

Antonia Hoffmann und Phil Ganz

DHI

Circular Economy im Bausektor

Chancen und Perspektiven unter Berücksichtigung von Stoffströmen



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



sowie die
Wirtschaftsministerien
der Bundesländer

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

2025

Ludwig-Fröhler-Institut
Forschungsinstitut im Deutschen Handwerksinstitut

Antonia Hoffmann und Phil Ganz

Circular Economy im Bausektor

Chancen und Perspektiven unter Berücksichtigung von Stoffströmen

Anmerkung:

Im Folgenden wird versucht, eine geschlechtergerechte und geschlechterneutrale Sprache zu verwenden. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung weiblicher, männlicher und diverser Sprachformen verzichtet. Alles, was in Bezug auf Personen, Rollen und Funktionen in der maskulinen Form dargeboten wird, gilt selbstverständlich gleichermaßen für alle Geschlechtsidentitäten.

Zusammenfassung

Die Circular Economy bietet für den Bausektor vielversprechende Chancen, um den Ressourcenverbrauch zu minimieren und die Umweltbelastung zu reduzieren. Diese Arbeit untersucht die Möglichkeiten und Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen. Es werden die im Baugewerbe viel genutzten Materialien Mineralik (insbesondere Beton), Holz, Metall, Ziegel, Kunststoffe, Dämmstoffe und Glas in Bezug auf ihre Verwendung, ihren aktuellen Stoffstrom sowie ihre aktuelle und zukünftige nachhaltige Nutzung analysiert. Zudem werden die rechtlichen Rahmenbedingungen in Deutschland und in der EU betrachtet. Abschließend werden im Rahmen der Arbeit Handlungsempfehlungen für die Wirtschaft und die Politik gegeben. Diese Empfehlungen zielen darauf ab, die Kreislaufwirtschaft im Bausektor zu fördern und die gesetzlichen Rahmenbedingungen zu verbessern, um das Baugewerbe nachhaltiger werden zu lassen. Die Arbeit bietet somit einen guten Überblick über die aktuelle Situation und liefert mit den genannten Handlungsempfehlungen einen wertvollen Beitrag zur Umsetzung der Circular Economy im Bausektor, auf den auch zukünftigen wissenschaftlichen Analysen aufbauen können.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis.....	VII
1 Einleitung	1
2 Theoretische Einführung	2
2.1 Circular Economy: Grundlagen und Konzepte	2
2.2 Rolle des Bausektors und des Handwerks in der Wertschöpfung.....	4
3 Methodik	5
4 Ergebnisse	6
4.1 Rolle der Circular Economy für den Bausektor	6
4.2 Stoffströme relevanter Baustoffe und deren zirkuläre Bedeutung	7
4.2.1 Mineralik	8
4.2.2 Holz	12
4.2.3 Metalle.....	16
4.2.4 Ziegel.....	19
4.2.5 Kunststoffe	22
4.2.6 Dämmstoffe	25
4.2.7 Glas.....	29
4.2.8 Übersicht alternative Baustoffe.....	32
4.3 Regularien und Gesetze.....	34
4.3.1 Europäische Ebene	34
4.3.2 Nationale Ebene	39
4.3.3 Besonderheiten des Begriffes „Abfall“	40
5 Diskussion	41
5.1 Interpretation und Handlungsempfehlungen	41
5.2 Zukunft der Circular Economy im Bauwesen.....	45
5.3 Limitationen der Arbeit.....	45
6 Fazit.....	46
Literaturverzeichnis.....	47

Abkürzungsverzeichnis

BDE	Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Kreislaufwirtschaft e. V.
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWSB	Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen
GEG	Gebäudeenergiegesetz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MEB	Mineralische Ersatzbaustoffe
NKWS	Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie
ZDH	Zentralverband des Deutschen Handwerks

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Butterflydiagramm der Ellen MacArthur Foundation	3
Abbildung 2: 10R-Rahmen der Circular Economy	4
Abbildung 3: Stoffstrom von Beton	10
Abbildung 4: Stoffstrom von Holz.....	14
Abbildung 5: Stoffstrom von Stahl	17
Abbildung 6: Stoffstrom von Ziegeln	21
Abbildung 7: Stoffstrom von Kunststoffen.....	24
Abbildung 8: Stoffstrom von Dämmstoffen.....	27
Abbildung 9: Stoffstrom von Glas	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verschiedene Dämmstoffe mit Anwendungsgebieten	26
Tabelle 2: Übersicht über die in der Arbeit aufgeführten alternativen Baustoffe	33

1 Einleitung

Die Bauwirtschaft ist einer der ressourcenintensivsten Sektoren weltweit und trägt erheblich zur Umweltbelastung bei. So ist sie weltweit für mindestens 37 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich und allein die Verarbeitung von Zement macht etwa 7 % der weltweiten Treibhausgasemissionen aus (United Nations Environment Programme [UNEP], 2023). Angesichts des Klimawandels, des Biodiversitätsverlusts und der Umweltverschmutzung, welche die Lebensgrundlagen der Menschheit gefährden, gewinnt das Konzept der Circular Economy (auch Kreislaufwirtschaft¹) im Bausektor immer mehr an Bedeutung (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz [BMUV], 2024f). Die Circular Economy zielt darauf ab, den Lebenszyklus von Materialien zu verlängern, Abfall zu minimieren und die Wiederverwendung und das Recycling von Baustoffen zu fördern (UNEP, 2023). Diese Forschungsarbeit untersucht die Chancen und Perspektiven der Circular Economy im Bausektor, wobei der Fokus auf den Stoffströmen und den rechtlichen Rahmenbedingungen liegt.

Die Circular Economy bietet zahlreiche Vorteile für den Bausektor. Durch die Wiederverwendung und das Recycling von Baustoffen können nicht nur Ressourcen geschont, sondern auch die Umweltbelastung reduziert werden (BMUV, 2024f). Jedoch stehen der Umsetzung der Circular Economy im Bausektor auch zahlreiche Herausforderungen gegenüber. Dazu gehört unter anderem die teils schwierige Auswahl von nachhaltigen Materialien, das Design von neuen Materialien, besonders in Bezug auf das Ende ihres Lebenszyklus sowie die gesetzlichen Voraussetzungen (Hossain et al., 2020).

Ein zentraler Aspekt dieser Arbeit ist die Analyse vielgenutzter Materialien im Bausektor sowie deren Stoffströme. Dabei wird untersucht, wie diese Materialien im Bausektor verwendet werden und wie sie weiterverwendet und recycelt werden können. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf den Möglichkeiten, Abfall zu vermeiden und die Ressourceneffizienz zu steigern. Zudem werden die rechtlichen Rahmenbedingungen betrachtet, die für die Umsetzung einer Circular Economy im Bausektor von entscheidender Bedeutung sind (BMUV, 2024f). Hierbei wird untersucht, welche gesetzlichen Vorgaben und Normen bereits existieren und welche zusätzlichen Maßnahmen erforderlich sind, um die Kreislaufwirtschaft im Bausektor zu fördern.

Die zentralen Forschungsfragen dieser Arbeit lauten:

- Welche Stoffströme existieren und stehen für die Circular Economy im Bausektor zur Verfügung?
- Welche Bedeutung hat die Circular Economy für den Bausektor?
- Wie verändert sich die Perspektive auf eine Circular Economy im Bausektor?

Zunächst wird der theoretische Hintergrund der Arbeit dargelegt, hierbei werden die Grundlagen der Circular Economy und ihre Konzepte sowie der Bausektor und die Rolle des Handwerks in der Wertschöpfung definiert. Anschließend wird die Methodik dieser

¹ Im Rahmen dieser Arbeit werden die beiden Begriffe Circular Economy und Kreislaufwirtschaft synonym verwendet.

Literaturarbeit erläutert. In den nächsten Kapiteln wird die Geschichte der Circular Economy sowie ihre Rolle im Bausektor beleuchtet. Anschließend werden die Materialien Mineralik, insbesondere Beton, Holz, Metall, Ziegel, Kunststoffe, Dämmstoffe sowie Glas auf ihren Stoffstrom, ihre Verwendung im Bausektor und ihre praktische zirkuläre Verwendung hin untersucht. Im darauffolgenden Abschnitt wird ein Abriss über die Regularien und Gesetze zum Thema Circular Economy im Bausektor in Deutschland und in der EU gegeben. Abschließend werden die Ergebnisse der Arbeit interpretiert, diskutiert und es werden Handlungsempfehlungen abgeleitet. Im letzten Schritt wird ein abschließendes Fazit gegeben.

2 Theoretische Einführung

2.1 Circular Economy: Grundlagen und Konzepte

Mithilfe einer Kreislaufwirtschaft kann dem Klimawandel und anderen globalen Herausforderungen wie dem Verlust der biologischen Vielfalt, Abfall und Umweltverschmutzung entgegengewirkt werden (Ellen MacArthur Foundation, 2024). Sie ist ein Produktions- und Verbrauchsmodell, bei dem bestehende Materialien und Produkte so lange wie möglich geteilt, geleast, wiederverwendet, repariert, aufgearbeitet und recycelt werden, um den Lebenszyklus der Produkte zu verlängern (Europäisches Parlament, 2023). Hierbei sollen Abfälle auf ein Minimum reduziert werden. Wenn ein Produkt das Ende seiner Lebensdauer erreicht, bleiben die Ressourcen und Materialien so gut wie möglich in der Wirtschaft und werden immer wieder weiterverwendet, um weiterhin Wertschöpfung zu generieren (Europäisches Parlament, 2023). Die Kreislaufwirtschaft steht im Gegensatz zum traditionellen, linearen Wirtschaftsmodell („Wegwerfwirtschaft“), das auf große Mengen billiger, leicht zugänglicher Materialien und Energie setzt (Europäisches Parlament, 2023). Laut der Ellen MacArthur Foundation basiert die Circular Economy auf drei Prinzipien (Ellen MacArthur Foundation, 2024):

Abfall und Verschmutzung beseitigen. Derzeit funktioniert unsere Wirtschaft nach dem folgenden Schema: Wir entnehmen Rohstoffe aus der Erde, stellen Produkte daraus her und werfen sie schließlich als Abfall weg. Dieses System kann langfristig nicht funktionieren, da die Ressourcen auf unserem Planeten endlich sind (Ellen MacArthur Foundation, 2022b). In einer Kreislaufwirtschaft werden Materialien am Ende ihrer Nutzung wieder in die Wirtschaft zurückgeführt. Auf diese Weise entsteht ein zirkuläres System. Viele Produkte könnten durch Wartung, Teilen, Wiederverwendung, Reparatur, Aufarbeitung, Wiederherstellung und als letzte Möglichkeit durch Recycling im Umlauf gehalten werden. Z. B. können Lebensmittel und andere biologische Materialien, die sicher in die Natur zurückgeführt werden können, Land regenerieren und die Produktion neuer Lebensmittel und Materialien fördern (Ellen MacArthur Foundation, 2022b).

Produkte zirkulieren. Materialien sollen entweder als Produkt oder, wenn das nicht mehr möglich ist, als Komponenten oder Rohstoffe weitergenutzt werden. Auf diese Weise entsteht kein Abfall und der innere Wert von Produkten und Materialien bleibt im Wirtschaftskreislauf erhalten. In Abbildung 1, dem Butterflydiagramm, ist dies gut zu erkennen (Ellen MacArthur Foundation, 2022a).

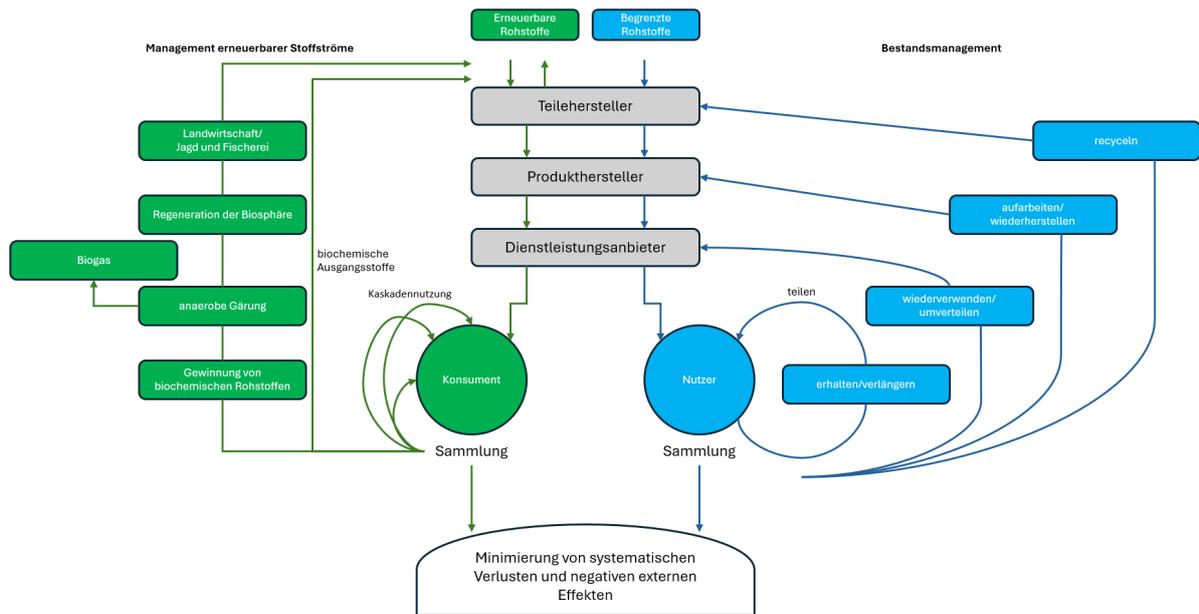


Abbildung 1: Butterflydiagramm der Ellen MacArthur Foundation

Anmerkung: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Ellen MacArthur Foundation, 2022a)

Regenerieren der Natur. Indem die Wirtschaft von linear auf zirkulär umgestellt wird, wird der Fokus von Ausbeutung zur Regeneration verlagert. Das heißt, wenn Produkte und Materialien im Kreislauf gehalten werden, wird weniger Land für die Gewinnung neuer Rohstoffe, z. B. aus Minen, benötigt (Ellen MacArthur Foundation, 2022c). Wenn wirtschaftliche Aktivitäten schrittweise von der Materialgewinnung entkoppelt werden, kann mehr Land an die Natur zurückgegeben und renaturiert werden. Zudem werden in einem regenerativen Modell natürliche Systeme nachgeahmt. Seit Milliarden von Jahren regenerieren sich diese natürlichen Systeme selbst, es gibt in der Natur keinen Abfall (Ellen MacArthur Foundation, 2022c).

Zudem gibt es die sogenannten R-Strategien, welche konkrete Konzepte sind, die auf Materialien und Produkte im Sinne der Circular Economy angewandt werden können. Diese werden in der Literatur von 3 Konzepten (3R) bis zu 10 Konzepten (10R) beschrieben (Reike et al., 2018). Auch das BMUV als Teil der deutschen Bundesregierung orientiert sich in ihrem Entwurf einer nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie an diesen Strategien (BMUV, 2024f). Bei 10R spricht man von folgenden Strategien zum Umgang mit Materialien und Produkten (Morseletto, 2020):

Verengung des Kreislaufes (narrowing)			Verlangsamung des Kreislaufes (slowing)				Schließen des Kreislaufes (closing)		
R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
Refuse	Rethink	Reduce	Reuse	Repair	Refurbish	Remanufacture	Repurpose	Recycle	Recover
Produkt überflüssig machen; Funktion anders bereitstellen	Intensivierung der Produktnutzung (z. B. gemeinsame Nutzung)	Steigerung der Effizienz; Verringerung des Rohstoffeinsatzes	Secondhand; Verwendung entsprechend der ursprünglichen Funktion	Reparatur und Wartung; Verwendung im Originalzustand	Wieder-aufarbeitung/ Restaurierung alter Produkte	Verwendung ausrangierter Teile für ein neues Produkt mit derselben Funktion	Verwendung ausrangierter Teile für ein neues Produkt mit anderer Funktion	Material verarbeiten, um seine Qualität zu erhalten oder zu verringern	Verbrennung von Material zur Energierückgewinnung
Hoch			Zirkularität				Gering		

Die Konzepte lassen sich in übergeordnete Gruppen zusammenfassen, R0-R2 beschreiben die intelligenterere Verwendung und Herstellung von Produkten, um Kreisläufe zu verengen. R3-R7 beschreiben Konzepte zur Verlängerung der Lebensdauer der Materialien, indem die Kreisläufe verlangsamt werden. R8 und R9 handeln von der sinnvollen Verwertung der Baustoffe (Morseletto, 2020).

2.2 Rolle des Bausektors und des Handwerks in der Wertschöpfung

Zum Bausektor zählen die Unternehmen des produzierenden Gewerbes, die im Hochbau (z. B. Wohnhäuser, öffentliche und industrielle Bauten) und Tiefbau (z. B. Straßen, Brücken) tätig sind. Hierbei wird zwischen Bauhaupt-, Ausbau- und Bauhilfsgewerbe unterschieden (Bundeszentrale für politische Bildung, 2016). Zum Bauhauptgewerbe zählen die Unternehmen, die den Rohbau von Hochbauten errichten, aber auch Tiefbauten inklusive Straßenbauten und Spezialbauten (z. B. Schornsteinbau, Dämmung und Abdichtung) durchführen und außerdem alle entsprechenden Reparatur- und Instandhaltungsbetriebe (Bundeszentrale für politische Bildung, 2016). In Deutschland ist das Bauhauptgewerbe in den Wohnungs-, Wirtschafts- und öffentlichen Bau unterteilt. Das nominale Bauvolumen verteilt sich zu 58 % auf den Wohnungsbau und zu 28 % auf den Wirtschaftsbau. Das Bauvolumen ist definiert als die Summe aller Leistungen, die auf die Herstellung und Erhaltung von Bauwerken gerichtet sind. Die Berechnung des Bauvolumens bezieht sich auf die Produktion im Bausektor². Das Ausbaugewerbe, auch Baunebengewerbe genannt, ist eine Subbranche des Baugewerbes. Es umfasst die Tätigkeiten von Bauunternehmen, die sich mit dem Ausbau von Bauwerken und der Bauinstallation beschäftigen (Bundeszentrale für politische Bildung, 2016). Das Bauhilfsgewerbe umfasst z. B. die Fassadenreinigung und die Gebäudetrocknung (Bundeszentrale für politische Bildung, 2016), aber auch Leistungen wie Bodenuntersuchungen, Transport von Erd- und Trümmernmassen, Abbrucharbeiten und Beseitigung von Bauschutt, Reinigungsarbeiten auf Baustellen oder den Einsatz von Spezialhebezeugen wie mobilen Kränen (bauprofessor.de, 2016).

Mit Blick auf das Handwerk waren im Jahr 2022 in Deutschland 388.000 Betriebe im Baugewerbe gemeldet. Diese Betriebe beschäftigten insgesamt 1.931.000 Personen und erwirtschafteten einen Umsatz in Höhe von 390 Milliarden Euro. Das Handwerk hat eine hervorgehobene Rolle im Baugewerbe, da sich 67 % der Betriebe in den Handwerkskammern organisiert haben und mit 1.531.000 Personen das Handwerk 79,3 % der beschäftigten Personen des Baugewerbes gestellt haben. Zudem kam mit 279 Milliarden Euro 71,6 % des erwirtschafteten Umsatzes von Handwerksbetrieben (Statistisches Bundesamt, 2022b). Das Handwerk wird vor allem durch kleine und mittlere Unternehmen (KMU) geprägt. Im Jahr 2022 gehörten 99,6 % der Handwerksunternehmen im Handwerk in Deutschland zu den KMU, diese Unternehmen erwirtschafteten 72,9 % der Umsätze und beschäftigten 80,7 % der im Handwerk tätigen Personen (Statistisches Bundesamt, 2022a).

² https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/analysen-kompakt/2021/ak-01-2021-dl.pdf;jsessionid=52B7F5D980ADC0BEF9C853D836382FD3.live21324?__blob=publicationFile&v=2

Die Aussichten für den Wirtschaftsbau deuten laut Prognosen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung auf einen rückläufigen Trend hin, der insbesondere durch die verstärkte Nutzung von Homeoffice bedingt ist. Die wirtschaftliche Expansion konzentriert sich daher vornehmlich auf Produktions- und Lagerflächen von Unternehmen. Im Vergleich dazu nimmt der Öffentliche Bau mit lediglich 18 % des nominalen Bauvolumens den geringsten Anteil ein. Dies umfasst sowohl öffentlichen Hochbau als auch Tiefbau, der maßgeblich zur gesellschaftlichen Entwicklung beiträgt. Bezüglich des Wohnungsbaus, der den größten Anteil repräsentiert, ergibt sich eine vielversprechende Perspektive für das Ausbaugewerbe, insbesondere in Groß- und Universitätsstädten. Diese Erkenntnis wird durch Prognosen von Forschungsinstituten, dem Sachverständigenrat sowie der Bundesregierung gestützt, die im Durchschnitt ein Wachstum von 1,5 - 1,8 % für die Bauinvestitionen prognostizieren (Bericht zur Lage und Perspektive der Bauwirtschaft 2021). Angesichts der steigenden Prognosen für Bauinvestitionen deutet sich an, dass die Circular Economy im Bau- und Ausbaugewerbe eine zunehmend wichtige Rolle spielen wird.

3 Methodik

Eine Literaturrecherche bildet die Grundlage der Arbeit und bietet einen umfassenden Überblick über den aktuellen Wissensstand im Bereich der Circular Economy, insbesondere in Bezug auf die ausgewählten Baumaterialien und deren Bedeutung für den Bausektor und das Bau- und Ausbauhandwerk. Zusätzlich wird ein Abriss über die aktuelle Rechtslage zum Thema Circular Economy in Deutschland und Europa gegeben. Die Quellen wurden hierbei systematisch ausgewählt, hauptsächlich aus der wissenschaftlichen Datenbank Google Scholar. Hierbei wurden wissenschaftliche Veröffentlichungen und Fachliteratur zur Beantwortung der Forschungsfrage herangezogen, um den zuvor genannten Überblick zu geben. Teilweise wurden auch Veröffentlichungen von Unternehmen und Fachmagazinen herangezogen. Zudem wurden Publikationen und Daten der EU-Kommission, von Bundes- und Landesministerien sowie von Bundesoberbehörden wie dem Umweltbundesamt verwendet. Der Schwerpunkt lag auf Veröffentlichungen der letzten vier Jahre, um die Aktualität der Literatur sicherzustellen.

Die Vorgehensweise bei der Literaturrecherche war wie folgt: In einem ersten Schritt wurden sowohl auf Google Scholar als auch in der normalen Google Suchmaschine die Begriffe „Kreislaufwirtschaft“ und teilweise auch „Nachhaltigkeit“ in Verbindung mit dem jeweiligen Kapitelthema (z. B. „Metalle“) eingegeben. Zudem wurde immer „Bausektor“, „Baubranche“ oder „Baugewerbe“ in die Suche hinzugefügt, zusätzliche Artikel wurden teilweise auch ohne diese Zusätze ermittelt. Sämtliche Suchen wurden darüber hinaus noch in englischer Sprache durchgeführt, um eine umfangreichere Suche zu ermöglichen. Hierbei wurden dann respektive die Begriffe „Circular Economy“, „sustainability“ und „in construction/in the construction sector“ verwendet. Bei den Suchen wurden anschließend, wenn möglich, Artikel mit einer möglichst großen Anzahl an Zitationen ausgewählt. In einem zweiten Schritt wurden bei den gefundenen Artikeln zunächst der Abstract und die Zusammenfassung am Ende durchgelesen. Wenn ein Artikel für die Arbeit relevant erschien, wurde er gespeichert, ansonsten aussortiert, wenn sich herausgestellt hat, dass der Artikel nur sehr entfernt oder gar nichts mit dem Thema der Arbeit „Circular Economy im Bausektor“ zu tun hat. Wenn sich durch den gesamten Text eines Artikels herausgestellt hat, dass er nicht zum Thema der Arbeit passt, wurde er in einem

dritten Schritt ebenfalls aussortiert. Veröffentlichungen von Unternehmen und Fachmagazinen sowie Publikationen und Daten der EU-Kommission oder von Ministerien wurden meist über Google gefunden und bei Relevanz abgespeichert.

4 Ergebnisse

4.1 Rolle der Circular Economy für den Bausektor

Die Entnahme und Verarbeitung mineralischer, metallischer und biogener Ressourcen tragen erheblich zu den globalen Treibhausgasemissionen bei (Grossarth, 2024). Seit 1970 hat sich die weltweite Nutzung von Rohstoffen mehr als verdreifacht. Hauptgründe dafür sind die ressourcenintensivere Lebensweise und die wachsende Weltbevölkerung, die sich im gleichen Zeitraum verdoppelt hat (Lutter et al., 2022). Bis Mitte des Jahrhunderts wird sich die Menge der weltweit entnommenen Rohstoffe nahezu verdoppeln (Grossarth, 2024). Ressourcenschonung ist daher auf allen Ebenen der Wirtschaft notwendig, insbesondere in der Bauwirtschaft, die in Deutschland und weltweit die größten Abfallmengen verursacht (Grossarth, 2024). Die Abfalldaten für Deutschland sind wie folgt (Statistisches Bundesamt, 2024):

Im Jahr 2022 wurden in Deutschland 399,1 Millionen Tonnen Abfälle entsorgt, Bau- und Abbruchabfälle machten mit 216,2 Millionen Tonnen den größten Anteil am Gesamtabfallaufkommen aus, nämlich 54,2 %. Von den 399,1 Millionen Tonnen Abfall wurden 326,5 Millionen Tonnen Abfälle verwertet, was einer Verwertungsquote von 81,8 % entspricht und damit gegenüber den Vorjahren ungefähr gleich ist (2021: 81,9 %; 2020: 81,7 %). Der Großteil der Abfälle (280,0 Millionen Tonnen bzw. 70,2 % aller Abfälle) wurde stofflich verwertet, also recycelt. Energetisch verwertet wurden 11,7 % (46,6 Millionen Tonnen) aller Abfälle, während 16,3 % (65,1 Millionen Tonnen) auf Deponien abgelagert wurden.

Ein weiterer wichtiger Punkt der Circular Economy im Bausektor ist der Fakt, dass Wohngebäude üblicherweise eine Lebensdauer von 80 bis 100 Jahren und Nichtwohngebäude etwa von 50 bis 80 Jahren haben (Pfeiffer et al., 2010). Dies ist von hoher Relevanz, da in Deutschland insbesondere in der Nachkriegszeit nach dem Zweiten Weltkrieg viele Gebäude gebaut, bzw. wieder aufgebaut wurden. Viele dieser Wohnhäuser weisen eine schlechte Energiebilanz auf. Eine Studie aus dem Jahr 2021, die vom Immobiliendienstleister McMakler in Auftrag gegeben wurde, bestätigt dies. Rund 64 % aller Wohngebäude in Deutschland wurden vor 1979 gebaut und bis heute nicht saniert. Etwa 66 % dieser Gebäude fallen in die schlechtesten Energieklassen F, G und H. Konkret bedeutet dies, dass es derzeit etwa 4 Millionen sanierungsbedürftige Häuser in Deutschland gibt (McMakler, 2021).

Eine Kreislaufwirtschaft schont Ressourcen und kann durch verschiedene Maßnahmen erreicht werden. Dazu gehören die Zertifizierungen für Urban Mining, digitale Baustoffbörsen und strengere abfallrechtliche Vorgaben, wie z. B. Rücknahmepflichten für Baustoffe oder verpflichtende Gebäudematerialpässe. Auch neue Normierungen und veränderte Bau- und Planungsprozesse sowie ein zirkuläres Produktdesign sind wichtig (Grossarth, 2024). Außerdem stehen Materialien im Mittelpunkt der Circular Economy des Bausektors, weshalb in den folgenden Kapiteln vielgenutzte Materialien im Bausektor und anschließend die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Circular Economy in Deutschland und der EU näher

beleuchtet werden, unter anderem die europäische Abfallrahmenrichtlinie und das daraus folgende Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Zudem muss erwähnt werden, dass die Vorstellung einer „industrialisierten Welt ohne Abfall“ zwar attraktiv, aber als starre Norm praxisuntauglich ist. Dennoch ist sie, vor allem für Unternehmen die innovativ sein wollen, ein wichtiger Teil der zirkulären Transformation. Innovationen in der Abfall- und Recyclingwirtschaft, wie z. B. die Trennung von Baustofffraktionen aus dem Abbruch, sind ebenfalls entscheidend (Grossarth, 2024).

4.2 Stoffströme relevanter Baustoffe und deren zirkuläre Bedeutung

Ein Stoffstrom beschreibt den Weg eines Materials von seiner Gewinnung als Rohstoff über die Veredelungsstufen bis hin zum Endprodukt, dessen Nutzung oder Verbrauch sowie gegebenenfalls Wiederverwendung oder Verwertung bis zur Entsorgung (Rothe & Glüge, 2024). Zu den Aufgaben des betrieblichen Stoffstrommanagements gehören unter anderem die Modellierung, Analyse und Bewertung von Stoffströmen, um deren Dokumentation zu verbessern und die zugrunde liegenden Produktionsprozesse zu optimieren (Rothe & Glüge, 2024).

Die Stoffstromanalyse umfasst beispielsweise:

- Die Erfassung und Darstellung der wichtigsten Material- und Energieströme.
- Die Identifizierung bisher unbekannter Stoffströme, wie etwa Abfall.
- Eine umfassende, ganzheitliche Betrachtung der unternehmerischen Stoffströme, um Transparenz zu schaffen.

Um das Stoffstrommanagement zu vereinfachen können Softwarelösungen wie die der Firma N1 Circular GmbH angewendet werden. N1 bietet Software für Unternehmen und Kommunen an, die sowohl zur Optimierung unternehmensinterner Prozesse als auch zur flexiblen Vernetzung von Unternehmen untereinander oder zum öffentlichen Teilen von Standort- und Leistungsdaten genutzt werden kann (N1 Circular GmbH, 2024). Die Überprüfung der Stoffströme dient dazu, Potenziale zur Kostensenkung oder Wertsteigerung zu erkennen, als Entscheidungshilfe für Neuanschaffungen zu fungieren und neue Strategien im Umgang mit umweltbelastenden Stoffen zu entwickeln. Zudem ermöglicht sie eine langfristige Betrachtung des Verbrauchs (Rothe & Glüge, 2024). Für die Wiederverwendung von Baumaterialien gibt es zudem auch Angebote wie die von Concular, welche eine Plattform bieten, auf der alte, bzw. nicht mehr gebrauchte Materialien wie z. B. Fenster aus einem abgerissenen Gebäude angeboten und so wiederverwendet werden können (Vallero, 2023). Eine Kombination der Services wie der von N1 und von Concular bietet z. B. die Firma Mineral Minds, die sowohl eine Plattform für Handel mit Abfällen und Schüttgut bereitstellt, als auch eine Softwarelösung für das firmeninterne Stoffstrommanagement anbietet (Mineral Minds, 2024). Für die Entsorgung mineralischer Abfälle kann zudem die Software Mineral Waste Manager der gleichnamigen Firma verwendet werden. Diese verbindet alle relevanten Marktteilnehmer miteinander, z. B. die Bauwirtschaft, Transporteure und Baustoffaufbereiter, und bietet eine digitale und KI-basierte Lösung zur Unterstützung der Auftragsabwicklung in diesem Segment (Mineral Waste Manager GmbH, 2024).

In den folgenden Kapiteln werden unterschiedliche Baustoffe beleuchtet. Hier wird jeweils der Stoffstrom des Materials betrachtet und erläutert, wo das Material verwendet wird. Zudem werden aktuelle praktische Beispiele für die zirkuläre Nutzung genannt sowie ein Ausblick auf die Zukunft des Materials im Bausektor gegeben. Die betrachteten Materialien sind Mineralik (hier hauptsächlich Beton), Holz, Metalle (hier hauptsächlich Stahl), Ziegel, Kunststoffe, Dämmstoffe und Glas und wurden ausgewählt, da mit ihnen viele Bereiche und verwendete Baustoffe des Gebäudebaus abgedeckt werden (Song et al., 2018).

4.2.1 Mineralik

Zur Mineralik zählen hauptsächlich Gesteinskörnungen aus denen Beton, Asphalt und Mörtel hergestellt werden, aber auch Asphaltgranulat aus altem Asphalt, Schlacken und Hüttensande aus der Eisen- und Stahlerzeugung sowie die Nebenprodukte aus Stein- und Braunkohlekraftwerken wie Steinkohleflugasche (Umweltbundesamt, 2024a). Asphalt besteht aus Gesteinskörnungen und dem Bindemittel Bitumen und wird meistens für Straßen, Wege und Plätze verwendet, aber auch im Hochbau, beispielsweise als Gussasphaltestrich oder für die Abdichtung von Bauwerken und Deponien (Deutscher Asphaltverband, 2024). Mörtel bezeichnet Baustoffe, die aus einem Bindemittel (meist Kalk oder Zement) und einer Gesteinskörnung mit einer maximalen Korngröße von 4 mm bestehen. Der einzige Unterschied zwischen Mörtel und Beton liegt in der maximalen Korngröße (Umweltbundesamt, 2019b), da bei Mörtel im Gegensatz zu Beton kein Kies hinzugegeben wird (Grimm, 2015), welcher im Beton Größen bis zu 45 mm haben kann (Biscopig, 2012). Mörtel wird für Fugen im Mauerwerk eines Gebäudes sowie als Putzmörtel als äußerster Belag an Wänden und Decken verwendet (Umweltbundesamt, 2019b).

Im folgenden Kapitel wird mit Beton eines der Hauptprodukte aus Mineralikstoffen behandelt. Beton ist einer der grundlegenden Baustoffe für den Gebäudebau und bietet unterschiedliche Anwendungsbereiche, die im weiteren Verlauf beleuchtet werden. Beton ist eine Mischung aus Zement, Gesteinskörnungen, Wasser und meistens Betonzusatzstoffen und -mitteln. Durch Ändern der Mischungen können die Eigenschaften von Beton verändert werden. Beim Frischbeton bestimmen Zement und Wasser die Verarbeitbarkeit und den Zusammenhalt und sobald der Beton erhärtet ist, bestimmen sie die Festigkeit und Dichtheit (H. Müller & Wiens, 2016).

Verwendung von Beton im Bausektor

Es gibt verschiedene Betonarten für unterschiedliche Einsatzbereiche, folgende sind gängige Beispiele (Baunetz_Wissen_, 2024a):

- **Estrichbeton** ist ein Spezialbeton zur Herstellung von Fußbodenschichten. Die Korngröße ist begrenzt, um dünne Schichten herzustellen.
- **Fließbeton** wird häufig zum Füllen von Schalungen (Gussformen für Beton) verwendet. Darüber hinaus eignet sich Fließbeton auch zum Gießen von Bodenplatten und Fundamenten, zur Herstellung von Betonfertigteilen sowie zur Instandsetzung von Betonbauwerken (Kortmann Beton GmbH & Co. KG, 2024).
- **Mineralbeton** ist ein hochverdichtetes Gemisch aus Kies, Wasser und Splitt oder Brechkies. Mineralbeton wird ohne Bindemittel, wie z. B. Zement, zu einem

hochstandfesten Baustoff. Er wird im Straßenbau verwendet oder als geeigneter Untergrund für Terrassen.

- **Porenbeton** enthält anstelle von Gesteinskörnungen Luftporen, die durch chemisches Aufschäumen einer Mörtelmischung erzeugt werden. Porenbeton wird als Mauerwerksbaustoff verwendet (Schober, 2005).
- **Schleuderbeton** wird zur Herstellung von Rohren, Pfählen und Masten verwendet. Für die Verdichtung werden schnellrotierende Stahlschalungen verwendet. Dadurch entsteht ein sehr fester und dichter Beton.
- **Sichtbeton** ist ein Beton mit hohen Anforderungen an die sichtbare Oberfläche.
- **Sperrbeton** ist ein wasserundurchlässiger Beton durch bestimmte Zusammensetzung, Verdichtung, Nachbehandlung und gegebenenfalls Zusatz von Sperrmitteln.
- **Spritzbeton** wird mit Druckluft in Schläuchen oder Rohrleitungen mit einer Spritzdüse flächig aufgetragen. Der Beton wird dadurch verdichtet. Spritzbeton wird vor allem im Tunnelbau eingesetzt.
- **Stahlbeton** kann hohe Druck- aber keine Zugspannungen aufnehmen. Zur Verstärkung werden tragende Stahleinlagen (Bewehrung) einbetoniert.
- **Vakuumbeton** entsteht durch den Einsatz von Saugmatten und Vakuumpumpen, wodurch ein Unterdruck erzeugt wird. Überschüssiges Wasser wird entzogen, die Rissbildung wird reduziert und es entstehen dichtere Oberflächen. Vakuumbeton wird z. B. im Brückenbau verwendet (Patel, 2024).

Aus Beton werden zudem verschiedene Bauteile gefertigt. Hierzu gehören unter anderem konstruktive Fertigteile und Mauersteine und -blöcke, welche von Maurern verwendet werden (Bundesagentur für Arbeit, 2024f). Zudem sind Pflastersteine und andere Produkte für den Garten- und Landschaftsbau, sowie Rohre, vorgefertigte Gebäude aus Betonfertigteilen (z. B. Garagen) und sonstige Fertigteile wie Dachsteine Produkte, die aus Beton gebaut werden (Umweltbundesamt, 2019a).

Aktueller Stoffstrom von Beton

Beton besteht hauptsächlich aus Zement, welcher aus Zementwerken kommt, Gesteinskörnungen, die z. B. aus Granit sind (Baunetz_Wissen_, 2024e) und Wasser. Bei Beton werden wie bei anderen Baustoffen, die bei der Produktion anfallenden Überschussmengen, Produktionsrückstände und Ähnliches wieder in den Produktionsprozess zurückgeführt. Altbeton entsteht beim Rückbau und der Sanierung von Straßen, Bauwerken und im Garten- und Landschaftsbau, hierbei zum Teil in Verbindung mit anderen Baustoffen und zum Teil als Monofraktion. Wenn Beton mit anderen Baustoffen verbunden ist, kann der Altbetonanteil der Bauschuttmassen bei > 50 Gewichts-% liegen (Umweltbundesamt, 2019a).

Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung der derzeitigen und potenziellen Verwendungswege von Beton und betrachtet hierbei die Art des Rückbaus. Unterschieden wird zwischen normalem selektivem Rückbau und ambitioniertem Rückbau mit höherer Selektivität. Bei normalem selektivem Rückbau wird in der Aufbereitung ein einstufiger Brecher für den Altbeton verwendet und anschließend werden die kleingebrochenen Betonteile gesiebt. Dieser hier entstehende Recycling-Baustoff (RC-Baustoff) kann für den Erd- und Tiefbau oder sonstige stoffliche Verwertung genutzt werden. Ungeeignete oder schadstoffbelastete

Bestandteile, die nach dem Sieben entstehen, müssen entsorgt werden. Bei ambitioniertem Rückbau wird der Altbeton zunächst vorgesiebt, dann ggf. mehrstufig im Brecher gebrochen, anschließend in einen Leichtstoffabscheider gegeben und zum Ende der Aufbereitung erneut gesiebt. Der hier entstehende qualifizierte RC-Baustoff kann für die Betonherstellung im Hochbau oder im Erd- und Tiefbau verwendet werden. Wie beim normalen selektiven Rückbau müssen ungeeignete oder schadstoffbelastete Teile, die nach der Aufbereitung verbleiben, entsorgt werden (Umweltbundesamt, 2019a).

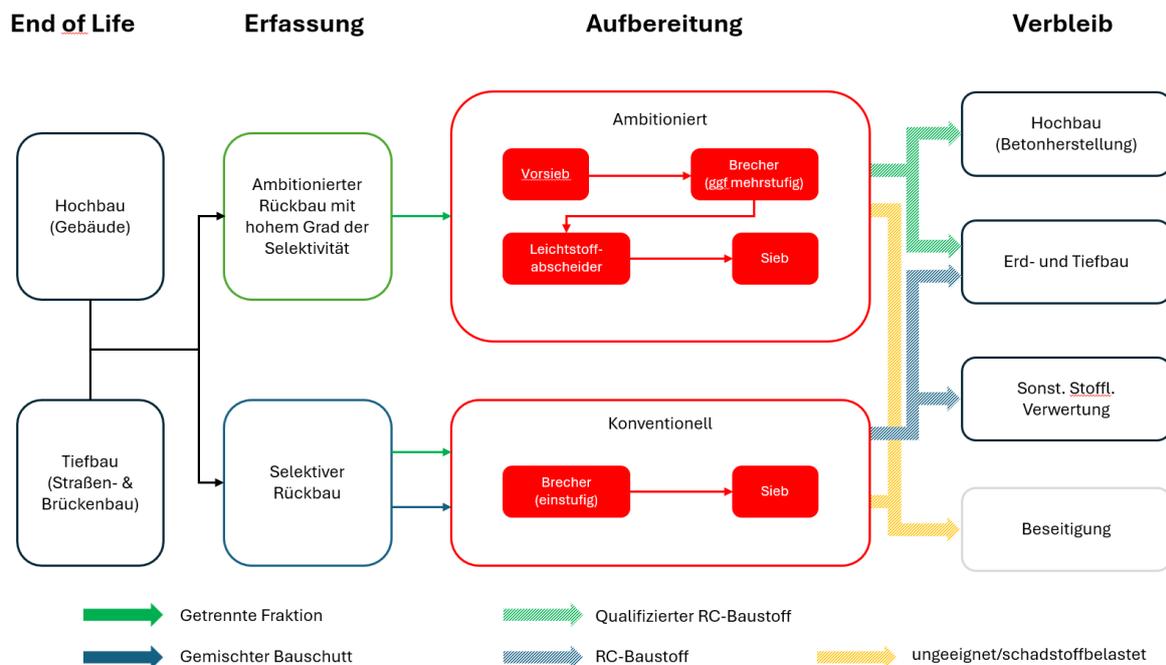


Abbildung 3: Stoffstrom von Beton

Anmerkung: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Umweltbundesamt, 2019a)

Es ist zudem zu sehen, dass normaler Beton bei konventioneller Aufbereitung nicht wieder als Baustoff zu verwenden ist. RC-Beton kann jedoch, wie im folgenden Kapitel beschrieben, teilweise wiederverwendet werden.

Praktische Beispiele zur zirkulären Nutzung von Beton

Bei der zirkulären Nutzung von Beton wird auf RC-Beton gesetzt, das ist Beton, bei dem eine **RC-Gesteinskörnung** (Recycling-Gesteinskörnung) zur Herstellung verwendet wird. Ein konkretes Beispiel liefert eine Studie der BTU Cottbus, bei der die Stoffflüsse und Energieaufwände von RC- und Standardbeton verglichen wurden. Hierbei war zur Herstellung von 1 m³ RC-Beton 1,08 t Betonbauwerk nötig, welches genutzt wird, um die im Verhältnis zu Standardbeton benötigten Mengen an Sand und Kies zu reduzieren (Mettke, 2010). In der Studie wurde auch der kumulative Energieaufwand der Herstellung erfasst. Dieser belief sich für RC-Beton pro m³ auf 2.320 MJ/m³ und für Standardbeton auf 2.560 MJ/m³, wobei bei beiden Herstellungsvorgängen der größte Teil der Energie für die Ausgangsstoffe aufgebracht werden muss (>80 %). Auch die CO₂-Emissionen (RC-Beton: 357.896 g/m³, Standardbeton: 397.951 g/m³), NO_x-Emissionen (RC-Beton: 822 g/m³, Standardbeton: 935 g/m³) und SO₂-Emissionen (RC-Beton: 104 g/m³, Standardbeton: 117 g/m³) liegen bei beiden Herstellungsarten nah

beieinander, jeweils wegen der hohen Emissionen bei der Herstellung der Ausgangsstoffe, wie schon bei den Energieaufwänden. Die Studie stellte fest, dass nur durch die Verwendung von Zement mit einem möglichst niedrigen Portlandzementklinkeranteil³ Emissionen und Energieverbrauch signifikant gesenkt werden können. Außerdem wurde festgestellt, dass die energetischen Vorteile des Einsatzes von RC-Gesteinskörnungen ausschließlich durch die Verkürzung der Transportwege entstehen. Dies bedeutet, dass nur in Gebieten mit hoher Bauaktivität, in denen auch eine hohe Abbruchrate herrscht, ein energetischer Vorteil erzielt werden kann (Mettke, 2010).

Zudem kann bei der Verwendung von Beton bereits bei der Planung des Bauteils oder Gebäudes auf die eingesetzte Menge geachtet werden. Ein effizienter Einsatz von Beton kann Material einsparen und somit auch Treibhausgasemissionen reduzieren (Marsh et al., 2022). Eine weitere Möglichkeit der nachhaltigen Nutzung von Beton ist eine gute **Instandhaltung**, z. B. durch Schutzanstriche (Marsh et al., 2022) oder eine Versiegelung, die den Beton vor Feuchtigkeit, UV-Strahlung, Chemikalien, mechanischer Beanspruchung und Korrosion schützen. Eine Versiegelung besteht meist aus Epoxidharz oder Kunstharzdispersionen, welche Polyurethan (PU) enthalten (sanier.de, 2024). Eine Möglichkeit zur nachhaltigen Nutzung von Beton liefert die Firma Neustark aus der Schweiz. Dabei wird Abbruchbetongranulat, das aus dem Beton abgerissener Gebäude gewonnen wird, mit CO₂ angereichert, das zuvor in Biogasanlagen gesammelt und anschließend verflüssigt wurde. Das so entstehende mit CO₂ angereicherte Betongranulat kann wie gewöhnliches Betongranulat verwendet werden, mit dem Vorteil, das hier CO₂ dauerhaft gespeichert wird (neustark AG, 2024).

Zukunft von Beton im Bausektor

Die Zukunft von Beton als Baumaterial hängt davon ab, ob sich nachhaltige Betonsorten im Baugewerbe durchsetzen können (Nilimaa, 2023). Da beim Bauen mit Beton viele Treibhausgase erzeugt werden, sind potenzielle grüne Alternativen zu gewöhnlichem Beton von großem Vorteil für die Umwelt. Mögliche Arten von nachhaltigem Nutzen von Beton sind beispielsweise die Verwendung von alternativen Betonzusatzmitteln wie Flugasche, Silikastaub⁴, Hochofenschlacke und Reishülsenasche. **Wasserdurchlässiger Beton** lässt Wasser hindurchsickern, wodurch weniger Abwasserrinnen benötigt werden und Regen einfacher in das Grundwasser gelangen kann. Zudem gibt es **reflektierenden Beton**, der durch reflektive oder helle Komponenten die Hitzeabsorption minimiert, sodass die Oberflächentemperatur von Bauten reduziert werden. Dies wiederum bedeutet, dass der Beton weniger Schäden durch Aufheizen erleidet und geringere Energiemengen zum Kühlen des Gebäudes erforderlich sind (Nilimaa, 2023). Zudem ist es vorteilhaft, lokale Materialien für den Betonbau zu verwenden, da auch der Transport hohe Emissionen verursacht. Innovative Technologien wie **selbstheilender Beton** können ebenfalls dazu beitragen, Beton nachhaltiger zu machen. Ein Beispiel ist selbstheilender Beton, welcher Risse aus eigener Kraft repariert, wodurch Korrosion reduziert wird und weniger Wartung erforderlich ist (Nilimaa, 2023).

³ Portlandzementklinker: Gemisch aus gemahlenem Kalkstein mit Ton, Sand und Eisenerz, welches zu Klinker gebrannt wird und anschließend mit Gips zu Zement vermahlen wird (Baunetz_Wissen_ (2024c)).

⁴ Silikastaub: Nebenprodukt bei der Herstellung von Silizium und Siliziumlegierungen (InformationsZentrum Beton (2019)).

Eine andere innovative Technologie ist **3D-gedruckter Beton**, der weniger Material benötigt und zudem weniger Abfall erzeugt. Hierbei spritzt eine Druckdüse eine feine Betonlinie auf eine Bodenplatte und zieht Schicht für Schicht Außen- und Innenwände hoch. Ein praktisches Beispiel ist das erste öffentlich geförderte Mehrfamilienhaus aus einem 3D-Drucker im nordrhein-westfälischen Lünen (Gröneweg, 2024). Eine weitere technologische Entwicklung ist der photokatalytische Beton, bei dem ein photokatalytisches Material wie Titandioxid in den Beton oder die Oberflächenbeschichtung eingearbeitet wird, um Schadstoffe wie NO_x unter Sonneneinstrahlung abzubauen. So wird zu einer verbesserten Luftqualität und einem nachhaltigeren städtischen Umfeld beigetragen (Nilimaa, 2023). Ein weiteres Beispiel liefert die Firma Carbocon, welche **Carbonbeton** verbaut. Carbonbeton besteht aus der Kombination aus Carbonfasern, die als Gelege oder Stäbe vorliegen, mit Feinbeton (z. B. von der Firma PAGEL Spezial-Beton GmbH & Co. KG) und ermöglicht eine Bauweise mit hoher Tragfähigkeit (CARBOCON GMBH, 2024). Bei Carbonbeton wird der Materialverbrauch verringert, indem Stahl durch Carbon ersetzt wird. Da Carbon nicht rostet, entfällt der zusätzliche Bedarf an Beton, der normalerweise zum Schutz des Stahls vor Korrosion erforderlich ist. Carbon ist zudem im Vergleich zu Stahl viermal leichter und sechsmal tragfähiger (CARBOCON GMBH, 2024). Carbonbeton eignet sich gut, um bestehende Bauwerke zu verstärken und instand zu setzen, z. B. Brücken oder Silos. Ein Nachteil des Carbonbetons ist jedoch der höhere Preis der Ausgangsmaterialien (z. B. Carbon, Feinbeton) im Vergleich zu herkömmlichem Stahlbeton (CARBOCON GMBH, 2024).

4.2.2 Holz

Holz ist einer der ältesten Baustoffe des Menschen und war lange Zeit der einzige Baustoff, der gleichermaßen Druck-, Zug- und Biegebeanspruchungen aufnehmen vermochte (Neuhaus, 2017). Holz besteht aus Pflanzenzellen, welche die Hauptbestandteile Cellulose, Hemicellulose und Lignin in folgendem Verhältnis beinhalten:

- Cellulose: zwischen 40 % und 60 %
- Hemicellulose: zwischen 15 % und 20 %
- Lignin: zwischen 15 % und 40 %

Der Anteil dieser natürlichen Substanzen ist bei jeder Holzart unterschiedlich verteilt. Generell enthalten Laubhölzer beispielsweise weniger Lignin als Nadelhölzer (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., 2024). Erfindungen wie Nägel, Stahlblechformteile (z.B. Winkel) und Klebstoffe (z.B. wasserfester Kunstharzkleber) haben das Bauen mit Holz noch vielfältiger gemacht (Neuhaus, 2017).

Verwendung von Holz im Bausektor

Im Bausektor werden sowohl Nadel- (z. B. Fichte, Kiefer, Weißtanne) als auch Laubhölzer (z. B. Rotbuche, Eiche, Ahorne) eingesetzt. Nadelhölzer werden im Bausektor für die Produktion von Balken, Sparren, Brettern, Schalhölzern und Spanplatten sowie anderen Produkten für den Innenausbau eingesetzt (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2024). Laubhölzer werden in der Bauindustrie hauptsächlich im Innenausbau, wie bei Treppen und Spanplatten, eingesetzt. Zudem gewinnen sie als Brettschichtholz im Konstruktionsbau zunehmend an Bedeutung (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2024). Holz wird hauptsächlich von Tischlern bzw. Schreincrn verarbeitet, um

die gewünschten Bauteile für den Gebäude- oder Innenausbau herzustellen. Zudem gibt es Schreinereibetriebe, die sich auf bestimmte Bereiche spezialisiert haben, wie z. B. den Treppenbau (Bundesagentur für Arbeit, 2024g). Auch andere Gewerke wie Zimmerer und Dachdecker verwenden Holz, z. B. zum Bauen von Holzkonstruktionen für Dachstühle (Bundesagentur für Arbeit, 2024c, 2024h).

Aktueller Stoffstrom von Holz

Holz ist ein gut wiederverwertbarer Rohstoff und eignet sich daher für nachhaltiges Bauen. Früher wurden vorwiegend Massiv- oder Vollholzelemente aus historischen Gebäuden für die Wiederverwendung in Betracht gezogen (Wimmers, 2017). Zukünftig werden zusätzlich auch industriell gefertigte Konstruktionsvollhölzer, Brett- und Balkenschichtholzbauteile, welche für konstruktive Zwecke jeglicher Art Anwendung finden, für eine Wiederverwendung zur Verfügung stehen (Dechantsreiter et al., 2015). Es ist jedoch zu beachten, dass Altholz von Altbauten so gut wie nicht wiederverwendet werden kann, ohne die Materialien der Bauteile voneinander zu trennen. Dieses Holz kann vorwiegend zur Herstellung von anderen Holzzeugnissen oder zur Energiegewinnung durch Verbrennen genutzt werden (D. Müller & Moser, 2022). Eine Wiederverwendung von Altholz ohne Trennung der Bauteile kann dann erfolgen, wenn die Bauteile standardisiert sind, z. B. bei einer Deckenkonstruktion eines Wohnungsbaus mit üblicher Spannweite, und wenn die Anforderungen der Bauplanung von den Bauteilen erfüllt werden (D. Müller & Moser, 2022).

In der folgenden Abbildung 3, können die Stoffströme der stofflichen und energetischen Holzverwendung in Bayern im Jahr 2022 entnommen werden. Hierbei wird zunächst zwischen Industrieholz, Stammholz, Brennholz und Waldhackgut unterschieden. Wichtig für den Bausektor ist im nächsten Schritt das Schnittholz, welches im Bau verwendet wird, z. B. für Böden. Am Ende des Holzzyklus wird das Altholz entweder energetisch verwertet oder wiederverwendet. Hervorzuheben ist, dass mehr als die Hälfte des Altholzes wiederverwendet wird (Metsch et al., 2024).

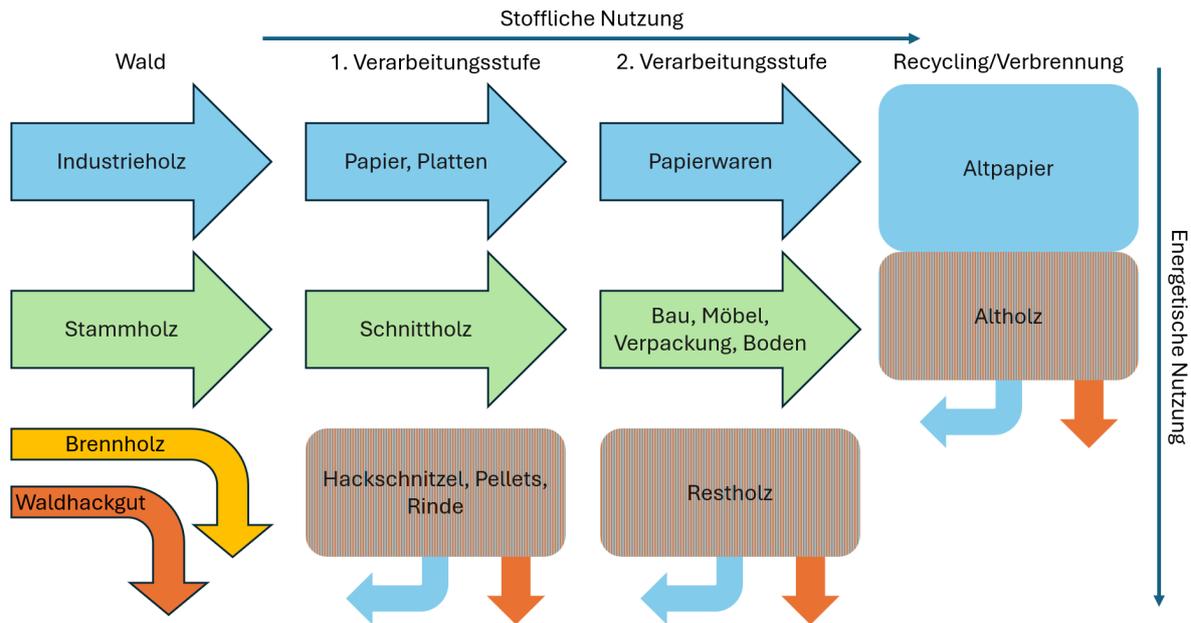


Abbildung 4: Stoffstrom von Holz

Anmerkung: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Metsch et al., 2024)

Praktische Beispiele zur zirkulären Nutzung von Holz

Holz gilt als nachhaltiges Baumaterial, da es in vielen Regionen der Welt wächst und erneuerbar ist. Zudem halten Gebäude aus Holz das CO₂ in sich, welches von den Bäumen vor ihrem Abholzen aufgenommen wurde. Eine Vielzahl historischer Holzgebäude veranschaulicht die Langlebigkeit und die herausragenden Eigenschaften von Holz als Baumaterial. Insbesondere das Verhältnis von struktureller Leistungsfähigkeit zu Eigengewicht im Vergleich zu Metallen ist als signifikant vorteilhaft zu erachten. Damit Holzgebäude eine Langlebigkeit erreichen können, ist es jedoch essenziell, beim Bauen auf grundlegende bautechnische Prinzipien zu achten (Unterrainer, 2018).

In Finnland spielen nachhaltige Produkte und Dienstleistungen, längere Materialkreisläufe, Innovationen, digitale Lösungen und die nachhaltige Nutzung erneuerbarer Ressourcen bereits eine wichtige Rolle. Auch der Bausektor in Finnland trägt wesentlich dazu bei, indem er sich auf kohlenstoffarme Lösungen und erhebliche Reduzierungen der Umweltauswirkungen konzentriert (Husgafvel & Sakaguchi, 2023). Beispielsweise werden gegenwärtig 90 % der neu errichteten Einfamilienhäuser in Holzrahmenbauweise erbaut, wobei 30 % dieser Gebäude hauptsächlich aus Baumstämmen bestehen. Außerdem ist in Finnland in den vergangenen Jahren eine vermehrte Errichtung von Mehrfamilienhäusern mit bis zu 14 Etagen zu verzeichnen. Diese Entwicklung ist unter anderem auf die Priorisierung des mehrstöckigen Holzbaus in der finnischen Politik seit den 1990er Jahren zurückzuführen (Ilgın & Karjalainen, 2022). In Deutschland wurde im Jahr 2023 durch den 20. Deutschen Bundestag die sogenannte Holzbauintiative mit dem Ziel eingeführt, die folgenden Punkte zu realisieren (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen [BMWSB], 2023):

1. Holz und andere nachwachsende Rohstoffe stärker als bisher und gleichzeitig ressourcenschonend im Hoch- und Ingenieurhochbau zu berücksichtigen,

2. die Quantität des Holzbaus zu steigern sowie die Innovation des Holzbaus zu befördern,
3. die Zirkularität des Holzbaus bei der Weiterentwicklung der Holzbauweisen und die Potenziale der Altholzverwertung zu erschließen und zu fördern,
4. den Holzbau und den Holzleichtbau insbesondere bei der Nachverdichtung im urbanen Raum zu berücksichtigen und
5. den seriellen Holzbau und die serielle Sanierung mit Holz und anderen nachwachsenden Rohstoffen zu steigern.

Ein weiterer Weg zur Verwendung von Altholz ist die Verarbeitung zu Hackschnitzeln. Die Holzrecycling & Biomasse Schmid GmbH aus Bayern verarbeitet z. B. jährlich 50.000 Tonnen Altholz zu Hackschnitzeln (Holzrecycling & Biomasse Schmid GmbH, 2024). Hackschnitzel können z. B. zur Herstellung von Holzfasernplatten oder durch Weiterverarbeitung zu Zellstoff für die Papierherstellung verwendet werden (AiR Abfall ist Rohstoff GmbH, 2024), zudem können sie thermisch verwertet werden (Holzrecycling & Biomasse Schmid GmbH, 2024).

Zukunft von Holz im Bausektor

Wie schon im vorherigen Kapitel erwähnt, eignet sich Holz auch zum Bauen von Hochhäusern. Ein wesentlicher Grund, warum Holz in diesem Kontext nur in geringem Maße zum Einsatz kommt, ist die weitverbreitete Angst vor Feuer. Stahl zeigt im Brandfall meist eine geringere Resilienz als Holz, da es sich schneller ausdehnt und somit schneller zum Kollaps eines Gebäudes führen kann (Wimmers, 2017). Auch das Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht ist bei Holz im Allgemeinen besser als bei Stahl. Daraus lässt sich ableiten, dass ein Bauwerk, das unter Einsatz von Stahl errichtet werden kann, gleichermaßen unter Einsatz von Holz errichtet werden kann. Zudem ist unabhängig davon, ob Massivholzplatten oder dicke Holzstützen für Böden oder Wände verwendet werden, das strukturelle Gewicht eines Holzgebäudes in der Regel wesentlich geringer als das eines vergleichbaren Gebäudes aus Beton. Diese Eigenschaften machen Holz, zumindest theoretisch, wettbewerbsfähig mit anderen, typisch genutzten Baustoffen (Wimmers, 2017).

Ein anderes Beispiel ist das Forschungsprojekt mit dem Namen „**Einfach Bauen**“, hier wurden drei baugleiche Häuser errichtet; eines aus Mauerziegeln, eines aus Leichtbeton und eines aus Holz. Es wurde bei den Bauten darauf geachtet, ausschließlich die jeweiligen Materialien zu verwenden, um gute eine gute Vergleichbarkeit gewährleisten zu können. Bei den Häusern wurden die Außenwände in Bezug auf ihre Dauerhaftigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dämmwirkung verglichen. Außerdem wurden die verschiedenen Gebäude auf Energieverbrauch und thermischen Komfort geprüft (Stumm, 2023). Hierbei wurde festgestellt, dass das Holzhaus hinsichtlich der Dämmwirkung und des Energieverbrauchs die besten Werte aufweist, während es in Bezug auf den thermischen Komfort die schlechtesten Werte erzielt. Zudem wurde die Wiederverwertbarkeit untersucht, hier wurde konkret festgestellt, dass beim Holzhaus etwa die Hälfte des Baumaterials wiederverwendet werden kann, was den besten Wert der drei untersuchten Gebäude darstellt (Stumm, 2023). Diese Erkenntnisse untermauern die Eignung von Holz als Baumaterial für den Bausektor der Zukunft.

Eine weitere innovative Möglichkeit, mit der in Zukunft mit Holz gebaut werden könnte, kommt von der Technischen Universität München (TUM), genannt „**Timber Earth Slab**“. Das Projekt konzentriert sich auf die Weiterentwicklung einer Holz-Lehm-Decke für den

mehrgeschossigen Holzbau (Technische Universität München, 2024). Timber Earth Slab versucht die Vorteile von Holzdecken (niedriger Primärenergiebedarf, Präfabrizierbarkeit, Recyclbarkeit) und Massivdecken (Feuerfestigkeit, Schallschutz, thermische Masse) zu vereinen. Es besteht aus einem tragenden, robotisch gefertigten und statisch optimierten Holzraster mit einer Lehmverfüllung, welche dank der Technologie des ETH-Spinoffs Oxara wie Beton gegossen werden kann, gefüllt ist. In der Design Factory der TUM wurde die Funktionstüchtigkeit des Konzepts durch einen 1:1-Prototypingprozess nachgewiesen und damit der Grundstein für weitere Forschung gelegt (Design Factory der TUM School of Engineering and Design, 2021).

Eine Studie des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung kommt zu dem Schluss, dass der Gebäudebau mit Holz in Europa das Potenzial hat, bis zum Jahr 2030 etwa 46 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent pro Jahr zu speichern (Hildebrandt et al., 2017). Um dieses Potenzial zu erschließen, sind verschiedene Maßnahmen erforderlich, um den Marktanteil von Holzwerkstoffen vor dem Hintergrund bestehender politischer Instrumente zu erhöhen, z. B. die schrittweise Einführung strengerer Vorschriften für den Handel mit Kohlenstoffemissionen oder mehr Anreize für die freiwillige Verwendung innovativer Holzbaustoffe (Hildebrandt et al., 2017).

4.2.3 Metalle

Metalle sind ein wichtiger Baustoff im Bausektor und zeichnen sich durch vielfältige Eigenschaften aus. Sie finden in vielen Bereichen des Gebäudebaus Anwendung, welche im weiteren Verlauf beleuchtet werden. Metalle unterscheiden sich nach ihren physikalischen und mechanischen Eigenschaften. Zu den physikalischen Eigenschaften zählen beispielsweise die Struktur (wie z.B. Dichte), die elektrische und thermische Leitfähigkeit, der Schmelzpunkt sowie die Magnetisierung. Zudem haben Metalle vorteilhafte mechanische Eigenschaften wie z. B. ihre Härte, Zugfestigkeit, plastische Verformbarkeit und ihr Verhalten bei hoher Temperatur (Hornbogen et al., 2019). Metalle sind reine chemische Elemente, die in der Natur meist nicht in reiner Form vorkommen, sondern als Erz (Chemie.de, 2024). Deutschland ist bei metallischen Rohstoffen stark auf Importe angewiesen, z. B. aus Ländern wie China, Australien oder Staaten in Südamerika wie Chile und Brasilien (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz [BMWK], 2021). Vor diesem Hintergrund sind eine nachhaltige Nutzung und das Recycling dieser Metalle von entscheidender Bedeutung.

Verwendung von Metallen im Bausektor

In der Baubranche werden verschiedene Metalle für unterschiedliche Anwendungen genutzt, hervorzuheben sind hierbei Stahl, Aluminium, Kupfer und Zink. Eisen, beziehungsweise seine Legierung Stahl, macht eine sehr große Menge an verwendeten Metallen beim Gebäudebau aus (Kober, 2023). So ist mit über 100 Millionen m³ jährlich, Stahlbeton der am meisten verbaute Baustoff in Deutschland (Schweier, 2022). Verwendet wird Stahlbeton z. B. für Profile und Stützen, Bewehrungen, aber auch Dacheindeckungen oder Fassadenverkleidungen und verarbeitet wird er meist von Beton- und Stahlbetonbauern (Bundesagentur für Arbeit, 2024b). Ein weiteres Metall, das in der Baubranche eine signifikante Anwendung findet, ist Aluminium. Dieses zeichnet sich durch ein geringes Gewicht und eine unkomplizierte Verarbeitung aus und findet beispielsweise in der Herstellung von Fensterrahmen, Türen, Rollläden,

Dacheindeckungen und Fassaden Verwendung. Aluminium kommt z. B. für Fensterrahmen, Türen, Rollläden, Dacheindeckung und Fassaden zum Einsatz. Des Weiteren findet Kupfer vielfach Verwendung, meist in Form von Messing, Rotguss, Bronze oder Tombak. Seine Einsatzgebiete umfassen Kupferdächer und -rohre, welche beispielsweise im Kontext der Wasserleitungstechnik verbaut werden. Darüber hinaus werden sie von Anlagenmechanikern im Bereich der Sanitär-, Heizungs- und Klimatechnik installiert (Bundesagentur für Arbeit, 2024a). Ein weiteres Beispiel ist Zink, welches entweder als Rostschutz in Form von Beschichtungen oder meist als Legierung (Titanzink) von Dachdeckern für Dachdeckungen und -rinnen verwendet wird (Bundesagentur für Arbeit, 2024c). Fallrohre und Fassadenverkleidungen werden auch teilweise aus Zink gefertigt (Kober, 2023).

Aktueller Stoffstrom von Metallen

Im Bausektor werden verschiedene Metalle benutzt, hauptsächlich Stahl, Aluminium, Kupfer und Zink (Kober, 2023). Im Folgenden wird der Stoffstrom von Stahl betrachtet, da dieser eine der meistgenutzten Metalllegierungen in der Baubranche ist. Stahl wird neben Gebäuden in vielen anderen Produkten verwendet (z. B. Autos, Schiffe), was bei der Betrachtung des Stoffstroms beachtet werden muss. Trotzdem wurden in Europa bis ins Jahr 2019 etwa 83 % des verwendeten Stahls für Gebäude und Infrastruktur verwendet (Rostek et al., 2022). Die folgende Abbildung 4 zeigt den Stoffstrom von Stahl in Europa aus dem Jahr 2019. Hierbei ist der komplette Weg vom Erzabbau bis zur Wiederverwendung aufgezeigt, jeweils mit einer Angabe, wo Verluste entstehen sowie, wo neuer Schrott für die Wiederverwendung aufkommt.

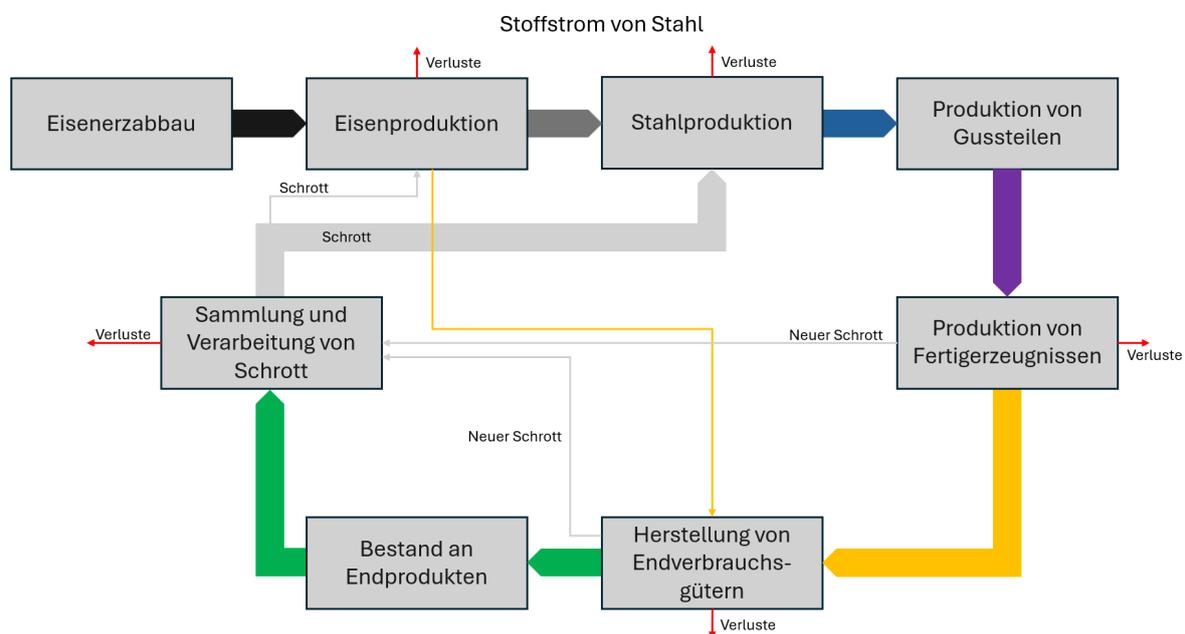


Abbildung 5: Stoffstrom von Stahl

Anmerkung: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Rostek et al., 2022)

Praktische Beispiele zur zirkulären Nutzung von Metallen

Am Ende der Nutzung eines Gebäudes kann ein großer Prozentsatz der verwendeten Metallbaustoffe direkt wiederverwendet werden, indem das Metall eingeschmolzen wird. So

wird es z. B. bei Gebäuden mit Tragwerken aus Metall oder auch bei allen elektrischen Leitungen gehandhabt (Metals for Buildings, 2024). Durch die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Teile kann die Nutzungsdauer entsprechend verlängert werden. Am Ende seiner Nutzungsdauer kann ein metallischer Baustoff vollständig recycelt werden. Aktuell werden über 95 % der in Gebäuden verwendeten Metallbaustoffe am Ende der Nutzung gesammelt (Metals for Buildings, 2024). Kleine und mittelständische Unternehmen spielen eine entscheidende Rolle beim Sammeln und Aufbereiten von metallhaltigen Baustoffen für das Recycling, wobei der hohe wirtschaftliche Wert entscheidend für diese systematischen Bemühungen ist (Metals for Buildings, 2024).

Die Metallrückgewinnung reduziert den Energiebedarf im Vergleich zur Primärproduktion, je nach Metall oder metallhaltigem Produkt, um 60 % bis 95 %. Damit stellt Metallrecycling eine Win-Win-Situation für Umwelt und Wirtschaft dar (Metals for Buildings, 2024). Angesichts der anhaltend hohen Nachfrage nach Metallen, sollte z. B. Stahl vorzugsweise direkt wiederverwendet werden. Wenn sich Stahl nicht für die direkte Wiederverwendung eignet, wird er eingeschmolzen, um neuen Stahl zu produzieren. In den Niederlanden werden mehr als 80 % des anfallenden Altmetalls recycelt, während fast 100 % als recycelbar gelten (Tam & Tam, 2006). Stahlschrott wird fast vollständig recycelt und kann wiederholt recycelt werden. In Japan wird Baustahl meist außerhalb der Baustelle gefertigt oder maßgenau zugeschnitten, wobei der Verschnitt vollständig recycelt wird, um Abfall vor Ort zu vermeiden (Tam & Tam, 2006). In Deutschland wird ein Drittel des hergestellten Stahls auf Basis von Stahlschrotten hergestellt, dieser kommt aus unterschiedlichen Quellen. Hier werden meist drei Kategorien unterschieden (Umweltbundesamt, 2020):

- Eigenschrott, der direkt in Stahlwerken anfällt.
- Neuschrott, der in der stahlverarbeitenden Industrie anfällt, z. B. Stanzabfälle im Automobilbau.
- Altschrott, der am Ende der Lebensdauer von Gütern über den Metallhandel sowie Verwertungsbetriebe erfasst und recycelt wird.

Zudem können bestimmte Bauteile aus Metallen direkt wiederverwendet werden, ein Beispiel hierfür ist ein Projekt des Baubüros in situ in Winterthur in der Schweiz. Hierbei wurden alte Stahlträger verwendet, um die Struktur eines Kopfbaus zu konstruieren. Zudem wurde eine alte Außentreppe wiederverwendet, um die Stockwerke des Baus zu verbinden. Durch die Wiederverwendung wurde der Fußabdruck in der Erstellung um 60 % gegenüber einem vergleichbaren konventionellen Neubau verringert (baubüro in situ ag, 2021).

Zukunft von Metallen im Bausektor

Wie in den vorherigen Kapiteln aufgezeigt, werden Metalle wie z. B. Stahl schon zu großen Teilen und insbesondere in großen Mengen recycelt. Da Stahl auch in Zukunft in großen Mengen im Bausektor benötigt wird, sind klimafreundlichere Wege zur Stahlproduktion nötig. Eine vielversprechende Methode zur Stahlproduktion ist die Wasserstoff- (oder übergangsweise auch Erdgas-) basierte **Direktreduktion von Eisenerz (DRI)** zu Eisenschwamm im Schachtofen. Hier entsteht schmelzfähiger Eisenschwamm, wobei als Reduktionsmittel Wasserstoff anstelle von Kokskohle zum Einsatz kommt, der klimaneutral erzeugt werden kann. In einem nächsten Schritt muss der Eisenschwamm zu Rohstahl veredelt

werden, dies kann wie beim Wiedereinschmelzen von Eisenschrott in einem Elektrolichtbogenofen oder in einem Einschmelzer passieren. Dieses Verfahren reduziert den CO₂-Fußabdruck um rund 97 % (von 1,7 tCO₂ auf rund 0,05 tCO₂) im Vergleich zu einem herkömmlichen Hochofen. In den letzten Jahren wurde weltweit ein bedeutender Ausbau der Kapazitäten für DRI-Anlagen angekündigt (Holtz et al., 2024). In Deutschland wird dieses Verfahren in Zukunft auch zum Einsatz kommen, so soll auf dem Werksgelände der thyssenkrupp Steel beim Südhafen in Duisburg bis 2027 eine erste Direktreduktionsanlage der Firma entstehen (thyssenkrupp Steel Europe AG, 2024).

Eine weitere potenziell in der Zukunft eingesetzte Technologie zur Stahlgewinnung ist die sogenannte **Molten Oxide Electrolysis (MOE)** der Firma Boston Metal. Boston Metal hat einen Elektrolyseprozess entwickelt, der die Notwendigkeit von Kohle in der Stahlproduktion eliminiert. Die MOE-Plattform von Boston Metal nutzt erneuerbare Elektrizität, um Eisenerz in hochwertiges flüssiges Metall umzuwandeln. Dieser direkte Ansatz eliminiert mehrere Schritte im Stahlherstellungsprozess und erzeugt nur Sauerstoff als Nebenprodukt. MOE benötigt kein Prozesswasser, keine gefährlichen Chemikalien oder Edelmetallkatalysatoren. Das Ergebnis ist ein sauberes, hochreines flüssiges Metall, das direkt weiterverarbeitet werden kann. Bis 2026 soll die Technologie marktreif sein und zudem keine CO₂-Emissionen verursachen (Boston Metal, 2024).

Neben der Herstellung von Metallen gibt es auch neue Verfahren die zukünftig im Bausektor eingesetzt werden können. Ein Beispiel hierfür ist der 3D-Druck, auch als additive Fertigung bezeichnet. Das sogenannte **Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)** ist ein Verfahren bei dem Stahl in Schichten produziert wird. Gegenwärtig findet die Anwendung vornehmlich im Bereich der Verbindungen Anwendung, wohingegen sie im Bereich der Herstellung vollständiger Strukturen aufgrund der maximalen Schichtdicke von 5 kg pro Stunde weniger relevant ist. Nichtsdestotrotz konnten durch den Einsatz der Anwendung signifikante Materialeinsparungen erzielt werden. Durch 3D-Druck gibt es die Möglichkeit auch neue Verbindungsarten und -strukturen zu entwerfen, was neue Design- und Produktionsstrategien ermöglicht (Lange et al., 2020). Stahl wird somit durch die Verbesserung von aktuellen Herstellungs- und Anwendungsverfahren sowie durch neue Technologien auch in Zukunft relevant bleiben.

4.2.4 Ziegel

Der Begriff „Ziegel“ wird oft als Kurzversion für Mauerziegel verwendet. Mauerziegel bestehen aus Ton, Lehm oder tonhaltigen Massen und werden mit oder ohne Zuschlagstoffe produziert. Diese Zuschlagstoffe werden hinzugegeben, um die Rohdichte zu bestimmen, so verringern Stoffe wie Sägemehl, Papierfangstoff oder Polystyrolkugeln die Rohdichte, während schwerere Stoffe diese erhöhen (Pröll, 2020).

Ziegel weisen gute bauliche Eigenschaften auf, z. B. (Pröll, 2020):

- Hohe Festigkeit bei niedriger Rohdichte
- Gute Wärmedämmung
- Bei entsprechender Konstruktion guter Schallschutz

- Natürliche Feuchtereglung (Mauerziegel können Raumluftfeuchte aufnehmen, speichern und bei günstigen klimatischen Bedingungen schnell wieder abführen)
- Optimaler Putzgrund für witterungs- und frostbeständige Fassaden
- Nichtbrennbares Baumaterial

Verwendung von Ziegeln im Bausektor

Ziegel sind eines der am häufigsten verwendeten Baumaterialien im Bausektor. Die Möglichkeiten der Verwendung von Ziegeln sind vielfältig, jedoch werden sie hauptsächlich für den Bau von Wohngebäuden verwendet (Bubalo et al., 2021). Hierbei werden Ziegel beim Bauen von Mauerwerk verwendet, diese Arbeit wird von Maurern ausgeführt (Bundesagentur für Arbeit, 2024f). Andere Verwendungen von Ziegeln sind z. B. als Dachziegel oder als Material für Wege. Hier eine Auswahl von verschiedenen Ziegelarten mit ihren Verwendungszwecken (Blauarbeit, 2023):

- **Vollziegel** haben keine Hohlräume, dafür einen guten Schallschutz und sind frostresistent, tragen aber wenig zur Wärmedämmung bei. Sie werden vor allem als äußerste Schicht einer Hohlsteinmauer verwendet.
- **Klinker** haben eine hohe Witterungsresistenz, werden nicht verputzt und als Klinkerfassade verwendet.
- **Lochziegel** sind Ziegel, die Hohlräume enthalten und somit besser dämmen als Vollziegel. Sie werden für Mauern verwendet.
- **Thermoziegel** sind Lochziegel, welche statt mit Luft mit Isolierschaum befüllt sind und besser isolieren.
- **Akustikziegel** sind Lochziegel, bei denen die Löcher nach außen zeigen. Sie schlucken Schall und bieten bessere Schalldämmung. Sie werden z. B. bei Eisenbahnstrecken oder stark befahrenen Straßen eingesetzt. Sie werden als Außenziegel vor andere, wärmeisolierende Ziegel gemauert.
- **Pflasterziegel** werden für Wege, Auffahrten oder Terrassen verwendet und sind deshalb witterungsbeständig.

Aktueller Stoffstrom von Ziegeln

Der Ton, welcher für die Produktion der Ziegel verwendet wird, stammt aus Tongruben, von denen sich einige in Deutschland befinden (SWR, 2021). Im Jahr 2022 wurden in Deutschland circa 11,7 Mio Tonnen Ton abgebaut (Bastian et al., 2023). Nach dem Abreißen eines Gebäudes können Ziegel recycelt werden und erneut für die Ziegelproduktion oder andere Zwecke verwendet werden. Altziegel können dann als hochwertiges Ausgangsmaterial für das Ziegelrecycling genutzt werden, wenn es gelingt, ziegelhaltiges Mauerwerk bereits beim Abbruch und Rückbau möglichst sortenrein von anderen mineralischen Bauabfällen zu trennen (Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V., 2024). Der Stoffstrom von Ziegeln ist simpel. Der genaue Prozess von der Produktion bis zum Recycling kann der Abbildung 5 entnommen werden. (López-García et al., 2021):



Abbildung 6: Stoffstrom von Ziegeln

Anmerkung: Eigene Darstellung in Anlehnung an (López-García et al., 2021)

Praktische Beispiele zur zirkulären Nutzung von Ziegeln

Neben Altziegeln, die beim Abreißen eines Gebäudes entstehen, fallen während der Ziegelproduktion Materialreste, sogenannter Brennbruch, an. Dieses Magerungsmittel⁵ kann den Bedarf an neuen Rohstoffen verringern und so bis zu 30% der benötigten Rohstoffe ohne Qualitätsverlust ersetzen. Ein Beispiel ist die Firma Wienerberger, ein großer Ziegelproduzent mit Sitz in Österreich. Bei Wienerberger wird bei der Produktion von **Poroton-Ziegeln** Brennbruch als Magerungsmittel eingesetzt. Diese Poroton-Ziegel können auf 10 m² Außenwand 882 kg CO₂ einsparen (Wienerberger, 2024).

Altziegel können auch zu **RC-Ziegeln** verarbeitet werden, die bei der Bauschuttzubereitung als Sand, Splitt oder Sand-Splitt-Gemisch gewonnen werden und als Schüttmaterial für Straßen oder Wege und andere Verkehrsflächen sowie im Garten- und Landschaftsbau Verwendung finden (Baustoff Recycling Bayern e.V. München, 2024). Eine weitere viel genutzte Weiterverwendung von Altziegeln ist die Herstellung von **Tennismehlen/-sand**, welche hauptsächlich aus Brennbruch bestehen und als Belag für Tennisplätze verwendet werden (Pröll, 2020).

Zukunft von Ziegeln im Bausektor

Für die zukünftige Herstellung von Ziegeln gibt es viele innovative Konzepte. Ein Beispiel ist die Verwendung von Oliventresteröl bei der Produktion, wodurch die Menge der benötigten

⁵ Magerungsmittel: Hierzu zählen alle nicht im Besitz der Tonbildsamkeit befindlichen Stoffe, die bei der Ziegelproduktion als Zusätze dienen (Niederleuthner (1928)).

Rohmaterialien des zur Herstellung benötigten Tons reduziert werden kann (López-García et al., 2021). Eine weitere innovative Idee ist die Nutzung von Zigarettenstummeln (auf Englisch cigarette butts; CBs), die bei der Herstellung in die Ziegel verarbeitet werden. Dies kann auf zwei Arten vorteilhaft sein, erstens könnten so Zigarettenabfälle sinnvoll genutzt werden und zweitens sind Ziegel mit CBs in Bezug auf den Energiebedarf günstiger zu produzieren. Jedoch muss erwähnt werden, dass CB-Ziegel teils schlechtere Eigenschaften als normale Ziegel haben, so ist die Druckfestigkeit beispielsweise niedriger. Nur 2,5 % der jährlichen weltweiten Ziegelproduktion müssten durch CB-Ziegel gedeckt werden, um die jährliche weltweite Zigarettenproduktion vollständig auszugleichen (Mohajerani et al., 2016). Eine weitere Option besteht in der Nutzung von Abfällen aus Papiermühlen und Baumwollfabriken im Rahmen der Ziegelproduktion. In der Tat werden auf diese Weise Ziegel hergestellt, die eine verbesserte Druckfestigkeit im Vergleich zu herkömmlichen Ziegeln aufweisen (Joglekar et al., 2018). Somit gibt es viele Möglichkeiten zur alternativen Herstellung von Ziegeln, die in Zukunft genutzt werden können, um eine umweltfreundlichere Produktion zu ermöglichen und gleichzeitig Abfallprodukte aus anderen Industrien sinnvoll weiterzuverwenden.

Eine Möglichkeit von Ziegeln ist die Verwendung von Solarzellen als Dachziegel. Als Beispiel stellt die Firma Meyerburger Solarzellen her, welche als Ziegeleratz fungieren. Die Integration dieser Solarzellen in Dächer ermöglicht zugleich die Erzeugung von umweltfreundlichem Strom (Meyerburger, 2024). Ein weiteres Beispiel kommt von der indischen Firma GreenJams, welche einen Ziegel entwickelt hat, der aus dem von der Firma entwickelten Agrocrete besteht. Agrocrete ist ein Material aus Ernterückständen und industriellen Nebenprodukten, die normalerweise verbrannt werden würden, und ist somit kohlenstoffneutral (GreenJams, 2022). Laut GreenJams weisen die Ziegel eine 3,5-mal höhere Wärmedämmung auf als traditionelle Tonziegel, kosten 50 % weniger und weisen dabei eine vergleichbare Stabilität auf. Berechnungen von GreenJams zeigen zudem, dass bei einer Fläche von 92,9 m² (1000 Quadratfuß) 4 Tonnen CO₂ gebunden werden und 13,71 Tonnen CO₂ vermieden werden (GreenJams, 2022). Diese Fakten stützen die Hypothese, dass Ziegel aus Agrocrete eine gute Alternative darstellen.

4.2.5 Kunststoffe

Kunststoffe, auch Plastik genannt (Hengstmann & Tamminga, 2022), sind hochmolekulare organische Verbindungen, die durch chemische Reaktionen entweder aus natürlichen hochmolekularen Stoffen oder durch Aneinanderlagern von Monomeren entstehen (Elsner, 2008). Die Vielfalt der Kunststoffe ergibt sich aus den zahlreichen Möglichkeiten der Monomerauswahl und ihrer Verknüpfung zu Ketten. Kunststoffe sind wichtige Werkstoffe, die sich gut verarbeiten und recyceln lassen und bieten sowohl Chancen als auch Risiken durch ihre Anpassungsfähigkeit (Elsner, 2008). Jährlich werden weltweit über 400 Millionen Tonnen Kunststoff produziert, wobei die Baubranche etwa 16 % davon ausmacht, was rund 65 Millionen Tonnen entspricht (Klimaforum Bau, 2021). Kunststoffe können die Energiebilanz von Gebäuden verbessern und zeichnen sich durch ihre lange Lebensdauer, Flexibilität sowie Beständigkeit gegen Fäulnis und Korrosion aus. Zudem sind Bauteile aus Kunststoff einfach zu installieren und zu warten (Klimaforum Bau, 2021). Es wurde festgestellt, dass das Recycling von Plastikmüll für Bauzwecke die Klimanachhaltigkeit erheblich verbessert, während recycelte Kunststoffe gleichzeitig als zuverlässiges Baumaterial dienen

können (Jawaid et al., 2023). Aufgrund der Herausforderungen in Bezug auf Dauerhaftigkeit, Tragfähigkeit und Brandbeständigkeit werden Kunststoffbaustoffe hauptsächlich in nicht tragenden Bauteilen verwendet (Klimaforum Bau, 2021).

Verwendung von Kunststoffen im Bausektor

Heutzutage sind im Bauwesen überall Materialien zu finden, die entweder aus Kunststoff bestehen oder Polymerverbindungen enthalten. Diese reichen von Fensterrahmen sowie Dach- und Dichtungsbahnen über Hartschaum-Dämmstoffe, Fugenmassen und Bindemittel bis hin zu Fußbodenbelägen. Zu den im Bau verwendeten Kunststoffen gehören z. B. Polyvinylchlorid (PVC), Polyethylen (PE), Polyisobutylen (PIB), Polymethylmethacrylat (PMMA, bekannt als „Plexiglas“) und Butyl- oder Silikonkautschuk (Grimm, 2024). Das Zeitalter der Polymere im Bauwesen begann Mitte der 1930er-Jahre mit den ersten Rohren aus hartem PVC. Seit den 1950er-Jahren werden auch zunehmend Fensterrahmen aus PVC hergestellt (Grimm, 2024). Die Bauindustrie ist der Hauptverwender von PVC und macht etwa 60-70 % des gesamten PVC-Verbrauchs aus, daher könnten bedeutende Veränderungen in den Anwendungen von PVC direkte Auswirkungen auf die weltweite Produktion und den Verbrauch dieses Materials haben. In der Bauindustrie findet PVC Anwendung in Rohren, Kabeln, Folien, Profilen, Platten, Befestigungselementen, Bodenbelägen, Tapeten und Beschichtungen (Petrović & Hamer, 2018). Für Rohre und andere Produkte wie Baufolien wird auch häufiger PE verwendet (Grimm, 2024). Handwerker, die oft mit Kunststoffen arbeiten, sind z. B. Anlagenmechaniker für Sanitärtechnik beim Verlegen von Rohren (Bundesagentur für Arbeit, 2024a), oder Elektroniker, welche Kabel für Hausgeräte oder Beleuchtung installieren (Bundesagentur für Arbeit, 2024d). Weitere häufig im Bauwesen eingesetzte Kunststoffe sind beispielsweise Butyl- und Silikonkautschuk für die Fugenabdichtung, PIB für Dach- und Dichtungsbahnen, PMMA für Produkte wie Lichtkuppeln und Weich-PVC für Bodenbeläge. Zudem gibt es eine große Gruppe von Kunstharzen, die insbesondere als Bindemittel und Zusatzstoffe in Mörteln und Beton verwendet werden (Grimm, 2024). Auch die meisten modernen Klebstoffe funktionieren auf Kunststoffbasis und auch Fliesenkleber auf Zementbasis enthält heute meist Kunststoffanteile, um ihn flexibler, bzw. weniger spröde zu machen. Zudem bestehen Dämmstoffe häufig aus Kunststoffen wie Styropor (expandiertes Polystyrol: EPS) oder PU (Grimm, 2024).

Aktueller Stoffstrom von Kunststoffen

Deutschland ist ein wichtiger Standort der Kunststoff- und Chemieindustrie sowie der Entsorgungs- und Kreislaufwirtschaft. Allerdings liegt der Anteil der aus Haushalten stammenden Kunststoffe, welche in den Produktionsprozess zurückgeführt werden, hierzulande bei unter 50 % (Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Kreislaufwirtschaft e.V [BDE], 2024). In Deutschland wurden im Jahr 2021 jedoch mehr als 99 % der Kunststoffabfälle stofflich oder energetisch verwertet, weniger als 1 % landeten auf der Mülldeponie. Es wurden 1,65 Mio. Tonnen Kunststoffrezyklat bei der Produktion von Kunststoffprodukten verwendet, was einen Anteil von ca. 11,7 % der gesamten Verarbeitungsmenge ausmacht (Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung, 2021). Abbildung 6 zeigt den Stoffstrom von Kunststoffen in Deutschland im Jahr 2021, und betrachtet

hierbei zunächst die Rohstoffversorgung, anschließend die Verarbeitung und den Verbrauch von Kunststoff sowie die Nutzung und zuletzt die Verwertung.

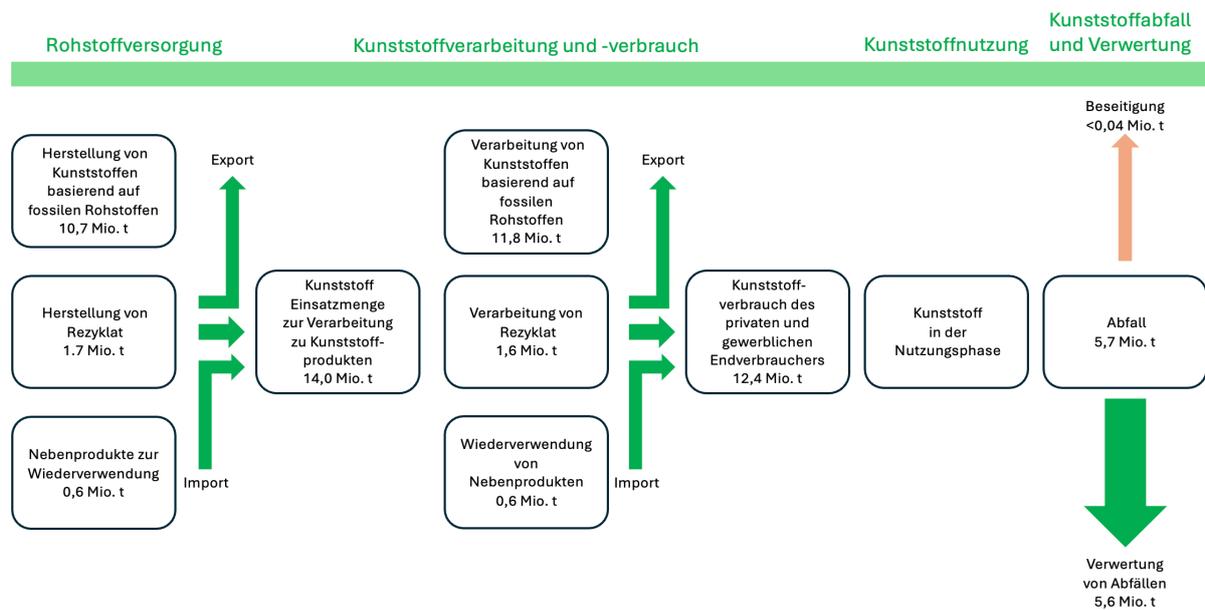


Abbildung 7: Stoffstrom von Kunststoffen

Anmerkung: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung, 2021)

Der Baubereich stellt in Deutschland nach dem Verpackungssektor das zweitgrößte Anwendungsgebiet von Kunststoffen dar. Im Jahr 2017 wurden in diesem Bereich etwa 2,6 Millionen Tonnen Kunststoffe verbaut (Umweltbundesamt, 2021). Bauprodukte aus Kunststoff, wie Rohre oder Fenster, zeichnen sich durch eine sehr lange Lebensdauer aus. Diese beträgt etwa 25-30 Jahre für Fußböden, 40-50 Jahre für Fenster und bis über 80 Jahre für Kunststoffrohre. Da Kunststoffe im Bauwesen erst seit etwa 40 Jahren verstärkt eingesetzt werden und der Verbrauch seitdem deutlich gestiegen ist, unterscheiden sich Verbrauchsmenge und Abfallaufkommen hier erheblich (Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung, 2021).

Praktische Beispiele zur zirkulären Nutzung von Kunststoffen

Eine Studie des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2021 zeigt, dass es an geeigneten Vorgaben für das Recycling von Kunststoffbauprodukten fehlt und die Mengen unzureichend erfasst werden. Um dies zu verbessern, schlägt das Umweltbundesamt vor, bautechnische Produktstandards um Vorgaben zur Dauerhaftigkeit, Recyclingfähigkeit und Rezyklateinsatz zu ergänzen. Kunststoffabfälle sollten besser getrennt gesammelt werden, da sie derzeit oft als Baumischabfälle entsorgt werden (Umweltbundesamt, 2021).

Recycling ist der Prozess, bei dem wiedergewonnene Materialien zur Herstellung neuer Produkte verwendet werden. Bei organischen Materialien wie Kunststoffen kann das auch die Energierückgewinnung umfassen, bei der das Material durch kontrollierte Verbrennung als Brennstoff genutzt wird. Diese führt jedoch zu einer geringeren Umweltleistung im Vergleich zur Materialrückgewinnung, da dieser Prozess die Nachfrage nach neuen Materialien nicht reduziert (Hopewell et al., 2009). Seit über 30 Jahren steht das Kunststoffrecycling im Fokus der Gesetzgebung und der öffentlichen Diskussion in Deutschland (BDE, 2024).

Es gibt zwei Hauptmethoden Kunststoffe zu recyceln, mechanisches und chemisches Recycling (Santos et al., 2024). Mechanisches Recycling stellt die in Recyclinganlagen hauptsächlich genutzte Methode sowie das Hauptverfahren in der Bauindustrie dar. Dabei wird das Polymerprodukt physisch auf Makroebene zerkleinert, ohne dass die Polymerketten, z. B. durch Schreddern, zerstört werden. Beim mechanischen Recycling entstehen z. B. Kunststoffharze, Granulat oder Plastikflocken (Santos et al., 2024). Im Bausektor können Kunststoffprodukte, die aus mechanischem Recycling gewonnen wurden z. B. als Hilfsmittel für den Bau von tragenden Strukturen wie Brücken verwendet werden (Schyns & Shaver, 2021). Beim chemischen oder rohstofflichen Recycling werden Kunststoffe depolymerisiert, das heißt, sie werden in ihre ursprünglichen Bausteine zurückverwandelt, entweder in Monomere, neue Kunststoffharze oder Energie (Santos et al., 2024). PE, welches in Rohren verwendet wird, kann z. B. chemisch recycelt werden, um wieder neue Bauteile aus PE zu produzieren (Achilias et al., 2007).

Zukunft von Kunststoffen im Bausektor

Die Zukunft von Kunststoffen im Bausektor eröffnet vielfältige Einsatzmöglichkeiten sowie innovative Technologien zur Wiederverwendung. So gibt es z. B. die Möglichkeit PVC durch einfaches Waschen in einem Lösungsmittel besser aus alten Produkten herauszufiltern (Santos et al., 2024). Außerdem können in Zukunft zur Sortierung von Kunststoffabfällen automatisierte Systeme zum Einsatz kommen, welche die Effizienz vom Vorsortieren der Abfälle deutlich erhöhen können und somit mehr Recycling zulassen (Mohan et al., 2021). Kunststoffabfälle können zudem als Bindemittel, Zuschlagstoff und Fasern in Zement verwendet werden, was sie zu einer praktikablen Alternative für zementgebundene Verbundwerkstoffe macht (Jawaid et al., 2023). Kunststoffabfälle könnten auch als Ersatz für herkömmliche Block-, Ziegel- oder Holzwände verwendet werden. Diese Kunststoffwände werden hergestellt, indem recyceltes Plastik unter Hitze zu Blöcken zusammengepresst wird. Es muss jedoch erwähnt werden, dass diese Kunststoffwände nicht für tragende Anwendungen geeignet sind, sondern nur für nichttragende Elemente wie z. B. Trennwände verwendet werden können (Awoyera & Adesina, 2020). Auch Dachziegel können aus Plastik hergestellt werden, so bietet z. B. die Firma Weber Plastik GmbH Plastikdachziegel an. Diese können z. B. für Gartenhäuser, Carports, Vordächer und für die Altbausanierung verwendet werden. Gemäß den Angaben des Herstellers Weber Plastik werden die Ziegel zu 100 % aus recyceltem Kunststoff gefertigt (Weber Plastik GmbH, 2024). Im Vergleich zu herkömmlichen Ziegeln soll zudem eine Reduktion des Plastikanteils um 20 % erreicht werden, da die erforderliche Überdeckung geringer ist. Abschließend muss noch hinzugefügt werden, dass eine vollständige Kreislaufführung von Kunststoffen nur durch klare Rahmenbedingungen und Vorgaben erreicht werden kann, die eine verbesserte Zusammenarbeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette fördern (BDE, 2024).

4.2.6 Dämmstoffe

Dämmstoffe sind Stoffe, die zur Wärme- oder Schalldämmung in Gebäuden verwendet werden. Sie können aus unterschiedlichen Materialien bestehen, hierzu gehören Kunststoffe wie EPS oder extrudierter Polystyrol-Hartschaum (XPS), aber auch Mineralfasern wie Stein- oder Glaswolle. Auch verwendet werden Holzweichfasern, Holzwolle-Leichtbauplatten, Blähton, Perlite, Schaumglas oder Kork. (Timm et al., 2019)

Verwendung von Dämmstoffen im Bausektor

Im Bausektor werden Dämmstoffe meist zur Wärmedämmung eingesetzt. Das heißt, dass mit ihnen ein angenehmes Klima in Gebäuden geschaffen wird, entweder indem Wärme, die durch Heizen erzeugt wird, nicht zu schnell entweicht oder indem bei hohen Temperaturen die Hitze aus dem Gebäude ferngehalten wird, beziehungsweise die durch Klimaanlage gekühlte Luft in den Gebäuden gehalten wird.

Eine richtige Verwendung von Dämmstoffen ist besonders dann schwierig, wenn alte Gebäude energieeffizient saniert werden sollen. Dies liegt zum einen daran, dass Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage sowie künstliche Beleuchtung und Beschattungssysteme häufig nicht mit intelligenten Steuergeräten ausgestattet sind und deshalb falsch verwendet werden, was zu Energieverschwendung führt (Ricciu et al., 2018). Zudem ist es schwierig alte Gebäude, besonders solche mit Baujahr vor 1960, energieeffizient zu gestalten, da hier häufig keinerlei Dämmsysteme verbaut sind und diese oft nur sehr schwer nachrüstbar sind (Ricciu et al., 2018). Dämmstoffe sind ein wesentlicher Bestandteil des energieeffizienten Bauens und des Wärmeschutzes. Die Rohdichte [kg/m^3] und die daraus resultierende Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK] sind entscheidende Kenngrößen zur Beurteilung ihrer Eigenschaften: Je niedriger die Rohdichte und der λ -Wert, desto besser ist das Dämmvermögen (Baunetz_Wissen_, 2024b). Bei der Planung von Neubauten oder Sanierungen müssen neben der Dämmleistung auch weitere Eigenschaften wie die Brandschutzklasse, Druckfestigkeit, Wasseraufnahme, Verrottung und der Energieaufwand in der Produktion bei der Bewertung eines Dämmstoffs berücksichtigt werden. Da alle Dämmstoffe unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, ist eine objektbezogene Festlegung erforderlich (Baunetz_Wissen_, 2024b).

Tabelle 1 ist eine Übersicht über verschiedene Dämmstoffe mit ihren Anwendungsfeldern zu entnehmen.

	Geneigte Dächer und Flachdächer	Umkehrdach	Außen- dämmung	Innen- dämmung	Erdberührte Wände	Unterhalb von erdberührten Bodenplatten	Oberhalb von Bodenplatten mit Trittschall- dämmung
Mineralwolle	X		X	X			X
Schaumwolle	X		X	X	X	X	
PU-Hartschaum	X		X				
EPS (Polystyrol- Hartschaum)	X		X	X	X		X
XPS (Polystyrol- Extruderschaum)		X	X		X		
Hanf	X		X	X			X
Holzfaser	X		X	X			
Schaumglasschotter						X	
Vakuum- Isolationspaneel				X			X
Kalziumsilikatplatten				X			

Tabelle 1: Verschiedene Dämmstoffe mit Anwendungsgebieten

Anmerkung: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Baunetz_Wissen_, 2024b)

Aktueller Stoffstrom von Dämmstoffen

Da Dämmstoffe aus unterschiedlichen Materialien bestehen, z. B. aus Kunststoffen wie PU oder Mineralstoffen wie Steinwolle, fallen die Stoffströme der Dämmstoffe teils

unterschiedlich aus. Allgemein lässt sich der Stoffstrom wie in Abbildung 7, die auf einem Bericht der ETH Zürich beruht, darstellen. Hier werden ölbasierte Dämmstoffe (EPS, XPS und PU-Schaum), Mineralwollen (Glaswolle und Steinwolle) und Holzfaserplatten berücksichtigt. Bei den Materialien, die recycelt werden, wird davon ausgegangen, dass Klebstoffreste vom Dämmstoff getrennt werden (Wiprächtiger et al., 2020).

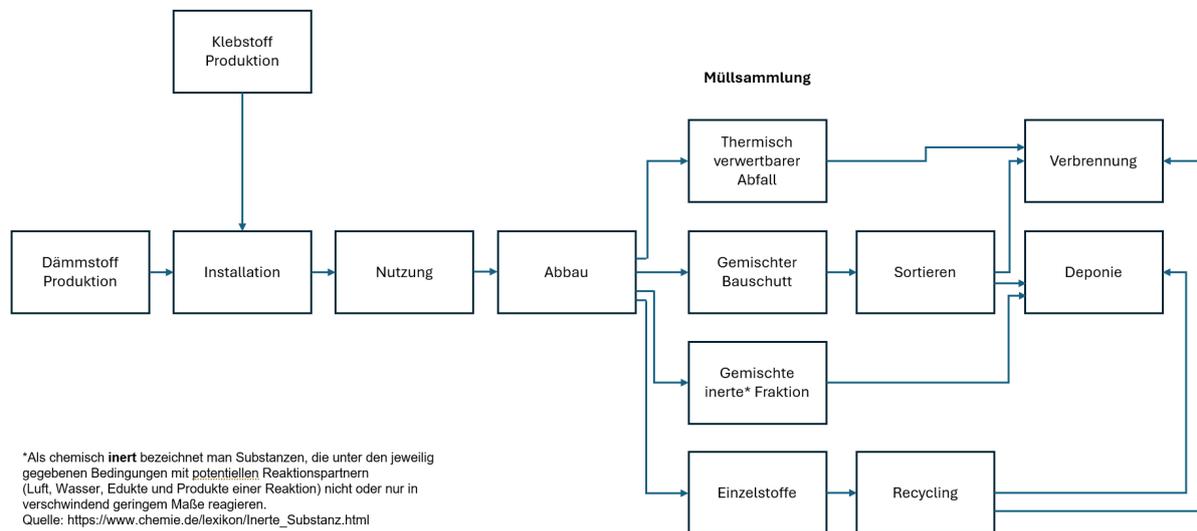


Abbildung 8: Stoffstrom von Dämmstoffen

Anmerkung: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Wiprächtiger et al., 2020)

Die Dämmstoffe werden beim Einbau häufig mit Klebstoffen angebracht. Nach dem Abbau der Dämmstoffe werden sie im nächsten Schritt gesammelt und in brennbares Material, gemischte Bauabfälle, Mischschutt, gemischte inerte Materialien oder als wiederverwertbarer Dämmstoff unterteilt. Nur wiederverwertbare Dämmstoffe können recycelt werden und wieder zur Produktion verwendet werden, der Rest wird thermisch verwertet oder in einer Deponie gelagert (Wiprächtiger et al., 2020).

Praktische Beispiele zur zirkulären Nutzung von Dämmstoffen

Aktuell steht bei der zirkulären Nutzung von Dämmstoffen das Recycling im Vordergrund. Für die unterschiedlichen Dämmstoffarten gibt es verschiedene Verfahren zur zirkulären Nutzung. Im folgenden Abschnitt werden einige Beispiele behandelt. Ein erstes Beispiel ist die Firma Rockwool, welche unter anderem drei Werke zur Steinwolleproduktion in Deutschland betreibt. Rockwool betreibt einen eigenen Recyclingservice namens Rockcycle®, welcher die Rückgabe von Steinwolleverschnitten und Altdämmstoffen vorsieht, sofern diese sortenrein sind. Rockwool beschreibt ihre Steinwolle als vollkommen recycelbar, somit können die bei Rockcycle® abgegebenen Steinwollereste in neuen Steinwolleprodukten von Rockwool wiederverwendet werden (DEUTSCHE ROCKWOOL GmbH & Co. KG, 2024). Weltweit wurden im Jahr 2023 50.200 Tonnen von Steinwolle durch Rockwool recycelt (ROCKWOOL Group, 2024).

Ein weiteres Beispiel ist das Recycling von EPS-Hartschaum. Hierbei kann ein selektives Lösungsmittelverfahren eingesetzt werden, um EPS-Abfälle zu einem neuen Polystyrol-

Rohstoff zu verarbeiten, der in neuen EPS-Dämmstoffplatten verwendet werden kann (Industrie-verband Hartschaum e. V [IVH], 2024). In einer Anlage in den Niederlanden können jährlich 3.000 Tonnen recycelt werden (IVH, 2024).

Ein letztes Beispiel ist das Recycling von Glaswolle. Glaswolle besteht schon in der Herstellung aus bis zu 80 % Altglas (Reinhardt et al., 2022). Zudem kann gebrauchte Glaswolle in einer durch OxyFuel betriebenen Glasschmelzwanne in gemahlenem Zustand zugeführt werden und so zur Produktion von neuer Glaswolle beigemischt werden. Hierbei wird von einem rückführbaren Anteil von 10 % ausgegangen (Reinhardt et al., 2022). Es gibt zudem noch die Möglichkeit, die alte Glaswolle zu Glasfritten zu verarbeiten, welche dann wie das in der normalen Produktion verwendete Altglas benutzt werden kann. Das Verarbeiten zu Glasfritten wird auch in mit OxyFuel betriebenen Glaswannen durchgeführt. Das Verfahren hat in Frankreich bereits Anwendung gefunden (Reinhardt et al., 2022).

Zukunft von Dämmstoffen im Bausektor

Es gibt bereits gute Verfahren wie Dämmstoffe in Zukunft nachhaltiger hergestellt werden können. Eines dieser Verfahren ist die Verwendung von altem PET, z. B. aus PET-Flaschen zur Konstruktion von Dämmmaterial. Hierbei wird 100 % recyceltes PET zur Herstellung verwendet, sodass sich die entstehenden kg CO₂ äquivalent um 46 % reduzieren (Intini & Kühtz, 2011). Die Firma Pflüger TOB GmbH ist ein Produzent von Dämmstoffen aus PET und gibt an, dass ihre PET-Dämmstoffe auch nach der Nutzung wieder zu 100 % recycelbar sind. Das sogenannte PETtherm 50 kann für die Dämmung von Gebäudehüllen, Dächern, Böden und Innenwänden verwendet werden (Pflüger TOB GmbH, 2024).

Eine weitere Methode, die angewandt werden könnte, ist die Produktion von Jute-Wollfaser-Dämmplatten, hierbei werden die Jutefasern aus gebrauchten Kaffeesäcken und die Wolle aus gebrauchten Matratzen gewonnen (Majumder et al., 2023). Die Kombination aus 40 % Jute, 40 % recycelter Wolle und 20 % Polyester ergibt sehr leichte Platten mit einer sehr porösen Struktur, welche die Wärmeleitfähigkeitswerte garantieren, die denen von Industrieplatten aus Schafwolle und ähnlichen Polyesteranteilen entsprechen (Majumder et al., 2023).

Eine andere Methode wie Dämmstoffe in Zukunft im Bausektor verwendet werden können, ist die Verwendung von Aerogel-Dämmungen. Aerogel besteht aus Siliciumdioxid und weist sehr gute Stoffeigenschaften auf, z. B. eine Wärmeleitfähigkeit, die 2 - 2,5-mal niedriger ist als die von herkömmlicher Mineralwolle (Baetens et al., 2011). Aerogel-Dämmstoffe können zudem so konstruiert werden, dass sie gut durchsichtig sind, was eine Anwendung bei Fenstern erlaubt. So könnten Fenster besser isoliert werden, wobei eine Energieeinsparung von 19 bzw. 34 % für 13,5 und 20 mm dickes Glas möglich ist. Allerdings kommt es zu starker Lichtstreuung, wenn das Aerogel-Fenster direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist, sodass sich Fenster mit Aerogel-Dämmung gut für Nordfenster und für Tageslichtkomponenten im Allgemeinen eignen (Baetens et al., 2011).

Eine weitere Innovation ist die Nutzung von Popcorn als Grundmaterial für Dämmstoffe (Richter, 2021). Hierbei wird zunächst Mais zerkleinert und dann expandiert, also zu Popcorn verarbeitet. Dieses wird anschließend mit Maisstärke überzogen damit es wasserabweisend wird und mit pflanzlichen oder tierischen Proteinen verklebt, bevor es zu Platten gepresst wird.

Diese Platten können, wie herkömmliche Dämmplatten, verwendet werden. Nachhaltig sind die Platten, da die Dämmplatten Bruchmais enthalten, der in der Lebensmittelproduktion nicht genutzt wird. Zudem sind auch die anderen Bestandteile Nebenprodukte aus der Industrie. Die Platten können nach Nutzung entweder zerkleinert und wiederverwendet werden oder innerhalb von sechs bis acht Wochen vollständig auf dem Kompost abgebaut werden (Richter, 2021).

4.2.7 Glas

Glas ist eines der ältesten Kulturgüter der Menschheit (Schneider et al., 2016) und ein Werkstoff, ähnlich wie Keramik, Metalle oder Kunststoffe. Glas wirkt glatt, bricht scharfkantig, ist oft durchsichtig und glänzend. Durch seine porenfreie Oberfläche unterscheidet sich eine Glasscheibe jedoch von der körnigen und porösen Struktur einer Keramik (Schaeffer & Langfeld, 2020). Glas entsteht durch das Schmelzen verschiedener Rohstoffe. Der Hauptbestandteil ist Quarzsand mit einem Anteil von 60 %. Weitere 20 % bestehen aus Kalk und Dolomit, die als Stabilisatoren dienen. Die restlichen 20 % setzen sich aus Soda und Sulfat zusammen, die als Flussmittel den Schmelzprozess beschleunigen (Nippon Sheet Glass Co., Ltd., 2024). Die Eigenschaften von Glas sind im Wesentlichen folgende (Schneider et al., 2016):

- Transparenz bzw. Transluzenz bei geringer Lichtreflexion im sichtbaren Bereich des Lichts
- chemische Beständigkeit gegenüber sehr vielen Medien
- hohe Steifigkeit – im Bereich anderer Konstruktionswerkstoffe
- nahezu linear-elastisches Werkstoffverhalten bis zum Bruch
- geringe Temperatúrausdehnung – ähnlich derjenigen anderer Konstruktionswerkstoffe
- relativ konstante Materialeigenschaften im Gebrauchstemperaturbereich im Bauwesen
- hohe Sprödigkeit
- relativ geringe Zugfestigkeit und große Streuung der Festigkeitswerte aufgrund der hohen Sprödigkeit und der nicht vermeidbaren Oberflächenschäden mit Mikrorissen an der Glasoberfläche

Verwendung von Glas im Bausektor

Glas wird im Bausektor hauptsächlich wegen seiner Transparenz verwendet, jedoch auch als Gestaltungselement, Lichtquelle, Sonnenschutz oder als passiver Temperaturregler (Bammer, 2018). Die Anwendungsbereiche von Glas umfassen Fenster, Fassaden und Dächer. Innerhalb von Gebäuden findet man durchsichtige Schiebeelemente, wie in Küchen und Bädern sowie transparente Trennwände, z. B. in Großraumbüros. In der Architektur wird Glas auch für Fahrstühle und Balkongeländer eingesetzt (ALLPLAN, 2017). Ein Beispiel für einen Handwerksberuf, der viel mit Glas arbeitet, ist das Glasereigewerk, das vorwiegend aus kleineren Betrieben (<10 Mitarbeiter) besteht (Matthis, 2024) und z. B. Fenster und Türen verglast (Bundesagentur für Arbeit, 2024e). Im Folgenden werden verschiedene im Bausektor verwendete Glasarten aufgezählt (Schneider et al., 2016):

- Basisprodukte, hierzu zählen folgende:
 - **Floatglas** ist das heute am meisten verwendete Bauglas und wird z. B. für Fenster, Schaufenster oder Fassadenverglasungen verwendet.
 - **Gussglas** ist meistens nahezu undurchsichtig, jedoch lichtdurchlässig und wird z. B. für Türen, Trennwände oder Brüstungen und Geländer verwendet (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2024).
 - **Gefärbtes Glas** besteht bis zu 99,5 % aus Floatglas, die restlichen 0,5 % bestimmen die Färbung des Glases. Diese Glasart wird hauptsächlich aus ästhetischen Gründen eingesetzt.
- **Verbundglas** besteht aus einer Glasscheibe mit einer oder mehreren Scheiben aus Glas und/oder Verglasungsmaterial aus Kunststoff, die durch eine oder mehrere Zwischenschichten miteinander verbunden sind. Verbundglas ist somit robuster als herkömmliches Glas.
- **Vakuum-Isolierglas** besteht aus mindestens zwei Glasscheiben, die durch einen oder mehrere Abstandhalter voneinander getrennt und im Randbereich versiegelt sind. Isolierglas wird meist zur Wärme- oder Schalldämmung eingesetzt (Matthis, 2024).
- **Schutzverglasung** ist Glas zur Einbruchhemmung, Beschusshemmung oder Explosionshemmung.

Aktueller Stoffstrom von Glas

Im Folgenden wird der Stoffstrom von Glas betrachtet. 2022 wurden in Deutschland 7,9 Mio. Tonnen Glas hergestellt, davon 2,2 Mio. Tonnen Flachglas, welches im Bausektor verwendet wird (Umweltbundesamt, 2023). Glas hat den Vorteil, dass es unendlich oft wiederverwendet werden kann, indem es immer wieder eingeschmolzen und zu neuen Produkten verarbeitet wird. Da recyceltes Glas bei niedrigeren Temperaturen schmilzt als die Rohstoffe, die zur Glasherstellung benötigt werden, reduziert sich der Energiebedarf, wenn Glasscherben hinzugefügt werden. Grob geschätzt sinkt der Energiebedarf um etwa 0,2 bis 0,3 %, wenn 1 % Altglas dem Schmelzofen beigelegt wird. Das Einschmelzen von Altglas spart Rohstoffe wie Quarzsand, Soda und Kalk. Dies trägt auch zur Verringerung der Umweltbelastungen bei, die dem Herstellungsprozess zugerechnet werden können. Zudem muss eingeschmolzenes Altglas nicht deponiert werden. (Umweltbundesamt, 2023)

In den letzten Jahren wurden die Sammelsysteme zur Erfassung möglichst sortenreiner und fremdstoffarmer Flachglasprodukte im weiterverarbeitenden Gewerbe verbessert. Altglas, das die vorgegebenen Reinheitsanforderungen nicht erfüllt, muss aufbereitet werden (Umweltbundesamt, 2023). Altglas, das aus Qualitätsgründen nicht für die Herstellung neuer Flachgläser geeignet ist, kann in geringem Umfang bei der Produktion von Behälterglas sowie bei der Herstellung von Dämmwolle, Schmirgelpapier, Schaumglas und Glasbausteinen verwendet werden. (Umweltbundesamt, 2023)

Abbildung 8 veranschaulicht den Stoffstrom von Glas, beginnend mit der Produktion und der anschließenden Verwendung. Im Anschluss wird die Sammlung von Altglas dargestellt, gefolgt von der Sortierung und Wiederaufbereitung (Rose et al., 2019).

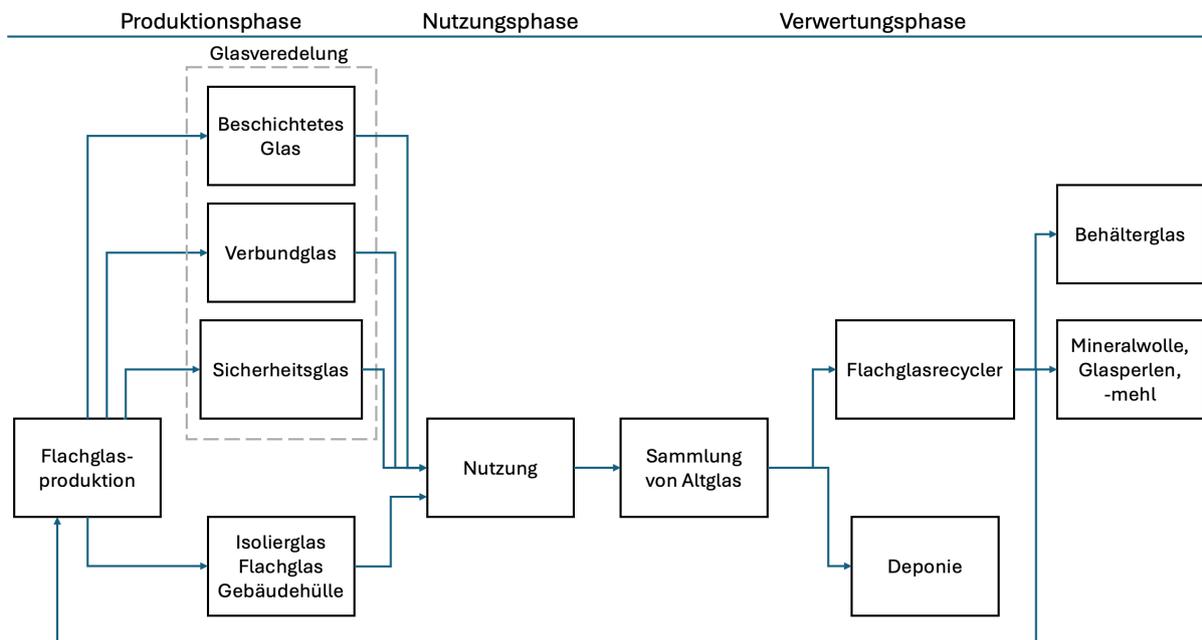


Abbildung 9: Stoffstrom von Glas

Anmerkung: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Rose et al., 2019)

Praktische Beispiele zur zirkulären Nutzung von Glas

Für Altbauglas findet nur selten ein geschlossener Recyclingkreislauf statt und die meisten Glashersteller nutzen wenig Altbauglas in der Neuproduktion. Stattdessen wird es oft zusammen mit anderen Baumaterialien zerkleinert und auf Deponien gelagert oder für minderwertige Füllungen wiederverwertet (Entwistle, 2024). Die Gründe hierfür sind in den Herausforderungen zu finden, die mit dem Recycling von Fensterglas einhergehen. Zudem werden von den Bauherren sehr hohe Anforderungen an die Eigenschaften der Glasprodukte gestellt, die durch recyceltes Glas nicht erfüllt werden können (Matthis, 2024).

Hierbei sind hauptsächlich zwei Faktoren zu beachten. Erstens ist Fensterglas heutzutage ein komplexer und teilweise hochentwickelter High-Tech-Werkstoff. Es muss frei von unerwünschten Zusatzstoffen sein und zudem farblich kontrollierbar (Baunetz_Wissen_, 2024d). Zweitens kann das zur Verfügung stehende Fensterglas je nach ursprünglicher Verwendung beschichtet, bedruckt, emailliert, mit Gasen gefüllt oder gefärbt sein. Die Reinigung dieser Glasreste und -scherben ist derzeit verfahrenstechnisch aufwendig und damit wirtschaftlich kaum praktikabel. Das Recycling von Fensterglas erfolgt durch Mahlen und Schmelzen, ähnlich dem Prozess des Recyclings von Glasflaschen. Ein Kreislauf, welcher die Wiederverwendung als neues Fensterglas ermöglicht, kann jedoch nicht erreicht werden (Baunetz_Wissen_, 2024d). Scherben, die bei der Produktion als Ausschuss anfallen, werden von Glasherstellern hingegen erneut verwendet. Wobei der Einsatz von Altglas von den spezifischen Anforderungen an den Reinheitsgrad der Scherben abhängig ist. So kann gefärbtes

Glas nicht zur Herstellung von Weißglas verwendet werden, und Keramikscherben oder Steine stören den Produktionsprozess (Umweltbundesamt, 2023).

Zukunft von Glas im Bausektor

Glas ist durch seine Eigenschaften ein wichtiges Material im Bausektor, das auch in Zukunft Verwendung finden wird. Um Glas nachhaltiger zu machen, gibt es verschiedene Ansätze. Viele Büro- und Wohngebäude in Europa müssen in naher Zukunft renoviert werden, um den aktuellen Anforderungen an die Energieeffizienz gerecht zu werden. Ein wesentlicher Aspekt dieser Maßnahmen ist die Steigerung der Dämmleistung der Gebäude, einschließlich der Fenster. Die meisten alten Fenster bestehen aus einem Rahmen und einer doppelt verglasten Isoliereinheit (Teich et al., 2024). Im Rahmen eines Tests wurde ein doppelt verglastes Isolierglas aus den 1980er Jahren demontiert, die einzelnen Glasscheiben gereinigt und die alte Randabdichtung entfernt. Im nächsten Schritt wurden die alten Glasscheiben mit einem neuen beschichteten Glas, das eine niedrige Wärmeabstrahlung aufweist, sowie einem Abstandhaltersystem kombiniert, um ein modernes Isolierglas zu produzieren. Es konnte festgestellt werden, dass die Isolierleistung von neuem Glas erreicht werden kann, wenn wiederaufbereitetes Glas verwendet wird. Allerdings hängt die Funktionalität des Glases in hohem Maße von der Haltbarkeit des verwendeten Dichtstoffs und der Oberflächenqualität der Klebestelle ab (Teich et al., 2024).

Eine weitere Möglichkeit, um Glas nachhaltiger zu machen, kommt vom Fraunhofer Institut für Silicatforschung, welches neue Beschichtungen zum Schutz von Glas entwickelte. Eine solche Beschichtung ist z. B. eine Beschichtung für Architekturverglasung (Fraunhofer-Institut für Silicatforschung, 2016). Hierbei sorgt die Beschichtung für schmutzabweisende Eigenschaften und antireflexive Eigenschaften. Mit der Beschichtung veredelte Gläser zeigen durch die spezielle Oberflächenstruktur einen Selbstreinigungseffekt durch Wind und Regen (Fraunhofer-Institut für Silicatforschung, 2016). Eine weitere innovative Möglichkeit für Glas wäre das komplette Ersetzen des Glases durch durchsichtige Solarzellen, mit denen Strom erzeugt wird. Transparente Solarzellen sind anspruchsvoll in der Herstellung (Husain et al., 2018) und haben das Potenzial für viele Anwendungen eingesetzt zu werden. Beispielsweise könnten Wolkenkratzer so einen Nettoenergieverbrauch von Null haben (Husain et al., 2018).

4.2.8 Übersicht alternative Baustoffe

In den vorherigen Kapiteln wurden einige alternative bzw. innovative Baustoffe oder neuartige Verwendungen von bestehenden Baustoffen aufgelistet. Hier eine Übersicht über die genannten Alternativen:

Mineralik	Kunststoff
- alternative Betonzusatzmittel	- automatische Systeme zur Sortierung von Kunststoffen
- selbstheilender Beton	- Verwendung als Bindemittel, Zuschlagstoff und Fasern in Zement
- 3D-gedruckter Beton	- Dachziegel aus Kunststoff
- photokatalytischer Beton	
- Carbonbeton	
- Wiederverwendung von Betonfertigteilen	

Ziegel	Metall
<ul style="list-style-type: none"> - Zigarettenstummeln integriert in Ziegel - Verwendung von Abfällen in Ziegeln - Solarzellen als Ziegel - Ziegel mit Grünbewuchs - Ziegel aus Agrocrete 	<ul style="list-style-type: none"> - Direktreduktion von Eisenerz (DRI) - Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) - Molten Oxide Electrolysis (MOE)
Dämmstoff	Glas
<ul style="list-style-type: none"> - Dämmstoff aus recyceltem PET - Jute-Wollfaser-Dämmplatten - Aerogel-Dämmungen 	<ul style="list-style-type: none"> - modernes Isolierglas - neue Beschichtungen - durchsichtige Solarzellen - Wiederverwendung von ausgebauten Verglasungen

Tabelle 2: Übersicht über die in der Arbeit aufgeführten alternativen Baustoffe

Anmerkung: Eigene Darstellung

Es wird zudem noch an vielen alternativen Baumaterialien geforscht, Beispiele hierfür sind z. B. ein „Super-Material“ aus Graphen-Flocken, welches leichter als Plastik, aber härter als Stahl ist (Chandler, 2017). Im Rahmen der Experimente mit dem Material konnte eine Dichte von 4,6 % erreicht werden, die der von Baustahl entspricht. Zudem wurde eine 10-mal höhere Stärke festgestellt (Qin et al., 2017). Mit dem Material können komplexe Strukturen konstruiert werden, bei denen mit sehr geringem Materialeinsatz eine sehr hohe mechanische Stärke erzielt werden kann (Qin et al., 2017). Außerdem wurde bei den Experimenten festgestellt, dass die Geometrie des Materials auch für andere Stoffe, wie Kunststoffe oder Metalle, verwendet werden könnte (Chandler, 2017).

Ein weiteres alternatives Baumaterial sind Pilze, genauer gesagt Myzel, also die Wurzelstrukturen der Pilze (Fromm, 2023). Myzel eignet sich für Anwendungen wie akustische und thermische Isolierung, Verkleidungen oder Fußböden (Jones et al., 2020), aber auch für Quader, welche Mauersteinen sehr ähnlich sind (Fromm, 2023). Myzel weist eine hohe Affinität für Wärme- und Schalldämmungen auf, da es eine ähnliche oder geringere Wärmeleitfähigkeit aufweist, wie handelsübliche Wärmedämmstoffe und eine Schallabsorption von 70–75 % oder mehr erreicht. Damit übertrifft es herkömmliche Deckenplatten, Polyurethanschäume und Sperrholz (Jones et al., 2020). Außerdem hat Myzel ein besseres Brandverhalten und bessere Brandschutzeigenschaften als herkömmliche Baumaterialien wie EPS oder Spanplatten (Jones et al., 2020). Nachteile sind jedoch, die hohe Feuchtigkeitsaufnahme (Jones et al., 2020) und der Fakt, dass aus Myzel keine tragenden Bauteile gefertigt werden können, sodass vorerst z. B. nur Zwischenwände aus Myzel möglich sind (Fromm, 2023). Durch weitere Forschung und dem Aufbau von Produktionen auf Industrieniveau könnten Materialien wie Myzel oder das „Super-Material“ in Zukunft im Bausektor weitreichendere Anwendung finden.

4.3 Regularien und Gesetze

Zum Thema Circular Economy gibt es viele Regularien und Gesetze auf verschiedenen Ebenen. Im folgenden Kapitel wird sowohl die europäische Ebene als auch die nationale Ebene in Deutschland behandelt.

4.3.1 Europäische Ebene

In Folge der Zustimmung zu den UN-Nachhaltigkeitszielen und dem Pariser Klimaabkommen haben immer mehr Staaten und Gemeinschaften in ernsthafte Bemühungen zur Förderung der Nachhaltigkeit investiert, indem sie sich verbindliche Ziele gesetzt haben. Besonders im Fokus steht dabei die Bekämpfung der Klimaerwärmung und der Schutz der Biodiversität. Ein bahnbrechender Schritt wurde von der EU unternommen, indem sie als erste globale Region die Klimaneutralität bis 2050 als zwingendes strategisches Ziel für nachhaltige Entwicklung etablierte. Die EU entwickelte dazu zwei übergreifende Prinzipien, zum einen die Lenkung von großen zukunftsgerichteten Finanzströmen der privaten und institutionellen Investitionswirtschaft in nachhaltige Technologien und Unternehmungen. Zum anderen die verursachergerechte Zuteilung von negativen Umweltauswirkungen als Kosten (z. B. CO₂-Abgabe, Pfandsysteme, Abfallabgaben) über einen Produkt-Lebenszyklus und die Begrenzung von Verschmutzungsrechten (z. B. Zertifikatenhandel, Bundesimmissionsschutzverordnungen, Düngemittelverordnung) (Engelien et al., 2023).

Aus den beiden genannten Prinzipien wurden Maßnahmen abgeleitet, welche im Folgenden näher erläutert werden.

Green Deal. Der EU- Green Deal hat sich zum Ziel gesetzt, den Übergang zu einer modernen, ressourceneffizienten und wettbewerbsfähigen Wirtschaft schaffen. Die konkrete Zielsetzung besteht darin, dass Unternehmen bis zum Jahr 2050 keine Netto-Treibhausgase mehr emittieren, das Unternehmenswachstum von der Ressourcennutzung entkoppeln und sowohl Menschen als auch Regionen bei Umweltthemen unterstützen. Neben genannten Zielen soll ebenfalls der Verkehrssektor stark reformiert werden, indem alle in Europa zugelassenen neuen Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeuge bis 2023 emissionsfrei sein müssen (Europäische Kommission, 2023).

EU-Taxonomie. Die EU-Taxonomie ist Teil der allgemeinen Bemühungen der EU, die Ziele des Europäischen Green Deal zu erreichen. Sie dient als robustes, wissenschaftlich fundiertes Transparenzinstrument, das Unternehmen und Investoren dabei unterstützt, nachhaltige Investitionsentscheidungen zu treffen. Die EU-Taxonomie hat die Umlenkung von Kapitalströmen hin zu nachhaltigen Investitionen sowie die Integration von Nachhaltigkeit in das Risikomanagement und die Förderung langfristiger Investitionen und wirtschaftlicher Aktivitäten zum Ziel (Europäisches Parlament, 2020). Hierzu werden als Bewertungsmaßstab die folgenden Umweltziele verwendet (Österreichisches Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie [BMK], 2024):

- Klimaschutz
- Klimawandelanpassung
- Nachhaltige Nutzung und Schutz von Wasser- und Meeresressourcen

- Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft
- Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung
- Schutz und Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme

Eine Wirtschaftstätigkeit gilt gemäß der Verordnung als nachhaltig, wenn sie einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung eines oder mehrerer Umweltziele leistet, keine erheblichen negativen Auswirkungen auf eines oder mehrere Umweltziele hat, unter Einhaltung sozialer Mindeststandards durchgeführt wird und den von der Kommission festgelegten technischen Bewertungskriterien entspricht (BMK, 2024). Die EU-Taxonomie-Verordnung hat durch ihre Ziele somit auch Auswirkungen auf den Bausektor, da z. B. Neubauten oder Renovierungen hiervon betroffen sind.

Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft. Der zentrale Baustein zur Umsetzung des Green Deals ist der Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft. Die Dringlichkeit des Übergangs zu einer kohlenstoffneutralen, ökologisch nachhaltigen und schadstofffreien Kreislaufwirtschaft bis 2050 ist vor dem Hintergrund der Ressourcenknappheit und des Klimawandels evident. Diese Entwicklungen fungieren als treibende Kräfte für grundlegende Veränderungen in der Wirtschaftsstruktur. Im März 2020 legte die EU einen Aktionsplan vor, der darauf abzielt, den Übergang zur Kreislaufwirtschaft zu beschleunigen und dabei das Ziel der Klimaneutralität bis 2050 zu unterstützen. Dieser umfasst ein Maßnahmenpaket, das im Einklang mit dem EU-2050-Klimaneutralitätsziel steht (Europäische Kommission, 2020):

- Ein Rahmen für eine nachhaltige Produktpolitik: Mit der Verordnung zum Ökodesign für nachhaltige Produkte werden Anforderungen über den gesamten Lebenszyklus von Produkten festgelegt, z. B. verlängerte Haltbarkeit, bessere Reparier- und Wiederverwendbarkeit und Wiederaufbereitung.
- Stärkung der Position der Verbraucherinnen und Verbraucher: Sie sollen Informationen über Produkte erhalten, dies beinhaltet Angaben zur Lebensdauer und Reparierbarkeit.
- Weniger Abfall, mehr Wert: Seit den 1970er Jahren hat das EU-Abfallrecht zu erheblichen Verbesserungen bei der Abfallbewirtschaftung geführt. Es wird laufend fortentwickelt, um es an die Anforderungen der zirkulären Wirtschaft und an das digitale Zeitalter anzupassen.

Zudem gibt es im Aktionsplan unter Punkt 3.6 Ziele für die Bauwirtschaft und Gebäude, welche wie folgt definiert sind (Europäische Kommission, 2020):

- Einbeziehung der Nachhaltigkeitsleistung von Bauprodukten bei der Überarbeitung der Bauprodukteverordnung, einschließlich der möglichen Einführung von Anforderungen an den Rezyklatanteil für bestimmte Bauprodukte unter Berücksichtigung ihrer Sicherheit und Funktionalität.
- Förderung von Maßnahmen zur Steigerung der Langlebigkeit und Anpassungsfähigkeit von Gebäuden sowie die Entwicklung digitaler Gebäudelogs.
- Verwendung von Level(s) zur Integration der Lebenszyklusanalyse in die öffentliche Auftragsvergabe und in den EU-Rahmen zur Förderung nachhaltiger Investitionen,

sowie Überprüfung der Zweckmäßigkeit der Festlegung von CO₂-Reduktionszielen und des Potenzials der CO₂-Speicherung.

- Überprüfung der in den EU-Rechtsvorschriften festgelegten Zielvorgaben für das Recycling von Bau- und Abbruchabfällen sowie deren materialspezifischen Fraktionen.
- Unterstützung von Maßnahmen zur Reduzierung der Bodenversiegelung, zur Sanierung stillgelegter oder kontaminierter Brachflächen und zur Förderung der sicheren, nachhaltigen und kreislaufforientierten Nutzung von ausgehobenen Böden.

Zudem plant die EU eine Erweiterung der Ökodesign-Richtlinie sowie die Einführung digitaler Produktpässe, um transparente Produktinformationen zu gewährleisten. In Ergänzung dazu werden Initiativen zur Vermeidung geplanter Obsoleszenz und zur Stärkung der Reparierbarkeit verfolgt. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Förderung von Verbraucherrechten und dem Austausch von Informationen. Das übergeordnete Ziel besteht in der Etablierung einer bis 2050 kohlenstoffneutralen, ökologisch nachhaltigen und schadstofffreien Wirtschaft, um CO₂-Emissionen zu reduzieren, Wirtschaftswachstum zu fördern und neue Arbeitsplätze zu schaffen. Der Aktionsplan und die Maßnahmen der EU zielen darauf ab, die Wirtschaft nachhaltiger zu gestalten, den Ressourcenverbrauch zu reduzieren und eine effiziente Kreislaufwirtschaft zu fördern (Parlament, 2011).

Überprüfung der Bauprodukteverordnung (EU-BauPVO). Die EU-BauPVO gilt für ein Bauprodukt, wenn es auf dem Markt der EU im Rahmen einer Geschäftstätigkeit in Verkehr gebracht oder bereitgestellt wird, das heißt vermarktet wird, für das Bauprodukt eine nach Maßgabe der EU-BauPVO erstellte harmonisierte Norm vorliegt, die von der Europäischen Kommission im Amtsblatt der EU bekannt gemacht ist oder für das Bauprodukt eine Europäische Technische Bewertung auf Antrag des Herstellers für dieses Produkt ausgestellt ist (Vgl. Art. 1 und 4 EU-BauPVO). Am 30. März 2022 wurde der Vorschlag für eine überarbeitete Bauprodukteverordnung von der EU-Kommission angenommen (EU-Kommission, 2023). Damit soll gewährleistet werden, dass Bauprodukte in Zukunft langlebiger, reparierbarer, recyclebarer und leichter wiederverwendbar werden und dementsprechend einen Anstieg des Einsatzes von Recyclingmaterialien in der Baubranche zur Folge haben.

Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz (LkSG). Neben ökologischen Aspekten regelt das LkSG auch soziale Nachhaltigkeitsziele entlang der Wertschöpfungskette sämtlicher Unternehmen ab einer Größe von 1.000 Mitarbeitenden. Neben ökologischen Aspekten regelt das LkSG auch soziale Nachhaltigkeitsziele entlang der Wertschöpfungskette sämtlicher Unternehmen ab einer Größe von 1.000 Mitarbeitenden. Es betrifft die gesamten Lieferketten der Bauwirtschaft, einschließlich direkter und möglicherweise indirekter Zulieferer. Das LkSG zielt darauf ab, unternehmerische Sorgfaltspflichten zur Vermeidung von Menschenrechtsverletzungen in Lieferketten festzulegen. Es verbietet explizit die Verletzung menschenrechtsbezogener Pflichten wie Kinderarbeit, Zwangsarbeit, Leibeigenschaft und die Missachtung von Arbeitsschutzbestimmungen. Zudem untersagt es umweltbezogene Tätigkeiten wie die Herstellung, Verwendung und Entsorgung bestimmter schädlicher Substanzen (Deutscher Bundestag, 2021a).

Die Unternehmen müssen ein umfassendes Risikomanagement etablieren, betriebsinterne Zuständigkeiten festlegen, Grundsatzserklärungen abgeben, Präventionsmaßnahmen umsetzen und Abhilfemaßnahmen ergreifen. Zusätzlich sind die Einrichtung eines Beschwerdemanagements und die Umsetzung von Sorgfaltspflichten bei mittelbaren Zulieferern sowie eine umfassende Dokumentation und Berichterstattung erforderlich (Engelien et al., 2023).

Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG). Der Zweck dieses Gesetzes besteht darin, die Zuordnung von Anlagen zu regeln, die sowohl einen Schwellenwert für die Produktionsleistung als auch einen Schwellenwert für die Gesamtfeuerungswärmeleistung haben können. Hierdurch soll eine Grundlage für den Handel mit Berechtigungen zur Emission von Treibhausgasen in einem gemeinschaftsweiten Emissionshandelssystem geschaffen werden, um damit durch eine kosteneffiziente Verringerung von Treibhausgasen zum weltweiten Klimaschutz beizutragen. Das Gesetz dient auch der Umsetzung der europäischen und internationalen Vorgaben zur Einbeziehung des Luftverkehrs in Maßnahmen zur Erfassung, Reduktion und Kompensation von Treibhausgasen und zur Umsetzung der europäischen und internationalen Vorgaben zur Erfassung von Treibhausgasen im Seeverkehr (Bundestag, 2011).

EU-Ökodesign-Richtlinie. Die umweltgerechte Gestaltung von Produkten durch Ökodesign trägt maßgeblich zur Verbesserung der Energie- und Ressourceneffizienz bei. Die Europäische Kommission schätzt, dass durch die im Jahr 2019 verabschiedeten zehn neuen Ökodesign-Verordnungen und sechs neuen Energielabel-Verordnungen europaweit bis 2030 jährlich etwa 167 Terawattstunden Energie eingespart werden können. Dies entspricht einer Reduktion von über 46 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent und somit etwa dem jährlichen Energieverbrauch Dänemarks. Verbraucher profitieren durch geringere Stromkosten und langlebigere Produkte, während Ökodesign zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie beiträgt. Die Ökodesign-Richtlinie von 2005 bildet den Rahmen für einheitliche, verbindliche Mindestanforderungen an Produkte innerhalb der EU. Die Umsetzung erfolgt durch die Marktüberwachungsbehörden der Bundesländer. Selbstverpflichtungen der Industrie gemäß Artikel 17 der Ökodesign-Richtlinie sind als Alternative zu Durchführungsmaßnahmen möglich (Klimaschutz, 2021).

Critical Raw Materials Act. Rohstoffe sind entscheidend für strategische Sektoren wie die Netto-Null-Industrie, digitale Industrie, Luft- und Raumfahrt sowie Verteidigung. Europa steht vor einem erheblichen Anstieg der Nachfrage nach kritischen Rohstoffen und ist dabei in hohem Maße von Importen abhängig. Die Abhängigkeit von monopolistischen Lieferanten sowie die potenziellen Risiken durch Versorgungsengpässe, die infolge der COVID-19-Pandemie und der Energiekrise im Zuge des Ukraine-Russland-Konflikts deutlich wurden, stellen eine ernstzunehmende Herausforderung dar. Diese Faktoren bergen das Potenzial, die Erreichung der Klima- und Digitalisierungsziele der EU erheblich zu gefährden. Das Maßnahmenpaket zielt darauf ab, eine sichere, diversifizierte, bezahlbare und nachhaltige Versorgung mit kritischen Rohstoffen sicherzustellen. Demnach sieht die Verordnung eine aktualisierte Liste kritischer und strategischer Rohstoffe vor, für die spezifische Maßnahmen zu implementieren sind. Richtwerte für inländische Kapazitäten und Versorgungsdiversifizierung bis 2030 sollen festgelegt werden. Die Importe aus Drittländern sollen auf 65% des jährlichen Bedarfs begrenzt werden, um Verwaltungsaufwand zu verringern und Genehmigungsverfahren zu vereinfachen. Als interne Maßnahmen liegen die klaren

Prioritäten auf dem Abbau, der Verarbeitung und dem Recycling von kritischen Rohstoffen. Vorrangige Ziele sind die Schaffung sicherer und widerstandsfähiger Lieferketten sowie die effektive Überwachung und Koordination strategischer Rohstoffvorräte. Ergänzend werden Forschung, Innovation und die Förderung von Kompetenzen gezielt unterstützt (Parlament, 2023).

Abfallrahmenrichtlinie. Die EU soll durch mehr Abfalltrennung und Verwertung zu einer „Recycling-Gesellschaft“ werden (BMUV, 2024e). Die Abfallrahmenrichtlinie präzisiert zentrale Rechtsbegriffe des Abfallrechts und führt eine fünfstufige Abfallhierarchie ein: Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung (z. B. energetische Verwertung) und Beseitigung. Zudem definiert sie Regelungen zur Bestimmung von Nebenprodukten und zum Ende der Abfalleigenschaft. Ein Nebenprodukt ist ein Stoff, der bei der Herstellung eines anderen Stoffes oder Produkts anfällt und nicht der Hauptzweck der Herstellung ist (Umweltbundesamt, 2022). Als Nebenprodukt wird ein Stoff dann betrachtet, wenn die nachfolgenden Voraussetzungen vorliegen (Europäisches Parlament, 2024):

1. Es ist sichergestellt, dass der Stoff oder Gegenstand weiterverwendet wird.
2. Der Stoff oder Gegenstand kann direkt ohne zusätzliche Verarbeitung, die über normale industrielle Verfahren hinausgeht, verwendet werden.
3. Der Stoff oder Gegenstand wird als integraler Bestandteil eines Herstellungsprozesses erzeugt.
4. Die weitere Verwendung ist rechtmäßig, das heißt, der Stoff oder Gegenstand erfüllt alle relevanten Produkt-, Umwelt- und Gesundheitsschutzanforderungen und führt insgesamt nicht zu schädlichen Umwelt- oder Gesundheitsfolgen.

Die Voraussetzungen, dass Abfälle, die recycelt oder verwertet wurden, nicht mehr als Abfall bewertet werden sind folgende (Europäisches Parlament, 2024):

1. Der Stoff oder Gegenstand soll für bestimmte Zwecke verwendet werden.
2. Es besteht ein Markt oder eine Nachfrage für diesen Stoff oder Gegenstand.
3. Der Stoff oder Gegenstand erfüllt die technischen Anforderungen für die vorgesehenen Zwecke und entspricht den geltenden Rechtsvorschriften und Normen für Erzeugnisse.
4. Die Verwendung des Stoffs oder Gegenstands führt insgesamt nicht zu schädlichen Umwelt- oder Gesundheitsfolgen.

Außerdem gibt es Anforderungen zur Abfallvermeidung und die Pflicht der Mitgliedstaaten, Abfallvermeidungsprogramme zu erstellen. Es wurden spezifische Recyclingquoten für Siedlungsabfälle (50 %) und Bau- und Abbruchabfälle (70 %) eingeführt. Der Grundsatz der Produktverantwortung ist ebenfalls verankert, wodurch für Hersteller eine Rücknahme- und Beseitigungspflicht entstehen kann. Für gefährliche Abfälle, Altöl und Bioabfall gibt es besondere Bestimmungen (BMUV, 2024e).

4.3.2 Nationale Ebene

Im Folgenden werden die Regularien und Gesetze auf nationaler Ebene in Deutschland, die den Bausektor in Bezug auf Circular Economy betreffen, gelistet und kurz erklärt.

Gebäudeenergiegesetz (GEG). Das Gebäudeenergiegesetz legt Anforderungen an die energetische Qualität von Gebäuden fest, einschließlich der Erstellung und Nutzung von Energieausweisen sowie des Einsatzes erneuerbarer Energien zur Wärmeversorgung. Ziel des Gesetzes ist es, einen Beitrag zur Erreichung der nationalen Klimaschutzziele zu leisten (BMWSB, 2024). Durch das Gesetz werden verbindliche Vorgaben und Fristen für den Wechsel zu erneuerbaren Heizenergien festgelegt und bietet Verbraucherinnen und Verbrauchern, der Wohnungswirtschaft, der Heizungsindustrie und dem Handwerk einen Rahmen für ihre Investitionsentscheidungen. Dadurch werden erneuerbare Energien im Gebäudebereich schrittweise zum Standard und ersetzen z. B. klimaschädliche Erdgas- oder Erdöl-Heizungen (BMWK, 2024).

Link: <https://www.bmwsb.bund.de/Webs/BMWSB/DE/themen/bauen/energieeffizientes-bauen-sanieren/gebäudeenergiegesetz/gebäudeenergiegesetz-node.html>

Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV). Die Verordnung legt Anforderungen für die getrennte Sammlung und Entsorgung von gewerblichen Siedlungsabfällen sowie Bau- und Abbruchabfällen fest (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2024a). Sie findet Anwendung auf Erzeuger und Besitzer von gewerblichen Siedlungsabfällen sowie von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen und Betreiber von Vorbehandlungs- und Aufbereitungsanlagen. Damit sind auch alle Handwerksbetriebe umfasst, die die zuvor genannten Abfälle produzieren (Meyer, 2024).

Link: <https://www.zdh.de/ueber-uns/fachbereich-wirtschaft-energie-umwelt/umweltpolitik/gewerbeabfallverordnung/>

Mantelverordnung (MantelV) / Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV). Kerngedanke der MantelV bildet die Einführung einer ErsatzbaustoffV und die Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, welche in diesem Zusammenhang ebenso die Deponie- und Gewerbeabfallverordnung ändern.

Ziel der ErsatzbaustoffV ist die bundeseinheitliche Festlegung von Anforderungen an die Herstellung und Anwendung mineralischer Ersatzbaustoffe, insbesondere Recycling-Baustoffe. Gemäß der Novellierung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, die im Jahr 1999 in Kraft trat, werden die Regelungen seither anhand aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse und praktischer Erfahrungen im Vollzug angepasst. Sie erweitert den Anwendungsbereich auf das Einbringen von Materialien unter oder außerhalb durchwurzelbarer Bodenschichten und legt bundeseinheitliche Standards für die Verwertung von Materialien in Abgrabungen und Tagebauen fest. Zusätzlich integriert sie Aspekte des physikalischen Bodenschutzes, bodenkundliche Baubegleitung sowie die Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen durch Bodenerosion. Schließlich wurden mit ihr auch die Methoden zur Schadstoffbestimmung aktualisiert (Bundestag, 2023).

Link: <https://www.bmuv.de/faqs/ersatzbaustoffverordnung-ersatzbaustoffv>

Baugesetzbuch (BauGB). Das Baugesetzbuch deckt das allgemeine Städtebaurecht ab, einschließlich Regelungen zur Bauleitplanung, zum Flächennutzungsplan, Bebauungsplan, zur Bodenordnung und Erschließung. Es umfasst auch das besondere Städtebaurecht, das Sanierungsmaßnahmen und die Städtebauförderung regelt (bauprofessor.de, 2021).

<https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/novelle-baugesetzbuch-2306066>

Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Das KrWG setzt die Vorgaben der EU-Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 2008/98/EG) in nationales Recht um (Umweltbundesamt, 2022). Das Gesetz zielt darauf ab, die Kreislaufwirtschaft zu fördern, um natürliche Ressourcen zu schonen und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen zu gewährleisten (BMUV, 2024d). In § 6 ordnet das KrWG Maßnahmen zur Vermeidung und Bewirtschaftung von Abfällen in die folgende Rangfolge ein ("5-stufige Abfallhierarchie"):

1. Vermeidung
2. Vorbereitung zur Wiederverwendung
3. Recycling
4. Sonstige Verwertung
5. Beseitigung

Die Punkte 2 bis 4 gelten als Verwertungsmaßnahmen. Vorrangig ist die Maßnahme, die den Schutz von Menschen und Umwelt bei der Abfallbewirtschaftung unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips am besten gewährleistet. Zudem werden im KrWG unter anderem die Begriffe "Abfälle", "Nebenprodukte" und "Ende der Abfalleigenschaft" erläutert. Das KrWG gilt für Erzeuger, Besitzer, Händler, Makler, Sammler und Beförderer von Abfällen sowie für Hersteller und Vertreiber von Produkten und den daraus entstehenden Abfällen nach deren Gebrauch (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2024b).

Link: <https://www.bmuv.de/gesetz/kreislaufwirtschaftsgesetz>

Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) Die deutschen Ziele zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen sind im Bundes-Klimaschutzgesetz festgelegt. Die Emissionen sollen bis 2030 um mindestens 65 % und bis 2040 um mindestens 88 % im Vergleich zu 1990 gesenkt werden. Bis 2045 strebt Deutschland an, Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen. Nach 2050 sollen negative Treibhausgasemissionen erzielt werden (Umweltbundesamt, 2024b).

Link: <https://www.bmuv.de/gesetz/bundes-klimaschutzgesetz>

Es lässt sich zudem noch erwähnen, dass alle Bundesländer eigene Landesbauordnungen vorgeben, welche sich nach der Musterbauordnung richten. In den Landesbauordnungen wird das Baurecht des jeweiligen Bundeslandes geregelt (mein-eigenheim.de, 2024).

4.3.3 Besonderheiten des Begriffes „Abfall“

In Deutschland passt das KrWG den Abfallbegriff an die europäische Abfallrahmenrichtlinie an und erweitert ihn (§ 3 Abs. 1). Zudem gibt es noch die Abfallverzeichnis-Verordnung, die das Gesamtverzeichnis der Abfallarten enthält, in dem sowohl die nicht gefährlichen als auch

die gefährlichen Abfallarten erfasst sind (BMUV, 2001). Im KrWG ist die Beschränkung auf „bewegliche Sachen“ entfallen, sodass nun „alle Stoffe oder Gegenstände“ erfasst sind. Allerdings bleibt das Abfallrecht durch den Ausschluss von „nicht ausgehobenen Böden und Bauwerken“ weiterhin auf bewegliche Sachen beschränkt (Umweltbundesamt, 2022). Neu eingeführt wurden außerdem die Regelungen aus der EU-Abfallrahmenrichtlinie zur Abgrenzung zwischen Abfall und Nebenprodukten, die nicht dem Abfallrecht unterliegen (§ 4). Die neue Vorschrift zum Ende der Abfalleigenschaft präzisiert ebenfalls den Abfallbegriff. Zudem will die Bundesregierung mit der sogenannten Abfallende-Verordnung in Übereinstimmung mit der ErsatzbaustoffV dazu beitragen, MEB effektiver im Kreislauf zu führen und deren Vermarktung als hochwertige und qualitätsgesicherte Recycling-Produkte zu fördern. Somit sollen diese nicht nur in technischen Bauwerken, sondern auch in Bereichen, die noch nicht von der ErsatzbaustoffV abgedeckt sind, wie dem Garten- und Landschaftsbau, Verwendung finden. Dafür ist es notwendig, dass (BMUV, 2024b):

1. MEB durch ihren Status als Nicht-Abfall Zugang zu einem nachhaltigen Absatzmarkt erhalten.
2. durch den Status als Nicht-Abfall bestehende Vorurteile und Hemmnisse seitens der Verwender gegenüber diesen hochwertigen MEB abgebaut werden.
3. spezifische, mit dem Abfallrecht verbundene Verpflichtungen, wie beim Transport oder der Lagerung, für diese MEB entfallen.

Die Verordnung wird allgemein begrüßt, es gibt jedoch auch Kritik wie z. B. von der deutschen Industrie- und Handelskammer (DIHK). Diese fordert unter anderem, dass die Anforderungen gemäß § 5 Absatz 1 des KrWG für alle aufbereiteten Stoffe erfüllt werden sollten (Deutsche Industrie- und Handelskammer [DIHK], 2024). Außerdem sollte, wenn die Anforderungen der Ersatzbaustoffverordnung erfüllt sind, das Abfallende für alle Materialklassen eintreten, da in der Abfallende-Verordnung nur die „besten“ Materialklassen, also Böden und Steine, RC-Baustoffe und Ziegelmaterial, berücksichtigt werden (Mees, 2024). Andernfalls würde sich der Einsatz von nicht berücksichtigten Materialklassen weiter erschweren. Zuletzt wird gefordert, dass eine Abfallende-Verordnung allgemeine Kriterien und Verfahren für das Erreichen des Endes der Abfalleigenschaft festlegen sollte, sodass Unternehmen nicht auf aufwendige Rechtsgutachten und Anerkennungsverfahren angewiesen sind (DIHK, 2024).

5 Diskussion

5.1 Interpretation und Handlungsempfehlungen

In diesem Kapitel werden die gesammelten Informationen interpretiert. Im Anschluss werden Handlungsempfehlungen gegeben, sowohl für die aufgeführten Materialien als auch für die rechtliche Lage in der EU und in Deutschland.

Zunächst wird auf die in Kapitel 4 aufgeführten Materialien eingegangen, mit denen viele der im Bausektor verwendeten Stoffe abgedeckt werden. Für alle diese Materialien existieren, zum Zeitpunkt der Arbeit, bereits Verfahren für das Recycling oder für die anderweitige Wiederverwendung. Diese werden teils auf die große Masse der aufkommenden Altbaustoffe

angewandt, wie z. B. bei Metall, teils aber nur zu geringen Mengen durchgeführt wie z. B. bei Glas. Zudem gibt es auch Innovationen, die in Zukunft zu einer verbesserten Circular Economy der Materialien führen können, Beispiele hierfür sind in der Übersicht in Kapitel 4.2.8 zu sehen. Einen Teil der 250 Millionen Tonnen CO₂, die jährlich in der EU durch den Bausektor ausgestoßen werden (Dao, 2023), könnten durch diese Innovationen oder die Ausweitung der R-Strategien eingespart werden.

In Bezug auf die 10R-Strategien müssen die Materialien und der Bausektor als Ganzes betrachtet werden. Im Folgenden befindet sich eine Übersicht, wie mit den Materialien im Rahmen der 10R-Konzepte bereits umgegangen wird:

R0 Refuse: Das Verzicht auf die Verwendung bestimmter Produkte ist vor allem dann sinnvoll, wenn es alternative Materialien gibt, mit denen derselbe oder ein besserer Effekt erzielt werden kann. Beispielsweise lassen sich, wie das Projekt „Einfach Bauen“ zeigt, die Außenwände von Gebäuden komplett aus Holz statt aus Beton bauen, wenn der thermische Komfort nicht im Mittelpunkt steht.

R1 Rethink: Das Konzept Rethink findet in breite Anwendung, da die Generierung alternativer Produktionen oder neuer Produkte essenziell für die nachhaltige Produktgestaltung ist.

R2 Reduce: Die eingesetzten Rohstoffe oder die ausgestoßenen Emissionen zu reduzieren ist immer von Vorteil. Ein Beispiel ist das DRI-Verfahren bei der Stahlproduktion, mit dem bis zu 97 % der CO₂-Emissionen eingespart werden können.

R3 Reuse: Die Wiederverwendung von Bauteilen kann eine effektive Maßnahme zur Reduktion des Rohstoffverbrauchs und zur Vermeidung von Emissionen durch die Neuherstellung sein. Allerdings ist ihre Anwendung auf spezifische Gelegenheiten beschränkt. Ein Beispiel ist die Wiederverwendung der Stahlträger und Außentreppe in Kapitel 4.

R4 Repair: Die Reparatur von Bauteilen und Produkten in Gebäuden kann deren Lebensdauer deutlich verlängern. Hierbei steht das Handwerk im Mittelpunkt, welches diese Reparaturen durchführt.

R5 Refurbish: Die Sanierung von Gebäuden stellt vor allem eine effektive Methode zur Steigerung der Energieeffizienz dar, z. B. durch die Verwendung von nachhaltigen Dämmprodukten.

R6 Remanufacture: Ähnlich wie bei R3 Reuse, können Bauteile aus Gebäuden wiederverwendet werden. Bei R6 Remanufacture werden diese jedoch noch bearbeitet, bevor sie wiederverwendet werden können.

R7 Repurpose: Die Verwendung von Abfällen in neuen Produkten, wie z. B. Zigarettenstummeln in der Ziegelproduktion, ist ein guter Weg, Abfälle sinnvoll zu nutzen.

R8 Recycle: Wohl die bekannteste R-Strategie; Viele der analysierten Materialien können recycelt werden und somit nach ihrer Nutzung in neue Produkte verarbeitet werden. Durch ausreichendes Recycling kann die Neugewinnung von Rohstoffen reduziert werden.

R9 Recovery: Die meist thermische Verwertung von Materialien zur Gewinnung von Strom oder Heizenergie kann bei der Neuherstellung von Produkten Anwendung finden und somit den Bedarf an anderweitig erzeugter Energie reduzieren.

Zu bedenken ist zudem, dass durch den Transport von Materialien und Produkten im Baugewerbe auch hohe CO₂-Emissionen entstehen, so sind bis zu 10 % der Emissionen des gesamten Bauprozesses auf diesen zurückzuführen (Sezer & Fredriksson, 2021). Hier könnten durch die Verwendung lokaler Produkte und die Beauftragung lokaler Unternehmen Emissionen eingespart werden.

Durch die in der EU und in Deutschland herrschende Rechtslage, wird ein Wandel zu einer „Recycling-Gesellschaft“ angestrebt (BMUV, 2024e), was zu einer deutlichen Verbesserung der Circular Economy im Bausektor in Europa führen kann. Die vorliegenden Gesetze zielen darauf ab, die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren. Dabei wird auf die Zielvorgaben des sogenannten European Green Deal Bezug genommen, der eine Reduktion der Netto-Treibhausgasemissionen um mindestens 55 % bis zum Jahr 2030 gegenüber dem Jahr 1990 vorsieht (Europäische Kommission, 2024). In Deutschland bildet das KrWG den zentralen Fokus dieser Bestrebungen. Unter der Prämisse der erfolgreichen Implementierung der in diesem Gesetz vorgesehenen Abfallhierarchie auf einen substanziellen Anteil der Abfälle ist eine signifikante Reduktion der Emissionen von Deutschland und somit der gesamten EU zu erwarten. Somit trägt die Circular Economy maßgeblich zur Erreichung der Ziele des KSG bei.

Im folgenden Abschnitt werden Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Circular Economy im Bausektor gegeben, basierend auf den Analysen der Materialien sowie der Rechtsgrundlagen in der EU und in Deutschland.

Handlungsempfehlungen für den Bausektor:

- Die effiziente Ressourcennutzung sollte im Bausektor eine zentrale Rolle spielen. Verwirklicht werden kann dies, indem lineare Wertschöpfungsstrukturen durch Kreisläufe innerhalb und zwischen den Wertschöpfungsketten, dem Nutzungsverhalten und der Verwertung ersetzt werden.
- Neubauten sollten von ihrem Entstehungszeitpunkt an zirkulär konzipiert werden, um die Wiederverwendung von Materialien zu fördern und den Ressourcenverbrauch zu minimieren.
- Für die Sicherstellung einer effizienten Kreislaufwirtschaft ist die Wiederverwendung von geeigneten Bauteilen und Baustoffen von entscheidender Bedeutung. Die Konstruktion dieser Bauteile und Baustoffe sollte dahingehend erfolgen, dass eine spätere Wiederverwendung möglich ist. Zudem sollten Recyclingverfahren gefördert werden, die eine Minderung der Qualität der Materialien vermeiden.
- Auch sollte bereits bei der Konstruktion eines Gebäudes der Fokus auf die einfache Trennbarkeit und Sortenreinheit der Baustoffe gelegt werden. Dies kann durch die Anwendung unkomplizierter Bauweisen mit einer begrenzten Vielfalt an Baustoffen sowie z. B. durch den Einsatz von lösbaren Verbindungen wie Schraub- statt

Klebeverbindungen erreicht werden. Zudem sollte der Einsatz schädlicher Materialien vermieden werden.

- Das Handwerk sollte in die Planungs- und Designphase einbezogen werden.
- Die Verlängerung der Lebensdauer von Gebäuden sollte als zentrales Ziel angestrebt werden. In diesem Zusammenhang ist es ratsam, Sanierung und Umnutzung zu priorisieren und, wo sinnvoll, dem Abriss und Neubau vorzuziehen. Zudem sollte die Baustoffindustrie Produkte mit einer langen Lebensdauer entwickeln.
- Öffentliche Gebäude könnten eine Vorreiterrolle einnehmen, um zirkuläre Ansätze zu etablieren und zu fördern, sowohl bei Neubauten als auch bei Sanierungen. So kann auch ein besseres Bewusstsein der Bevölkerung für Circular Economy im Bausektor geschaffen werden.

Handlungsempfehlungen für die Politik:

- Die Baubranche erfordert eine umfassende staatliche Förderpolitik für neue Konzepte und technologische Innovationen. Die Circular Economy bietet einen ganzheitlichen Ansatz, der den Energieverbrauch, die Ressourcennutzung sowie die Abfallreduktion und Wiederverwendung von Materialien berücksichtigt. Eine entsprechende Förderpolitik schafft Anreize für umweltfreundlichere Entscheidungen und optimiert den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden. Recycelte Baumaterialien sollten preislich mit neuen Materialien konkurrieren können, z. B. durch Steuerreduzierungen oder Fördergelder für Produktionsanlagen von nachhaltigen Produkten. Zudem sollten Richtlinien, Gesetze und Regularien für den Einsatz von Ersatzbaustoffen vereinfacht werden. Der Einsatz von recycelten Baumaterialien sollte keinen zusätzlichen bürokratischen Aufwand verursachen. Außerdem sollten Anreize für Bauteil- und Baustoffbörsen geschaffen werden, um den Handel mit wiederverwendbaren Baustoffen zu fördern. Dies würde gleichzeitig das modulare Bauen unterstützen, das eine flexible Umgestaltung und Anpassung von Gebäuden im Laufe ihres Lebenszyklus ermöglicht.
- Neben der Vereinfachung von Richtlinien sollten diese auch auf ihre Sinnhaftigkeit überprüft und aktuell gehalten werden. Für neue Produkte und Verfahren können veraltete Gesetze hinderlich sein. Außerdem sollten bei Richtlinien alle Stoffe berücksichtigt werden, so sollten z. B. bei der Ersatzbauverordnung alle Materialklassen aufgenommen werden.
- Eine zusätzliche Maßnahme wäre zudem die Einführung einer Pflicht zur Rücknahme von Altprodukten oder einer Abgabegebühr für Unternehmen, denen eine Rücknahme nicht möglich ist. Dies würde sicherstellen, dass Materialien und Bauteile nach ihrer Nutzungsdauer wieder in den Kreislauf zurückgeführt werden und nicht als Abfall enden. Unternehmen wären somit stärker in die Verantwortung genommen, nachhaltige Produkte zu entwickeln und zu vermarkten.

- Zudem sollten Beratungsleistungen zum Thema Circular Economy staatlich gefördert werden, um in der Bevölkerung, vor allem aber bei Bauherren und Unternehmen im Bausektor, ein besseres Verständnis für das Thema zu schaffen.

5.2 Zukunft der Circular Economy im Bauwesen

Die Zukunft der Circular Economy im Bausektor verspricht eine nachhaltige und ressourcenschonende Entwicklung. Damit diese auch zustande kommt, sollten in den nächsten 100 Jahren mindestens folgende Punkte umgesetzt werden:

Im Mittelpunkt steht die Forschung, die sich auf die Neuentwicklung von Produkten und Technologien konzentrieren sollte. Dabei ist es besonders wichtig, massentaugliche Produkte zu entwickeln, um eine möglichst große Wirkung zu erzielen. Durch Innovationen können Materialien und Bauweisen geschaffen werden, die den Anforderungen der Kreislaufwirtschaft gerecht werden.

Zukünftige Forschung kann auf der gegebenen Übersicht über die verschiedenen Materialien und dem jeweils gegebenen zukünftigen Ausblick aufbauen. Vor allem sollten Überlegungen bezüglich der Praktikabilität der genannten Innovationen angestellt werden. Auch die Überprüfung, ob bestimmte Innovationen überhaupt weltweit sinnvoll angewandt werden können, sollte durchgeführt werden. Hierbei sollte insbesondere auf potenzielle Hürden geachtet werden.

Darüber hinaus sollte es die gesetzliche Verpflichtung zum Betreiben von Kreislaufwirtschaft geben. Dies könnte durch entsprechende Regelungen und Normen erreicht werden, die sicherstellen, dass alle Akteure im Bausektor nachhaltige Praktiken umsetzen. Die Einhaltung der genannten Handlungsempfehlungen und die Erreichung der Reduktionsziele der EU sind hierbei wichtig. Nur durch konsequentes Handeln können die Klimaziele erreicht und die Umweltbelastung reduziert werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der deutliche Bürokratieabbau in Deutschland. Bürokratische Hürden sollten abgebaut bzw. vereinfacht werden, um den Einsatz von recycelten und wiederverwendbaren Baumaterialien und die Umsetzung von Bauprojekten zu erleichtern. Dies würde nicht nur den Bausektor entlasten, sondern auch die Akzeptanz und Umsetzung nachhaltiger Praktiken fördern.

Insgesamt bietet die Circular Economy im Bausektor eine vielversprechende Perspektive für eine nachhaltige Zukunft. Durch gezielte Forschung, gesetzliche Regelungen und den Abbau bürokratischer Hürden kann der Bausektor einen bedeutenden Beitrag zum Klimaschutz und zur Ressourcenschonung leisten.

5.3 Limitationen der Arbeit

Diese Arbeit konzentriert sich thematisch fast ausschließlich auf den Hochbau, was eine gewisse Eingrenzung darstellt. Für ein umfassenderes Verständnis der Baubranche sollten zukünftige Untersuchungen auch den Tiefbau einbeziehen. Auch liegt der Fokus dieser Arbeit mehr auf der Industrie und weniger auf dem Handwerk, hier könnte weitere, vertiefende Forschung anknüpfen. Zudem wurden im Rahmen der Arbeit keine eigenen Daten erhoben,

beispielsweise durch Interviews oder Umfragen. Außerdem wird im Rahmen der Arbeit keine Einordnung der Circular Economy in die übergeordnete Nachhaltigkeitsthematik vorgenommen. Stattdessen stehen Materialien und Ressourcen sowie die rechtliche Lage im Mittelpunkt der Betrachtung. Die Analyse der Baustoffe beschränkt sich zudem auf die in Kapitel 4 aufgeführten Stoffe. Andere Materialien, die auch im Bausektor Anwendung finden, wie z. B. Aluminium, werden nur kurz oder gar nicht erwähnt und dementsprechend auch nicht analysiert.

6 Fazit

Diese Forschungsarbeit hat sich intensiv mit der Circular Economy im Bausektor auseinandergesetzt. Im Fokus standen die Stoffströme der Materialien und Baustoffe Beton, Holz, Metalle, Ziegel, Kunststoffe, Dämmstoffe und Glas sowie die rechtlichen Rahmenbedingungen, die für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen von entscheidender Bedeutung sind. Die Analyse der Materialien aus dem Baugewerbe hat gezeigt, dass es ein großes Potenzial zur Wiederverwendung und zum Recycling gibt. Hierbei hat die Untersuchung der Stoffströme ergeben, dass schon sinnvoll mit Altbaustoffen umgegangen wird, allerdings auch noch Verbesserungspotenziale bestehen. Durch innovative Bauweisen und Technologien können die Materialien effizienter genutzt und die Lebensdauer von Gebäuden verlängert werden.

Die rechtlichen Rahmenbedingungen spielen eine zentrale Rolle bei der Förderung der Circular Economy im Bausektor. Es wurde aufgezeigt, dass bestehende Gesetze und Verordnungen bereits wichtige Grundlagen schaffen, jedoch noch weiterentwickelt und angepasst werden müssen, um die Kreislaufwirtschaft umfassend zu unterstützen. Insbesondere die Einführung von Vorgaben zur Dauerhaftigkeit, Recyclingfähigkeit und Wiederverwendbarkeit von Produkten ist von großer Bedeutung. Zudem sollten bürokratische Hürden abgebaut werden, um den Einsatz von recycelten Baumaterialien zu erleichtern.

Die Kreislaufwirtschaft hat das Potenzial, die Zukunft des Bauwesens nachhaltig zu gestalten. Durch die Einhaltung der Handlungsempfehlungen, wie die effiziente Ressourcennutzung, eine umfassende staatliche Förderpolitik sowie die Einführung gesetzlicher Verpflichtungen zur Kreislaufwirtschaft, kann der Bausektor einen bedeutenden Beitrag zum Klimaschutz und zur Ressourcenschonung leisten. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Circular Economy im Bausektor eine vielversprechende Perspektive bietet, die jedoch nur durch eine enge Zusammenarbeit aller Akteure und die Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen erfolgreich umgesetzt werden kann. Die Chancen und Potenziale sind groß, und mit den richtigen Maßnahmen kann die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen zu einem zentralen Element einer nachhaltigen Zukunft werden.

Literaturverzeichnis

- Achilias, D. S., Roupakias, C., Megalokonomos, P., Lappas, A. A. & Antonakou, E. V. (2007). Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). *Journal of hazardous materials*, 149(3), 536–542.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.076>
- AiR Abfall ist Rohstoff GmbH. (2024). Holz hackschnitzel zur stofflichen Verwertung. URL: <https://abfall-ist-rohstoff.de/leistungen/lieferung/hackschnitzel-stofflich/> Zuletzt geprüft am 15.10.2024.
- ALLPLAN. (2017). Nachhaltig, vielfältig, ausgefallen: Darum ist Glas als Baustoff so beliebt. URL: <https://www.allplan.com/de/blog/glas-architektur-nachhaltiges-bauen/> Zuletzt geprüft am 22.10.2024.
- Awoyera, P. O. & Adesina, A. (2020). Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00330.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00330>
- Baetens, R., Jelle, B. P. & Gustavsen, A. (2011). Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 43(4), 761–769.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.012>
- Bammer, M. (2018). Glas im Bauwesen. *Zeitschrift für Recht des Bauwesens*, 7(1), V–VII.
<https://doi.org/10.33196/zrb201801V01>
- Bastian, D., Bookhagen, B., Eicke, C., Elsner, H., Henning, S., Kern, M., Kuhn, K., Liesegang, M., Lutz, R., Mähltz, P., Moldenhauer, K., Pein, M., Schauer, M., Schmidt, S [Sandro], Schmitz, M., Szurlies, M. & Wittenberg, A. (2023). Deutschland - Rohstoffsituation 2022. <https://doi.org/10.25928/dero-si22>
- baubüro in situ ag. (2021). K.118 – Kopfbau Halle 118 Winterthur 2021. URL: <https://insitu.ch/projekte/196-k118-kopfbau-halle-118> Zuletzt geprüft am 15.10.2024.
- Baunetz_Wissen_. (2024a). Betonarten nach Einsatzbereich. URL: <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/betonarten/betonarten-nach-einsatzbereich-150978> Zuletzt geprüft am 02.09.2024.
- Baunetz_Wissen_. (2024b). Dämmstoffe: Eigenschaften, Anwendungen, Kennwerte. URL: <https://www.baunetzwissen.de/bauphysik/fachwissen/waermeschutz/daemmstoffe-eigenschaften-anwendungen-kennwerte-4366887> Zuletzt geprüft am 08.10.2024.
- Baunetz_Wissen_. (2024c). Hauptbestandteile des Zements. URL: <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/herstellung/hauptbestandteile-des-zements-150930> Zuletzt geprüft am 23.09.2024.
- Baunetz_Wissen_. (2024d). Recycling von Glas. URL: <https://www.baunetzwissen.de/fenster-und-tueren/fachwissen/bauschaeden-sanierung/recycling-von-glas-155383> Zuletzt geprüft am 23.10.2024.

- Baunetz_Wissen_. (2024e). Zusammensetzung von Beton. URL: <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/herstellung/zusammensetzung-von-beton-150914> Zuletzt geprüft am 07.10.2024.
- bauprofessor.de. (2016). Bauhilfsgewerbe. URL: <https://www.bauprofessor.de/bauhilfsgewerbe/> Zuletzt geprüft am 18.11.2024.
- bauprofessor.de. (2021). Baugesetzbuch (BauGB). URL: <https://www.bauprofessor.de/baugesetzbuch/> Zuletzt geprüft am 11.11.2024.
- Baustoff Recycling Bayern e.V. München. (2024). RC Ziegel. URL: <https://www.baustoffrecycling-bayern.de/node/332-2> Zuletzt geprüft am 18.09.2024.
- Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. (2024). Holznutzung und -verwendung. URL: <https://www.lwf.bayern.de/forsttechnik-holz/holzverwendung/052977/index.php> Zuletzt geprüft am 17.09.2024.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt. (2024a). GewAbfV - Gewerbeabfallverordnung. URL: <https://www.umweltpakt.bayern.de/abfall/recht/bund/169/gewabfv-gewerbeabfallverordnung> Zuletzt geprüft am 11.11.2024.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt. (2024b). KrWG - Kreislaufwirtschaftsgesetz. URL: <https://www.umweltpakt.bayern.de/abfall/recht/bund/95/krwg-kreislaufwirtschaftsgesetz> Zuletzt geprüft am 11.11.2024.
- Benyus, J. M. (1997). Biomimicry: Innovation inspired by nature. Morrow New York.
- Biscoping, M. (2012). Gesteinskörnungen für Normalbeton. URL: <https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/basiswissen/zement-merkblaetter/B2.pdf>.
- Blauarbeit. (2023). Ziegelarten und ihre Eigenschaften im Überblick. URL: <https://ratgeber.blauarbeit.de/maurer/ziegelarten> Zuletzt geprüft am 07.10.2024.
- Boston Metal. (2024). Decarbonizing steelmaking for a net-zero future. URL: <https://www.bostonmetal.com/green-steel-solution/> Zuletzt geprüft am 27.11.2024.
- Boulding, K. E. (2013). The economics of the coming spaceship earth. In Environmental quality in a growing economy (S. 3–14). RFF Press.
- Bubalo, A., Vouk, D., Stirmer, N. & Nad, K. (2021). Use of Sewage Sludge Ash in the Production of Innovative Bricks—An Example of a Circular Economy. Sustainability, 13(16), 9330. <https://doi.org/10.3390/su13169330>
- Bundesagentur für Arbeit. (2024a). Anlagenmechaniker/in für Sanitär-, Heizungs- und Klimatechnik. URL: <https://rest.arbeitsagentur.de/infosysbub/berufepool-rest/ct/v1/steckbriefe/15164.pdf> Zuletzt geprüft am 17.09.2024.
- Bundesagentur für Arbeit. (2024b). Beton- und Stahlbetonbauer/in: Ausbildungsberuf. URL: <https://web.arbeitsagentur.de/berufenet/beruf/3979> Zuletzt geprüft am 16.09.2024.
- Bundesagentur für Arbeit. (2024c). Dachdecker/in. URL: <https://rest.arbeitsagentur.de/infosysbub/berufepool-rest/ct/v1/steckbriefe/129406.pdf> Zuletzt geprüft am 17.09.2024.

- Bundesagentur für Arbeit. (2024d). Elektroniker/in der Fachrichtung Energie- und Gebäudetechnik. URL: <https://rest.arbeitsagentur.de/infosysbub/berufepool-rest/ct/v1/steckbriefe/15636.pdf> Zuletzt geprüft am 01.10.2024.
- Bundesagentur für Arbeit. (2024e). Glaser/in der Fachrichtung Verglasung und Glasbau. URL: <https://rest.arbeitsagentur.de/infosysbub/berufepool-rest/ct/v1/steckbriefe/4364.pdf> Zuletzt geprüft am 22.10.2024.
- Bundesagentur für Arbeit. (2024f). Maurer/in. URL: <https://rest.arbeitsagentur.de/infosysbub/berufepool-rest/ct/v1/steckbriefe/3938.pdf> Zuletzt geprüft am 18.09.2024.
- Bundesagentur für Arbeit. (2024g). Tischler/in. URL: <https://rest.arbeitsagentur.de/infosysbub/berufepool-rest/ct/v1/steckbriefe/4460.pdf> Zuletzt geprüft am 23.09.2024.
- Bundesagentur für Arbeit. (2024h). Zimmerer/Zimmerin. URL: <https://rest.arbeitsagentur.de/infosysbub/berufepool-rest/ct/v1/steckbriefe/4010.pdf> Zuletzt geprüft am 23.09.2024.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. (2024). Gussglas. URL: <https://www.wecobis.de/bauproduktgruppen/verglasungen-pg/basisglaeser-pg/gussglas-pg.html#:~:text=Bei%20Verwendung%20als%20Einfachglas%3A&text=T%C3%BCren%2C%20Trennw%C3%A4nde%2C%20Oberlichter%2C%20Beleuchtungssysteme,ohne%20Sicherheitsanforderungen.&text=wie%20Roh%2D%2FOrnamentglas%20mit,%C3%9Cberkopfverglasungen.> Zuletzt geprüft am 22.10.2024.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). (2001). Hinweise zur Anwendung der Abfallverzeichnis-Verordnung vom 10. Dezember 2001, BGBl. I S. 3379. URL: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/avv_erlaeu-terungen.pdf Zuletzt geprüft am 12.11.2024.
- Ersatzbaustoffverordnung (2023). URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/ersatzbaustoffv/ErsatzbaustoffV.pdf>.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). (2024a). Circular Economy in der Europäischen Union. URL: <https://www.bmuv.de/DL1461> Zuletzt geprüft am 05.11.2024.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). (2024b). Eckpunktepapier zur Abfallende-Verordnung für bestimmte mineralische Ersatzbaustoffe. URL: <https://www.bmuv.de/gesetz/eckpunktepapier-zur-abfallende-verordnung-fuer-bestimmte-mineralische-ersatzbaustoffe> Zuletzt geprüft am 12.11.2024.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). (2024c). Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV). URL: <https://www.bmuv.de/faqs/ersatzbaustoffverordnung-ersatzbaustoffv> Zuletzt geprüft am 11.11.2024.

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). (2024d). Kreislaufwirtschaftsgesetz. URL: <https://www.bmuv.de/gesetz/kreislaufwirtschaftsgesetz> Zuletzt geprüft am 11.11.2024.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). (2024e). Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien: Abfallrahmenrichtlinie. URL: <https://www.bmuv.de/gesetz/richtlinie-2008-98-eg-ueber-abfaelle-und-zur-aufhebung-bestimmter-richtlinien> Zuletzt geprüft am 05.11.2024.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. (2024f, 17. Juni). Entwurf einer Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS). URL: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/nkws_entwurf_bf.pdf Zuletzt geprüft am 29.11.2024.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). (2021). Rohstoffe: Bergbau, Recycling, Ressourceneffizienz – wichtig für Wohlstand und Arbeitsplätze. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/rohstoffe-bergbau-recycling-ressourceneffizienz.pdf?__blob=publicationFile&v=1 Zuletzt geprüft am 09.09.2024.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). (2024). Was steht wo? Das Gebäudeenergiegesetz in drei Minuten. URL: <https://www.bmwk-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2024/02/Meldung/News1.html> Zuletzt geprüft am 11.11.2024.
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). (2023). Holzbauinitiative. URL: https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/veroeffentlichungen/bauen/holzbauinitiative.pdf?__blob=publicationFile&v=2 Zuletzt geprüft am 04.09.2023.
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). (2024). Das Gebäudeenergiegesetz. URL: <https://www.bmwsb.bund.de/Webs/BMWSB/DE/themen/bauen/energieeffizientes-bauen-sanieren/gebäudeenergiegesetz/gebäudeenergiegesetz-node.html> Zuletzt geprüft am 11.11.2024.
- Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Kreislaufwirtschaft e.V. (BDE). (2024). Eine Kreislaufwirtschaftsstrategie für Deutschland. URL: <https://www.bde.de/presse/kreislaufwirtschaft-strategie-kernbotschaften/> Zuletzt geprüft am 01.10.2024.
- Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. (2024). Re-Use und Recycling von Ziegeln. URL: <https://www.ziegel.de/recycling#info> Zuletzt geprüft am 18.09.2024.
- Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung (Hrsg.). (2021). Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. Conversio. URL: https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfassung_Stoffstrombild_2021_13102022_1_.pdf Zuletzt geprüft am 01.10.2024.

- Bundeszentrale für politische Bildung. (2016). Baugewerbe. URL: <https://www.bpb.de/kurzknapp/lexika/lexikon-der-wirtschaft/18786/baugewerbe/> Zuletzt geprüft am 18.11.2024.
- CARBOCON GMBH. (2024). Das Prinzip Carbonbeton. URL: <https://www.carbocon.de/carbonbeton/> Zuletzt geprüft am 15.10.2024.
- Chandler, D. L. (2017). Researchers design one of the strongest, lightest materials known. MIT. URL: <https://news.mit.edu/2017/3-d-graphene-strongest-lightest-materials-0106> Zuletzt geprüft am 29.10.2024.
- Chemie.de. (2024). Metalle. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Metalle.html#Vorkommen> Zuletzt geprüft am 09.09.2024.
- Dao, B. (2023). Revised EU rules for construction products miss the mark on sustainability. European Environmental Bureau. URL: <https://eeb.org/revised-eu-rules-for-construction-products-miss-the-mark-on-sustainability/#:~:text=%5B1%5D%20Construction%20has%20a%20vast,generates%2030%25%20of%20our%20waste.> Zuletzt geprüft am 25.11.2024.
- Dechantsreiter, U., Horst, P., Mettke, A., Asmus, S., Schmidt, S [Stephanie], Knappe, F., Reinhardt, J., Theis, S. & Lau, J. J. (2015). Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen. Umweltbundesamt. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/instrumente-zur-wiederverwendung-von-bauteilen>.
- Design Factory der TUM School of Engineering and Design. (2021). Timber Earth Slab. URL: <https://www.arc.ed.tum.de/defac/aktuelles/news-single-startseite/article/timber-earth-slab/> Zuletzt geprüft am 20.11.2024.
- Deutsche Industrie- und Handelskammer (DIHK). (2024). Abfallende-Verordnung: DIHK-Stellungnahme. URL: <https://www.ihk.de/braunschweig/beratung-und-service/umwelt-und-energie/umwelt/abfall-kreislaufwirtschaft/abfallende-verordnung-dihk-stellungnahme-6050044> Zuletzt geprüft am 12.11.2024.
- DEUTSCHE ROCKWOOL GmbH & Co. KG. (2024). Rockcycle®: Das Rücknahmesystem für Steinwolle. URL: https://www.prosperkolleg.de/wp-content/uploads/2023/08/praxisbeispiel_CE_rockwool.pdf Zuletzt geprüft am 09.10.2024.
- Deutscher Asphaltverband. (2024). Asphalt - Was ist das eigentlich? URL: <https://www.asphalt.de/basics/asphalt-fuer-jedermann/was-ist-das-eigentlich/#:~:text=ist%20das%20eigentlich%3F-,Asphalt,die%20leicht%20fl%C3%BCchtigen%20Inhaltsstoffe%20verdunsten.> Zuletzt geprüft am 28.10.2024.
- Ekins, P., Domenech Aparisi, T., Drummond, P., Bleischwitz, R., Hughes, N. & Lotti, L. (2020). The circular economy: What, why, how and where (Background paper for an OECD/EC Workshop on 5 July 2019 within the workshop series “Managing environmental and energy transitions for regions and cities”, Paris).

- Ellen MacArthur Foundation. (2022a). Circulate products and materials. URL: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circulate-products-and-materials> Zuletzt geprüft am 15.11.2024.
- Ellen MacArthur Foundation. (2022b). Eliminate waste and pollution. URL: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/eliminate-waste-and-pollution?_gl=1*1x0r761*_up*MQ.*_ga*NjcxNTIxMjA1LjE3MzE2ODkyMjI.*_ga_V32N675KJX*MTczMTY4OTIxOS4xLjAuMTczMTY4OTIxOS4wLjAuMA. Zuletzt geprüft am 15.11.2024.
- Ellen MacArthur Foundation. (2022c). Regenerate nature. URL: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/regenerate-nature?_gl=1*1x0r761*_up*MQ.*_ga*NjcxNTIxMjA1LjE3MzE2ODkyMjI.*_ga_V32N675KJX*MTczMTY4OTIxOS4xLjAuMTczMTY4OTIxOS4wLjAuMA. Zuletzt geprüft am 15.11.2024.
- Ellen MacArthur Foundation. (2024). What is a circular economy? URL: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview> Zuletzt geprüft am 15.11.2024.
- Elsner, P. (Hrsg.). (2008). VDI-Buch. Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen ; mit 240 Tabellen (7., neu bearb. und erw. Aufl.). Springer.
- Entwistle, D. (2024). Recycling Post-Consumer Glass: a Challenge and an Opportunity for the Flat Glass Industry. Challenging Glass Conference Proceedings, 9. <https://doi.org/10.47982/cgc.9>
- Erkman, S. (1997). Industrial ecology: an historical view. *Journal of Cleaner Production*, 5(1-2), 1–10.
- Esposito, M., Tse, T. & Soufani, K. (2018). Introducing a Circular Economy: New Thinking with New Managerial and Policy Implications. *California Management Review*, 60(3), 5–19. <https://doi.org/10.1177/0008125618764691>
- Europäische Kommission. (2020). Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM%3A2020%3A98%3AFIN> Zuletzt geprüft am 05.11.2024.
- Europäische Kommission. (2024). Der europäische Grüne Deal. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de Zuletzt geprüft am 05.11.2024.
- Europäisches Parlament. (2020). VERORDNUNG (EU) 2020/852. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0852> Zuletzt geprüft am 16.11.2024.
- Europäisches Parlament. (2023). Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile. URL: <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile> Zuletzt geprüft am 15.11.2024.

- Europäisches Parlament. (2024). RICHTLINIE 2008/98/EG. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0098-20240218> Zuletzt geprüft am 16.11.2024.
- European Environment Agency. (2024). Addressing the environmental and climate footprint of buildings. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/addressing-the-environmental-and-climate-footprint-of-buildings>.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2024). Eigenschaften und Aufbau. URL: <https://holz.fnr.de/rohstoff-holz/eigenschaften-und-aufbau#:~:text=Hauptbestandteile%20des%20Holzes&text=Sie%20bestehen%20aus%20den%20drei,beispielsweise%20weniger%20Lignin%20als%20Nadelh%C3%B6lzer>. Zuletzt geprüft am 03.09.2024.
- forstwirtschaft-in-deutschland.de. (2024). Die Sylvicultura Oeconomica. URL: <https://www.forstwirtschaft-in-deutschland.de/forstwirtschaft/nachhaltigkeit/sylvicultura-oeconomica/> Zuletzt geprüft am 20.11.2024.
- Fraunhofer-Institut für Silicatforschung. (2016). Innovation und Restauration für Glas in Bau und Architektur. URL: <https://www.isc.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/pressearchiv/pressearchiv-2016/innovation-und-restauration-fuer-glas-in-bau-und-architektur.html?L=0&cHash=7fd8c12d17455fffce2681e4f1fe5f39> Zuletzt geprüft am 23.10.2024.
- Fromm, L. (2023). Bauen mit Pilzen: Herstellung, Materialien und Einsatzbereiche. URL: <https://www.dabonline.de/bautechnik/bauen-pilzen-myzel-steine/> Zuletzt geprüft am 04.11.2024.
- Geisendorf, S. & Pietrulla, F. (2018). The circular economy and circular economic concepts— a literature analysis and redefinition. *Thunderbird International Business Review*, 60(5), 771–782. <https://doi.org/10.1002/tie.21924>
- GreenJams. (2022). Agrocrete® Hollow Blocks. URL: https://greenjams.org/wp-content/uploads/2023/06/Digital_Agrocrete-Hollow-Block-Brochure.pdf Zuletzt geprüft am 20.11.2024.
- Grimm, R. (2015). Zement – Mörtel – Putz: Was ist der Unterschied? *Baustoffwissen.de*. URL: <https://www.baustoffwissen.de/zement--moertel--putz-was-ist-der-unterschied-31102023> Zuletzt geprüft am 27.11.2024.
- Grimm, R. (2024). Überblick: Kunststoffe im Bauwesen. URL: <https://www.baustoffwissen.de/ueberblick-kunststoffe-im-bauwesen-31102023> Zuletzt geprüft am 30.09.2024.
- Grossarth, J. (Hrsg.). (2024). *Bioökonomie und Zirkulärwirtschaft im Bauwesen*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-40198-6>
- Gröneweg, S. (2024). Ein Haus, sechs Wohnungen und 118 Stunden Druckzeit. *Handelsblatt*. URL: <https://www.handelsblatt.com/finanzen/immobilien/3d-druck-ein-haus-sechs-wohnungen-und-118-stunden-druckzeit-04/100096008.html> Zuletzt geprüft am 23.01.2025.

- Hengstmann, E. & Tamminga, M. (2022). Was ist Plastik? In E. Hengstmann & M. Tamminga (Hrsg.), Plastik in der Umwelt (S. 1–17). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-65864-2_1
- Hildebrandt, J., Hagemann, N. & Thrän, D. (2017). The contribution of wood-based construction materials for leveraging a low carbon building sector in europe. *Sustainable Cities and Society*, 34, 405–418. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.013>
- Holtz, G., Schüwer, D. & Samadi, S. (2024). Klimaneutrale Produktion von Stahl, Zement und Kunststoffen : Lösungswege und Herausforderungen (M. Herten, Hg.). Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. <https://doi.org/85933>
- Holzrecycling & Biomasse Schmid GmbH. (2024). Altholzrecycling für Mensch und Umwelt: nachwachsende Rohstoffe optimal aufgearbeitet. URL: <https://holzrecycling-schmid.de/> Zuletzt geprüft am 15.10.2024.
- Hopewell, J., Dvorak, R. & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 364(1526), 2115–2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
- Hornbogen, E., Warlimont, H. & Skrotzki, B. (2019). *Metalle*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57763-9>
- Hossain, M. U., Ng, S. T., Antwi-Afari, P. & Amor, B. (2020). Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109948. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109948>
- Husain, A. A., Hasan, W. Z. W., Shafie, S., Hamidon, M. N. & Pandey, S. S. (2018). A review of transparent solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 779–791. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.031>
- Husgafvel, R. & Sakaguchi, D. (2023). Circular Economy Development in the Wood Construction Sector in Finland. *Sustainability*, 15(10), 7871. <https://doi.org/10.3390/su15107871>
- Ilgın, H. E. & Karjalainen, M. (2022). *Massive Wood Construction in Finland: Past, Present, and Future*. Tampere University, Tampere. URL: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/140692/81864.pdf?sequence=1>.
- Industrie-verband Hartschaum e. V. (IVH). (2024). Recycling von EPS-Hartschaum. URL: <https://www.ivh.de/umwelt/recycling/> Zuletzt geprüft am 09.10.2024.
- InformationsZentrum Beton. (2019). Silikastaub. URL: <https://beton.wiki/index.php?title=Silikastaub> Zuletzt geprüft am 08.12.2024.
- Intini, F. & Kühtz, S. (2011). Recycling in buildings: an LCA case study of a thermal insulation panel made of polyester fiber, recycled from post-consumer PET bottles. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(4), 306–315. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0267-9>

- Jawaid, M., Singh, B., Kian, L. K., Zaki, S. A. & Radzi, A. M. (2023). Processing techniques on plastic waste materials for construction and building applications. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 40, 100761. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100761>
- Joglekar, S. N., Kharkar, R. A., Mandavgane, S. A. & Kulkarni, B. D. (2018). Sustainability assessment of brick work for low-cost housing: A comparison between waste based bricks and burnt clay bricks. *Sustainable Cities and Society*, 37, 396–406. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.025>
- Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A. & John, S. (2020). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. *Materials & Design*, 187, 108397. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397>
- Klimaforum Bau. (2021). Kunststoffprodukte in der Baubranche: Vorteile, Probleme, Lösungsansätze. URL: <https://klimaforum-bau.de/2021/06/kunststoffprodukte-in-der-baubranche-vorteile-probleme-loesungsansaeetze/> Zuletzt geprüft am 30.09.2024.
- Kober, V. (2023). Metall am Bau: Alle wichtigen Metallarten auf einen Blick. URL: <https://www.wohnet.at/bauen/bauvorbereitung/metallarten-14118> Zuletzt geprüft am 10.09.2024.
- Kortmann Beton GmbH & Co. KG. (2024). Fließbeton. URL: <https://www.kortmann-beton.de/glossar/fliessbeton/#:~:text=Zum%20F%C3%BCllen%20von%20Schalungen%20wird,zur%20Instandsetzung%20von%20Betonbauwerken%20ausgelegt.> Zuletzt geprüft am 07.10.2024.
- Lange, J., Feucht, T. & Erven, M. (2020). 3D printing with steel. *Steel Construction*, 13(3), 144–153. <https://doi.org/10.1002/stco.202000031>
- López-García, A. B., Cotes-Palomino, T., Uceda-Rodríguez, M., Moreno-Maroto, J. M., Cobo-Ceacero, C. J., Andreola, N. M. F. & Martínez-García, C. (2021). Application of Life Cycle Assessment in the Environmental Study of Sustainable Ceramic Bricks Made with ‘alperujo’ (Olive Pomace). *Applied Sciences*, 11(5), 2278. <https://doi.org/10.3390/app11052278>
- Lutter, S., Kreimel, J., Giljum, S., Dittrich, M., Limberger, S., Ewers, B., Schoer, K., Manstein & Christopher. (2022). Die Nutzung natürlicher Ressourcen: Ressourcenbericht für Deutschland 2022. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb_die_nutzung_natuerlicher_ressourcen_2022_0.pdf Zuletzt geprüft am 19.11.2024.
- Majumder, A., Achenza, M., Mastino, C. C., Baccoli, R. & Frattolillo, A. (2023). Thermoacoustic building insulation materials fabricated with recycled fibers – Jute, Wool and Loofah. *Energy and Buildings*, 293, 113211. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113211>
- Marsh, A. T., Velenturf, A. P. & Bernal, S. A. (2022). Circular Economy strategies for concrete: implementation and integration. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132486. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132486>
- Matthis, R. (5. April 2024). Interview durch A. Hoffmann.

- McDonough, W. & Braungart, M. (2010). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. North point press.
- McMakler. (2021, 17. November). Sanierungsbedarf am Immobilienmarkt [Pressemitteilung]. URL: https://a.storyblok.com/f/88871/x/9e74c4d5f2/211118_pressemitteilung_mcmakler_energieeffizienz.pdf Zuletzt geprüft am 19.11.2024.
- Mees, K. (2024). Nachhaltigekeit im Handwerk: Circular Economy und Ressourceneffizienz im Bauhandwerk. Zentralverband Deutsches Baugewerbe ZDB.
- mein-eigenheim.de. (2024). Landesbauordnungen im Überblick. URL: <https://www.mein-eigenheim.de/baurecht/landesbauordnung-bundeslaender.html> Zuletzt geprüft am 11.11.2024.
- Metals for Buildings. (2024). Metalle in Gebäuden: Unentbehrlich und vollständig wiederverwertbar. URL: <https://www.metalsforbuildings.eu/assets/pdf/bcb0e4fa2f/MFB-leaflet-LR-DE.pdf> Zuletzt geprüft am 11.09.2024.
- Metsch, J., Hiendlmeier, S., Genßler, M. & Borchert, H. (2024). Energieholzmarkt Bayern 2022. URL: https://www.carmen-ev.de/wp-content/uploads/2024/08/energieholzmarktbericht_2022_endversion.pdf.
- Mettke, A. (2010). Ökologische Prozessbetrachtungen - RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen): Untersuchungsergebnisse der Prozessanalysen: · Herstellung der RC-Gesteinskörnung · Herstellung des RC-Betons · Herstellung von Normalbeton. BTU Cottbus, Cottbus.
- Meyer, D. (2024). Gewerbeabfallverordnung. Zentralverband des Deutschen Handwerks (ZDH). URL: <https://www.zdh.de/ueber-uns/fachbereich-wirtschaft-energie-umwelt/umweltpolitik/gewerbeabfallverordnung/> Zuletzt geprüft am 11.11.2024.
- Meyerburger. (2024). Der Solardachziegel in Meyer Burger Qualität. URL: https://www.meyerburger.com/fileadmin/user_upload/Solardachziegel/Solardachziegel-Meyer-Burger-Tile-Broschur-DE_web.pdf Zuletzt geprüft am 21.10.2024.
- Mineral Minds. (2024). Das unabhängige Netzwerk für ver- und Entsorgung. URL: <https://mineral-minds.de/> Zuletzt geprüft am 05.11.2024.
- Mineral Waste Manager GmbH. (2024). Das Assistenzsystem für die Entsorgung mineralischer Abfälle. URL: <https://www.mineral-waste-manager.de/> Zuletzt geprüft am 01.12.2024.
- Mohajerani, A., Kadir, A. A. & Larobina, L. (2016). A practical proposal for solving the world's cigarette butt problem: Recycling in fired clay bricks. *Waste management* (New York, N.Y.), 52, 228–244. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.012>
- Mohan, H. T., Jayanarayanan, K. & Mini, K. M. (2021). Recent trends in utilization of plastics waste composites as construction materials. *Construction and Building Materials*, 271, 121520. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121520>

- Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104553. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>
- Müller, D. & Moser, D. (2022). Rückbau und Wiederverwendung von Holzbauten. PIRMIN JUNG Schweiz AG. URL: https://www.leidorf.com/wp-content/uploads/2022/05/R_ckbau_und_Wiederverwendung_von_Holzbauten_1651460319.pdf Zuletzt geprüft am 23.09.2024.
- Müller, H. & Wiens, U. (2016). *Beton-Kalender*. Ernst.
- N1 Circular GmbH. (2024). Das Betriebssystem der Kreislaufwirtschaft. URL: <https://n1circular.com/#jumpto-intro> Zuletzt geprüft am 25.10.2024.
- Neuhaus. (2017). *Ingenieurholzbau*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- neustark AG. (2024). Wir entfernen CO₂ aus der Atmosphäre – und speichern es dauerhaft. URL: https://www.neustark.com/de?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAxea5BhBeEiwAh4t5K2fuVl18hDaUNmGfqOk5XRTp6xez3im61tX1_qKKwjPIHYp6zX0xZBoCFTQQAvD_BwE Zuletzt geprüft am 06.12.2024.
- Niederleuthner, R. (1928). Magerungsmittel. In R. Niederleuthner (Hrsg.), *Unbildsame Rohstoffe keramischer Massen* (S. 4–17). Springer Vienna. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-5336-9_2
- Nilimaa, J. (2023). Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. *Developments in the Built Environment*, 15, 100177. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100177>
- Nippon Sheet Glass Co., Ltd. (2024). Vom Rohstoff zum Gemenge. URL: <https://www.pilkington.com/de-at/at/technologie/vom-sand-zum-glas/vom-rohstoff-zum-gemenge#> Zuletzt geprüft am 22.10.2024.
- Österreichisches Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). (2024). EU-Taxonomie-Verordnung. URL: <https://www.bmk.gv.at/green-finance/finanzen/eu-strategie/eu-taxonomie-vo.html> Zuletzt geprüft am 10.11.2024.
- Patel, H. (2024). Vacuum Concrete: Applications, Advantages, and Procedures for High-Strength Construction. URL: <https://www.bricknbolt.com/blogs-and-articles/construction-guide/vacuum-concrete> Zuletzt geprüft am 07.10.2024.
- Pearce, D. W. & Turner, R. K. (1989). *Economics of natural resources and the environment*. Johns Hopkins University Press.
- Petrović, E. & Hamer, L. (2018). Improving the Healthiness of Sustainable Construction: Example of Polyvinyl Chloride (PVC). *Buildings*, 8(2), 28. <https://doi.org/10.3390/buildings8020028>
- Pfeiffer, M., Bethe, A., Fanslau-Görlitz, D. & Zedler, J. (2010). *Nutzungsdauertabellen für Wohngebäude: Lebensdauer von Bau- und Anlagenteilen* (1. Aufl.). Bauwerk.

- Pflüger TOB GmbH. (2024). PETtherm - Der grüne Dämmstoff aus PET. Recycelt und recycelbar mit vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten. URL: <https://www.pflueger-tob.de/pettherm50/> Zuletzt geprüft am 15.10.2024.
- Pröll, M. (2020). Ziegel Lexikon: Mauerwerk Ausgabe 2020.
- Qin, Z., Jung, G. S., Kang, M. J. & Buehler, M. J. (2017). The mechanics and design of a lightweight three-dimensional graphene assembly. *Science advances*, 3(1), e1601536. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601536>
- Reike, D., Vermeulen, W. J. & Witjes, S. (2018). The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 246–264. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027>
- Reinhardt, J., Veith, C., Knappe, F. & Mellwig, P. (2022). Der Gebäudebestand steht vor einer Sanierungswelle – Dämmstoffe müssen sich den Materialkreislauf erschließen. URL: <https://www.ifeu.de/publikation/der-gebaeudebestand-steht-vor-einer-sanierungswelle-daemmstoffe-muessen-sich-den-materialkreislauf-erschliessen>.
- Ricciu, R., Besalduch, L. A., Galatioto, A. & Ciulla, G. (2018). Thermal characterization of insulating materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1765–1773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.057>
- Richter, V. (2021). Popcorn - Baustoff der Zukunft? URL: <https://www.swr.de/wissen/daemmplatten-aus-popcorn-100.html> Zuletzt geprüft am 29.10.2024.
- ROCKWOOL Group. (2024). Rockcycle®. URL: <https://www.rockwool.com/group/about-us/sustainability/environment/circularity/> Zuletzt geprüft am 09.10.2024.
- Rose, A., Sack, N., Nothacker, K. & Gassman, A. (2019). Recycling von Flachglas im Bauwesen - Analyse des Ist-Zustandes und Ableitung von Handlungsempfehlungen. URL: https://www.ift-rosenheim.de/fileadmin/IFT/Forschung/Forschungsberichte/2019/1911Kurzbericht_Flachglasrecycling_Deutsch.pdf.
- Rostek, L., Lotz, M. T., Wittig, S., Herbst, A., Loibl, A. & Espinoza, L. T. (2022). A dynamic material flow model for the European steel cycle (Karlsruhe; Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI).
- Rothe, J. & Glüge, M. (2024). Stoffstrom. In J. Rothe & M. Glüge (Hrsg.), *essentials. Ökobilanzen* (S. 9–12). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-68575-4_3
- sanier.de. (2024). Betonversiegelung. URL: <https://www.sanier.de/malerarbeiten/farbe/betonversiegelung> Zuletzt geprüft am 07.10.2024.
- Santos, G., Esmizadeh, E. & Riahinezhad, M. (2024). Recycling Construction, Renovation, and Demolition Plastic Waste: Review of the Status Quo, Challenges and Opportunities.

- Journal of Polymers and the Environment, 32(2), 479–509. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02982-z>
- Schaeffer, H. A. & Langfeld, R. (2020). *Werkstoff Glas*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-60260-7>
- Schneider, J., Kuntsche, J., Schula, S., Schneider, F. & Wörner, J.-D. (Hrsg.). (2016). *Glasbau*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68927-0>
- Schober, G. (2005). Die chemischen Umsetzungen bei der Herstellung von Poren beton: Aus Zement, Kalk, Gips und Quarzsand wird Porenbeton. *ZKG International*(58), 63–70. URL: http://www.pb-aac.de/Drucksachen/ZKG_58_Schober_Die_chemischen_Umsetzungen_bei_PB.pdf.
- Schweier, R. (2022). Modellfabrik für Carbonbeton in Leipzig eröffnet. Fakultät Wirtschaftswissenschaft und. URL: <https://fww.htwk-leipzig.de/mueller-scm/nachrichtenuuebersicht/einzelansicht/artikel/modellfabrik-fuer-carbonbeton-in-leipzig-eroeffnet> Zuletzt geprüft am 10.09.2024.
- Schyns, Z. O. G. & Shaver, M. P. (2021). Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromolecular rapid communications*, 42(3), e2000415. <https://doi.org/10.1002/marc.202000415>
- Sezer, A. A. & Fredriksson, A. (2021). Environmental impact of construction transport and the effects of building certification schemes. *Resources, Conservation and Recycling*, 172, 105688. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105688>
- Song, Q., Duan, H., Yu, D., Li, J., Wang, C. & Zuo, J. (2018). Characterizing the essential materials and energy performance of city buildings: A case study of Macau. *Journal of Cleaner Production*, 194, 263–276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.148>
- Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature*, 531(7595), 435–438. <https://doi.org/10.1038/531435a>
- Stahel, W. R. & Reday-Mulvey, G. (1981). *Jobs for tomorrow: the potential for substituting manpower for energy*. Vantage Press.
- Statistisches Bundesamt. (2021). *Produzierendes Gewerbe: Gewerbegruppen der Handwerksstatistiken nach Handwerksordnung Stand 2021*. URL: https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/Handwerk/gewerbegruppen.pdf?__blob=publicationFile Zuletzt geprüft am 18.11.2024.
- Statistisches Bundesamt. (2022a). *Handwerk Strukturdaten 2022*. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Handwerk/aktuell-struktur-handwerk.html> Zuletzt geprüft am 18.11.2024.
- Statistisches Bundesamt. (2022b). *Unternehmen, Beschäftigte und Umsatz in ausgewählten Wirtschaftsabschnitten im Berichtsjahr 2022*. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Handwerk/Tabellen/unternehmen-beschaeftigte-umsatz-wirtschaftsabschnitte.html?nn=207320> Zuletzt geprüft am 18.11.2024.

- Statistisches Bundesamt. (2024). Abfallaufkommen im Jahr 2022 um 3,0 % geringer als im Vorjahr. URL: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/06/PD24_216_321.html
Zuletzt geprüft am 12.11.2024.
- Stumm, A. (2023). Monitoring Bad Aibling. *Bauwelt*(9.2023), 50–57. URL: <https://www.bauwelt.de/dl/1941484/artikel.pdf>.
- Tonabbau im Westerwald (22. Juni 2021). SWR. URL: <https://www.ardmediathek.de/video/natuerlich/tonabbau-im-westerwald/swrfernsehen/Y3JpZDovL3N3ci5kZS9hZXgvczEyNTg0ODQ>.
- Tam, V. W. & Tam, C. M. (2006). A review on the viable technology for construction waste recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 47(3), 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.12.002>
- Technische Universität München. (2024). Timber Earth Slab. URL: <https://www.cee.ed.tum.de/hbb/forschung/laufende-forschungsprojekte/timber-earth-slab/>
Zuletzt geprüft am 20.11.2024.
- Teich, M., Scherer, C., Schuster, M., Brandenstein, M. & Elstner, M. (2024). Reuse and remanufacturing of insulated glass units. *Glass Structures & Engineering*. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.1007/s40940-024-00276-x>
- Tesla. (2024). Solar Roof. URL: <https://www.tesla.com/solarroof> Zuletzt geprüft am 21.10.2024.
- thyssenkrupp Steel Europe AG. (2024). thyssenkrupp Steel Europe startet die grüne Transformation in Duisburg. URL: <https://transformation.thyssenkrupp-steel.com/> Zuletzt geprüft am 15.10.2024.
- Timm, H., Allmendinger, T. & Strehle, N. (2019). *Estriche, Parkett und Bodenbeläge*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-25847-4>
- Umweltbundesamt. (2019a). Beton: Factsheet. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/factsheet_beton_fi_barrierefrei.pdf Zuletzt geprüft am 26.08.2024.
- Umweltbundesamt. (2019b). Mörtel/Putz. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/factsheet_moertelputz_fi_barrierefrei.pdf Zuletzt geprüft am 28.10.2024.
- Umweltbundesamt. (2020). Eisen und Stahl. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/eisenstahl> Zuletzt geprüft am 11.09.2024.
- Umweltbundesamt. (2021). Kunststoffrecycling in der Baubranche stärken. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/kunststoffrecycling-in-der-baubranche-staerken> Zuletzt geprüft am 27.11.2024.
- Umweltbundesamt. (2022). Abfallrecht. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/abfallrecht>
Zuletzt geprüft am 12.11.2024.

- Umweltbundesamt. (2023). Glas und Altglas. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/glas-altglas#massenprodukt-glas> Zuletzt geprüft am 22.10.2024.
- Umweltbundesamt. (2024a). Mineralik. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sekundaerrohstoffwirtschaft-mineralik> Zuletzt geprüft am 28.10.2024.
- Umweltbundesamt. (2024b). Treibhausgasminderungsziele Deutschlands. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands#internationale-vereinbarungen-weisen-den-weg> Zuletzt geprüft am 25.11.2024.
- United Nations Environment Programme. (2023). Building Materials and the Climate: Constructing a New Future. URL: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/43293>.
- Unterrainer, W. (2018). Wood – A Sustainable Building Material?, Aarhus.
- Vallero, C. (2023). Zirkuläres Bauen. KfW. URL: <https://www.kfw.de/stories/wirtschaft/gruenden/concular/> Zuletzt geprüft am 28.10.2024.
- Weber Plastik GmbH. (2024). Kunststoffdachziegel „BIBER“. URL: https://www.weber-plastik.de/assets/files/modules/weber_dachziegel.pdf Zuletzt geprüft am 15.10.2024.
- Wienerberger. (2024). Recycling von Altziegeln. URL: <https://www.wienerberger.de/klimaschutz/recycling-star-ziegel.html> Zuletzt geprüft am 18.09.2024.
- Wimmers, G. (2017). Wood: a construction material for tall buildings. *Nature Reviews Materials*, 2(12). <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.51>
- Wiprächtiger, M., Haupt, M., Heeren, N., Waser, E. & Hellweg, S. (2020). A framework for sustainable and circular system design: Development and application on thermal insulation materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104631. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104631>