von Bauprodukten steigern. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/recycling-von-bauprodukten-steigern>. Zugriff 31. Januar 2023
- [UBA 2023] Umweltbundesamt (2023): Was ist Urban Mining? Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining#was-ist-urban-mining->, Zugriff am 3. Februar 2023.
- [Uhlig 2019] Uhlig, S., Colson, B., Schoknecht, U. (2019): A mathematical approach for the analysis of data obtained from the monitoring of biocides leached from treated materials exposed to outdoor conditions. In: Chemosphere 228, 271–277.

- [VDPM 2018] Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V. (2018): WDVS-Statistik 2017. Berlin, 5. März 2018
- [VDPM 2023a] Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V. (2023): Fassadensysteme, Aufbau und Anwendungsbereiche, online verfügbar unter <https://www.vdpm.info/daemmsysteme/fassadendaemmsysteme/#aufbau>, Zugriff am 18. Juli 2023.
- [VDPM 2023b] Mikrobiologischer Bewuchs auf Fassaden – Algen und Pilze. Merkblatt des Verbands für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V., des Bundesverbands Ausbau und Fassade, des Bundesverbands Farbe Gestaltung Bautenschutz, des Bundesausschuss Farbe und Sachwertschutz e.V. und des Verbands der deutschen Lack- und Druckfarbenindustrie (VdL). Online verfügbar unter Presse-Merkblatt_Mikrobiologischer-Bewuchs_11-2020-final.pdf (vdpm.info), Zugriff am 18. Juli 2023.
- [VDZ 2022a] Verein Deutscher Zementwerke (2022): Anzahl der Unternehmen in der Zementindustrie in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2021 [Graph]. In Statista., online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/161712/umfrage/anzahl-der-unternehmen-in-der-zementindustrie-seit-2000/>, Zugriff am 21. Juli 2023.
- [VDZ 2022b] Verein Deutscher Zementwerke (2022): Anzahl der Werke in der Zementindustrie in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2021 [Graph]. In Statista., online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/161713/umfrage/anzahl-der-werke-in-der-zementindustrie-seit-2000/>, Zugriff am 21. Juli 2023.
- [Vega-Garcia 2020a] Vega-Garcia, P.; Schwerd, R.; Scherer, C.; Schwitalla, C.; Johann, S.; Rommel, S.H.; Helmreich, B. (2020): Influence of façade orientation on the leaching of biocides from building façades covered with mortars and plasters. In: Science of the Total Environment, 734, 139465.
- [Vega-Garcia 2020b] Vega-Garcia, P.; Schwerd, R.; Scherer, C.; Schwitalla, C.; Helmreich B. (2020): Development of a model for stormwater runoff pre-diction on vertical test panels coated with plaster and mortar. In: Water, 12 (9) 2593.
- [Vega-Garcia 2021a] Vega-Garcia, P.; Schwerd, R.; Schwitalla, C.; Johann, S.; Scherer, C.; Helmreich, B (2021): Leaching prediction for vertical test panels coated with plaster and mortars exposed under real conditions by a PHREEQC leaching model. In: Chemosphere, 280, 130657.
- [Vega-Garcia 2021b] Vega-Garcia, P.; Schwerd, R.; Johann, S.; Helmreich, B. (2021): Groundwater risk assessment of leached inorganic substances from facades coated with plasters and mortars. In: Chemosphere, 287, 132176.

- [Vega-Garcia 2023] Vega-Garcia, P.; Schwerd, R.; Scherer, C. (2023): Entwicklung eines Modells zur Bewertung der Umwelteigenschaften üblicher Putze und Mörtel im Außenbereich. Durchgeführt im Auftrag des Verbands für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V. Fraunhofer Institut für Bauphysik, Valley (IBP-Bericht UHS-006/2023). Online verfügbar unter <https://www.vdpm.info/services/downloads/forschungsberichte/>, Zugriff am 19. Juli 2023.
- [Vereinte Nationen 2015] Vereinte Nationen (2015): Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. Online verfügbar unter <https://www.un.org/Depts/german/gv-70/band1/ar70001.pdf>, Zugriff am 13. Juni 2023.
- [VerpackG 2023] Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen (Verpackungsgesetz - VerpackG).
- [Vollpracht 2010] Vollpracht, A.; Brameshuber, W. (2010): Investigations on the leaching behaviour of irrigated construction elements. In: Environmental Science and Pollution Research 17, 1177–1182.
- [Weber 2020] Weber, M. (2020): Untersuchung zum Abtrag von Wärmedämmverbundsystem mit spanender Bürste. Dissertation. Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Karlsruhe. KIT-Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften.
- [Weiler 2019] Weiler, L.; Vollpracht, A. (2019): Environmental compatibility of carbon reinforced concrete: Irrigated construction elements. In: Key Engineering Materials, 809, 314–319.
- [Weiler 2020a] Weiler, L.; Vollpracht, A. (2020): Leaching of Carbon Reinforced Concrete—Part 1: Experimental Investigations. In: Materials 13, 4405.
- [Weiler 2020b] Weiler, L.; Vollpracht, A. (2020): Leaching of Carbon Reinforced Concrete—Part 2: Discussion of Evaluation Concepts and Modelling. In: Materials 13, 4937.
- [Winkelkötter 2023] Winkelkötter, J.; Flamme, S.; Heller, N. (2023): Recycling and energy recovery of EPS-based ETICS waste in cement plants. In: ZKG Cement Lime Gypsum (1). Online verfügbar unter <https://www.zkg.de/en/artikel/recycling-and-energy-recovery-of-eps-based-etics-waste-in-cement-plants-3899020.html>, Zugriff am 3. Mai 2023.
- [Wicke 2015] Wicke, D.; Matzinger, A.; Rouault, P. (2015): Relevanz organischer Spurenstoffe im Regenwasserabfluss Berlins (Relevance of trace organic substances in the rainwater runoff in Berlin). Report. http://www.kompetenzwasser.de/fileadmin/user_upload/pdf/forschung/OgRe/Abschlussbericht_OgRe_final_rev2.pdf.

- [Wicke 2021] Wicke, D.; Tatis-Muvdi, R.; Rouault, P.; Zerball-van Baar, P.; Dünnbier, U.; Rohr, M.; Burkhardt, M. (2021): Bauen und Sanieren als Schadstoffquelle in der urbanen Umwelt. UBA-Texte 155/2021. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- [Ximenes 2015] Ximenes, S.; Brito, J Gaspar, P. L.; Silva, A. (2015): Modelling the degradation and service life of ETICS in external walls. In: Mater Struct 48 (7), S. 2235–2249.

A.1 Anhang

A.1.1 Begriffsklärungen unter Einbezug relevanter Normen

Putzmörtel nach [DIN EN 998-1]

Gemisch aus einem oder mehreren anorganischen Bindemitteln, Gesteinskörnungen, Wasser und gegebenenfalls Zusatzstoffen und/oder Zusatzmitteln, das als Außen- oder Innenputz verwendet wird.

Putzlage nach [DIN EN 998-1]

Lage, die in einem oder in mehreren Arbeitsgängen mit demselben Putzmörtel vor dem Verfestigen der vorherigen Putzlage (z. B. frisch auf frisch) ausgeführt wird.

Unterputz nach [DIN EN 998-1]

Untere Lage oder Lagen eines Putzsystems.

Oberputz nach [DIN EN 998-1]

Oberste Lage eines mehrlagigen Putzsystems, die eine dekorative Funktion erfüllen kann.

Mauermörtel nach [DIN EN 998-2]

Gemisch aus einem oder mehreren anorganischen Bindemitteln, Zuschlägen, Wasser und gegebenenfalls Zusatzstoffen und/oder Zusatzmitteln für Lager-, Stoß- und Längsfugen, Fugenglattstrich und nachträgliches Verfugen.

Bindemittel nach [DIN EN 998-2]

Material, das dazu dient, feste Partikel als einheitliche Masse zu verbinden, z. B. Zement, Baukalk.

Gesteinskörnung nach [DIN EN 998-2]

Körniges Material, das nicht aktiv an der Erhärtung des Mörtels beteiligt ist.

Zusatzmittel nach [DIN EN 998-2]

Material, das in kleinen Mengen dem Mörtel zugegeben wird, um bestimmte Veränderungen der Eigenschaften zu erzielen.

Zusatzstoff nach [DIN EN 998-2]

Fein zerteiltes anorganisches Material (das keine Gesteinskörnung oder kein Bindemittel ist), das dem Mörtel beigegeben werden kann, um Eigenschaften zu verbessern oder besondere Eigenschaften zu erzielen.

Außen- und Innenputz nach [DIN EN 15824]

Pastöses oder pulverförmiges Produkt, das aus einem Gemisch aus einem organischen Bindemittel oder mehreren organischen Bindemitteln, Füllstoffen und Gesteinskörnungen, Zusätzen/Hilfsstoffen mit Wasser oder einem Lösemittel besteht, und das zum Verputzen im Außen- oder Innenbereich verwendet wird.

Wärmedämmstoffe für Gebäude**Mineralwolle** nach [DIN EN 13162]

Dämmwolle, die aus geschmolzenem Stein, Schlacke oder Glas hergestellt wird

Matte nach [DIN EN 13162]

Flexibles, faseriges Dämmprodukt, das als Rolle oder flach geliefert wird, und das kaschiert oder umschlossen sein kann.

Platte nach [DIN EN 13162]

Hartes oder halbhartes (Dämm-)Produkt von rechtwinkliger Form und rechteckigem Querschnitt, dessen Dicke gleichmäßig und deutlich geringer ist als die anderen Abmessungen.

Kaschierung nach [DIN EN 13162]

Funktionelle oder dekorative Oberflächenschicht mit einer Dicke von weniger als 3mm, z. B. Papier, Kunststofffolie, Gewebe- oder Metallfolie, die nicht als einzelne Wärmedämmstofflage angesehen wird und nicht zum Wärmedurchlasswiderstand des Produktes beiträgt.

expandiertes Polystyrol (EPS) nach [DIN EN 13163]

Fester Dämmstoff mit Zellstruktur, der aus verschweißtem, geblähtem Polystyrol oder einem seiner Co-Polymere hergestellt wird und eine geschlossenzellige, luftgefüllte Struktur hat und in vier Arten unterteilt wird, die sich auf die Anwendung beziehen:

- EPS i: für tragende Anwendungen; dabei ist „i“ der Nennwert (als Druckspannung bei 10 % Stauchung angegeben);
- EPS S: für nicht tragende Anwendungen;

- EPS SD: für nicht tragende Anwendungen mit akustischen Eigenschaften;
- EPS T: für schwimmende Estriche

extrudierter Polystyrolschaum (XPS) nach [DIN EN 13164]

Harter Dämmstoff aus Schaumkunststoff, der durch Blähen und Extrudieren aus Polystyrol oder einem seiner Co-Polymere mit oder ohne Haut hergestellt wird und der eine geschlossenzellige Struktur aufweist.

Polyurethan-Hartschaum (PU) nach [DIN EN 13165]

Familie von Dämmprodukten aus duroplastischem Hartschaumstoff mit überwiegend geschlossenzelliger Struktur, die PUR- und PIR-Hartschäume miteinschließt.

PIR nach [DIN EN 13165]

Dämmprodukt aus duroplastischem Hartschaumstoff mit überwiegend geschlossenzelliger Struktur, hauptsächlich auf der Basis von Polyisocyanurat.

PUR nach [DIN EN 13165]

Dämmprodukt aus duroplastischem Hartschaumstoff mit überwiegend geschlossenzelliger Struktur, hauptsächlich auf der Basis von Polyurethan.

Phenolharzschaum nach [DIN EN 13166]

Harter Dämmstoff aus Schaumkunststoff, dessen polymeres Gerüst im Wesentlichen durch die Polykondensation von Phenol, seiner Homologen und/oder Derivaten mit oder ohne Aldehyde oder Ketone hergestellt wird.

Holzwolle nach [DIN EN 13168]

Lange Holzspäne, die in einem Holzspanverfahren gewonnen werden, das Holzwolle aus Spänen mit parallelen Kanten und einem Längen-Breiten-Verhältnis $\geq 20 : 1$ sicherstellt.

anorganischer Binder nach [DIN EN 13168]

Bindemittel, die für die Fertigung von Holzwolle-Produkten verwendet werden, sind Zement, Kombinationen aus Zement und Kalk, Magnesit und Gips.

Holzwolle-Platte nach [DIN EN 13168]

Hartes Dämmprodukt aus loser Holzwolle, die mit einem mineralischen Bindemittel gebunden wird und zur endgültigen Dicke gepresst wird.

Holzwolle-Mehrschichtplatte nach [DIN EN 13168]

Mehrschicht-Produkt, in welchem die Holzwolle mit einem mineralischen Bindemittel gebunden ist und auf einer oder beiden Seiten mit einem anderen Dämmstoff beschichtet ist.

Holzfaserdämmstoffe nach [DIN EN 13171]

Aus Holzfasern, gegebenenfalls unter Hinzufügung von Bindemitteln und/oder Zusatzmitteln, werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe mit einem Massenanteil von mindestens 80% Holzfasern; mechanisch gebundene Erzeugnisse fallen ebenfalls unter diese Begriffsbestimmung.

Abfall nach [KrWG 2023]

Abfälle im Sinne dieses Gesetzes sind alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Abfälle zur Verwertung sind Abfälle, die verwertet werden; Abfälle, die nicht verwertet werden, sind Abfälle zur Beseitigung.

Ende der Abfalleigenschaft nach [KrWG 2023]

Die Abfalleigenschaft eines Stoffes oder Gegenstandes endet, wenn dieser ein Recycling oder ein anderes Verwertungsverfahren durchlaufen hat und so beschaffen ist, dass

1. er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,
2. ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,
3. er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt sowie
4. seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt.

Aufbereitung (chemisch) nach [Kadner 2021]

Chemisches Recycling: Die Gesamtheit von Verfahren, die einerseits mehr als nur werkstoffliche oder physikalische Vorgänge zur Aufbereitung des Ausgangsstoffs nutzen, die aber andererseits nicht zur vollständigen chemischen Umsetzung (Verbrennung) mit Luftsauerstoff führen.

Aufbereitung (mechanisch/physikalisch) in Anlehnung an [Kadner 2021]

Werkstoffliches Recycling: Die Gesamtheit an rein mechanischen und physikalischen Aufbereitungsprozessen. Die Molekularstruktur an sich wird beim werkstofflichen Recycling beibehalten.

Beseitigung nach [KrWG 2023]

Beseitigung im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verfahren, das keine Verwertung ist, auch wenn das Verfahren zur Nebenfolge hat, dass Stoffe oder Energie zurückgewonnen werden. Anlage 1 enthält eine nicht abschließende Liste von Beseitigungsverfahren.

Energetische Verwertung in Anlehnung an [Kadner 2021]

Vollständige chemische Umsetzung (Verbrennung) mit Luftsauerstoff.

Stoffliche Verwertung nach [KrWG 2023]

Stoffliche Verwertung im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verwertungsverfahren mit Ausnahme der energetischen Verwertung und der Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder als anderes Mittel der Energieerzeugung bestimmt sind. Zur stofflichen Verwertung zählen insbesondere die Vorbereitung zur Wiederverwendung, das Recycling und die Verfüllung.

Verwendungszweck nach [EU 2011]

Beabsichtigte Verwendung des Bauprodukts, die in der jeweils anwendbaren harmonisierten technischen Spezifikation festgelegt ist.

Lebenszyklus nach [EU 2011]

Die aufeinanderfolgenden und untereinander verbundenen Phasen eines Bauproduktlebens von der Beschaffung der Rohstoffe oder der Gewinnung aus natürlichen Ressourcen bis zur Entsorgung.

End of Life

Nutzungsende. Statuswechsel: Ende des ursprünglich vorgesehenen Verwendungszwecks und Überführung in eine neue Phase der Bestimmung.

Produkt nach [DIN, DKE, VDI 2023]

Ist das Ergebnis von Arbeit oder eines natürlichen oder industriellen Prozesses.

Bauprodukt nach [EU 2011]

Jedes Produkt oder jeden Bausatz, das beziehungsweise der hergestellt und in Verkehr gebracht wird, um dauerhaft in Bauwerke oder Teile davon eingebaut zu werden, und dessen Leistung sich auf die Leistung des Bauwerks im Hinblick auf die Grundanforderungen an Bauwerke auswirkt.

Primärrohstoff nach [Geldsetzer 2021]

Bezeichnung für Substanzen natürlicher Herkunft (pflanzlich, tierisch oder mineralisch), die zur Weiterbearbeitung oder -verarbeitung bestimmt sind (vergleiche Grundstoffe sowie nachwachsende Rohstoffe).

Sekundärrohstoff (Rezyklat) nach [KrWG 2023]

Rezyklate im Sinne dieses Gesetzes sind sekundäre Rohstoffe, die durch die Verwertung von Abfällen gewonnen worden sind oder bei der Beseitigung von Abfällen anfallen und für die Herstellung von Erzeugnissen geeignet sind.

Nebenprodukt nach [KrWG 2023]

Fällt ein Stoff oder Gegenstand bei einem Herstellungsverfahren an, dessen hauptsächlicher Zweck nicht auf die Herstellung dieses Stoffes oder Gegenstandes gerichtet ist, ist er als Nebenprodukt und nicht als Abfall anzusehen, wenn:

1. sichergestellt ist, dass der Stoff oder Gegenstand weiterverwendet wird,
2. eine weitere, über ein normales industrielles Verfahren hinausgehende Vorbehandlung hierfür nicht erforderlich ist,
3. der Stoff oder Gegenstand als integraler Bestandteil eines Herstellungsprozesses erzeugt wird
4. und die weitere Verwendung rechtmäßig ist; dies ist der Fall, wenn der Stoff oder Gegenstand alle für seine jeweilige Verwendung anzuwendenden Produkt-, Umwelt- und Gesundheitsschutzanforderungen erfüllt und insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt führt.

Recycling-Baustoff (RC-Baustoff)

Im Allgemeinen: Sekundärrohstoffe für den Bau, die aus Abfällen aufbereitet wurden.

Im Besonderen: Sekundärrohstoffe für den Bau, die durch Aufbereitung mineralischer Bau und Abbruchabfälle entstehen.

Schadstoff, Verunreinigung, z. T. auch Störstoff (Kontamination, Belastung) nach [DIN, DKE, VDI 2023]

Ist eine unerwünschte Substanz oder unerwünschtes Material.

Deponie nach [KrWG 2023]

Deponien sind Beseitigungsanlagen zur Ablagerung von Abfällen oberhalb der Erdoberfläche (oberirdische Deponien) oder unterhalb der Erdoberfläche (Untertagedeponien). Zu den Deponien zählen auch betriebsinterne Abfallbeseitigungsanlagen für die Ablagerung von Abfällen, in denen ein Erzeuger von Abfällen die Abfallbeseitigung am Erzeugungsort vornimmt.

Verfüllung nach [KrWG 2023]

Verfüllung ist jedes Verwertungsverfahren, bei dem geeignete nicht gefährliche Abfälle zur Rekultivierung von Abgrabungen oder zu bautechnischen Zwecken bei der Landschaftsgestaltung verwendet werden. Abfälle im Sinne des Satzes 1 sind solche, die Materialien ersetzen, die keine Abfälle sind, die für die vorstehend genannten Zwecke geeignet sind und auf die für die Erfüllung dieser Zwecke unbedingt erforderlichen Mengen beschränkt werden.

WDVS nach [Heller 2022] in [ETAG 004 2013]

Die Systeme bestehen aus einem vorgefertigten Wärmedämmstoff, der auf eine Wand geklebt oder mit Hilfe von Dübeln, Profilen, Spezialteilen usw. mechanisch befestigt wird, oder aus einer Kombination von Kleber und mechanischen Befestigungen. Der Wärmedämmstoff ist mit einem Putz versehen, der aus einer oder mehreren (auf der Baustelle aufgetragenen) Schichten besteht, von denen eine mit einem Armierungsgewebe bewehrt ist. Der Putz wird direkt auf die Dämmplatten ohne Luftzwischenraum oder Trennschicht aufgebracht.

Open Loop (auch „out of box“, Recyclingsystem mit offenem Kreislauf) nach [Kadner 2021]

Beim Open-Loop-Recycling werden die Rezyklate auch in anderen Anwendungen verwendet. Das Open-Loop-Recycling ermöglicht ein breiteres Anwendungsspektrum der Rezyklate, was einen größeren Markt und damit gegebenenfalls eine höhere Nachfrage mit sich bringt – aber auch das Risiko für höhere Qualitätsverluste im Recycling.

Closed Loop (auch „in the box“, Recyclingsystem mit geschlossenem Kreislauf) nach [Kadner 2021]

Closed-Loop-Recycling bedeutet die Wiederverwendung von Rezyklaten in der gleichen Anwendung, aus der die Input-Materialien stammen. Ein Closed Loop im Sinne hundertprozentiger permanenter Kreislaufführung aller Materialien ist physikalisch nicht möglich und eine Annäherung daran thermodynamisch zunehmend suboptimal. Diese Idealvorstellung ist daher nicht erstrebenswert.

Upcycling nach [Kadner 2021]

Ein Verfahren zur Umwandlung von Materialien in neue Materialien mit höherer Qualität und gesteigerter Funktionalität.

Downcycling nach [Kadner 2021]

Ein Verfahren zur Umwandlung von Materialien in neue Materialien mit geringerer Qualität und reduzierter Funktionalität.

Urban Mining nach [UBA 2023]

Urban Mining ist die integrale Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers mit dem Ziel, aus langlebigen Gütern sowie Ablagerungen Sekundärrohstoffe zu gewinnen. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Güter noch aktiv genutzt und erst in absehbarer Zukunft freigesetzt werden oder ob sie bereits das Ende ihres Nutzungshorizonts erreicht haben. Das Urban Mining bezieht sich nicht allein auf die Nutzung innerstädtischer Lager, sondern befasst sich vielmehr mit dem gesamten Bestand an langlebigen Gütern. Darunter fallen beispielsweise Konsumgüter wie Elektrogeräte und Autos aber auch Infrastrukturen, Gebäude und Ablagerungen auf Deponien.

Dauerhaftigkeit (durability), Funktionsbeständigkeit, Haltbarkeit, Langlebigkeit nach [DIN, DKE, VDI 2023]

Fähigkeit, unter bestimmten Nutzungs-, Wartungs- und Reparaturbedingungen nach Bedarf zu funktionieren, bis ein eingeschränkter Zustand erreicht ist.

Nachhaltigkeit

Handlungsprinzip zur Ressourcennutzung, bei dem eine dauerhafte Bedürfnisbefriedigung durch die Bewahrung der natürlichen Regenerationsfähigkeit der beteiligten Systeme (v. a. Lebewesen und Ökosysteme) gewährleistet werden soll.

Aufrüstung (Upgrade) nach [Kadner 2021]

Verfahren zur Verbesserung der Funktionalität, Leistung, Kapazität oder Ästhetik eines Produkts.

Rückgewinnung (Recover) nach [DIN, DKE, VDI 2023]

Jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis Abfälle innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie andere Materialien ersetzen, die ansonsten zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen.

Instandsetzung (Refurbish) nach [DIN, DKE, VDI 2023]

Ein altes Produkt wiederherstellen und es auf den neuesten Stand bringen (auf ein bestimmtes Qualitätsniveau).

Wiederaufarbeitung (Remanufacture) nach [DIN, DKE, VDI 2023]

Verwendung von Teilen eines ausrangierten Produkts in einem neuen Produkt mit der gleichen Funktion (und im Neuzustand).

Reparatur (Repair) nach [Kadner 2021]

Prozess der Rückführung eines fehlerhaften Produkts in einen Zustand, in dem es seine bestimmungsgemäße Verwendung erfüllen kann.

Wiederverwendung nach [KrWG 2023]

Wiederverwendung im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verfahren, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, wieder für denselben Zweck verwendet werden, für den sie ursprünglich bestimmt waren.

Vermeidung nach [KrWG 2023]

Vermeidung im Sinne dieses Gesetzes ist jede Maßnahme, die ergriffen wird, bevor ein Stoff, Material oder Erzeugnis zu Abfall geworden ist, und dazu dient, die Abfallmenge, die schädlichen Auswirkungen des Abfalls auf Mensch und Umwelt oder den Gehalt an schädlichen Stoffen in Materialien und Erzeugnissen zu verringern. Hierzu zählen insbesondere die anlageninterne Kreislaufführung von Stoffen, die abfallarme Produktgestaltung, die Wiederverwendung von Erzeugnissen oder die Verlängerung ihrer Lebensdauer sowie ein Konsumverhalten, das auf den Erwerb von abfall- und schadstoffarmen Produkten sowie die Nutzung von Mehrwegverpackungen gerichtet ist.

Verwertung nach [KrWG 2023]

Verwertung im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis die Abfälle innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie entweder andere Materialien ersetzen, die sonst zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder indem die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen. Anlage 2 enthält eine nicht abschließende Liste von Verwertungsverfahren.

Vorbereitung zur Wiederverwendung nach [KrWG 2023]

Vorbereitung zur Wiederverwendung im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verwertungsverfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile von Erzeugnissen, 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.

Wartung (Maintenance) nach [Kadner 2021]

Kombination aller technischen und verwaltungstechnischen Maßnahmen, die dazu dienen, einen Gegenstand in einem Zustand zu erhalten oder wiederherzustellen, in dem er die geforderte Leistung erbringen kann.