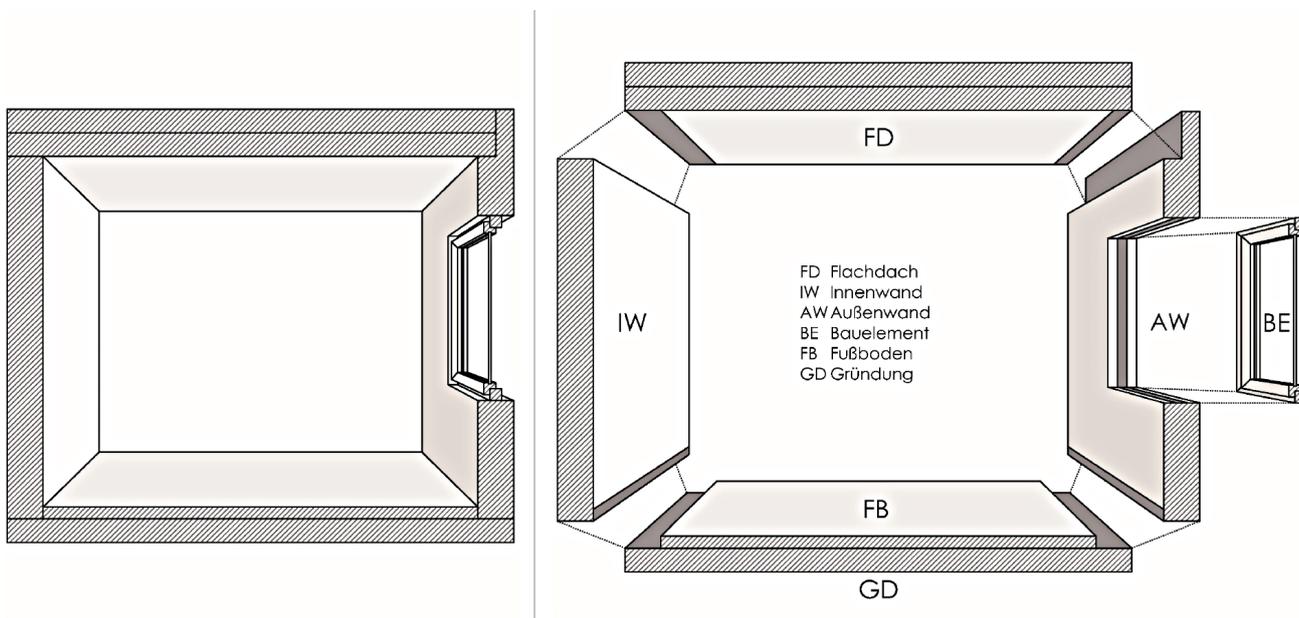


Handbuch

Konstruktionen planen





Optionen für Re-Use-fähige Konstruktionen

mit Fokus auf Gebäude mit kurzen Nutzungsdauern

Dorsch Lutz ¹; Kindelbacher Simon ¹; Fulterer Anna Maria ²; Zirkl Andrea ²; Bauer Barbara ³; Fellner Maria ³; Dobra Tudor ³; Huemer-Kals Veronika ³; Meissner Markus ⁴; Orth Daniel ⁴; Geiger Gerald ⁵; Portugaller Benjamin ⁵; Maydl-Stöckl Julia ⁶; Richter-Trummer Rupert ⁶; Fischer Vera ⁷; Sauer Sophia ⁷

¹ Fachhochschule Salzburg GmbH (FH Salzburg), Kuchl, Salzburg

² AEE - Institut für nachhaltige Technologien (AEE), Gleisdorf, Steiermark

³ IBO - Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie (IBO), Wien

⁴ Österreichisches Ökologie-Institut (ÖÖI), Wien

⁵ Spar GmbH (SPAR), Salzburg

⁶ Steiermärkische Krankenanstaltengesellschaft m. b. H. (KAGes), Graz, Steiermark

⁷ ATP sustain GmbH (ATP), Wien

Juni, 2024

BUILD RE-USE – 100 % Re-Use und Recycling bei Gebäuden mit kurzen Nutzungszyklen



 Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Die Autor:innen distanzieren sich hiermit ausdrücklich von den Inhalten aller verlinkten Seiten dieses Berichts, wir machen uns diese Inhalte nicht zu eigen.

Autoren

Dorsch Lutz, Kindelbacher Simon | Fachhochschule Salzburg GmbH (FH Salzburg), Kuchl, Salzburg

mit Beiträgen von

Anna Maria Fulterer | AEE – Institut für nachhaltige Technologien, Gleisdorf, Steiermark

Barbara Bauer, Maria Fellner, Tudor Dobra, Veronika Huemer-Kals | IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie, Wien

Markus Meissner, Daniel Orth | Österreichisches Ökologie-Institut, Wien

mit Unterstützung durch

Gerald Geiger, Benjamin Portugaller | Spar GmbH, Salzburg

Julia Maydl, Rupert Richter-Trummer | KAGes – Steiermärkische Krankenanstaltengesellschaft m. b. H., Graz, Steiermark

Vera Fischer, Sophia Sauer | ATP sustain GmbH, Wien

Lektorat

Anna Maria Fulterer | AEE – Institut für nachhaltige Technologien, Gleisdorf, Steiermark

Barbara Bauer | IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie, Wien

Umschlagsbild

Darstellung eines beispielhaften untersuchten Raums im Schnitt und Explosionszeichnung der das Raumvolumen umschließenden Bauteile;

Quelle: eigene Darstellung

Ko-finanziert vom BMK

in der 1. Ausschreibung Kreislaufwirtschaft FFG Projektnummer F0999889848

Kuchl, 2024

Kurzfassung

Die Planung und Umsetzung von wiederverwendbaren Konstruktionen, wie Außenwänden und Flachdächern, ist mit vielfältigen Barrieren konfrontiert und noch kein standardmäßiger Vorgang. Diesbezüglich erfordern sie einen abweichenden Prozess der Planung und Umsetzung. Das vorliegende Dokument behandelt entsprechende Planungsprozesse und ist im Rahmen des FFG-geförderten Forschungsprojekts „Build Re-Use – 100 % Re-Use und Recycling bei Gebäuden mit kurzen Nutzungszyklen“ entstanden. Bei kurzen Nutzungsdauern, wie für viele Nichtwohngebäuden zutreffend, erfährt die Wiederverwendbarkeit von Komponenten eine gesteigerte Relevanz für die Lebenszyklusanalyse der Umweltauswirkungen. Das Dokument zeigt im Sinne der Kreislaufwirtschaft Optionen für wiederverwendbare Konstruktionen bei Neubauten, Sanierungen, Erweiterungen oder dem Austausch von Bauteilen im Bestand. Handlungsempfehlungen für die Bergung wiederverwendbarer Bauteile aus bestehenden Gebäuden werden auszugsweise angeführt und ansonsten in weiteren Veröffentlichungen zum Projekt behandelt. Der Schwerpunkt der vorliegenden Betrachtung liegt auf der Reversibilität der Einzelkomponenten oder Bauteilschichten.

Das Dokument gliedert sich in zwei Hauptbestandteile:

- Eine Rückschau auf theoretische Ansätze zu Re-Use-fähigen Konstruktionen (Grundlagen)
- Eine Marktschau auf praktische Ansätze zu Re-Use-fähigen Konstruktionen (Optionen)

Die Kombination aus theoretischen Ansätzen und praktischen Beispielen ist als methodischer Einstieg in die Konstruktion von Re-Use-fähigen Bauteilen zu verstehen. Es werden die Grundprinzipien für reversible Bauteilaufbauten erläutert. Anschließend werden maßgebliche Bauteile eines Gebäudes, wie die obersten und untersten Geschoßdecken oder Außenwände, betrachtet. Übliche konventionelle Konstruktionsweisen werden hinsichtlich Re-Use-Barrieren untersucht und es werden Optionen zur Behebung der identifizierten Barrieren gezeigt. Hierbei wird auf am Markt verfügbare oder im Rahmen von Forschungsvorhaben erprobte Produktbeispiele, die solche Optionen darstellen können, eingegangen. Die Beispiele sind nicht als abschließende Lösung zu interpretieren, sondern stehen stellvertretend für Ansätze zum Abbau von Re-Use-Barrieren.

Inhaltsverzeichnis

Impressum.....	2
Kurzfassung	3
Inhaltsverzeichnis.....	4
1. Einleitung.....	5
1.1. Betrachtungsrahmen.....	5
Use Cases.....	6
Technische Anforderungen, Potentiale und Barrieren (verfasst: ÖÖI)	7
Re-Use-Prozess und Kooperationsmodelle (verfasst: AEE intec)	8
Bewertung und Datenmanagement (verfasst: IBO).....	9
Begrifflichkeiten der Kreislauf- und Abfallwirtschaft	10
1.2. Motive und Theorien des kreislauffähigen Bauens.....	12
Historische Entwicklungen zur Wiederverwendung von Konstruktionen	12
Ableitung von Ansätzen für die Methodik	20
2. Methodik	22
3. Optionen für Re-Use-fähige Konstruktionen.....	25
3.1. Flachdach, oberste Geschoßdecke, Träger	26
3.2. Innenwand.....	30
3.3. Außenwand	34
3.4. Bauelement	39
3.5. Fußboden	41
3.6. Gründung, unterste Geschoßdecke	44
4. Optionen für die Wiederverwendung von Bauteilen aus dem Bestand	48
Anhänge	49
Glossar (verfasst: IBO)	49
Literaturverzeichnis.....	52
Abbildungsverzeichnis.....	56
Tabellenverzeichnis	58
Produktbeispielverzeichnis.....	59

1. Einleitung

1.1. Betrachtungsrahmen

Im Forschungsprojekt Build Re-Use werden Konzepte für die Transformation von Gebäuden mit kurzen Nutzungszyklen zu kreislauffähigen Konstruktionen entwickelt. Die Entwicklung und Evaluierung von Maßnahmen erfolgt anhand dreier maßgeblicher Use Cases - einem Supermarkt, einem Interimsgebäude eines Krankenhauses und dem Mieterausbau in einem Bürogebäude. Die Unterteilung des Projektumfangs in Arbeitspakete und deren Wechselwirkung ist in Abbildung 1 dargestellt.

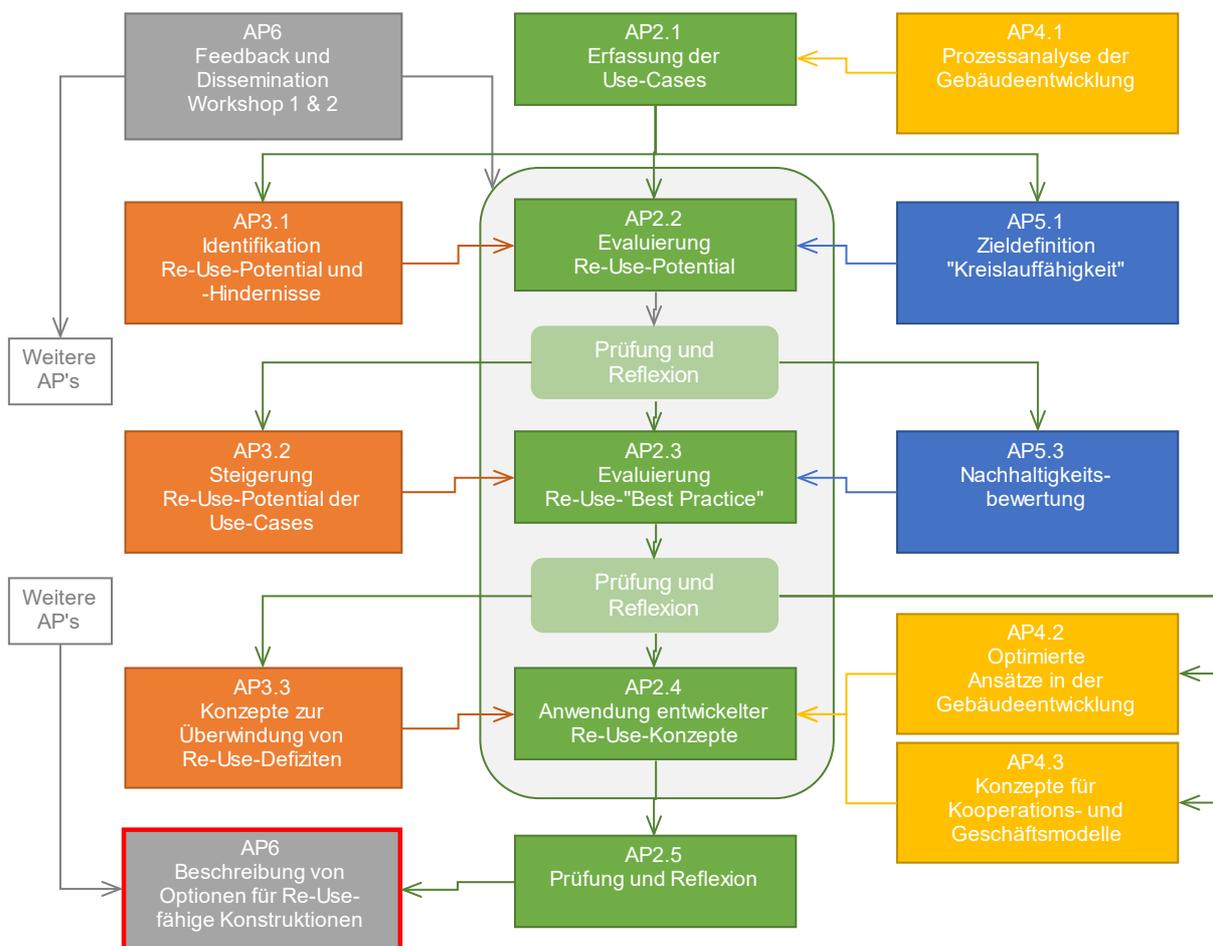


Abbildung 1: Eiorndung des vorliegenden Dokuments im Forschungsprojekt Build Re-Use und Wechselwirkung mit den Arbeitspaketen (AP); Quelle: eigene Darstellung

Die Erkenntnisse aus den Arbeitspaketen „Technische Anforderungen, Potentiale und Barrieren“ (3), „Prozesse“ (4) und „Bewertungssysteme“ (5) werden durch Prüfung und Reflexion im Arbeitspaket „Use Cases“ (2) evaluiert. Dieses Dokument ist das Ergebnis und Weiterentwicklung des Prozesses. Zu Beginn werden weitere Erkenntnisse aus den Arbeitspaketen 3, 4 und 5 in komprimierter Form aufgezeigt. Detailliertere Betrachtungen zu den Arbeitspaketen finden sich sowohl bei den im Rahmen der Arbeitspakete entstandenen Veröffentlichungen sowie im publiziertem Endbericht.

Use Cases

Um die üblichen Barrieren und Potentiale für Re-Use-fähige Konstruktionen an realen Beispielen erfassen und bewerten zu können, stehen dem Projekt Build Re-Use drei bereits umgesetzte, beziehungsweise in Planung befindliche Gebäude mit kurzen Nutzungszyklen und die zugehörigen Planungsunterlagen als Anschauungsbeispiele zu Verfügung. Diese weisen folgende Nutzungen auf:

- Lebensmittelmarkt
- Interimsgebäude im Sanitätsbereich
- Mieterausbau eines Bürogebäudes

Die anvisierten Nutzungsdauern der Gebäude betragen laut den Angaben der Eigentümer*innen, beziehungsweise Planer*innen, zwischen zehn bis 15 Jahre. Nach Ende der Nutzungsdauer erfolgt beim Supermarkt üblicherweise ein Rückbau und gegebenenfalls Ersatzneubau, beim Interimsgebäude ein Rückbau am jetzigen Standort und beim Mieterausbau des Bürogebäudes ist eine von Ausbaukonstruktionen entkernte Rückgabe der Räumlichkeiten vereinbart. Die unterschiedlichen Nutzungsrandbedingungen bedingen verschiedene Konzepte für Re-Use-fähige Konstruktionen, welche in Deliverable 2.1 „Beschreibung der drei Use-Cases und ihrer Spezifikationen“ dargestellt sind.

Um zu untersuchen, warum üblich angewendeten Bauweisen mehrheitlich nicht Re-Use-fähig sind, wurde eine Literaturrecherche zu Barrieren und Potentialen durchgeführt (Deliverable 2.2 „Re-Use: Barrieren und Potentiale bei bestehenden Gebäuden“). Anschließend erfolgte eine Übertragung der Erkenntnisse auf die übliche Konstruktionsweisen der exemplarischen Gebäude (Deliverable 2.3 „Status quo von Re-Use-Potential und -Defiziten bei Use Cases“). Hierfür wurden die konventionellen Aufbauten der Bauteile, die verwendeten Materialien sowie die Verbindung der Bauteilschichten untereinander erfasst und bewertet (Abbildung 4). Je nach Use-Case liegen bei den konventionellen Ausführungen verschiedene Ausmaße an Re-Use-Fähigkeit vor, mehrheitlich stellen die üblichen Konstruktionsweisen allerdings Re-Use-Barrieren dar. Das Dokument zeigt Optionen, mit welchen diese Barrieren bei Konstruktionen überwunden werden können.

ID BT-Schicht	Einzel-Komponenten	Materialzuordnung (Hauptbestandteil)	Dicke d [m]	Inhomogen [Volumen-%]	Volumen V [dm ³ /m ² BT]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Masse m [kg/m ² BT]
[Auswahl erforderlich]							
BT 6	SPAR - AW6	[Bauteilerfassung]	flächig	[Bauteilmenge]	135 m ²	[Quellverweis]	SPAR-22
BT 6.1	Raumluft						
BT 6.1	Kalk-Gipsputz	Mineralisch	0,015	100%	15,0	1150	17,3
BT 6.2	Beton - Halbfertigteil ausbetoniert	Mineralisch	0,250	99%	247,5	2000	495,0
BT 6.2 a	Bewehrungsstahl	Metallisch		1%	2,5	7850	19,6
BT 6.3	Holz - Konstruktionsholz	Nachwachsend	0,160	10%	16,0	500	8,0
BT 6.3 a	Dämmmatte MiWo	Mineralisch		90%	144,0	14	2,0
BT 6.4	Winddichtungsbahn	Synthet. Polymere	0,001	100%	0,6	325	0,2
BT 6.5	Holz - Konstruktionsholz	Nachwachsend	0,080	10%	8,0	500	4,0
BT 6.5 a	Luftschicht	Luftschicht		90%	72,0	0	0,0
BT 6.6	Holz - Sichtschalung	Nachwachsend	0,022	100%	22,0	500	11,0
BT 6.7							
BT 6.8							
BT 6.9							
BT 6.10							
BT 6.11							
BT 6.12							
	Außenluft	[Gesamtstärke]	0,528			[Bauteil-Flächengewicht]	557,1

Volumenverteilung je m²/lfm Bauteil

Massenverteilung je m²/lfm Bauteil

Abbildung 2: Auszug aus der schematischen Erfassung des Bauteils "SPAR - AW6" (Außenwandkonstruktion Nummer 6 des Lebensmittelmarkts) und Verteilung der Materialitäten; Quelle: eigene Darstellung.

Technische Anforderungen, Potentiale und Barrieren (verfasst: ÖÖI)

Barrieren für Re-Use sind unter anderem die technische Komplexität bei der Entnahme und Wiederverwendung von Bauteilen, rechtliche und normative Einschränkungen, die Sicherstellung der Qualität und Sicherheit wiederverwendeter Materialien sowie die Verfügbarkeit von Informationen über nutzbare Bauteile und ihre Eigenschaften. Die Überwindung dieser Barrieren erfordert innovative Lösungsansätze und eine enge Zusammenarbeit zwischen den Akteur*innen der Baubranche, Abbruchunternehmen, sowie der Politik und Forschung, um die Potenziale der Wiederverwendung in Rück- und Neubau voll auszuschöpfen.

Für eine Wiederverwendung müssen Bauelemente **technische Anforderungen** erfüllen. Dazu benötigen sie geeignete Eigenschaften hinsichtlich Qualität und Zustand, Verbindungstechniken, Kompatibilität mit neuen Bauvorhaben sowie Langlebigkeit und Funktionalität.

Zentrale Handlungsfelder für den verwertungsorientierten Rückbau und die Wiederverwendung in den Prozessphasen von der Planung eines Neubaus bis zum Rückbau und Wiedereinbau sind:

- **Einsatz lösbarer Verbindungen:** Bauteile sollten so konstruiert sein, dass sie leicht demontiert werden können, indem beispielsweise auf leicht zugängliche Montageanschlüsse und lösbare Verbindungstechniken zurückgegriffen wird. Dies ermöglicht eine effiziente Trennung und Wiederverwendung von Materialien.
- **Qualität und Instandhaltung in der Nutzungsphase:** Um die Wiederverwendbarkeit der Materialien zu gewährleisten, ist eine hohe Qualität und Langlebigkeit entscheidend. Dies erfordert regelmäßige Instandhaltungsmaßnahmen während des Nutzungszeitraums und die Möglichkeit zur Wartung.
- **Design für Wiederverwendung / Einsatz lösbarer Verbindungen:** Bauprojekte sollen darauf ausgelegt sein, dass Bauelemente und Materialien leicht demontiert und wiederverwendet werden können. Dies erfordert eine Gestaltung, die die Demontage erleichtert und den Verschleiß minimiert, etwa durch den Einsatz lösbarer Verbindungstechniken und die Integration von Revisionsöffnungen. Leicht zugängliche Montageanschlüsse ermöglichen eine effiziente Demontage und damit die Trennung und Wiederverwendung von Materialien. Dabei ist es essenziell, mutwillige Beschädigung durch Nutzer*innen und Verschleiß zu verhindern, etwa durch die Verwendung geeigneter Verbindungsstücke und Abdeckkappen.
- **Standardisierung und Zertifizierung:** Die Einführung von Standards und Zertifizierungen für wiederverwendbare Bauteile und Produkte kann die Vertrauenswürdigkeit und den Marktwert dieser Materialien erhöhen. Dadurch werden die Akzeptanz und der Einsatz von wiederverwendbaren Elementen in Bauvorhaben gefördert.
- **Information und Transparenz:** Ein zentraler Aspekt ist die Bereitstellung von Informationen über verfügbare wiederverwendbare Bauteile und ihre Eigenschaften. Plattformen oder Datenbanken können dazu beitragen, die Verfügbarkeit und Transparenz von wiederverwendbaren Materialien zu verbessern und die Suche nach geeigneten Bauteilen zu erleichtern.

Re-Use-Prozess und Kooperationsmodelle (verfasst: AEE intec)

Damit Produkte und Bauteile ein weiteres Mal verwendet werden können, sind abseits der bautechnischen weitere Hürden zu überwinden. Zwei wichtige Punkte sind:

- **Das Abfallrecht:** Es soll den Menschen vor gefährlichen und gesundheitsbeeinträchtigenden Substanzen schützen, erschwert aber die Wiederverwendung und Kreislaufwirtschaft, indem auch ungefährliche Produkte als Abfall deklariert werden und entsprechend zu behandeln sind
- **Rahmenbedingungen für Risikomanagement:** Für neue Produkte ist eindeutig definiert, welche Anforderungen sie erfüllen müssen und wie diese Eigenschaften nachgewiesen werden können, u.a. durch normierte Produktionsprozesse. Ebenso ist geregelt, wer verantwortlich ist, wenn Schäden auftreten. Damit Re-Use Produkte unkompliziert eingesetzt werden können, müssen Qualitätssicherung und Haftungsfragen geklärt sein.

Re-Use-Prozesse, Kooperations- und Geschäftsmodelle liefern Lösungen für die genannten Hürden. Die Entwicklung solcher Lösungen ist notwendig für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft.

Lösungsansätze zum Abfallrecht: Wird eine Komponente dem ursprünglichen Gebäude entnommen, und der Eigentümer will sich ihrer entledigen, dann wird sie zu Abfall. Nun darf sich nur mehr ein zertifiziertes Abfallunternehmen um die Komponente kümmern und sie gegebenenfalls zurück in die Verwendung bringen. Mögliche Lösungsansätze sind: Kauf durch Nachnutzer*in oder Rücknahme durch Hersteller*in vor Ausbau, Abfalllizenz bei Händler*innen/Refurber*innen, Absichtserklärung Re-Use vor Ausbau. Dementsprechend sind Regeln für das Abfall-Ende bei Bauteilen gefragt, wie es sie für Haushaltsgeräte zum Teil bereits gibt.

Lösungsansätze für Risikomanagement: Beim Geschäftsmodell ‚Loop Produkt‘ nimmt ein*e Hersteller*in das Produkt zurück, erfasst dessen Eigenschaften, bezieht diese auf die Anforderungen an neue Produkte und bietet dann das Produkt nach einem eventuellen Refurbishment am Markt an, inklusive Gewährleistung und Haftung wie bei einem neuen Produkt. Beispiele für schon angebotene Loop-Produkte sind Doppelböden und Bodenbeläge ¹, aber auch Systembauweisen, bei denen der herstellende Betrieb Modelle für eine Wiederverwendung der einzelnen Elemente anbietet ².

Ein Re-Use-fähiges Geschäftsmodell muss Wiederverwendung fördern und Antworten auf gängige Re-Use-Hürden bieten (Abbildung 5).

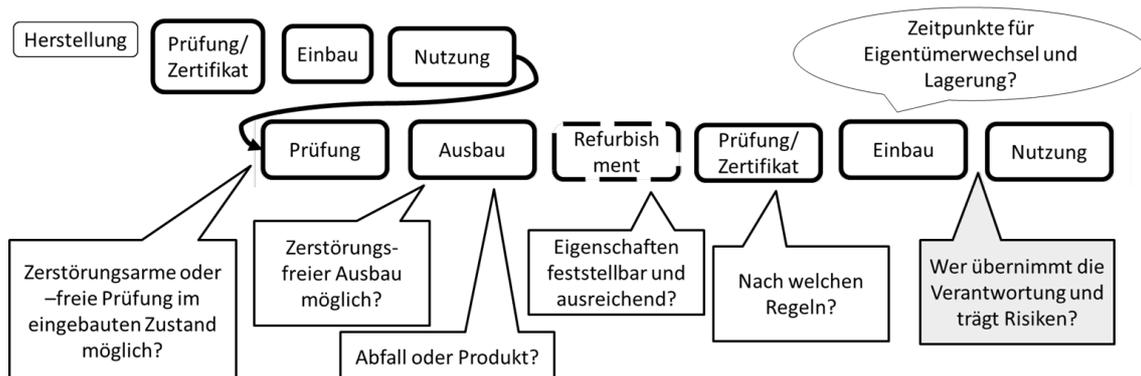


Abbildung 3: Zu klärende Fragestellungen eines Re-Use-Geschäftsmodells; Quelle: eigene Darstellung (AEE Intec)

Ein wichtiger Aspekt ist der **Prozess** von der Erkundung im Spender-gebäude bis hin zum Einbau im Empfänger-Gebäude, wie in der Grafik oben dargestellt. Dabei muss definiert sein, wem die Komponenten in jedem Schritt gehören und damit verbunden wer jeweils das Risiko und die Verantwortung trägt. Ebenso wichtig sind **Prüfprozesse**, die zeigen, welche Qualität ein Re-Use-Bauteil hat. Davon hängt ab, welche Anforderungen es im Empfängergebäude erfüllen kann.

Bewertung und Datenmanagement (verfasst: IBO)

Die im Rahmen des Build Re-Use Projektes entwickelte Bewertungsmethodik versteht sich als ergänzendes Verfahren zu Gebäude-Zirkularitätsbewertungen (z.B. BNB Zirkularitätsindex, Level(s), DGNB-Gebäuderessourcenpass, Madaster Circularity Indicator) oder einzelnen Bewertungskriterien in Gebäudezertifizierungen, die den Anteil wiederverwendeter Materialien in der Pre- und/oder Post-Consumer-Phase ausweisen (u.a. LEED, BREEAM). Es präzisiert die Bedingungen, unter denen zerstörungsfrei rückbaubare Baustoffe, Bauteile oder Komponenten wiederverwendet werden können. Verschiedene Prozesse vom Rückbau im Quell- bis zum Einbau im Zielgebäude werden betrachtet (Abbildung 6). Jeder Schritt in der Prozessabfolge ist für die Einstufung, ob das angenommene Re-Use-Potenzial rückgebauter Materialien tatsächlich ausgeschöpft werden kann, wesentlich. Dazu zählen als Grundvoraussetzungen

- der zerstörungsfreie Rückbau,
- Schadstofffreiheit und
- eine ausreichenden Restnutzungsdauer.

Idealerweise liegen dazu aus der Nutzungshistorie des Quellgebäudes Informationen zu Einbauzeitpunkt, Materialtyp und -qualität, möglichen Schadensereignissen sowie Nutzungs- und Umwelteinflüssen (wie Witterungsexposition, mechanische Beanspruchungen, Feuchteintritt etc.) vor. Ergänzt wird diese Erhebung um Sichtprüfungen durch Sachverständige nach Rückbau. Verläuft die erste Bewertung positiv, können detailliertere Materialprüfungen Aufschluss über die genauen Produkteigenschaften und erforderliche Instandsetzungsmaßnahmen bringen. Gegebenenfalls müssen Einschränkungen beim Verwendungszweck hingenommen oder neue Anwendungsbereiche mit geringeren Produkthanforderungen für Re-Use-Baustoffe gefunden werden.

Die Bewertung bezieht Aufwände für Transport, Zwischenlagerung, Vorbereitungsmaßnahmen zur Wiederverwendung sowie die Prüfung des Einsatzes in Gebäuden mit deutlich gestiegenen Grundanforderungen (an Nutzungssicherheit, Brand-, Schall-, Wärmeschutz usw.) mit ein. Für die Planer*innen des Zielgebäudes bedeutet dies in der Regel, Planungs- und Beschaffungsprozesse neu zu strukturieren, insbesondere die Beschaffung oder zumindest die Sondierung von Re-Use-fähigen Bauprodukten aus Rückbau-Baustellen zeitlich vorzuziehen, sowie die Detail- und Werkplanung deutlich früher anzusetzen. Über einen Entscheidungspfad mit Muss-Kriterien und Kann-Bestimmungen wird die Re-Use-Wahrscheinlichkeit für Materialgruppen präzisiert oder, wenn die Prüfung zu einem negativen Ergebnis kommt, werden den Baustoffen andere Verwertungswege zugeordnet.

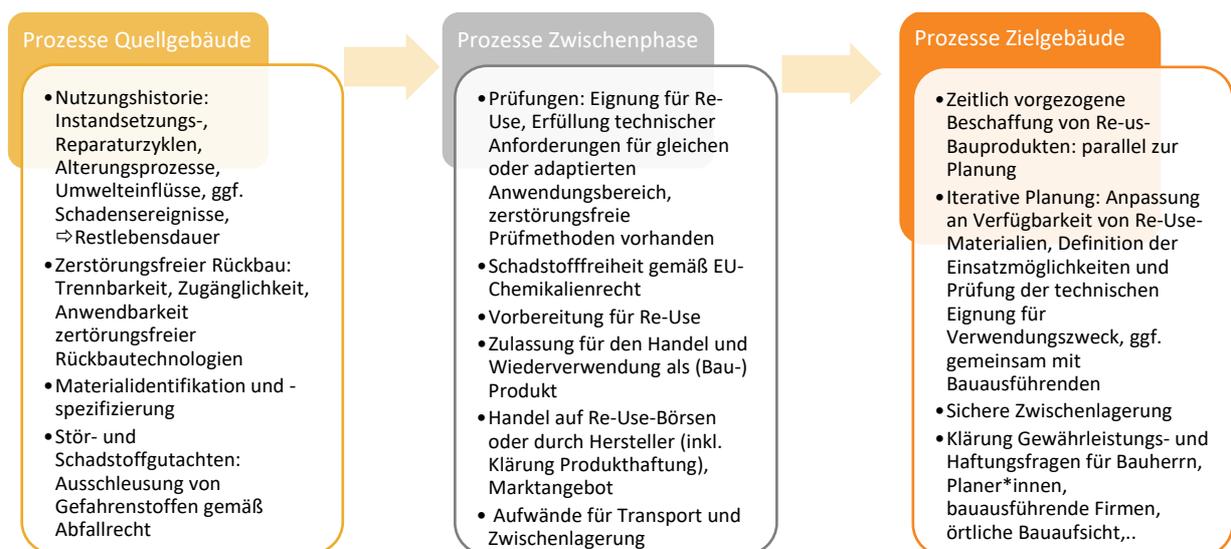


Abbildung 4: Basis für die Bewertungsmethodik sind die Analyse von Prozessen in Quellgebäude und Zielgebäude sowie die Zwischenphase; Quelle: eigene Darstellung (IBO)

Begrifflichkeiten der Kreislauf- und Abfallwirtschaft

Zur Definition von Begrifflichkeiten siehe auch das vom Österreichischen Institut für Bauen und Ökologie im Projektrahmen (AP 5.1) erstellte auszugsweise Glossar im Anhang.

Die **Kreislaufwirtschaft** beschreibt einen Gegenentwurf zur gegenwärtig vorherrschenden linearen Wirtschaft der Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Erzeugnissen, und damit auch Gebäuden. Produkte und Materialien sowie die zugrundeliegenden Geschäftsprozesse von Herstellung, Kauf und Rückgabe sollen so gestaltet werden, dass keinerlei Abfälle entstehen, sondern die Produkte, beziehungsweise deren Bestandteile, immer wieder- oder weiterverwendet, beziehungsweise wieder- oder weiterverwertet werden können. Gemäß ÖNORM ISO 20400:2017-04, Nachhaltiges Beschaffungswesen – Leitfaden, werden in Anlehnung an eine Definition der Ellen MacArthur Foundation in der Kreislaufwirtschaft technische und biologische Kreisläufe unterschieden (Abbildung 2), in denen Produkte, Komponenten und Werkstoffe zirkulieren und somit erhalten bleiben. Das der Definition zugrunde liegende **Cradle-to-Cradle-Prinzip** ist eines der bekanntesten Designprinzipien der Kreislaufwirtschaft und geht auf den Chemiker Michael Braungart und den Architekten William McDonough zurück (McDonough & Braungart, 2002).

CRADLE TO CRADLE

nach Prof. Michael Braungart und Prof. William McDonough

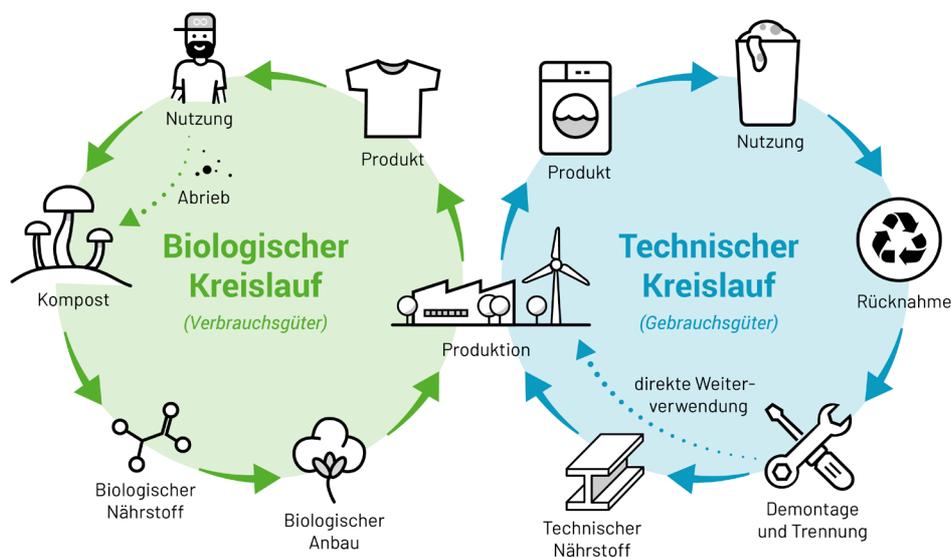


Abbildung 5: Biologischer und technischer Stoffkreislauf nach dem Cradle-to-Cradle-Prinzip; Quelle: Felix Jörg Müller, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, via Wikimedia Commons (modifiziert)

Das Cradle-to-Cradle-Prinzip („von der Wiege zur Wiege“) steht im Gegensatz zum bisher üblichen „Take – make – waste“ -Modell, das die Entnahme von Rohstoffen für die Produktion aus den natürlichen Kreisläufen und die Zurückgabe in einer für diese Kreisläufe nicht-brauchbarer Form, also vor allem als Abfall („Cradle-to-grave“), beschreibt. Bei einem Produktdesign nach dem Cradle-to-Cradle-Prinzip entstehen hingegen statt Abfällen Wert- oder Nährstoffe, da alle Bestandteile eines Produkts im technischen oder biologischen Rohstoffkreislauf verbleiben können, der notwendige Ressourcenabbau und das Abfallaufkommen werden minimiert (Cradle to Cradle NGO).

Die unterschiedliche Priorisierung der Abfallbehandlung ist festgehalten in der fünfstufigen **Abfallhierarchie** (Abbildung 3) gemäß **Abfallrahmenrichtlinie** (offiziell: „Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien“). Abfälle sollen zuallererst vermieden werden, fallen sie dennoch an, soll eine Wiederverwendung ermöglicht werden. Ein Recycling oder eine sonstige Verwertung, z.B. thermisch oder zur Verfüllung, soll nur bei beispielsweise wirtschaftlicher oder technischer Unzumutbarkeit erfolgen. Die Beseitigung von Abfällen, z.B. durch Verbrennen oder Deponierung, stellt den am geringsten priorisierten Weg dar und bildet somit die Spitze der umgekehrten Pyramide. In Österreich wurde die EU-Abfallrahmenrichtlinie im Rahmen der Novelle 2010 des Abfallwirtschaftsgesetzes 2002 in nationales Recht umgesetzt, in Deutschland 2012 durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz (Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen). Die Abfallhierarchie befindet sich jeweils zu Beginn der Gesetzestexte und stellt das übergeordnete Prinzip der Abfallbehandlung dar.

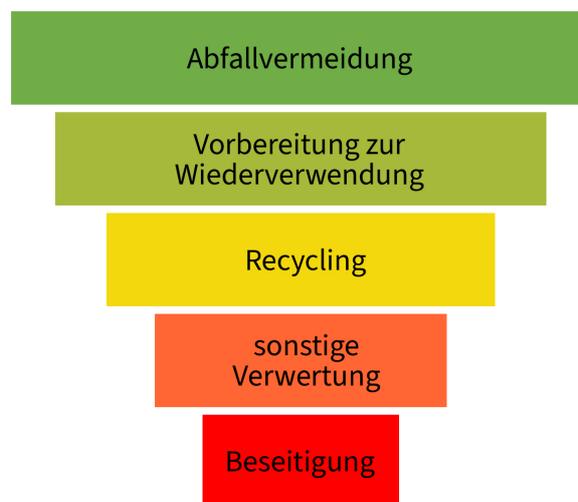


Abbildung 6: Die fünfstufige Abfallhierarchie entsprechend der EU-Abfallrahmenrichtlinie und dem österreichischen Abfallwirtschaftsgesetz 2002; Quelle: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Prinzipien und Strategien der Kreislaufwirtschaft beziehen sich unspezifisch auf die gesamte Produktpalette an Gebrauchs- und Verbrauchsgegenständen und stellen ein übergeordnetes ökologisches Ziel dar. Hierbei ist jede angesprochene Branche mit spezifischen Herausforderungen konfrontiert, und somit auch der Bau, Betrieb und Abbruch von Gebäuden. Ansätze für die Implementierung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen finden sich unter anderem in der sogenannten Recycling-Baustoffverordnung (RBV) und der dort zitierten ÖNORM B 3151:2022-05, Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode. Bei der Demontage von Gebäuden ist entsprechend der Dokumente für eine Rückführung der verbauten Rohstoffe anstelle eines Abrisses ein Rückbau „in umgekehrter Reihenfolge der Errichtung“ (ÖNORM B 3151) erforderlich. Hierdurch können Materialien der Wiederverwendung (Re-Use), Aufbereitung oder Verwertung (Recycling) zugeführt werden. Dabei muss eine Trennung der verschiedenen Materialien und die Separierung schadstoffhaltiger Anteile erfolgen. Förderlich für eine Wiederverwendbarkeit von Materialien ist die im Bau berücksichtigte Möglichkeit zur Demontage einzelner Konstruktionsteile, welche als „Auseinandernehmen durch Lösen von Verbindungen oder Abtrennen von Teilen“ (ÖNORM B 3151) definiert wird.

1.2. Motive und Theorien des kreislauffähigen Bauens

Historische Entwicklungen zur Wiederverwendung von Konstruktionen

Eine Wiederverwendung von noch intakten Bauteilen aus ökonomischen und funktionalen Gründen kann seit Anbeginn der anthropogenen Bautätigkeit nachgewiesen werden, beispielsweise zweitverwendete Balken zur Substitution neu herzustellender Baustoffe (Schindler, 2009). Genauso lange findet allerdings auch eine repräsentativ motivierte Wiederverwendung von Bauteilen, denen ein gewisser ästhetischer oder symbolischer Wert zugewiesen wird, statt. Diese Bauteile werden auch als „Spolien“ bezeichnet, vom lateinischen Wort für „Raub“ oder „Zerstörung“ und ähneln in ihrer Verwendung heutigen Antiquitäten. Mit dem Aufkommen der Denkmalpflege als architektonische Disziplin zur Mitte des 19. Jahrhunderts kam eine weitere Triebfeder für die Wiederverwendung von Bauteilen hinzu. Eine Variante ist die Translozierung, also der Abbau von kompletten Gebäuden mit historischem Wert und der Wiederaufbau an einem anderen Ort (Leonhardt, 1998).



Abbildung 7: Zur Wiederverwendung historischer Bauteile als Spolien können sowohl repräsentative als auch pragmatische Gründe beigetragen haben;
Quelle: GFreihalter, CC BY-SA 3.0
<<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>>, via Wikimedia Commons

Im späten 20. Jahrhundert wurden die Beweggründe um emotionale Aspekte der Nostalgie und seit den 1970er-Jahren, mit dem Aufkommen der Umweltbewegung, um ökologische begründete Motive erweitert. Konkret verringert sie den Ressourcen- und Energieeinsatz sowohl bei der Entsorgung der Baurestmassen als auch für die Neuproduktion von Materialien für spätere Bauvorhaben (Schrader, 2000). Entsprechend kann die historische Wiederverwendung auch hinsichtlich ihrer Ablesbarkeit differenziert werden: in eine „sichtbare Wiederverwendung“ in Form von in Szene gesetzter Spolien und in eine „verborgene Wiederverwendung“ als pragmatischer Ansatz zur Ressourcen- und Kosteneinsparung (Abbildung 7; Devlieger, 2018).

Nachfolgend werden nun wichtige Entwicklungsschritte betrachtet, die die geschichtliche Wiederverwendung von Bauteilen geprägt haben. Vor dem Projekthintergrund (siehe 1.1 Betrachtungsrahmen) wird besonderer Bezug auf Gebäude mit kurzen Nutzungszeiten genommen. Dass Gebäude nur für eine Standzeit von wenigen Monaten oder Jahren errichtet werden, betrifft vorrangig Gebäude mit Nichtwohnnutzung. Durch die kurze Nutzungszeit wirkt sich der Einsatz wiederverwendeter und wiederverwendbarer Konstruktionen bei solchen Gebäuden besonders stark auf die Lebenszyklusanalyse der Umweltauswirkungen aus. Der historische Rückblick auf Aspekte der Wiederverwendung von Bauteilen beschränkt sich hierbei auf den Zeitraum ab Mitte des 19. Jahrhunderts, als die Herstellung von Baustoffen und Gebäuden

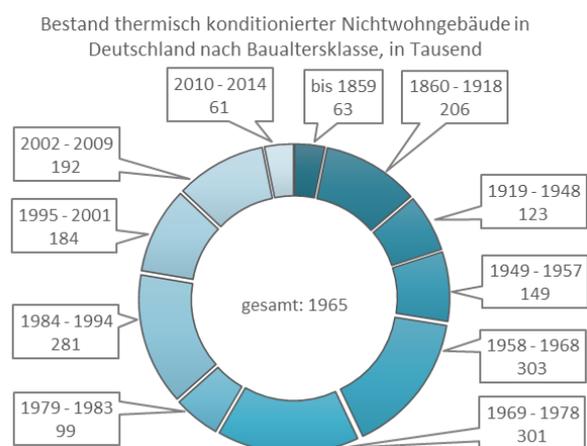


Abbildung 8: Nichtwohngebäude-Bestand in Deutschland – für Österreich liegen keine entsprechend differenzierten Daten vor, aufgrund der vergleichbaren Historie wird eine ähnliche Verteilung erwartet;
Quelle: eigene Darstellung nach Hörner et al. (2021)

stark industrialisiert wurde und eine rege Bautätigkeit einsetzte. Knapp 97 % der (beheizten) Nichtwohngebäude sind in diesem Zeitraum entstanden (Abbildung 8).



Abbildung 9: Der Crystal Palace nach dem Wiederaufbau auf dem Sydenham Hill (London, UK);
Quelle: <https://www.ebay.fr/itm/393118137764>, Public domain, via Wikimedia Commons

Ein prominentes historisches Beispiel für temporäre Gebäude ist der 1850 als Ausstellungsgebäude errichtete Crystal Palace in London (Abbildung 9). Der geplanten Standzeit im Hyde-Park von wenigen Monaten während der Weltausstellung wurde mit einer Konstruktion begegnet, die einen rückstandsfreien Ab- und Wiederaufbau an anderer Stelle ermöglichte. Ab 1852 begann letzterer auf dem Sydenham Hill in London. Ermöglicht wurde die im Wettbewerb geforderte Möglichkeit zu Demontage (und der Wiederaufbau) durch maßlich und geometrisch standardisierte und optimierte Bauteile mit wenigen verschiedenen Grundformaten. Daraus resultierten eine effiziente Modularität und Reglementierung. Zudem wurden die Verbindungen zwischen Stützen und Trägern durch Verriegeln mit Eisenbauteilen reversibel ausge-

führt. Unterstützt wurde das von Joseph Paxton entwickelte Konzept durch das im Eisenbahnbau erfahrene Unternehmen Fox, Henderson & Co., die ihre Erfahrungen aus der Konstruktion mit Eisenbauteilen in den Entwurf einbrachten (Stricker et al., 2021, S. 101f).

Auf ähnliche Weise ließ sich der Designer und Architekt Buckminster Fuller 1927 von der Effizienz der industriellen Massenproduktion zum Entwurf seines Hauskonzepts 4D Lightful House (später weiterentwickelt zum Dymaxion House, siehe Abbildung 10) inspirieren. Da die Industrie auf eine beständige Verbesserung der Technologie setzte, erachtete er sie als deutlich effizienter als die eher traditionell orientierte Bauwirtschaft. Anleihen und Wissenstransfer zur Materialeinsparung, Konstruktion und Stabilität fand Buckminster Fuller im Leichtbau der Schiff- und der Luftfahrt. Buckminster Fuller verfolgte mit dem Entwurf des Dymaxion House das Ziel, ein möglichst simpel zu (de-)montierendes, preisgünstiges Gebäude mit niedrigem Energie- und Ressourcenverbrauch zu entwickeln. Aus einer einfachen, industriell massenhaft fertigen Konstruktion und einer Formfindung entsprechend der einwirkenden dynamischen Kräfte sollte eine möglichst hohe Materialeffizienz resultieren („mit weniger Material mehr erreichen“; Brennan, 2017). Buckminster Fuller zufolge sollten Gebäude wie Industrieprodukte betrachtet werden, da auch der Großteil ihrer technischen Bestandteile mittlerweile auf diese Weise entstand. Als Material wählte er hierfür vorrangig das für Metalle verhältnismäßig leichte Aluminium. Neben der möglichen Massenproduktion in einer Fabrik berücksichtigte Fuller auch den Logistikprozess, indem alle Teile des Leichtbaus Platz in einer wiederverwendbaren, transportablen Edelstahlröhre finden konnten. Geschulte Teams sollten den Aufbau übernehmen. Nur für das Aufstellen des zentralen Aluminiummasts wurde ein Kran benötigt. Neben einer Integration der technischen Ver- und Entsorgungsleitungen im Mast

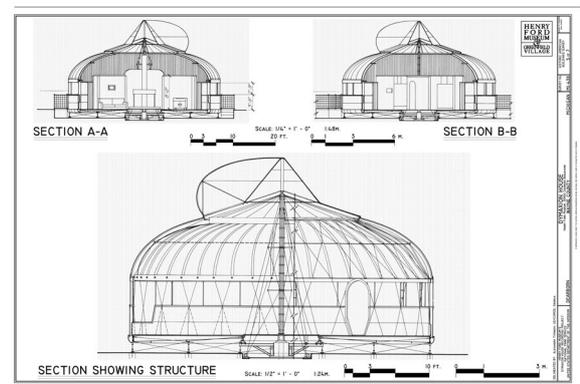


Abbildung 10: Das Dymaxion House von 1927 kombiniert ökologische und technologische Ansätze;
Quelle: *Historic American Buildings Survey (Library of Congress)*, Public domain, via Wikimedia Commons

konnten daran der Fußboden sowie Innen- und Außenwände durch ein Universalgelenk verankert werden. Zugstäbe sorgten für eine hinreichende Stabilität. Eine vorgefertigte Sanitäreinheit aus einem durchgängig einheitlichen Material (Metall oder glasfaserverstärkter Kunststoff) vervollständigte den Gebäudeentwurf. Das ganze Gebäude konnte wieder in seine ursprünglichen Bestandteile zerlegt werden. Buckminster Fullers Entwürfe blieben keine Vision, sondern wurden ab 1945 vereinzelt umgesetzt.



Abbildung 11. Händische Bergung intakter Mauerwerkssteine aus Trümmerschutt und Entfernung von Mörtelresten (das sog. „Ziegelputzen“), ca. 1946; Quelle: Deutsche Fotothek, CC BY-SA 3.0 DE <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/deed.en>>, via Wikimedia Commons

Im 20. Jahrhundert erfolgte eine Wiederverwendung von Bauteilen und -materialien im umfassenden Maßstab vor allem in (Nach-)Kriegs- und Krisenzeiten im Zuge der Trümmerverwertung, so in Belgien in Folge des 1. Weltkriegs (Devlieger, 2018, S. 33) und in Deutschland und Österreich nach den großflächigen Zerstörungen im 2. Weltkrieg. Intakte Ziegel oder Profileisen wurden aus den Trümmermassen für den direkten Wiedereinsatz geborgen, beschädigte Ziegel dienten als Zuschlagsstoffe für aus der Not geborene Entwicklungen wie Ziegelsplittbeton und Leichtbausteine aus Bauschutt (Nagler, 2015; Allgemeine Bau-Zeitung, 1948). Die umfassende Wiederverwendung kam jedoch nach einigen Jahren mit dem Verschwinden der Schuttberge und die zwischenzeitliche Vollbeschäftigung zum Erliegen: Es stand nicht mehr genügend Arbeitskraft für personalintensive Tätigkeiten,

wie das händische Entfernen der Mörtelreste von Mauersteinen, zur Verfügung (Abbildung 11; Leonhardt, 2000; Stürmer & Fritz, 2020). Gleichzeitig förderte die gesteigerte Wirtschaftskraft im Zuge des Wirtschaftswunders eine „Wegwerfmentalität“, die sich durch umfassenden Abriss intakter, aber ungewollter Bausubstanz und Deponierung der Baurestmassen äußerte. Ähnliche Effekte wurden mit Beginn der Industrialisierung beobachtet, als erstmals eine massenhafte industrielle Fertigung von Baumaterialien ermöglicht wurde (Schrader, 2000). Mit den gegenwärtig immer relevanter werdenden Herausforderungen wie der Klimakrise oder der Ressourcenverknappung beginnen Forschungen zu vergleichbaren Recyclingbaustoffen teilweise wieder von Neuem (z.B. Recycling-Beton mit Bauwerkssplitt³; Terrazzo-Fliesen mit Beimengung von Bauschutt⁴).

Wie sich bereits beim Crystal Palace gezeigt hat, wird durch Modularität und Standardisierung von Komponenten eine spätere Wiederverwendung grundsätzlich erleichtert (Devlieger, 2018, S. 34). Im Holzbau wurde in der Zeit der Wohnungsnot nach dem 1. Weltkrieg mit dem Zollingerdach (Barth, 1922) ein materialeffizientes Tonnendach entwickelt, das gegenüber vorherigen Konstruktionen erhebliche Mengen Holz einsparen konnte. Durch wiederholte Anordnung von kurzen, nicht-gebogenen Holzlamellen mit typisierten Abmessungen, die mit Bolzen fixiert werden, entsteht ein freitragendes Rauten-Lamellendach ohne Sparren und mit hoher Raumausnutzung für vielfältige Anwendungen als Wohn- und Nichtwohngebäude (Abbildung 12). Durch identische Abmessungen und die geringe Komplexität der Konstruktion wurden Vorfertigung und eine mögliche Montage durch Laien ermöglicht (Reinboth, 2016).

Ernst Neufert beschrieb zu Beginn der 1940er-Jahre im Zuge seiner Arbeiten zur Bauentwurfs- und Bauordnungslehre mit dem Oktametersystem eine neue Maßordnung. Diese basiert auf einem Grundmodul von einem Achtelmeter, also 12,5 cm. Dieses Maßsystem beschränkt die Auswahl möglicher Baumaße auf Vielfache beziehungsweise Teiler der Grundgröße. Umfassend angewandt sollen durch das vorgegebene Rastermaß die Planungs- und Bauprozesse sowie die Produktherstellung vereinfacht, rationalisiert und effizienter gestaltet werden (Drach, 2016). Entsprechend diesen Ansätzen basieren in Österreich und Deutschland seit der Nachkriegszeit die meisten gängigen Ziegelabmessungen auf Vielfachen des Oktameters, was einer Normierung, Standardisierung sowie Serienfertigung zugutekam (z.B. ÖNORM B 3200:1948, Baustoffe und maßgenormte Tragwerksteile; Mauerziegel; DIN 4172:1955 - Maßordnung im Hochbau).



Abbildung 12. Durch die entsprechende Anordnung kurzer, gerader Holzlamellen entsteht beim Zollingerdach eine gekrümmte Dachfläche; Quelle: Kulturagent, CC BY 3.0
<<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0>>, via Wikimedia Commons

Vorzugsweise für den Skelettbau wurde in der internationalen Normierung auch eine dezimetrische Maßordnung mit einem Grundmodul M von 10 cm beschrieben, wobei vergleichbare Effekte wie bei den Ziegelmaßen angestrebt werden (ISO 2848:1974, Modularkoordination; Grundsätze und Regeln [zurückgezogen]; DIN 18000-1:1973-11, Modulordnung im Bauwesen - Grundlagen [zurückgezogen]).

Um bei Wohngebäuden auf veränderte Lebensumstände zu reagieren und damit die Nutzungsdauer eines Gebäudes zu erhöhen, entwickelte der Niederländer John Habraken (1961) das Prinzip des **Open Building**. Dabei beschreibt Habraken als erster eine zu berücksichtigende Trennung des Gebäudes in Funktionsbereiche unterschiedlicher Anforderungen, Lebensdauern und Austausch-/Wartungszyklen: *support* und *infill*, feste Trag- und flexible Füllstrukturen. Durch Berücksichtigung soll die Flexibilität und Adaptionsfähigkeit von Gebäuden erhöht werden, vergleichbare Ansätze finden sich bereits 1927 bei Le Corbusier und Jeanneret. Die Tragstruktur umfasst hierbei das grundlegende statische System des Gebäudes, die Füllungen den Innenausbau, die gebäudetechnischen Installationen sowie die nichttragenden Elemente der Gebäudehülle. Nachfolgendes Zitat veranschaulicht den Ansatz:

The support represent the most permanent parts of the building, like the structure and can be seen as a bookcase. The infill represents the adaptable part of the building, or in other words the books.
Habraken (1961)

Die statische Grundstruktur wird bei Habraken über die Lebensdauer eines Gebäudes als unveränderlich angesehen, weswegen ihr eine besondere Bedeutung zukommt. Stützenraster sollen beispielsweise so gewählt werden, dass sie eine einfache Anpassung für verschiedene Nutzungen ermöglichen. Durch die Wahlfreiheit der Innenraum- und Fassadengestaltung wird eine umfassende Adaption durch die Nutzer*innen ermöglicht (OpenBuilding.co, 2021).

Während (Wohn-)Gebäude bei Habraken noch in zwei Schichten differenziert werden, identifiziert Duffy (1990) für Bürogebäude vier verschiedene Schichten: *Shell*, *Services*, *Scenery*, und *Set* (Tabelle 1). Die Differenzierung basiert auf seinen Vorarbeiten mit Henney (1989). Den Schichten werden unterschiedliche Funktionen und durchschnittliche Nutzungsdauern zugewiesen. Sie umfassen die Gebäudehülle

und Tragstruktur mit einer angenommenen Nutzungsdauer von 50 Jahren, die in den Büroräumen installierten gebäudetechnischen Anlagen mit ca. 15 Jahren, eine alle fünf bis sieben Jahre stattfindende Reorganisation der räumlichen Aufteilung des Bürogrundrisses sowie eine beinahe täglich wechselbare Büromöblierung beziehungsweise Ausstattung.

Tabelle 1: Die vier Schichten von Bürogebäuden nach Duffy (1990); Quelle: eigene Darstellung

Nr.	Layer	Deutsche Entsprechung	Angenommener Austauschzyklus
1	Shell	Gebäudehülle, Tragstruktur	50 Jahre
2	Services	Gebäudetechnik	15 Jahre
3	Scenery	Innenausbau	5 bis 7 Jahre
4	Sets	Einrichtung	täglich

Im Zuge einer angestrebten Effizienzsteigerung in der industriellen Produktion wurden seit den 1960er-Jahren weitere Schritte zur Standardisierung von Komponenten für die Fertigung getätigt. Durch den Ansatz **Design for Manufacture and Assembly** (DFMA) im Produktentwurf konnte die Herstellung industriell gefertigter Güter konnten die Anzahl unterschiedlicher benötigter Teile für ein Produkt reduziert sowie effizienzoptimierte Fertigungsverfahren etabliert werden (Boothroyd & Dewhurst, 1983; Goldense, 2022). Diese Ansätze berücksichtigten ausschließlich die Herstellungsprozesse eines Produkts bis zum endgültigen Verlassen der industriellen Fertigung. Anfang der 1990er-Jahre wurden Konstruktionsprinzipien, die auch die spätere rückstandsfreie Zerlegbarkeit in die Bestandteile berücksichtigen, mit dem Ausdruck **Design for Assembly and Disassembly** beschrieben. Der Begriff bezieht sich ebenfalls auf die generelle Produktentwicklung, lässt sich aber auf den Bau von Gebäuden übertragen. Insbesondere die zunehmende Betrachtung von Lebenszykluskosten und Umweltauswirkungen führte dazu, dass End-of-Life-Szenarien im Produktdesign vermehrt berücksichtigt werden. Als Lösung wird ein Produktdesign gefordert, welches eine einfache Demontage und damit ein Recycling der verbauten Materialien ermöglicht und so den Ressourceneinsatz und das Abfallaufkommen verringert (Boothroyd & Alting, 1992). Guy und Ciarimboli (2008) listen für Gebäude zehn Grundprinzipien für ein **Design for Disassembly** (DFD/DfD), die eine spätere Adaption oder einen sortenreinen Rückbau ermöglichen:



Abbildung 13: Anders als bei Gebäuden ermöglicht das übliche Konstruktionsdesign eines Automobils die Zerlegung in dessen Einzelteile und erleichtert somit Wartung, Austausch, Weiter- und Wiederverwendung; Quelle: Paul Hudson from United Kingdom, CC BY 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0>>, via Wikimedia Commons

1. Dokumentation von Material, Verbindungsmitteln und Konstruktion
2. Dauerhafte und werthaltige Materialien
3. Zugängliche und auffindbare Befestigungsmittel
4. Reduktion der chemischen Belastung von Baustoffen durch Kleber, Beschichtungen etc.
5. Bevorzugt Bolzen-, Schraub-, Nagelverbindungen
6. Weitestgehende Trennung der Gebäudetechnik und Baukonstruktion
7. Anpassung des Designs an das menschliche Maß für den manuellen Rückbau
8. In der Komplexität reduzierte Formen und Raster
9. Modularität, Standardisierung, Unabhängigkeit der verwendeten Baustoffe
10. Berücksichtigung der Rückbauplanung im Design.

Während das Design for Disassembly beispielsweise in der Automobil- und Elektroindustrie sehr bald eine breite Verwendung erfuhr (Crowther, 2001; Abbildung 14), finden sich dessen Ansätze in der Gebäudeplanung auch Jahre später noch nicht umfassend wieder (BC Housing, 2021).

Basierend auf den Arbeiten von Duffy und Henney (1990; 1989) veröffentlichte Stewart Brand (1995) seine Theorie der **Shearing Layers** von Gebäuden (Tabelle 2). Hierbei unterteilt Stewart Gebäude in Schichten unterschiedlicher Funktionen und üblicher Lebens-, beziehungsweise Nutzungsdauern, Stewart unterscheidet jedoch insgesamt sechs Schichten, indem er zu Duffys Schichten den Baugrund sowie das statische Grundgerüst des Gebäudes als Schichten addiert. Werden diese Funktionsschichten durch einzeln demontierbare Komponenten bedient, kann eine effiziente Erneuerung von Schichten am Ende ihrer Lebensdauer erfolgen. Jedes Gebäude befindet sich an einem geografischen Standort (*site*), dessen Nutzungsdauer als unbeschränkt angesehen wird. Die *structure* beschreibt die statische Tragstruktur eines Gebäudes, für die eine Lebensdauer zwischen 30 und 300 Jahren angenommen wird. Skin beschreibt die Gebäudehülle, deren Funktion die Trennung von Innen- vom Außenraum und damit der Schutz vor den natürlichen Elementen ist. Hier wird eine Lebensdauer von ca. 20 Jahren erwartet. Die technische Gebäudeausstattung wird mit dem Layer der *services* beschrieben und hält erwartungsgemäß zwischen sieben und 15 Jahren. Das Bestehen eines Gebäudegrundrisses (*space plan*) unterliegt stark der Nutzung, wobei übliche Dauern bei drei Jahren beginnen (Geschäftsgebäude) und bis zu 30 Jahre (Wohngebäude) erreichen können. Die kürzeste Nutzungsdauer, von wenigen Tagen bis zu mehreren Monaten, wird der Ausstattung und Möblierung, dem *stuff*, zugewiesen (Crowther, 2001, S. 9f).

Tabelle 2: Die sechs Schichten des "Shearing Layers"-Konzepts nach Brand (1995); Quelle: eigene Darstellung

Nr.	Layer	Deutsche Entsprechung	Angenommener Austauschzyklus
1	Site	Grundstück	Unbegrenzte Nutzungsdauer
2	Structure	Tragstruktur	30 bis 300 Jahre
3	Skin	Gebäudehülle	20 Jahre
4	Services	Gebäudetechnik	7 bis 15 Jahre
5	Space Plan	Grundriss	3 bis 30 Jahre
6	Stuff	Einrichtung	Täglich bis monatlich

Die Ansätze des Design for Disassembly und der Shearing Layers wurden in der Folge aufgegriffen und zum Konzept des **Design for Deconstruction** kombiniert (z.B. Crowther, 2000; Crowther, 2001; Guy & McLendon, 2000). Dieses beschreibt, welche Designprinzipien Gebäude verfolgen müssen, damit sie an ihrem Lebensende, beziehungsweise am Lebensende ihrer Funktionsschichten, dekonstruiert statt abgerissen werden können und ihre Bestandteile für eine Wiederverwendung in Frage kommen. Es unterscheidet sich vom Design for Disassembly, indem der Fokus stärker auf Gebäuden statt auf der Produktentwicklung im Allgemeinen liegt. In diesem Zusammenhang wird auch vermehrt von der Wiederverwendung von Bauteilen und -materialien, dem **Reuse**, gesprochen (Leonhardt, 1998; Sára et al., 2000; Guy & McLendon, 2000; Schrader, 2000). Reuse oder Re-Use (Wiederverwendung) steht im Gegensatz zur Auflösung von Form und Funktion bei Recycling (Wiederverwertung) von Baumaterialien. Es erfordert dadurch tendenziell geringere Prozessaufwendungen für Energie und Ressourcen. Ein Bauteil-Re-Use ist allerdings verhältnismäßig selten, da es mit vielen Barrieren, wie rechtlichen Unsicherheiten, logistischem Aufwand und Qualitätsbedenken verbunden ist (Hobbs & Adams, 2017; Menn, 2021).

Vorgänge bei der Demolierung eines Gebäudes werden in der Abfall- und Rückbauwirtschaft in Abbruch- und Rückbaumethoden unterteilt, abhängig von der stofflichen Beschaffenheit der Resultate (Abbildung 14). Beim konventionellen Abbruch wird ein Bauwerk ohne vorherige Entkernung oder spätere Separierung von Abfällen beseitigt. Dies stellt die größte Methode zur Beseitigung eines Gebäudes dar. Aufgrund gesetzlicher Anforderungen und hoher Entsorgungskosten vermischter Abbruchmaterialien wird diese Art des Abbruchs kaum mehr angewendet. Ein selektiver Abbruch unterscheidet sich von einem konventionellen durch die stoffliche Selektion der Abbruchmaterialien vor, während oder nach dem Abbruch. Um einzelne sortenreine Schichten im Falle eines Rückbaus zu separieren, beispielsweise für das stoffliche Recycling und die Wiederverwertung der in den Bauteilen enthaltenen Rohstoffe, wurde als Gegenentwurf zu den Abbruchmethoden der arbeitsintensivere **selektive Rückbau** entwickelt. Dabei erfolgt vor dem Abbruch der Tragkonstruktion eine sortenreine Separierung der unterschiedlichen Ausbaumaterialien (Rentz et al., 1994; Spengler et al., 1997; Ruch et al., 1997; Sára et al., 2000). Ziel kann auch die beabsichtigte Wiederverwendung gewonnener Bauteile sein (Leonhardt, 1998; Schrader, 2000), in diesem Fall wird der Rückbauvorgang auch als **Demontage zur Wiederverwendung** bezeichnet. Dies beschreibt den rückstandsfreie Abbau in umgekehrter Reihenfolge zur Montage (Hillebrandt et al., 2021). Hauptsächliches Hindernis für einen schichtweise selektierenden Rückbau ist die heutige Anwendung möglichst dauerhafter Verbindungs- und Fügetechniken zwischen Bauteilen und Bauteilschichten (Crowther, 2001; Guy & Ciarimboli, 2008). Die Differenzierung von Abbruch und Rückbauweisen aus abfallrechtlicher Sicht ist in Österreich in ÖNORM B 3151:2022-05, Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode, festgehalten.

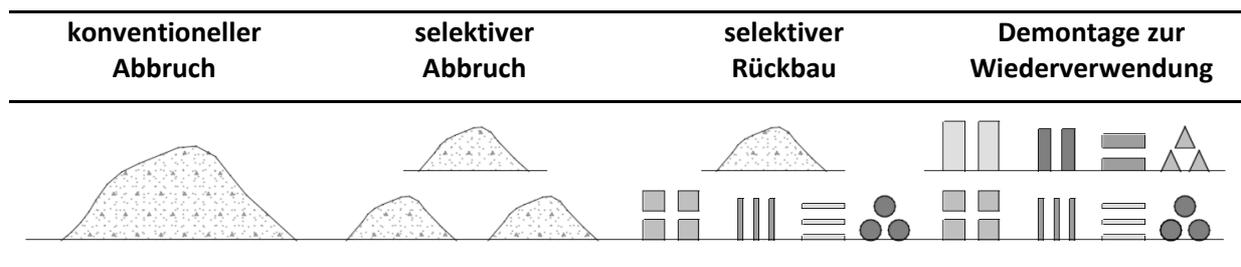


Abbildung 14: Übersicht über verschiedene Abbruch- beziehungsweise Rückbaumethoden und schematische Darstellung der Resultate aus stofflicher Sicht; Quelle: eigene Darstellung nach Hillebrandt et al., 2021

Im Rahmen des EU-geförderten Projekts „Buildings as Material Banks“ (BAMB) wurde eine Auswahl der bisher gezeigten Ansätze zum Leitbild des **Reversible Building Design** (RBD) vereint (Capelle et al., 2019). Dieses beschreibt die Möglichkeiten zur Demontage eines Gebäudes und seiner Bestandteile auf verschiedenen Ebenen. Ein Design for Disassembly wird hierbei als Schlüsselement genannt (Abbildung 15). Reversibilität taucht in der Architektur ursprünglich in Zusammenhang mit dem kulturellen Erbe beziehungsweise historischen Gebäuden auf als die Eigenschaft einer Maßnahme, die ohne Beschädigung rückgängig gemacht werden kann (EN 15898:2019).

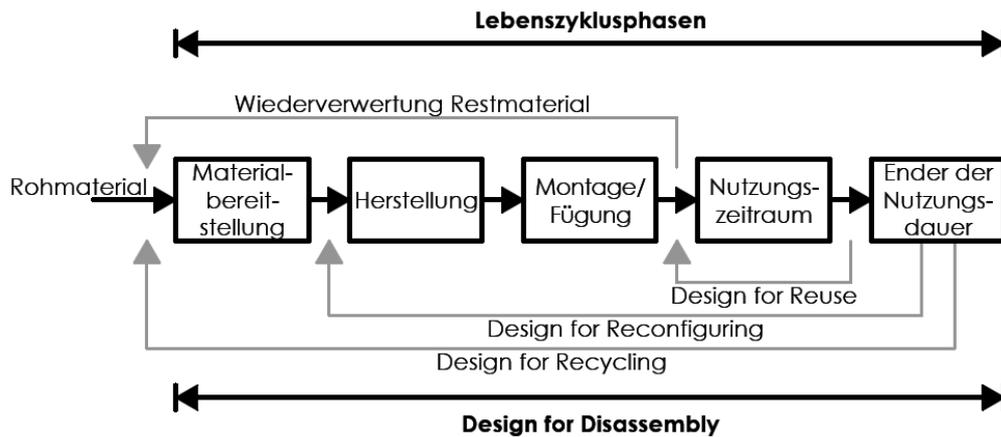


Abbildung 15: Design for Disassembly als Grundlage eines Kreislaufmodells für die Errichtung, Nutzung und den Rückbau von Gebäuden; Quelle: eigene Darstellung nach Durmisevic, 2006

Beim RBD werden, im Gegensatz zu Habraken (1961), Duffy (1990) und Brand (1995), drei Betrachtungsebenen gewählt: Die Reversibilität des Gebäudes als solches („building“), der Bauteile beziehungsweise Baukonstruktion („system“) und der jeweiligen Komponenten oder Bauteilschichten („component“). Auf den jeweiligen Ebenen kann dem Design anhand verschiedener Kriterien ein entsprechendes Potential zur späteren Demontage und Wiederverwendung zugewiesen werden (Durmisevic, 2006). Reversibilität bei einem Gebäude umfasst gemäß dem RBD auf allen drei Ebenen sowohl ein Wiederverwendungs- als auch Transformationspotential. Sind beide auf allen Ebenen umfänglich gegeben, dann kann entweder die Lebensdauer eines Gebäudes durch Adaption an neue Rahmenbedingungen verlängert oder der Ressourcenaufwand und das Abfallaufkommen durch die Nachnutzung von Komponenten und Materialien verringert werden. Das Wiederverwendungspotential beschreibt die mögliche Wiederverwendung des Gebäudes als Ganzes, seiner Bauteile oder einzelner Bauteilschichten, das Transformationspotential die räumliche, konstruktive und materielle Anpassungsfähigkeit (spatial, structural and material transformation). Die Möglichkeiten zur konstruktiven und materiellen Transformation werden hierbei als technische Reversibilität bezeichnet. Es wird betont, dass für eine funktionierende Umsetzung von RBD eine Berücksichtigung bereits in Entwurfsphase erfolgen muss (Durmisevic, 2019).

Die Aspekte des Wiederverwendungs- und Transformationspotentials ähneln der später in ISO 20887 zentralen Rückbaubar- und Anpassbarkeit von Gebäuden, auch **Design for disassembly and adaptability** (DfD/A) genannt. ISO 20887:2020-01, Nachhaltigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken - Planung der Rückbaubarkeit und Anpassbarkeit - Grundsätze, Anforderungen und Leitlinien, beschreibt einen internationalen Standard für Kreislaufwirtschaft im Baugewerbe. Die ISO-Norm zeigt Definitionen von Aspekten und Strategien der Kreislaufwirtschaft für Bauwerke und bezieht sich unter anderem auf vorhergehend beschriebene Ansätze von Crowther, Guy und Ciarimboli, Durmisevic sowie auf das BAMB-Projekt. Weiters wird darauf eingegangen, dass unterschiedliche beabsichtigte Nutzungsdauern eines Gebäudes die Priorisierung verschiedener Rückbau- und Transformationsansätze beeinflussen. So ist bei Gebäuden mit kurzen Nutzungsdauern oder häufigen Nutzungswechseln eine einfache Demontage und Wiederverwendbarkeit von Funktionsschichten relevanter als bei einer Langzeitnutzung durch dieselben Eigentümer*innen. Bei letzterem hingegen bekommen Prinzipien wie Dauerhaftigkeit und Reparaturfreundlichkeit einen tendenziell höheren Stellenwert.

ISO 20887 wurde nicht in EU- oder nationales österreichisches oder deutsches Recht überführt, wird aber in der „Taxonomieverordnung“ referenziert (offiziell: „Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates“). Darin wird beschrieben, dass ein Gebäudedesign nach ISO 20887 bei Neubau oder Renovierung „die Ressourceneffizienz, Anpassungsfähigkeit, Flexibilität und Demontagefähigkeit erhöht“ und damit die Kreislaufwirtschaft fördert.

Ableitung von Ansätzen für die Methodik

In den historischen Entwicklungen zur Wiederverwendung von Konstruktionen haben sich wiederkehrend Handlungsweisen gezeigt, die dieses Ziel unterstützen. Diese Ansätze wurden in den vergangenen Jahren in der wissenschaftlichen Literatur sowie in der internationalen Normung festgehalten. Die Kernaussagen ausgewählter Werke werden hier nun betrachtet und dienen als Entscheidungs- und Bewertungsgrundlage für die nachfolgende beispielhafte Darstellung von Optionen für wiederverwendbare Konstruktionen.

Guy und Ciarimboli (2008) beschreiben neben den oben beschriebenen zehn Grundprinzipien detaillierte Strategien für ein Design for Disassembly. Empfohlen wird unter anderem:

- Reduktion der Komplexität durch Minimierung der Anzahl unterschiedlicher Materialien, Befestigungsmittel und notwendiger Demontageschritte
- Verzicht auf gesundheitsbeeinträchtigende Substanzen in Materialien
- Priorisierung von Monomaterialität statt Verbundwerkstoffen auf Baustoffebene
- Vermeidung zusätzlicher Oberflächenbeschichtungen auf Komponenten oder zur Überdeckung von Verbindungsmitteln
- Baustoffdokumentation
- Reduktion unterschiedlicher Bauteilschichten und Komponenten und einheitliches Design
- Trennung von Tragstruktur und Ausbau
- Wiederverwendbare, widerstandsfähige Befestigungsmittel, Toleranzen zwischen Komponenten für bessere Zugänglichkeit
- Modularität und einheitliche Konstruktionsraster
- Vorfertigung von Bauteilen, die auch als Ganzes wiederverwendet werden können
- Leichtbaukomponenten für manuellen Rückbau
- Bündelung der technischen Leitungen in Versorgungssträngen für weniger Durchdringungen
- Berücksichtigung statischer Reserven für mögliche Erweiterungen

ÖNORM EN 17680: 2023-01, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung des Potentials zur nachhaltigen Modernisierung von Gebäuden, liefert Ansätze für ein erhöhtes Adaptionspotential auf Gebäudeebene:

- Anpassbarkeit und Vielseitigkeit in Bezug auf eine Nutzungsänderung von Gebäuden
- Erweiterungsfähigkeit als Anpassbarkeit des Gebäudevolumens oder der -abmessungen
- Flexibilität als Anpassbarkeit des Gebäudegrundrisses und der Raumaufteilung

Weitere Design-Strategien zur Erhöhung des Transformations- und Rückbaupotentials von Gebäuden in Neubau und Bestand sind in ISO 20887 beschrieben:

Transformationspotential

- Vielseitigkeit
- Umnutzbarkeit
- Erweiterbarkeit

Rückbaupotential

- Zugänglichkeit zu Komponenten und technischen Einrichtungen
- Unabhängigkeit
- Vermeidung von zusätzlichen Oberflächenbehandlungen und -veredelungen
- Förderung von Geschäftsmodellen zur Wiederverwendung (Kreislaufwirtschaft)
- Einfachheit
- Standardisierung
- Sicherheit der Demontage

ISO 20887 liefert auch Definitionen, inwiefern diese Strategien zur Kreislaufwirtschaft beitragen können.

Vielseitigkeit, Umnutzbarkeit und Erweiterbarkeit (eigene Übersetzungen; im englischen Original *versatility, convertibility, expandability*) beziehen sich vorrangig auf die Adaptionsmöglichkeiten auf Gebäudeebene, beispielsweise erforderlich durch eine veränderte Gebäudenutzung. Vielseitigkeit zielt auf die Möglichkeit zur regelmäßigen Mehrfachnutzung durch geringfügige Veränderungen ab, z.B. im Laufe eines Tages, wohingegen Wandelbarkeit auf das generelle Adaptionspotential von Räumen und Gebäuden an geänderte Anforderungen der Nutzer*innen abzielt. Können einem System neue Raumkapazitäten oder Funktionen hinzugefügt werden, spricht man von Erweiterbarkeit.

Besonders bei Komponenten mit einer kurzen Nutzungsdauer unterstützt eine Zugänglichkeit (*ease of access*) den möglichen Austausch, Aufbereitung oder Rückbau von Komponenten und verhindert das Entstehen von Abfall durch zerstörerische Abbruchmethoden. Hierbei wird insbesondere auf die unterschiedlichen Schichten eines Gebäudes Bezug genommen, ähnlich wie bei Habraken (1961), Duffy (1990), Brand (1995) und Durmisevic (2019). Aspekte der Zugänglichkeit sind freiliegende Verbindungsteile, die mit allgemein verbreiteten Methoden gelöst werden können. Die Zugänglichkeit weist eine gewisse Korrelation zur Unabhängigkeit auf. Diese beschreibt, dass Bestandteile eines Systems für räumliche oder funktionale Anpassungen verändert oder entfernt werden können, ohne die ursprüngliche Funktion und angrenzende Bauteile zu beeinträchtigen. Die Reversibilität von Verbindungsmitteln und Bauteilanschlüssen ist hierfür entscheidend.

Die Vermeidung von zusätzlichen Oberflächenbehandlungen impliziert den Verzicht auf Stoffe, die die Gesundheit beeinträchtigen oder die Wiederverwendung oder -verwertung einschränken. Dies bezieht sich vor allem auf jene Behandlungen, die rein ästhetischen und keinen spezifischen funktionalen Gesichtspunkten dienen (Korrosions-, Brandschutz). Materialien, die in ihrem Ausgangszustand bereits Eigenschaften aufweisen, welche bei anderen Materialien erst durch Oberflächenbehandlungen erzielt werden (z.B. die Witterungsbeständigkeit von Lärchenholz gegenüber anderen Holzarten) sind unter diesem Gesichtspunkt zu bevorzugen.

Sowohl in der gegenwärtigen Anwendung als auch im späteren Rückbau sollen Geschäftsmodelle forciert werden, die die Transformation zu einer Kreislaufwirtschaft unterstützen. Diese Modelle können Aspekte der Wiederverwendbarkeit, Reparierbarkeit, Wiederaufbereitbarkeit sowie den Einsatz wiederverwerteter und wiederverwertbarer Materialien umfassen (*reusability, refurbishability, remanufacturability, increased recycling, future recycling (recyclability)*). Bauteile oder Komponenten sind dann wiederverwendbar, wenn sie entsprechend ihres ursprünglichen Einsatzzwecks ohne Qualitäts- und Funktionsverlust öfters verwendet werden können. Kann der Verlust der ursprünglichen ästhetischen und funktionalen Eigenschaften eines Produkts zur weiteren Nutzung wiederhergestellt werden, wird von einer Reparierbarkeit gesprochen. Wiederaufbereitbar sind Produkte hingegen dann, wenn sie am Nutzungsende demontiert, auseinander gebaut und zu einem für den Wiedereinsatz geeigneten Zustand neu zusammengesetzt werden können. Der Einsatz von Materialien, die Recyclinganteile beinhalten und an ihrem Lebensende selbst recycelt werden können, vermeidet Emissionen und Müll.

Weitere Strategien zur Erhöhung des Rückbaupotentials sind Einfachheit und Standardisierung. Um Einfachheit bei einer Konstruktion zu forcieren, sollte diese aus der minimal notwendigen Anzahl an Einzelteilen und Materialien bestehen, wodurch die Reparaturfähigkeit erhöht und die Versagenswahrscheinlichkeit verringert wird. Werden nur wenige unterschiedliche Materialien genutzt, erhöhen sich Homogenität und Wiederverwertungspotential einer Konstruktion. Standardisierung beschreibt die größtmögliche Normierung von Konstruktionen und Komponenten, beispielsweise durch einheitliche Abmessungen oder eine wiederkehrende Auswahl identischer Komponenten und Verbindungsmittel für verschiedene Anwendungen. Dadurch wird die Komplexität des Zusammen- und Rückbaus, aber auch des Transports und der Wiederverwendung verringert. Modulare Bauweisen und Vorfertigung von Bauteilen reduzieren den Anpassungsaufwand und den Verschnitt auf der Baustelle und steigern die Qualität des fertigen Werks. Durch eine umfangreiche Dokumentation der verbauten Materialien und Verbindungsmittel und eine Rückbauplanung wird die Sicherheit der Demontage gewährleistet.

2. Methodik

Die vorliegende Betrachtung von Optionen für Re-Use-fähige Konstruktionen richtet sich an Planer*innen von Wohn- und Nichtwohngebäuden sowie an eine professionelle Bauherrschaft. Anhand eines abstrahierten Raums eines fiktiven maßgeblichen Gebäudes wird beschrieben, wie dessen Bauteile jeweils zu 100% Re-Use-fähig, das heißt in allen Einzelbestandteilen wiederverwendbar, konstruiert werden können. Grundlage zur Auswahl der Optionen sind Ansätze aus der Forschung und Baustoffindustrie, wobei auch Produkte mit noch verbleibendem Weiterentwicklungsbedarf berücksichtigt wurden. Ziel ist die Identifikation von bestehenden Potentialen sowie des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs, der zur Fortschreibung weiterer Ansätze notwendig ist. Teilweise werden Einzellösungen für unterschiedliche Funktionsschichten der Bauteile, beispielsweise für die tragende Grundstruktur und den raumseitigen Ausbau, zu Re-Use-fähigen Bauteilen kombiniert.

Es werden anhand konkreter technischer Lösungen aus Markt- und Forschungsrecherchen methodische Ansätze beschrieben, wie für die einzelnen Bauteile eines Gebäudes Re-Use-fähige Konstruktionen entwickelt werden können. Bereiche der Gebäudetechnik werden nicht betrachtet. Die beschriebenen Bauteile zeigen die anzustrebende Demontier- und Wiederverwendbarkeit im Sinne der Kreislaufwirtschaft für (Ersatz-)Neubauten, Sanierungen, Erweiterungen oder die Erneuerung von Bauteilen im Bestand. Der verwertungsorientierte Rückbau von Bestandsgebäuden ist mit anderen Rahmenbedingungen und Herausforderungen konfrontiert (Weismann et al., 2023) und wird in einer Kurzübersicht behandelt (siehe 4. Optionen für die Wiederverwendung von Bauteilen aus dem Bestand).

Bei der Untersuchung liegt der Fokus auf Gebäuden mit kurzen Nutzungszyklen. Bei diesen wirkt sich die Implementierung von Re-Use besonders stark auf die Lebenszyklusanalyse der Umweltauswirkungen aus. Beispielhaft umfassen bei Bürogebäuden übliche Zyklen von Mieterwechseln und die damit einhergehenden Umbauten mittlerweile eine Dauer von drei bis zehn Jahren (Devlieger, 2018). Dies zeigt die Relevanz der Thematik. Die konstruktive Umsetzung von Re-Use-fähigen Konstruktionen (siehe „Ableitungen von Ansätzen für die Methodik“) weist grundsätzlich keine Abhängigkeit von der Nutzungsdauer auf, wodurch eine Übertragung auch auf Gebäude mit längerer Nutzung gegeben ist.

Die Betrachtung der Optionen für eine gebäudebezogene Kreislauffähigkeit erfolgt hier in Anlehnung an die Hierarchien des Reversible Building Design auf Gebäude-, Bauteil- und Bauteilschichtebene (*building, system, component*). Um auf Gebäudeebene ein Transformationspotential im Sinne der *spatial reversibility* zu gewährleisten, wird ein maßgebliches Szenario für ein Nichtwohngebäude mit kurzer Nutzungsdauer und verschiedenen möglichen Nutzungsweisen definiert und durch schematische Darstellungen beschrieben. Hierfür werden grundlegende Festlegungen getroffen, beispielsweise hinsichtlich des z.B. Erschließungs- und statischen Systems. Darüber hinaus werden keine Variationen des Gebäudetypus betrachtet, da der Fokus der Untersuchung auf dem Wiederverwendungs- und Transformationspotentials auf Bauteil- und Komponentenebene liegt (*technical reversibility* im Sinne des RBD).

Auf Gebäudeebene nehmen das Grundriss- und Nutzungskonzept und das statische System großen Einfluss auf die Konstruktionsweise. Besonders im Bereich der Nichtwohngebäude unterscheiden sich die üblichen Konstruktionen stark, beispielsweise zwischen Gewerbe- und Bürobau durch unterschiedliche übliche Deckenspannweiten. Auch variieren die Anforderungen hinsichtlich Wärme-, Feuchte-, Schallschutz an die Bauteile eines Gebäudes, wenn es sich um nicht-konditionierte, also z.B. nicht-beheizte, -gekühlte und -belüftete Gebäude handelt. Bei Nichtwohngebäuden wie Lagerhallen oder teilweise offenen Gebäude kommt dies regelmäßig vor. In dieser Arbeit werden nur konditionierte Gebäude betrachtet, da diese eine höhere Komplexität aufweisen und die entwickelten Lösungsansätze auch auf nicht-konditionierte Gebäude angewendet werden können. Eine kurze Nutzungsdauer wird als Umfang weniger Jahre verstanden und bezieht sich nicht auf den Begriff der fliegenden Bauten (ÖNORM EN 13782:2015-06, Fliegende Bauten - Zelte – Sicherheit), die ohne Substanzverlust wiederho-

lend auf- und abgebaut werden können. Gebäude, die so design sind, dass sie auf veränderte Anforderungen durch Adaptionsmöglichkeiten entsprechend reagieren können, werden auch als dynamische Bauten (Durmisevic & Brouwer, 2002) oder wandelbare Gebäude (Durmisevic, 2006) bezeichnet.

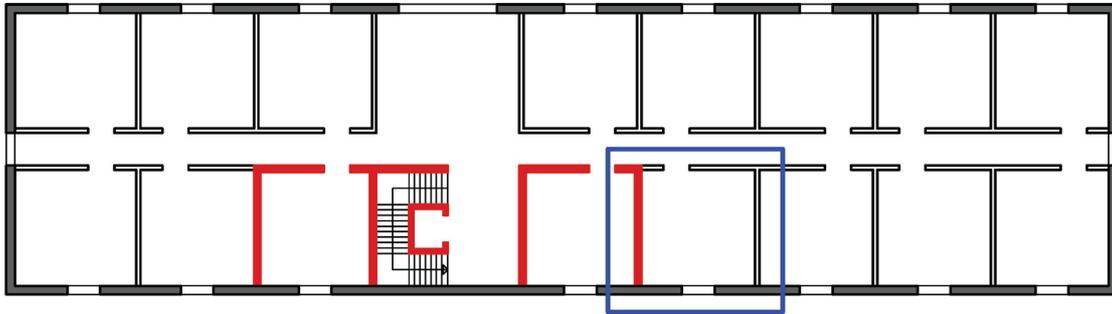


Abbildung 16: Grundriss-Szenario für einen fiktiven Betrachtungsfall mit aussteifendem Erschließungs- und Sanitärkern und ansonsten freier Grundrisseinteilung durch große Deckenspannweiten; blau hervorgehoben ist ein nachfolgend beispielhaft dargestellter Raum; Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 16 zeigt einen Gebäudegrundriss, der schematisch ein für eine Büronutzung übliches Konstruktionsraster zeigt (Jocher et al., 2011, S. 351f; Vismann, 2022, S. 150). Ebenso könnte es sich aber beispielsweise auch um ein Gebäude für die Lehre oder Pflege handeln, wodurch eine große Bandbreite an Nichtwohnnutzungen abgedeckt ist. Die rot dargestellten Wände stehen hierbei für Innenwände mit Anforderungen an den Schall- oder Brandschutz oder die Tragfähigkeit und begrenzen das fiktive Treppenhaus, beziehungsweise die Sanitärräume. Die Gebäudekonzept dieser Nichtwohnnutzung unterscheidet sich in den Grundzügen (Raum-, Tragstruktur) nicht wesentlich von üblichen Wohnbauten, was eine Übertragung von Ansätzen gewährleistet.

Sind keine tragenden Wandscheiben oder Träger in der Grundrissgestaltung zu berücksichtigen, weil die Decken von Außenwand zu Außenwand spannen oder auf Stützen und Trägern liegen, kann der restliche Grundriss frei mit leichten Trennwänden eingeteilt werden (Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau e.V., 2019; Graf et al., 2022). Das Konzept des freien Grundrisses durch den Entfall tragender Mauern geht ursprünglich auf die „Fünf Punkte zu einer neuen Architektur“ von Le Corbusier und Jeanneret (1927) zurück und erlaubt für jedes Stockwerk eine flexible Grundrissgestaltung, wodurch eine *spatial reversibility* unterstützt wird.

Das hier angenommene Gebäudesystem bildet die Grundlage für die nachfolgende Betrachtung einzelner Bauteile hinsichtlich der Optionen für eine Re-Use-fähige Konstruktionsweise. Hierfür werden die begrenzenden Bauteile eines beispielhaften Raumes, wie durch die rote Umrandung hervorgehoben, untersucht.

Bauteilschichten können sowohl Einzelfunktionen übernehmen (Wärmedämm-, Abdichtungsschicht) als auch mehrere Funktionen vereinen (z.B. Statik, Schallschutz und Wärmedämmung bei wärmedämmendem Mauerwerk). Auf der Ebene der Komponenten entscheiden vor allem reversible Verbindungen zwischen den Schichten über die Möglichkeit eines zerstörungsfreien Rückbaus. Die Materialwahl der Komponenten beeinflusst nicht nur den ökologischen Fußabdruck für die Beschaffung der Rohstoffe und die Verarbeitung zu Baumaterialien, sondern vor allem die Weiterverwertungsmöglichkeiten durch Recycling am Ende der Lebensdauer. Dies impliziert einen Verzicht auf Verbundwerkstoffe und Verklebungen. Weiters orientiert sich die Materialwahl an den Themenschwerpunkten lokale, recycelte, sortenreine und gewachsene Baumaterialien der „Materialbibliothek der deutschen Hochschulen“ (Karlsruher Institut für Technologie [KIT], 2021).

Eine Übersicht der untersuchten Bauteile des beispielhaften Raumes ist als Schnittzeichnung in Abbildung 17 ersichtlich. Der Raum wird als eingeschossige Konstruktion beschrieben, sodass die der Witterung exponierten oberen und unteren Hüllflächen (Gründung, Dach) berücksichtigt sind. Konstruktionsprinzipien für Geschoßdecken lassen sich hieraus ableiten. Abbildung 18 zeigt beispielhaft den detaillierten Aufbau eines Bauteils und auszugswise die Beschreibung seiner Komponenten. Auf diese Weise wird mit allen Bauteilen verfahren.

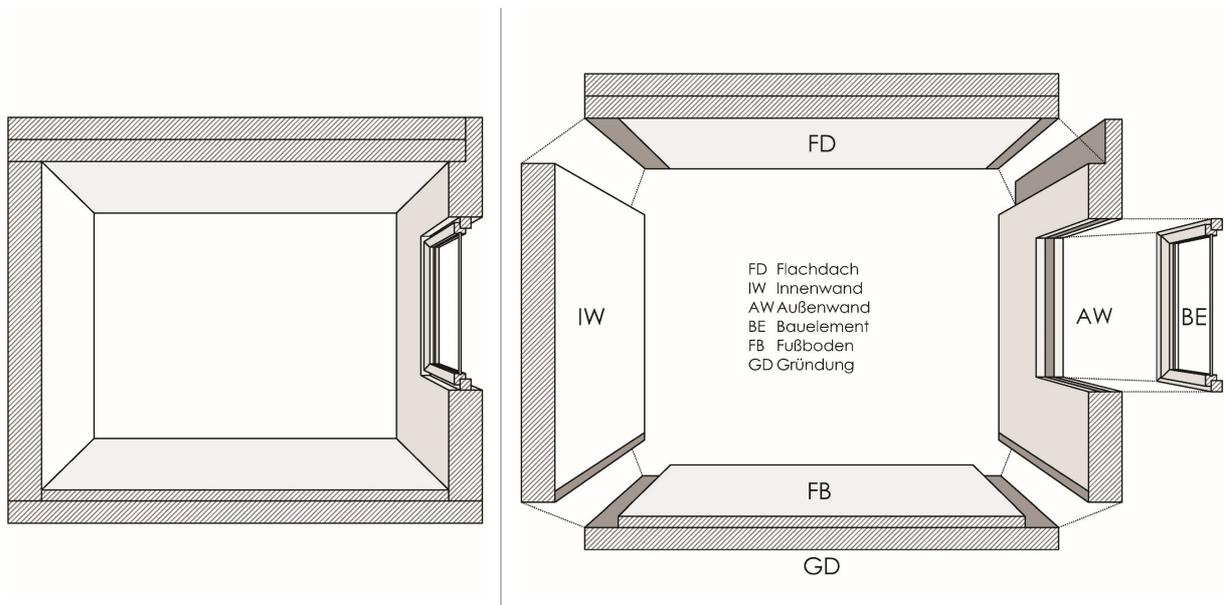


Abbildung 17: Darstellung eines beispielhaften untersuchten Raums im Schnitt und Explosionszeichnung der das Raumvolumen umschließenden Bauteile; Quelle: eigene Darstellung

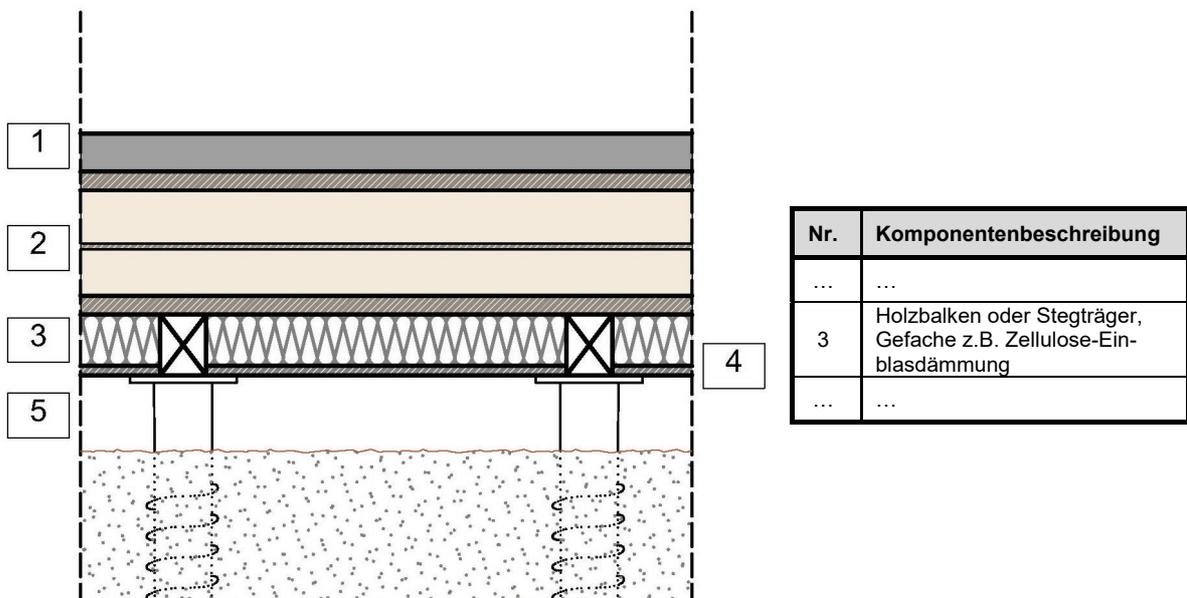


Abbildung 18: Beispielhafte Darstellung eines Bauteils (aufgeständerte Bodenplatte), die Beschreibung der Komponenten erfolgt textlich und über die Schraffur/Farbgebung; Quelle: eigene Darstellung

3. Optionen für Re-Use-fähige Konstruktionen

Zur Vermittlung der Optionen für die Re-Use-fähige Konstruktionen wird eine einheitliche Vorgehensweise angewandt. Diese umfasst, in dieser Reihenfolge:

- Schematische Darstellung und Abgrenzung des betrachteten Bauteils
- Abbildung beispielhafter, nicht-Re-Use-fähiger Konstruktionen
- Textliche Beschreibung der Re-Use-Barrieren
- Zeichnerische Darstellung Re-Use-fähiger Konstruktionen
- Textliche Beschreibung der Re-Use-ermöglichenden Ansätze in den Optionen
- Produktbeispiele und Abbildungen
- Berücksichtigung der Schnittstellen zu anderen Bauteilen

Grundlagen zur Auswahl der heute üblichen, nicht-Re-Use-fähigen Ausführungsweisen:

Die beispielhaften konventionellen Ausführungen resultieren aus einer Betrachtung der Use Cases und einem Abgleich mit Detailkatalogen aus Normen und dienen als Grundlage, um einen Veränderungsbedarf zu legitimieren. Folgende Normen wurden herangezogen:

ÖNORM B 8110-2:2020-01, Wärmeschutz im Hochbau - Teil 2: Wasserdampfdiffusion, -konvektion und Kondensationsschutz, 8 Nachweisfreie Konstruktionen.

ÖNORM B 5320:2020-10, Einbau von Fenstern und Türen in Wände - Planung und Ausführung des Bau- und des Fenster-/Türanschlusses.

DIN 4108 Beiblatt 2:2019-06, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Beiblatt 2: Wärmebrücken - Planungs- und Ausführungsbeispiele, mit CD-ROM, 7 Planungsbeispiele von Anschlussdetails.

Die Normen zeigen allgemein anerkannte, normgerechte Konstruktionen, weswegen sie als Referenzen für übliche konventionelle Bauweisen geeignet sind.

Erläuterungen zur zeichnerischen Darstellung der Re-Use-ermöglichenden Optionen:

[1], [2] ... bezeichnen die einzelnen Komponenten, aufsteigend von innen nach außen.

[a], [b] ... differenzieren Ausführungsvarianten für das Gesamtbauteil oder einzelne Schichten.

Ansätze zur Auswahl und textlichen Beschreibung der Re-Use-ermöglichenden Optionen:

Die Optionen stellen einen Marktspiegel von Produkten dar, die dazu beitragen können, die methodischen Ableitungen aus den Entwicklungen zur Wiederverwendung von Bauteilen zu erfüllen (siehe 1.2 Motive und Theorien des kreislauffähigen Bauens). Die gezeigten Optionen und Produkte stellen mögliche Lösungen dar, sind aber keinesfalls abschließend. Verweise auf spezifische Produkte sind mit Endnoten gekennzeichnet und am Dokumentende gelistet.

Es werden gleichrangig sowohl mineralische als auch Holzbauweisen betrachtet, wodurch die Bandbreite der in den betrachteten Normen vorherrschenden Formen der Gebäudekonstruktion abgebildet wird. Neben dem Motiv der Wiederverwendbarkeit werden vorrangig Baustoffe ausgewählt, die im Vergleich zu ähnlichen Produkten besonders geringe Umweltauswirkungen nachweisen.

Es sei darauf hingewiesen, dass die dargestellten Optionen qualitative Ansätze beschreiben, wie Re-Use-fähige Konstruktionen funktionieren können und keine abschließende statische, brand-, feuchte- oder wärmeschutztechnische Bemessung darstellen. Da sich viele Ansätze erst in einem Entwicklungsstadium befinden, war eine bauaufsichtliche Zulassung oder die Einhaltung aller Normen und Richtlinien keine Grundvoraussetzung für die Auswahl der Optionen.

3.1. Flachdach, oberste Geschoßdecke, Träger

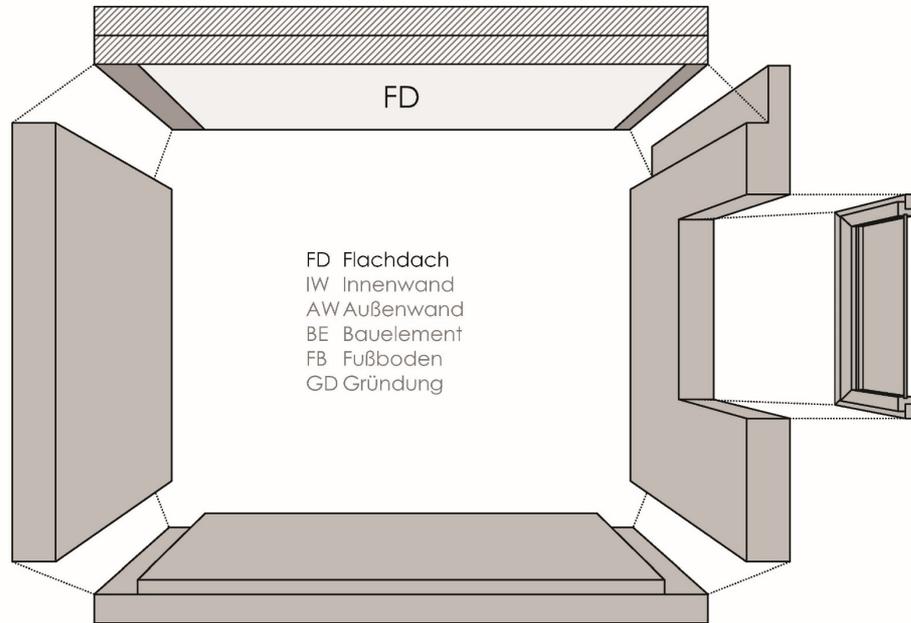
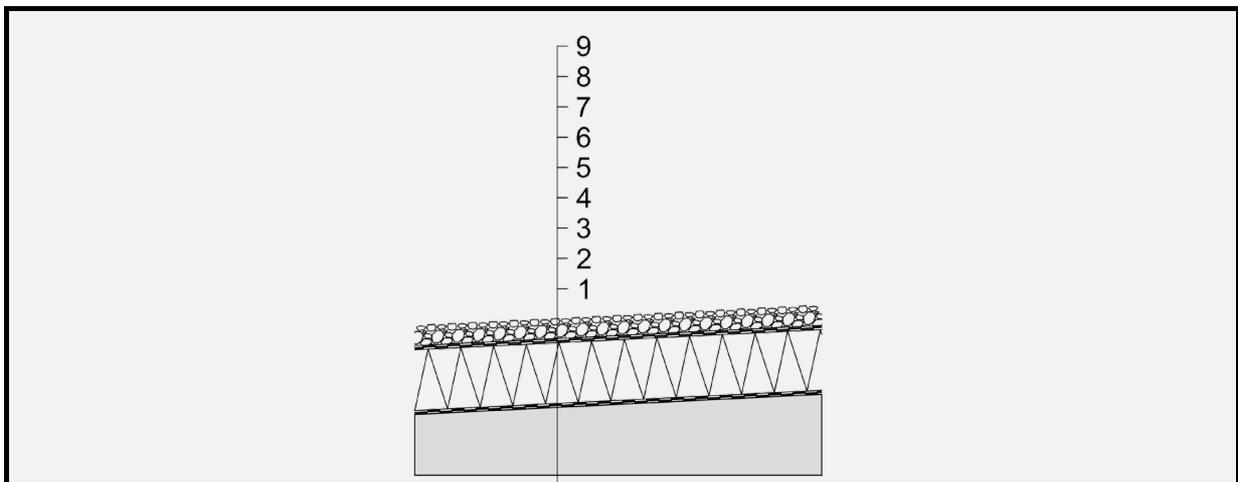


Abbildung 19: Darstellung eines Flachdachs bzw. einer obersten Geschoßdecke im Gefüge der Bauteile

Die dargestellte konventionelle Konstruktion (Tabelle 3) zeigt einen Flachdachaufbau mit plattenförmiger Massivdecke, welche aus verschiedenen Materialien gebildet werden kann.

Tabelle 3: Annahmen für eine beispielhafte übliche Flachdachkonstruktion und Beschreibung des Bauteilaufbaus



Nr.	Komponentenbeschreibung (Fortsetzung Tabelle 3)
	ÖNORM B 8110-2:2020-01 – 8.4.1, Warmdach
1	Deckenbildner (Beton, Ziegeldecke, Leichtbeton, Porenbeton, Brettsper Holz) mit Gefälle
2	gegebenenfalls Ausgleichsschicht
3	gegebenenfalls Voranstrich
4	Trennschichte [sic] mit $s_d > 1500$ m
5	gegebenenfalls Schutzschicht
6	Dämmstoff – ohne Hilfskonstruktion aus feuchtesensiblen Baustoffen
7	gegebenenfalls Trennschichte und Abdichtung
8	gegebenenfalls Schutzschicht
9	Auflast/Oberflächenschutz

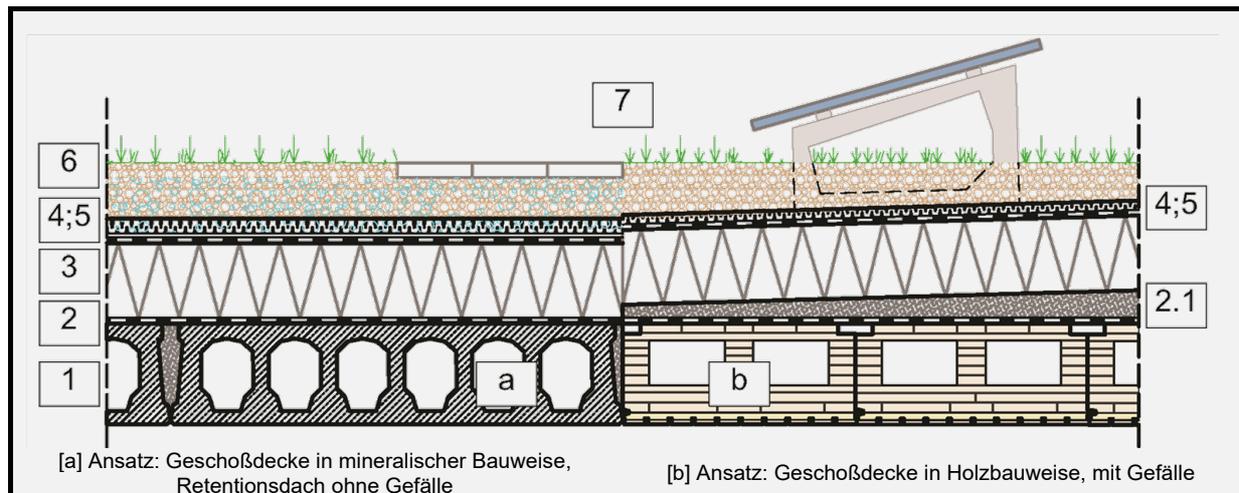
Bei (Leicht-)Beton- und Brettsper Holz werden in der Regel großformatige Elemente verwendet, die die individuellen Gegebenheiten des Gebäudes wie Aussparungen berücksichtigen. Durch die individuelle Fertigung ist ein direktes Re-Use in einem anderen Gebäude kaum möglich. Derselbe Effekt tritt bei Ausbildung eines individuellen Gefälles auf der Schichtoberseite ein. Dies ist als Alternative zur direkten Verlegung von Deckenplatten im Gefälle vor allem bei (Leicht-)Beton, als sogenannter Gefällebeton, üblich. Anders als in dieser Konstruktion kann das für die Flachdachentwässerung notwendige Gefälle auch durch Gefälledämmplatten, z.B. aus XPS, Polyurethan, Steinwolle, Schaumglas oder Holzfasern, hergestellt werden. Auch diese sind wiederum individuell auf die projektspezifischen Gegebenheiten abgestimmt. Die Wahl des Dämmstoffs nimmt wiederum Einfluss auf die Umweltauswirkungen, da beispielsweise die Herstellung von Steinwolle mit einem vergleichsweise hohen Energieaufwand verbunden ist. Abdichtungen, z.B. aus Bitumen oder aus Kunststofffolien, gelten als Störstoffe nach ÖNORM B 3151:2022-05 und müssen vor einem Rückbau entfernt werden, um eine Verunreinigung des Bauschutts zu verhindern. Hierbei verhindern die üblicherweise zum Einsatz kommenden Verklebungen zwischen Deckenbildner, Dampfsper-, Dämm- und Abdichtungsschicht die zerstörungsfreie Separierung der Bauteilschichten.

Weiters erfolgt bei Betondecken aus Halbfertigteilen und bei Ziegelementdecken eine Ortbetonergänzung, beziehungsweise bei Decken aus einachsig gespannten Platten, z.B. aus Porenbeton, ein Verguss zwischen den Segmenten. Durch die kraftschlüssige Verbindung der einzelnen Elemente ist eine Reversibilität nicht mehr gegeben. Am Markt existieren Porenbetondecken aus modularen länglichen Platten, deren Fügung untereinander reversibel mit Nut-und-Feder-Profilen erfolgt. Von statischer Seite ist der Einfluss auf die Scheibenwirkung der Decke zu berücksichtigen ⁵.

Hinzu kommt, dass Brettsper Holz- und Betondecken bei massiver Ausführung mit homogenem Querschnitt vergleichsweise materialintensiv und entsprechend schwer sind und damit die Gesamtumweltauswirkungen des Bauteils erhöhen. Eine Verringerung der Querschnittsfläche unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf bauliche Schutzziele (Statik, Brand-, Schall-, Wärme-, Feuchteschutz) kann dazu beitragen, den Material- und Ressourceneinsatz zu reduzieren.

Tabelle 4 zeigt mögliche Optionen, die gezeigten Barrieren zu umgehen. Anschließend folgt eine Beschreibung der Ansätze.

Tabelle 4: Optionen für Re-Use-fähige Flachdachkonstruktionen und Beschreibung der Bauteilaufbauten



Nr.	Komponentenbeschreibung
[a] 1	Spannbeton-Deckenplatte, Fugen mit Schüttung verfüllt, raumseitig spaltüberbrückendes Dampfsperklebeband
[b] 1	Brettsperrholz-Kastenelement mit Holzweichfaser-Akustikabsorber und Holzoberfläche
2	Trennlage, Dampfsperre lose aufgelegt, am Dachrand mechanisch befestigt
[b] 2.1	Trockenschüttung im Gefälle
3	druckfeste Holzfaserdämmplatte
4	EPDM-Abdichtungsbahn, lose verlegt, am Dachrand mechanisch befestigt
[a] 5	Retentionselement mit Wasserspeicherfunktion
[b] 5	Drainageelement
6	Substratschicht aus Ziegelsplitt, Vegetationsschicht extensiv oder intensiv
7	Plattenbelag oder durchdringungsfreie Montage von Aufbauten wie Photovoltaikmodulen und Geländern möglich

Im Gegensatz zu großformatigen Decken aus einem durchgängigen Material(-verbund) erhöhen modulare Deckenplatten, vor allem bei Anwendung von Standardrastermaßen, die Möglichkeit zur Wiederverwendung. Hierbei sind aber reversible Verbindungen zwischen den Einzelmodulen erforderlich, was bei mineralischen Bauteilen einen Verzicht auf den üblicherweise durchgeführten Fugenverguss oder Aufbeton erfordert (Jäger et al., 2022).

Modulare Deckenplatten existieren sowohl in mineralischer als auch in Holzbauweise. Bei einigen Ansätzen erfolgt zusätzlich eine Reduktion des Materialquerschnitts und somit des Ressourceneinsatzes. Bei Holzelementen wird dies durch die Ausbildung von Hohlräumen zwischen Deckschichten bewerkstelligt, wobei der Baustoff Holz entsprechend seiner statischen Tragfähigkeit optimal ausgenutzt wird⁶. In den Hohlräumen besteht die Möglichkeit zur Leitungsführung oder zur Verbesserung des Schall- und Wärmeschutzes. Die statische Scheibenwirkung der Decke wird durch Verschraubung der Elemente untereinander mit einem Koppelbrett sichergestellt.

Einen vergleichbaren materialsparenden Ansatz verfolgen Betonhohlplatten⁷. Der für die Reversibilität ausbleibende Verguss zwischen den Elementen ist statisch zu berücksichtigen. Auch die einzelnen Steine einer Ziegelelementdecke werden üblicherweise durch einen dauerhaften Betonverguss mit Stahlzulaugen verbunden, wodurch keine Reversibilität mehr gegeben ist. Um diesen Umstand zu beheben, wurde eine Ziegeldecke entwickelt, bei der die einzelnen Elemente passgenau zwischen (Holz-)Trägern eingelegt werden und ober- sowie unterseitig eine durchgängige Fläche bilden⁸. Das notwendige Achsmaß der Deckenbalken ist hierfür planerisch sicherzustellen.

Für die kraftschlüssige Fügung von Holzbauteilen, auch zwischen unterschiedlichen Bauteilen, werden Verbindungsmittel angeboten, die besonders für Reversibilität ausgelegt sind. So existieren Scheiben- und Konusdübel aus Kunstharzpressholz, die für zerlegbare Strukturen prädestiniert sind. Durch die Aufnahme der Schrauben in Einschraubmuttern wird die Beständigkeit bei mehrfachem Ein- und Ausdrehen der Bolzen optimiert. Deren Entwicklung erfolgte im Zusammenhang mit der Erforschung der erfolgreichen Erprobung von Trägern aus Buchenholz niedriger Qualität als Alternative zu Trägern aus Stahlbeton oder Nadelholz (Shi et al., 2021). Ein ebenfalls rückbaubares Verbindungsmittel stellen die metallfreien Schwalbenschwanzverbindungen aus Birkenesperrholz eines österreichischen Herstellers dar, die eine Vielzahl an Schrauben einsparen und bereits bei einem temporären Gebäude erfolgreich eingesetzt wurden (Pavillon Fuggerei NEXT500, Augsburg). Diese Holzverbinder können in verkleinerter Form im Innenausbau auch zur Verbindung von Platten eingesetzt werden.

Bei bahnenförmigen Dampfsperr- und Abdichtungsbahnen besteht die Herausforderung für Reversibilität im Verzicht auf dauerhafte Verklebungen. Ein Ersatz der häufig zum Einsatz kommenden Bitumenbahnen durch Folien aus FPO (flexible Polyolefine) oder EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk) und eine rein mechanische Fixierung an aufgehenden Bauteilen wie dem Dachrand kann hier eine Alternative darstellen. Die Windsogsicherung erfolgt durch eine entsprechende Auflast, zum Beispiel einen Gründachaufbau (Hillebrandt et al., 2021; Jäger et al., 2022).

Um Individuallösungen zu umgehen, werden Lösungen ohne Einsatz von Gefälledämmung und Deckenbildnern im Gefälle betrachtet. Die Erzeugung eines Gefälles kann mittels Schüttungen⁹ auf dem Deckenbildner erfolgen, wodurch die anschließend verlegten standardmäßigen Dämmplatten deren Neigung aufnehmen. Bei Ausbildung eines Retentionsdachs mit Abflussdrosselung, bei dem Teile des Niederschlags bewusst auf der Flachdachfläche zurückgehalten werden, ist auch die Ausbildung von gefällelosen Dächern möglich¹⁰.

Zur Vermeidung einer Durchdringung der Abdichtungs- und Dämmschichten und notwendiger Kompensationsmaßnahmen, ist eine durchdringungsfreie Montage von Geländern und Photovoltaikmodulen anzustreben¹¹. Vergleichbar mit den Optionen bei den Dachbahnen erfolgt die Lagesicherung durch eine entsprechende Auflast.

Im Sinne eines Verzichts auf Oberflächenbehandlungen sind zur Erhöhung der Feuerwiderstandsdauer von Stahlbauteilen wie Trägern und Stützen plattenförmige Bekleidungen gegenüber Brandschutzputzen oder -beschichtungen vorzuziehen. Letztere bestehen aus mehreren Schichten, wie Grundierung, eigentlicher Brandschutzbeschichtung als Dämmschichtbildner und Decklack, welche sich auch auf Knotenpunkte und Verbindungsstellen erstrecken müssen (Zelenka Brandschutztechnik, 2022). Eine weitere zu prüfende Option stellt die statische Überdimensionierung dar (Hillebrandt et al., 2021).

3.2. Innenwand

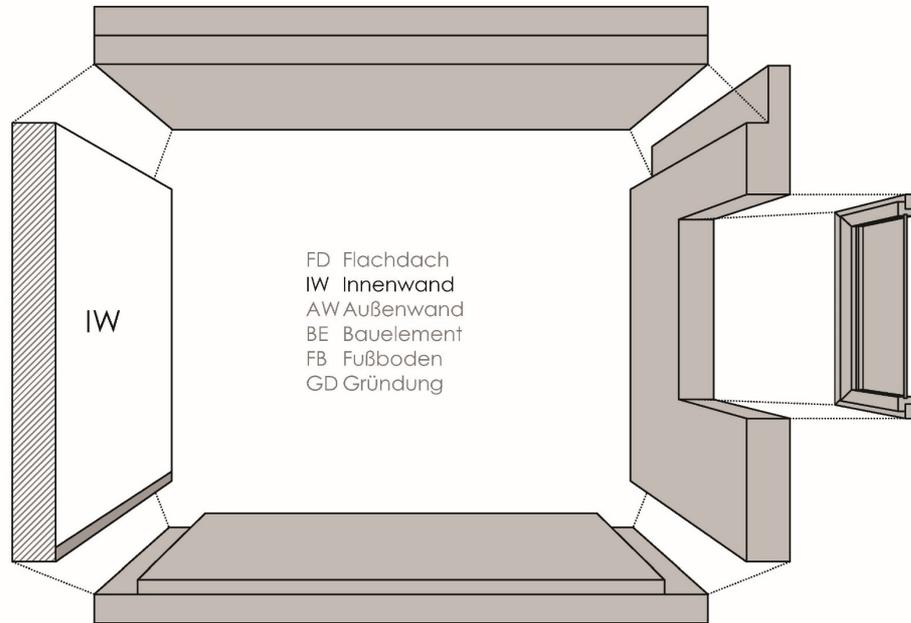
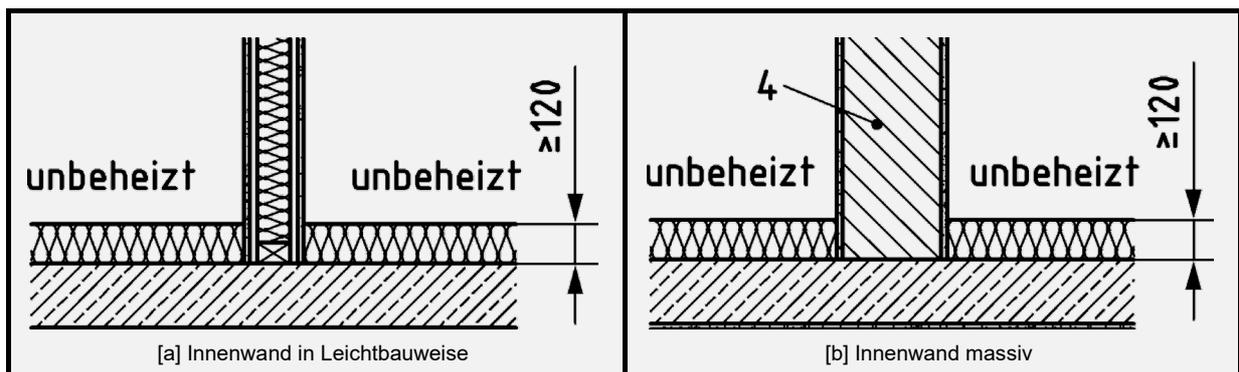


Abbildung 20: Darstellung einer Innenwand im Gefüge der Bauteile

Zur Betrachtung der Optionen für Innenwände bietet sich eine Differenzierung in leichte Trennwände zur Raumbildung ohne weitere spezifische Anforderungen und Wände mit besonderen funktionalen Ansprüchen, wie statisch tragend, Schall- oder Brandschutzanforderungen, Wände mit hygienischen Anforderungen, z.B. in Küchen und Sanitärräumen, an (Tabelle 5).

Tabelle 5: Annahmen für beispielhafte übliche Innenwandkonstruktionen und Beschreibung der Bauteilaufbauten

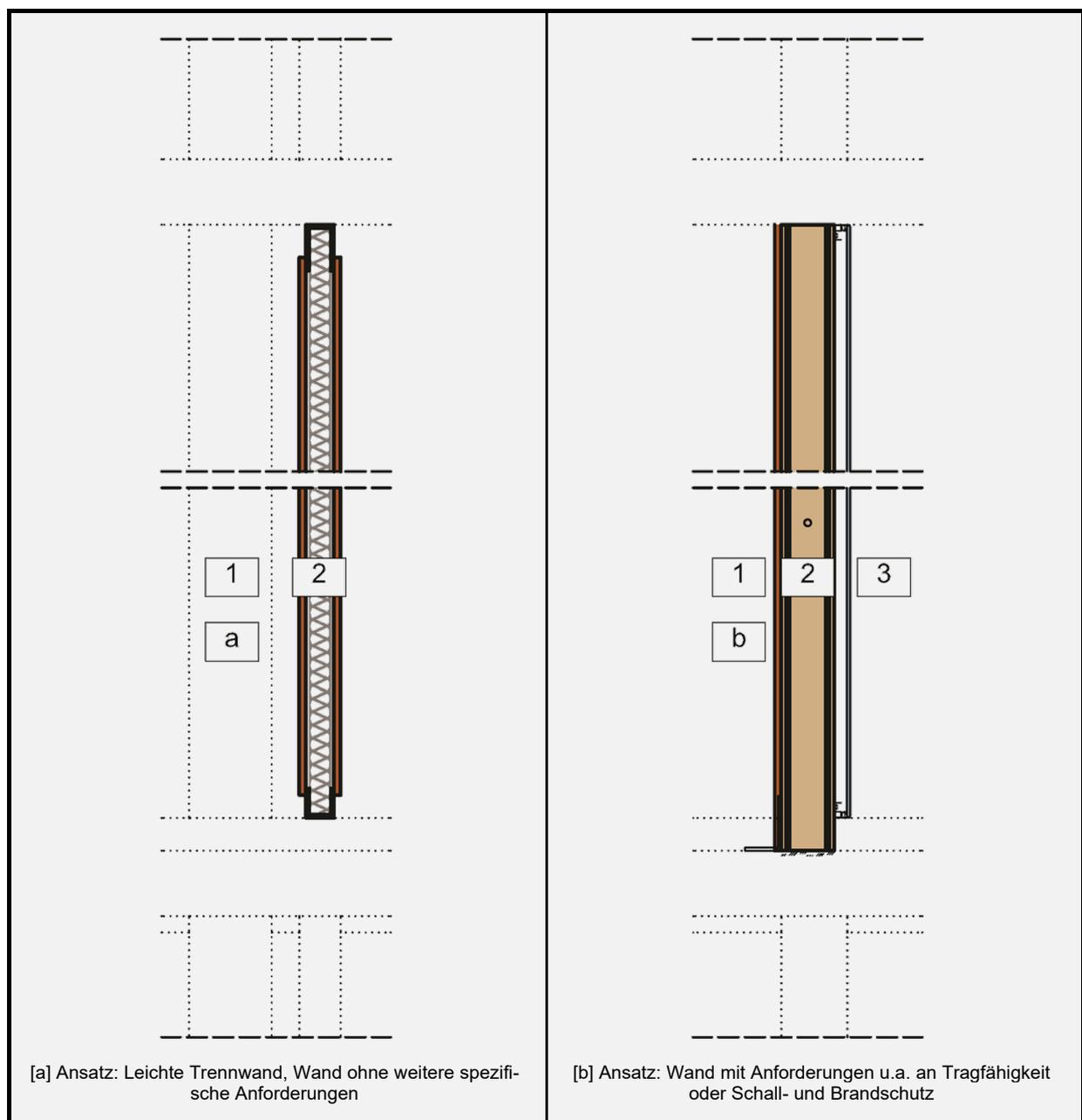


Nr.	Komponentenbeschreibung
	DIN 4108-2 Beiblatt 2:2019-06 – Nr. 168, Innenwand an Geschosdecke unbeheizt, Innenwand in Leichtbauweise
[a]	Holzständerkonstruktion, Wärmedämmung (allgemein), Holzwerkstoffplatte, Gipsplatte
	DIN 4108-2 Beiblatt 2:2019-06 – Nr. 167, Innenwand an Geschosdecke unbeheizt, Innenwand massiv, Dämmung oberhalb der Geschosdecke (Grafik modifiziert)
[b] 4	Mauerwerk verputzt

Diese Differenzierung spiegelt sich auch im zugrundeliegenden Betrachtungsszenario (siehe 2. Methodik) wider, indem die Wände des Erschließungskerns und der Sanitärräume von den Raumtrennwänden unterschieden werden. Für erstere werden hierbei eine unveränderliche Lage im Gebäude angenommen sowie zusätzliche Anforderungen an die Tragfähigkeit, den Schall- und Brandschutz sowie an die Reinigungsmöglichkeiten gestellt.

Tragende oder aussteifende Innenwände können auf unterschiedliche Bauweise, z.B. als Beton-, Mauerwerks-, Massivholz- oder Holzständerkonstruktion erstellt werden. Raumbildende Innenwände ohne weitergehende Anforderungen werden häufig in Leichtbauweise errichtet. Die konventionellen Konstruktionen aus beplankten Metallständern sind schnell und günstig zu errichten, können aber aufgrund der nicht-lösbaren Fügungen, wie dem Verpressen der Metallprofile, der Verschraubung der Platten und der Verspachtelung der Schraubenköpfe nicht zerstörungsfrei rückgebaut werden.

Tabelle 6: Optionen für Re-Use-fähige Innenwandkonstruktionen und Beschreibung der Bauteilaufbauten



Nr.	Komponentenbeschreibung (Fortsetzung Tabelle 6)
	Leichte Trennwand, Wand ohne spezifische Anforderungen
[a] 1	Tragstruktur des Gebäudes
[a] 2	Versetzbare Systemtrennwand
	Wand mit Anforderungen an Tragfähigkeit, Schall- oder Brandschutz, Hygiene
[b] 1	Innenausbau mit Lehmbauplatten
[b] 2	Massivholzwand aus modularen, verschraubten Elementen
[b] 3	ESG (Einscheibensicherheitsglas) mit reversibler Metallbefestigung

Für die Rauntrennwände wird hinsichtlich einer Nutzungsflexibilität die freie Einteilung und Variabilität des Gebäudegrundrisses angestrebt. Insbesondere Skelettkonstruktionen und hohe Deckenspannweiten sind hierbei förderlich, allerdings müssen die leichten Trennwände auch so konstruiert werden, dass eine Reversibilität und Flexibilität möglich sind. Tabelle 6 zeigt links die Grundstruktur zu Re-Use-fähigen Optionen für leichte Trennwände. Um auf veränderte Anforderungen, auch spontane, reagieren zu können, bieten sich anstelle von festen Rauntrennwänden versetzbare Systemtrennwände an ¹². Diese können durch Montage auf dem Fußbodenaufbau als Einzelmodule bewegt werden und so beispielsweise zur zeitweisen Vereinigung von Räumlichkeiten oder zur Abtrennung von Flächen dienen.

Für die flexible Grundrissgestaltung, beispielsweise in Bürogebäuden, bieten sich auch eine neue entwickelte reversible Trockenbauwand ¹³ aus höhenjustier- und neigbaren Ständern aus Recyclingstahl an, die untereinander per Klicksystem fixiert werden und mit oberflächenfertigen Platten mit Nut- und Feder-Verbindung ein- bis dreilagig beplankt werden können. Auch Schall- und Brandschutzanforderungen können erfüllt werden. Die reversible Montage der Platten an den Ständern erfolgt über Klettverschluss- oder Schraubverbindungen, an Boden und Decke über ein zugehöriges Klebeband. Das abschließende Oberflächenfinish aus Fugendichtstreifen und Spachtelmasse im Falle einer Gipskartonbeplankung wurden ebenfalls für Reversibilität optimiert. Das Grundraster basiert auf modularen I-Module von 60 cm Breite und justierbaren C-Modulen für den Wandabschluss sowie zur Herstellung von Türöffnungen. Lediglich in diesen Fällen ist ein Zuschnitt der Beplankung erforderlich. Vorgefertigte Aussparungen erlauben zudem die verschnittfreie Integration von Leitungsdurchführungen. Weiters bietet der Hersteller im Falle eines Rückbaus eine Rückkaufgarantie.

Vergleichbare Trockenbausysteme mit Klickverbindung zwischen den Trägern werden auch für die Herstellung von Installationswänden angeboten ¹⁴. Ursprünglich im Messebau beheimatet, sind zudem weitere reversible Lösungen für Trennwandsysteme mit Steck- und Schraubsystemen am Markt erhältlich, die mit Stoffen oder Paneelen beplankt werden können ¹⁵.

Sollen die Hohlwände aus Schallschutzgründen gedämmt werden, wird eine Kombination mit einem Dämmstoff aus Gras aus Landschaftspflegemaßnahmen vorgeschlagen ¹⁶. Dieser bietet aus Sicht des Rückbaus keine Vorteile gegenüber konventionellen Dämmstoffen, allerdings erfolgt durch die kurze Wachstumsdauer eine schnelle CO₂-Bindung, welche laut Umweltproduktdeklaration die Emissionen der Produktion übersteigt. Weiters steht der Ausgangsrohstoff nicht in Konkurrenz zur Bauholz-, Baustoff-, Papier- oder Brennstoffindustrie sowie zur Nahrungsmittelproduktion und die verbleibenden Reststoffe aus der Zellulosegewinnung werden über eine Biogasproduktion dem Produktionskreislauf zur Trocknung zugeführt. Auch weitere Wärmedämmstoffe wie beispielsweise aus Seegras ¹⁷ können besonders niedrige CO₂-Emissionen in der Herstellung aufweisen.

Die Optionen für tragende Innenwände gelten simultan auch für die Raumseite tragender Außenwände. Für die der Umgebung zugewandten Seite sind die Maßnahmen des Wärme- und Witterungsschutzes aus den Optionen für Außenwände zu übertragen.

Generell sind im Holzbau reversible Fügungen, wie Verschraubungen, üblich, wodurch beispielsweise Holzständerwände tendenziell eine hohe Reversibilität aufweisen. Hindernisse für wiederverwendbare Konstruktionen sind zum einen die raumseitigen Bekleidungen und eine fehlende Zugänglichkeit zu den Anschlüssen an angrenzende Bauteile, soll die Wandkonstruktion als Ganzes wiederverwendet werden. Mögliche Optimierungsansätze für Holzständerwände bestehen beispielsweise in der Reduzierung des Vollholzbedarfs, z.B. durch Ersatz von Konstruktionsvollholz durch Stegträger¹⁸ sowie eine reversible Ausführung der raumseitigen Bekleidungen.

Werden Massivholzwände aus großformatigen, projektspezifischen Platten erstellt, ist ein Re-Use aufgrund der individuellen Anfertigung eingeschränkt. Eine Option, um dem entgegenzuwirken, kann die Fertigung von Wandelementen aus durch Verschraubung und/oder Formschluss reversibel gefügten Einzelementen sein¹⁹. EPDM-Dichtungen können verdeckt zwischen den Elementen liegen und die Luft- und damit auch Schallübertragung minimieren. Die Oberflächen der Massivholzelemente können naturbelassen bleiben oder mit einer Beplankung versehen werden, die ein höheres Re-Use- oder Recycling-Potential aufweisen als die vorherrschenden Gipskarton- und Gipsfaserbauplatten, deren Wiederverwertungsquote bislang sehr niedrig ist (ca. 10 % der anfallenden Gipsabfälle; Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2021) und die nach ÖNORM B 3151:2022-05 einen vor dem Gebäuderückbau zu entfernenden Störstoff darstellen. Hierfür kommen beispielsweise Lehmbaumstoffe in Frage²⁰. Da Lehmbaumstoffe nicht mineralisch abbinden, sondern nur durch Trocknung härten, kann Lehm durch Zugabe von Wasser zirkulär wiederverwendet werden. Aufgrund dieser Wasserlöslichkeit können Lehmputze und -mörtel auch rückstandslos entfernt werden, was eine sortenreine Trennung, beispielsweise in Ziegelmauersteine und Lehmmörtel, erlaubt (ClayTec GmbH & Co. KG, 2023). Eine serienreife Neuentwicklung für modulare Wandbekleidungen aus nachwachsenden Rohstoffen stellen Paneele aus Pilzmyzel dar, die mit Klett- oder Magnetverbindern reversibel an der Wand befestigt werden²¹ und zusätzlich zur Wandgestaltung auch den Wärme- und Schallschutz verbessern. Weiters können die Platten bei abgehängten Decken durch Verschraubung oder Auflage reversibel eingesetzt werden.

Soll der Wandbildner aus mineralischen Baustoffen gefertigt werden, wird eine reversible Umsetzung aufgrund der üblichen Fügung und dem Verputz mit Mörteln deutlich erschwert (Stoffschluss). In diesem Fall bietet sich eine Optimierung der Kreislauffähigkeit durch Monomaterialität innerhalb der Konstruktion und Materialien mit niedrigen Umweltauswirkungen und geschlossenen Recycling-Kreisläufen an. Optionen hierfür sind beispielsweise Steine aus Hanfkalk mit Kalkmauermörtel und einem (Hanf-)Kalkputzsystem²². Bei der Herstellung der Hanfkalksteine erfolgt laut Umweltproduktdeklaration eine deutlich höhere CO₂-Bindung als CO₂ im Herstellungsprozess freigesetzt wird. Weiters können geschredderte Abbruchmengen auch bei anhaftenden Kalkmörteln und -putzen wieder dem Produktionsprozess zugeführt werden, beim betrachteten Produkt bis zu einem Anteil von 25% auch ohne relevante Veränderung der Stoffeigenschaften.

Besondere Herausforderungen für reversible Konstruktionen stellen Nassbereiche dar, da der Reversibilität zugute kommenden Toleranzen und freiliegende Verbindungsstellen wiederum Schwachstellen in der Abdichtungsebene darstellen. Möglichkeiten bestehen in der Beplankung der Wand mit ESG (Einscheibensicherheitsglas) durch Magnet- oder Einhängesysteme²³ und einer reversiblen (Trocken-)Verfugung zwischen den Platten und zu angrenzenden Bauteilen. Glasoberflächen können zudem in Lebensmittelbereichen eine gut zu reinigende Option für den Wandbelag darstellen.

3.3. Außenwand

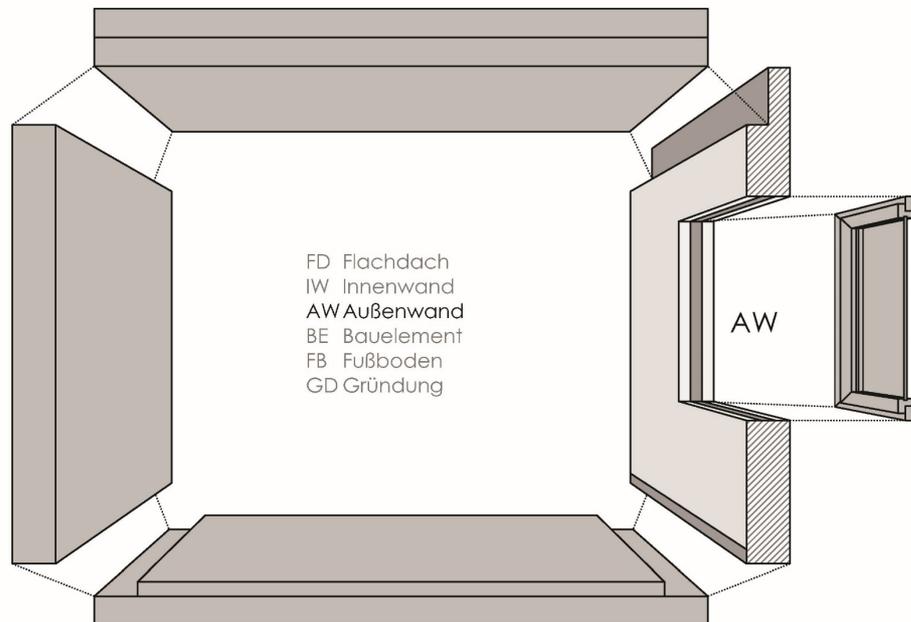
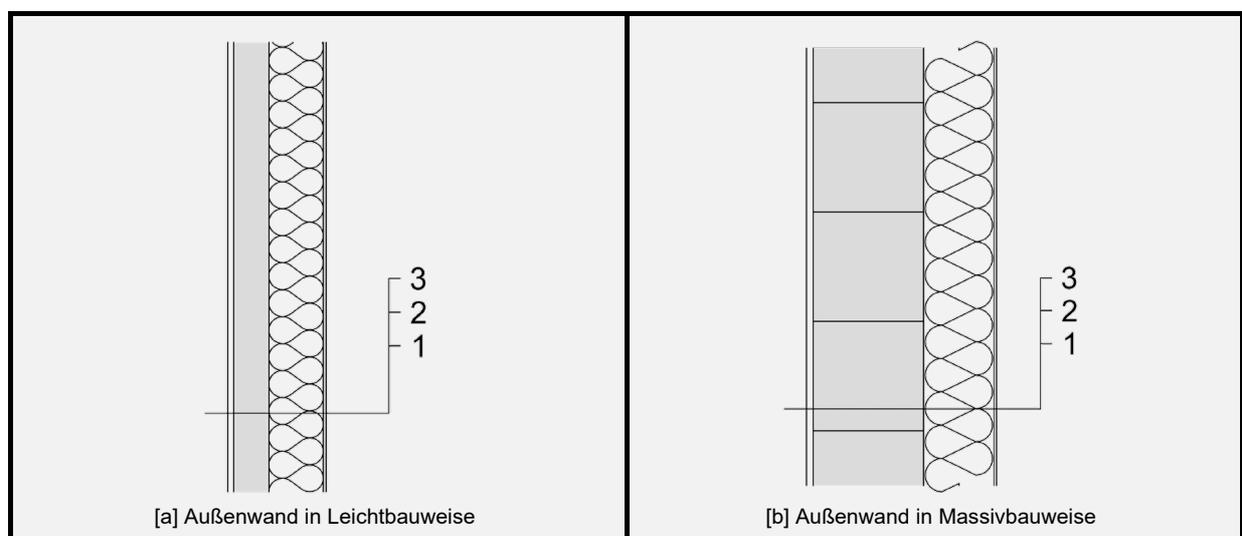


Abbildung 21: Darstellung einer Außenwand im Gefüge der Bauteile

Für die beispielhaften konventionellen Außenwände werden lastabtragende Konstruktionen betrachtet (Tabelle 7). Nichttragende Ausfachungen von Skelettragwerken oder vorgesetzte Außenwände stellen hierzu alternative Varianten dar, die mit stark abweichenden Rahmenbedingungen für die Grundkonstruktion und Bauteilanschlüsse einhergehen (BauNetz) und dementsprechend im Sinne der Variantenbeschränkung nicht behandelt werden.

Tabelle 7: Annahmen für beispielhafte übliche Außenwandkonstruktionen und Beschreibung der Bauteilaufbauten



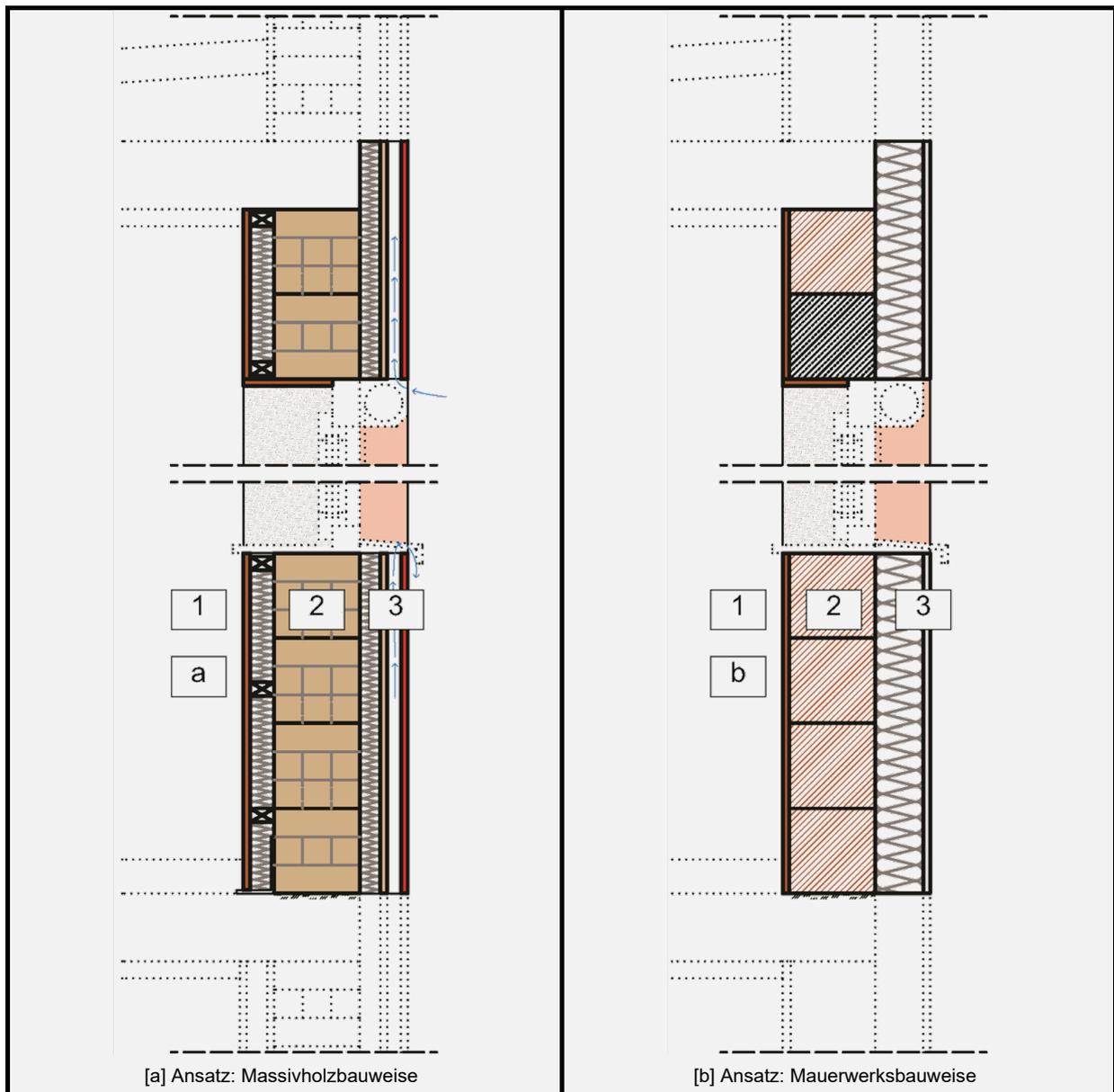
Nr.	Komponentenbeschreibung (Fortsetzung Tabelle 7)
	ÖNORM B 8110-2:2020-01 – 8.2.9, Holzmassiv-Außenwand mit äußerer Wärmedämmschichte
[a] 1	Bekleidung
[a] 2	Wandbildner (z. B. Brettsper Holz)
[a] 3	Wärmedämm-Verbundsystem
	ÖNORM B 8110-2:2020-01 – 8.2.2 und 8.2.10, Massive Außenwand oder Mantelbetonsteinwände mit Wärme-dämmverbundsystem
[b] 1	Innenputz/Spachtelung
[b] 2	Wandbildner, einschalig (z. B. Mauerwerk aus Mauerziegeln, Wände aus Beton bzw. Leichtbeton mit dichten und porigen Zuschlägen, Mauerwerk aus Porenbeton) ohne oder mit integrierter Dämmung (mineralische Dämmstoffe und Hartschäume) oder Mantelbeton oder Mantelbetonstein mit integriertem oder ohne integrierten Dämmstoff
[b] 3	Wärmedämm-Verbundsystem

Als Konstruktion für den Wandbildner lastabtragender Konstruktionen sind verschiedene Mauerwerksarten (wie Ziegel, Kalksandstein oder Porenbeton), Stahlbeton- und Massivholzbauweisen sowie Holz- und Stahlleichtbauweisen üblich. Bei Mauerwerken findet die Fügung innerhalb der Schicht durch Verklebung mit Mauermörteln statt, Stahlbeton-, Holz- und Stahlkonstruktionen werden häufig werkseitig vorgefertigt und anschließend auf der Baustelle montiert. Massivkonstruktionen aus Stahlbeton oder Holz werden hierbei üblicherweise individuell als großformatige Platten inklusive Öffnungen aus einem durchgängigen Material gefertigt, was eine Wiederverwendbarkeit aufgrund der projektspezifischen Anfertigung einschränkt. Raumseitig erfolgt der Ausbau auf dem Wandbildner üblicherweise durch Verputz oder plattenförmige Bekleidungen, die bereits oberflächenfertig sein können oder beispielsweise noch verspachtelt oder verfließt werden.

Der Wärmeschutz kann bereits durch den Wandbildner sichergestellt werden (z.B. hochwärmedämmendes Mauerwerk) oder durch zusätzliche Dämmschichten. Diese werden vorrangig außenseitig angebracht, wobei Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) oder vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF) übliche Ausführungsformen darstellen. WDVS bestehen hierbei aus einem vielschichtigen Systemaufbau mit tendenziell schwer lösbaren Fügungen wie Verklebungen mit Mörteln oder Schäumen und einem abschließenden außenseitigen Verputz mit Armierungsgewebe. Als Dämmmaterial kommen mineralische, synthetische oder natürliche Rohstoffe in Frage, Materialbeispiele hierfür sind Steinwolle-, Polystyrol- und Holzfaserdämmplatten. Wärmedämmverbundsysteme als mehrfache Verbundkonstruktionen gelten als problematisch hinsichtlich einer Kreislauffähigkeit (Hillebrandt et al., 2021), lediglich die Wahl des Dämmstoffs als Hauptbestandteil kann die Umweltauswirkungen in der Herstellung beeinflussen.

Entsprechend den üblicherweise eingesetzten Materialien werden nachfolgend vorrangig Re-Use-fähige Optionen in Holz- und mineralischer Bauweise betrachtet.

Tabelle 8: Optionen für Re-Use-fähige Außenwandkonstruktionen und Beschreibung der Bauteilaufbauten



Nr.	Komponentenbeschreibung (Fortsetzung Tabelle 8)
	Massivholzbauweise
[a] 1	Innenausbau mit Lehmbauplatten
[a] 2	Massivholzwand aus elementierten Holzbausteinen
[a] 3	vorgehängte hinterlüftete Fassade
	Ziegelbauweise
[b] 1	Innenausbau mit Lehmbauplatten
[b] 2	Mauerwerk aus Ziegelsteinen ohne Mörtelfugen
[b] 3	WDVS mit reversiblen Schichtfügungen

Beim Holzbau können Massiv- und Leichtbauweisen, wie der Holztafelbau, unterschieden werden. Wenn hierbei die Fügung der Bauteile nicht durch Nagelplatten mit eingeschränkter Lösbarkeit aufgrund vielfachen Verklammerns oder Vernagelns erfolgt, können die Bauteile untereinander sowie in ihrem Schichtaufbau meist relativ gut gelöst werden (Hillebrandt et al., 2021). Von entscheidenderer Bedeutung für eine Wiederverwendung ist hier die Gestaltung der Fassade und des Innenausbau. Bezüglich des Wandbildners werden dementsprechend nachfolgend Optionen und Alternativen für den Massivholzbau sowie den Leichtbau abseits des Holztafelbaus gezeigt.

Als möglicher Ansatz für die reversible Errichtung einer lastabtragenden Außenwand in Massivholzbauweise kommt die Erstellung aus Massivholz-Bausteinen in Frage ²⁴. Ein am Markt erhältliches System ermöglicht durch das Zusammenfügen kurzer Kanthölzer die Verwendung von häufig als minderwertig angesehenem Kalamitätsholz (Holz als Ergebnis von Sturmbruch, Trockenheit oder Schädlingsbefall) und erreicht dadurch relevante Einsparungen an CO₂-Emissionen und Schnittholz (Böttcher & Hennenberg, 2024). Die Verbindung der Steine erfolgt formschlüssig über Verzahnungen und Buchenholzdübel. Massivholzsysteme sollten aus Gründen der Suffizienz und Sortenreinheit ohne Folien und Leime einen hinreichend winddichten, steifen und dampfdiffusionsbremsenden Aufbau erlauben, sowie im Idealfall raumseitig eine fertige Sichtoberfläche bieten, um auf eine zusätzliche Bekleidung verzichten zu können (Hillebrandt et al., 2021). Eine hinreichende Funktionalität der Bausteine als Dampfbremse bei konditionierten Räumen ist nicht gegeben, wodurch zusätzliche Maßnahmen zu treffen sind. Sollen die Steine raumseitig sichtbar bleiben, muss außenseitig eine dampfbremsende Schicht hergestellt werden, zum Beispiel mit getackerten Bahnen aus Hanf- oder Leinenvlies und Lehmkleister. Undichtigkeiten in der luftdichten Schicht können sich durch das Quellen des Lehms infolge eines Tauwasserausfalls von selbst verschließen, zudem kommen keine synthetischen Polymere und Klebeverbindungen zum Einsatz. Ist keine Sichtbarkeit der Holzbausteine gewünscht, kommen raumseitige Vorsatzschalen in Frage, die weiters zur Dämmung oder zur Aufnahme gebäudetechnischer Installationen dienen können. Auch wenn tendenziell nicht vollständig zerstörungsfrei rückbaubar, bietet sich für Putzoberflächen wie bei Innenwänden ein Ausbau mit kreislauffähigen Lehmbauplatten und Lehmputz als dampfbremsende Schicht an.

Eine zusätzliche außenseitige Dämmebene kann als vorgehängte hinterlüftete Fassade mit einer Dämmung aus nachwachsenden Rohstoffen zwischen Holzständern, einer geschraubten MDF-Platte als wind- und schlagregendichte Ebene und einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade (Hillebrandt et al., 2021) ausgeführt werden. Bei der frei wählbaren Bekleidung sollte ein Fokus auf Dauerhaftigkeit, Tauschbarkeit und niedrige Umweltauswirkungen im Herstellungsprozess gelegt werden. Aus optischen Beweggründen kann eine unsichtbare reversible Montage von vorgehängten Fassadenbekleidungen mittels Hinterschnittankern erfolgen (Schneider et al., 2010).

Im Bereich des Holzleichtbaus bietet der Markt Hohlbausteinsysteme mit Schwalbenschwanzverbindungen ²⁵ oder als Stecksystem ²⁶ zur formschlüssigen Montage ohne Verschraubungen oder Verklebungen. Der Wärme- oder Schallschutz kann über eine reversible Kerndämmung der Hohlsteine mit Schütt- oder Einblasdämmstoffen optimiert werden. Die Hohlsteine werden unter anderem damit beworben, dass die Montage auch für Laien erlernbar sei, was sich vor Hintergründen wie dem Fachkräftemangel und Baupreissteigerungen als zusätzliche Beweggründe für vergleichbare Bauweisen erweisen könnte.

Mineralische Bauweisen wie der Ziegelbau stellen aufgrund der stoffschlüssigen Fügung mit Mörtelfugen, dem üblichen Verputz sowie der Instabilität der Ziegel beim Rückbau eine besondere Herausforderung für die Wiederverwendung dar, weswegen hier in der Literatur vielmehr ein Recycling in Betracht gezogen wird (Hillebrandt et al., 2021). An dieser Stelle sollen jedoch erprobte Ansätze für mögliche Re-Use-fähige Ziegelbauweisen und ergänzende Wärmedämmmaßnahmen beschrieben werden. Soll die Form der Ziegel nicht wesentlich verändert werden, liegt ein Ansatz für wiederverwendbare Konstruktionen im Verzicht auf schwer lösbare Mörtelfugen sowie auf einen klassischen Verputz und Anstriche (BauNetz, 2022). Im Rahmen der industriellen Forschung wurde ein Mauerwerkssystem entwickelt, bei welchem die höhenausgleichenden und verbindenden Funktionen des Mörtels durch punktuellen Kleberauftrag, der dadurch rein formschlüssig wirkt, und eine Trennlage ersetzt werden ²⁷. Als raumseitige

Bekleidung wird im System ein Lehmputz direkt auf den Ziegelsteinen aufgetragen, bei welchem die Reversibilität aufgrund einer Abwaschbarkeit, z.B. mittels Hochdruckreiniger, angenommen wird. Genauso wäre aber ein Ausbau mit Lehmbauplatten auf Unterkonstruktion oder punktueller Befestigung mittels Lehmörtel und ein Verputz mit Lehm denkbar.

In diesem System ist die Wärmeleitfähigkeit der Ziegel ausreichend für gängige Wärmeschutzanforderungen, weshalb keine weiteren Dämmschichten berücksichtigt sind. Diese werden jedoch notwendig, wenn keine Erfüllung der wärmeschutztechnischen Anforderungen durch den Wandbildner gewünscht ist, beispielsweise um schwerere Ziegel mit höherem Schalldämmwert zu verwenden. Hierfür ist mit einem neuartigen, reversiblen Dämmsystem mit Klettverschlussverbindungen ²⁸ die Berücksichtigung einer weiteren industriellen Entwicklung denkbar. Dieses System verbindet Ansätze des WDVS und der VHF. Hierbei wird eine Putzträgerplatte auf punktuellen Haltern reversibel befestigt und anschließend mit einem Kalkputz verputzt. Im entwickelten System handelt es sich beim Putzträger um eine Mineralwolleplatte. Durch Ersatz mit einer Kalziumsilikatplatte könnte eine Monomaterialität der Bekleidungsschicht erreicht werden. Weitere Entwicklungen im Bereich von WDVS behandeln reversible Dämmstoffanker ²⁹ für die rein mechanische Montage von WDVS-Dämmplatten ohne weitere Verklebung. Ungelöst ist hierbei allerdings die Reversibilität der abschließenden Bekleidung sowie die Eignung für Dämmmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen.

3.4. Bauelement

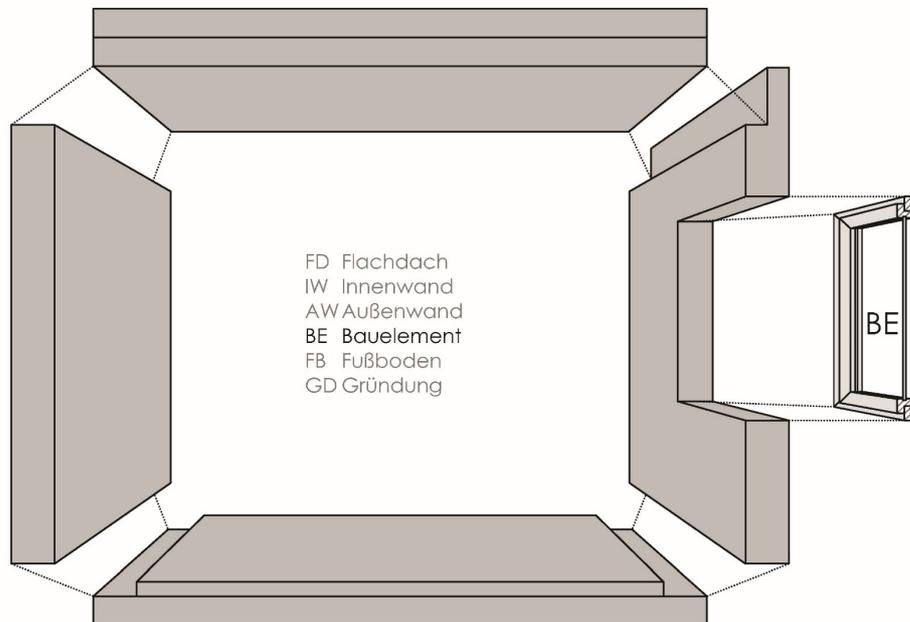
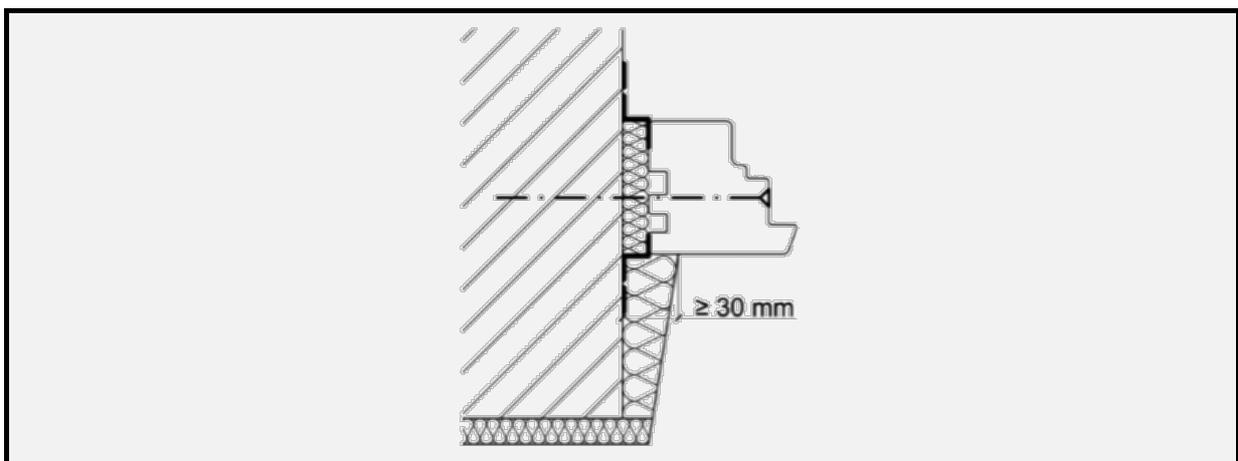


Abbildung 22: Darstellung eines Bauelements im Gefüge der Bauteile

Bei vorgefertigten Bauelementen, wie Fenster, Außentüren und Pfosten-Riegel-Fassaden, erfolgt der übliche Einbau als komplettes Element. Gängige Materialien sind Holz, Aluminium, Kunststoff und Verbundkonstruktionen aus den vorgenannten. Neben den Hauptmaterialien kommen üblicherweise Kunststoffe und Metalle in Dichtungen und Beschlägen zum Einsatz.

Tabelle 9: Annahmen für beispielhafte übliche Bauelementeinbindungen und Beschreibung der Bauteilfügung



Nr.	Komponentenbeschreibung
	ÖNORM B 5320:2020-10 – 4.7, Überdämmung an der äußeren Leibung

Da Bauelemente eine selbständige funktionale Einheit bilden, kommen dem Einbau und der Ausführung der Anschlussfugen zu den umgebenden Bauteilen besondere Bedeutung zu. Hierbei sind baukonstruktive und bauphysikalische Anforderungen wie Wind-, Luft- und Schlagregendichtheit, Lastabtragung, Wärme-, Schall- und Feuchteschutz, temperaturbedingte Materialdehnungen sowie Bewegungen umgebender Bauteile zu berücksichtigen. Diesen Anforderungen wird in der Regel mit Anstrichen, Folien, Dichtstoffen und Dichtbändern oder durch Einputzen mit Putzmörteln begegnet. Das Schließen der Fugen zwischen Bauelement und Anschlussbauteil erfolgt zumeist mit stark anhaftenden Polyurethanschäumen (BauNetz). Die üblichen Arten der Oberflächenbehandlung und Anschlussausbildung schränken einen rückstands- und zerstörungsfreien Ausbau sowie die Sortenreinheit erheblich ein.

Als nachwachsender Rohstoff ist der Einsatz von witterungsbeständigem, unlackiertem Holz wie Lärche oder Eiche auf der Außenseite ³⁰ vorteilhaft hinsichtlich einer Weiterverwendung oder -verwertung. Witterungsbedingte optische Alterungserscheinungen wie das Vergrauen müssen hierbei einkalkuliert werden, ihnen kann aber beispielsweise durch ausreichende Dachüberstände entgegengewirkt werden. Die Befestigung an den Anschlussbauteilen sollte rein mechanisch mit Metallwinkeln erfolgen, die luft- und winddichte Schließung der Bauanschlussfugen mittels Stopfwole oder sogenannten Kalfaterbändern aus nachwachsenden Rohstoffen (Hanf ³¹, Schafwolle) und einer Schicht Lehmkleister.

Bei der Integration von funktionalen oder gestalterischen Objekten wie Fensterbänken und Sonnenschutzvorrichtungen sind möglichst reversible Lösungen wie aufmontierte Schiebe- oder Faltelemente oder Vorsatzrollläden gegenüber Lösungen wie eingemauerten Rollladenkasten vorzuziehen.

3.5. Fußboden

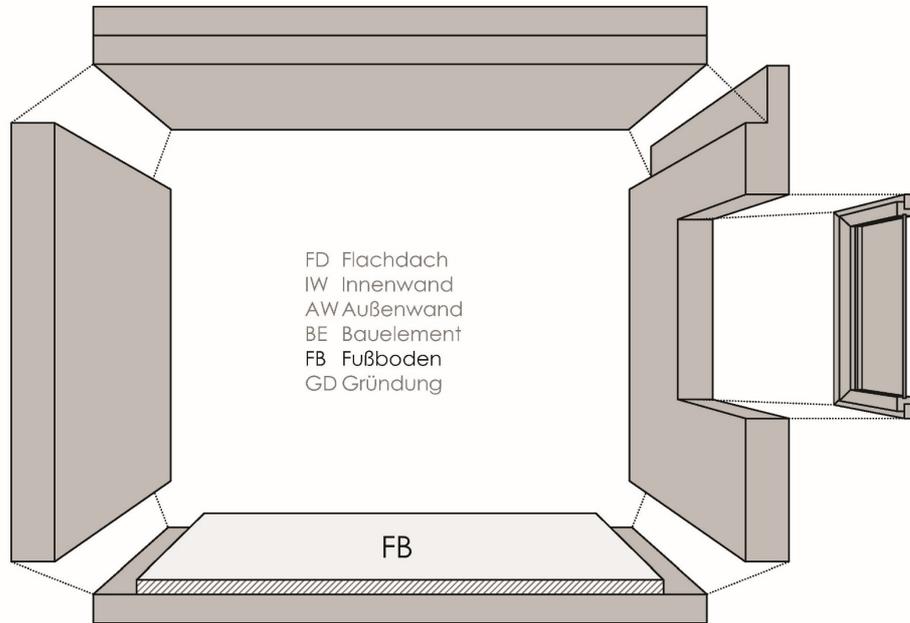
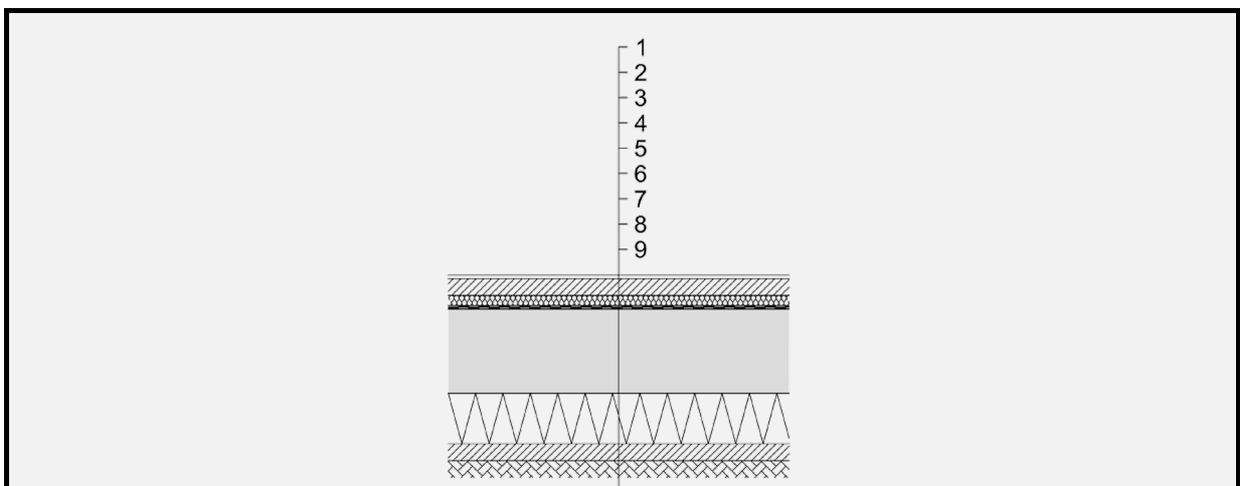


Abbildung 23: Darstellung eines Fußbodens im Gefüge der Bauteile

An Fußbodenaufbauten auf Deckenbildnern werden vielfältige Anforderungen gestellt, wie Lastverteilung, Trittschalldämmung, Ebenheit und gegebenenfalls auch die Integration einer Fußbodenheizung. Hieraus generieren sich üblicherweise vielschichtige Bauteilaufbauten, mit häufigem Einsatz von Verbundkonstruktionen.

Tabelle 10: Annahmen für beispielhafte übliche Fußbodenkonstruktionen und Beschreibung des Bauteilaufbaus

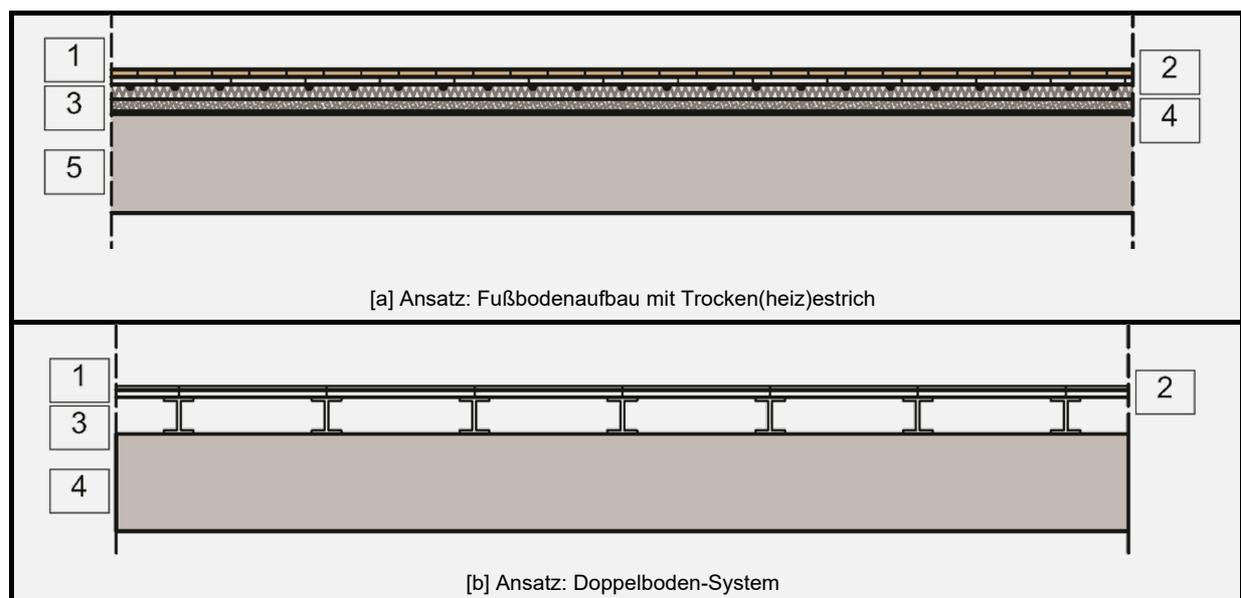


Nr.	Komponentenbeschreibung (Fortsetzung Tabelle 10)
	ÖNORM B 8110-2:2020-01 – 8.9.1, Boden [...] gegen Erdreich mit außenliegendem Dämmstoff
1	Belag
2	Estrich, Heizestrich
3	Trennschichte ($s_d > 100$ m, bzw. bei Fußbodenheizung $s_d > 40$ m)
4	Trittschalldämmung
5	Abdichtung
6	Geschoßdecke, siehe Kapitel 3.1 und 3.6

Hydraulisch abbindende, zementöse oder gipshaltige Ausgleichsmassen sind häufig mit Kunststoffzschlägen versetzt und gehen eine stoffschlüssige Verbindung mit dem Untergrund ein. Kleber und Folien kommen als dampfbremsende Ebene, Abdichtung oder Trennschicht zum Einsatz, synthetische Dämmstoffe als Wärme- und Trittschalldämmung. Die Lastverteilung der Nutzlasten übernimmt zumeist ein Zement- oder Anhydritestrich, der nach Erhärtung eine durchgängige Ebene bildet und somit keine Wiederverwendung erlaubt. Dies wäre aber häufig bereits durch die abschließende vollflächige Verklebung eines Bodenbelags, z.B. Parkett, Linoleum oder Teppichboden, nicht mehr möglich. Weiters werden häufig die Rohre einer Fußbodenheizung vom Estrich umschlossen und stellen einen Störstoff für den sortenreinen Rückbau dar.

Anstelle von großflächigen Zementestrichen mit langen Trocknungszeiten können Estrichelemente in Trockenbauweise, z.B. als Gips- oder Holzfaserverplatten³², eingesetzt werden. Hierbei ist ein Verzicht auf Klebstoffe durch Nut- und Feder- oder Schraubverbindungen anzustreben. Als wiederverwendbare Höhenausgleichsschicht kann eine Trockenschüttung eingebracht werden, z.B. mit aus Formstabilitätsgründen mit Zement oder Lehm ummantelten Holzspänen³³. Ein anderer Ansatz besteht in der Montage eines Doppelbodensystems, wie es bereits häufig bei Büronutzungen vorzufinden ist (Tabelle 11).

Tabelle 11: Optionen für Re-Use-fähige Fußbodenkonstruktionen und Beschreibung des Bauteilaufbaus



Nr.	Komponentenbeschreibung (Fortsetzung Tabelle 11)
	Fußbodenaufbau mit Trockenheizestrich
[a] 1	schwimmend verlegtes oder auf Leisten verschraubtes Parkett
[a] 2	Trockenestrich-System, z.B. Gips- oder Holzfaserplatten, gegebenenfalls zwischen Holzleisten
[a] 3	FBH-System im Trockenbauverfahren mit Trägerelement
[a] 4	Trocken-Ausgleichsschüttung, Rieselschutz auf Zellulosebasis
[a] 5	Geschoßdecke, siehe Kapitel 3.1 und 3.6
	Doppelboden-System
[b] 1	lose verlegte Teppichfliese
[b] 2	Doppelbodenplatte Holzwerkstoff
[b] 3	Doppelbodenstütze
[b] 4	Geschoßdecke, siehe Kapitel 3.1 und 3.6

Soll eine Fußbodenheizung zum Einsatz kommen, können die Heizungsrohre beispielsweise in genutete Holzweichfaserplatten mit Aluminium-Wärmeleitblechen als Trägerelemente eingebracht werden. Werden Holzleisten zwischen den HWF-Platten gelegt, kann daran ein Dielenboden reversibel verschraubt werden. Als diffusionshemmende Schicht kann unter der Dämmung eine PE-Folie, durch ausreichende Überlappung ohne Verklebung, verlegt werden.

Auch eine Montage von FBH-Rohren mit materialsparenden Zahnschienen und nichttragendem Lehmeestrich zwischen Lagerhölzern ist möglich, wobei der Lehm als Wärmeverteilschicht fungiert ³⁴. Weitere Anwendungsmöglichkeiten für Lehmbaumstoffe, auch als Sichtoberfläche, sind Lehm-Terrazzo- und Stampflehm Böden sowie Lehm-Kasein-Spachtelungen als finaler Oberbelag ³⁵.

Doppelbodensysteme ermöglichen durch auf Stützen aufgeständerte, untereinander nicht verbundene Platten eine Revisionsmöglichkeit für im Hohlraum befindliche gebäudetechnische Installationen (Vollenschaar, 2011). Die Reversibilität ist somit grundlegende Eigenschaft der Systeme. Übliche Materialien sind Gipsfaserplatten (Graubner et al., 2014), als nachwachsende Rohstoffe kommen auch Holzwerkstoffplatten in Frage. Weiters können Flächenheiz- und -kühlsysteme in den Platten integriert werden, wodurch zusätzliche Installationen wie Heizkörper substituiert werden ³⁶.

3.6. Gründung, unterste Geschoßdecke

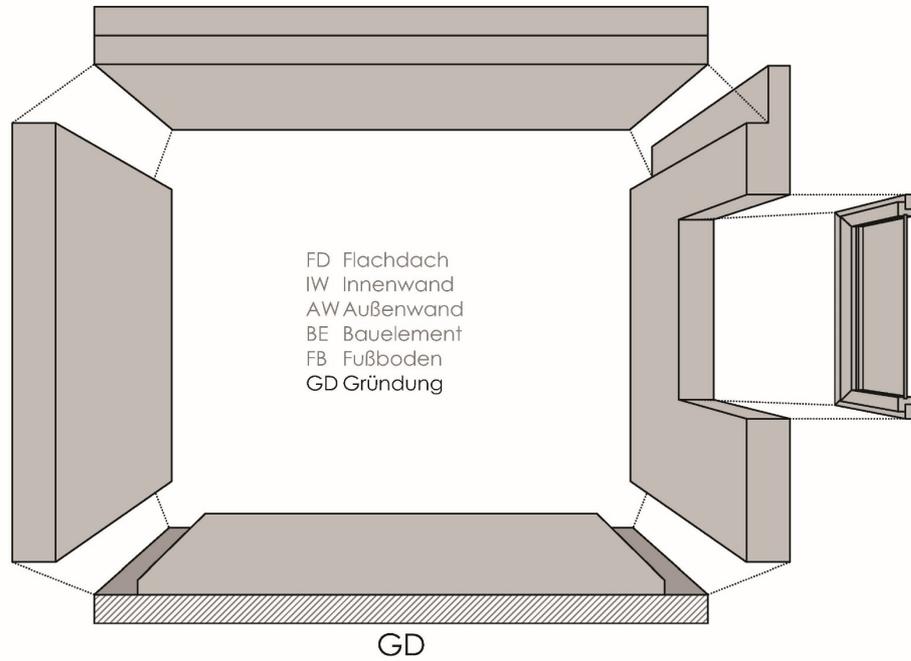
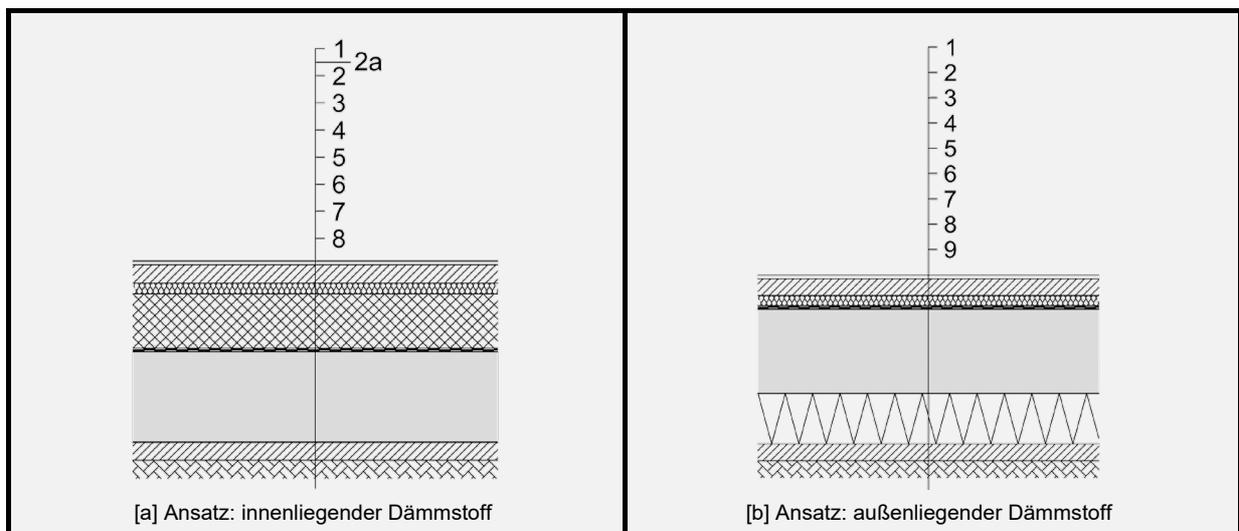


Abbildung 24: Darstellung einer Gründung bzw. untersten Geschoßdecke im Gefüge der Bauteile

Die Gründung eines Gebäudes dient der Ableitung der einwirkenden Lasten aus einem Gebäude in den Baugrund. Die Komplexität und der Umfang von Bauteilaufbauten hängen maßgeblich von der Höhenlage der untersten Geschoßdecke sowie der Art der Gründung ab.

Tabelle 12: Annahmen für beispielhafte übliche Gründungskonstruktionen und Beschreibung des Bauteilaufbaus



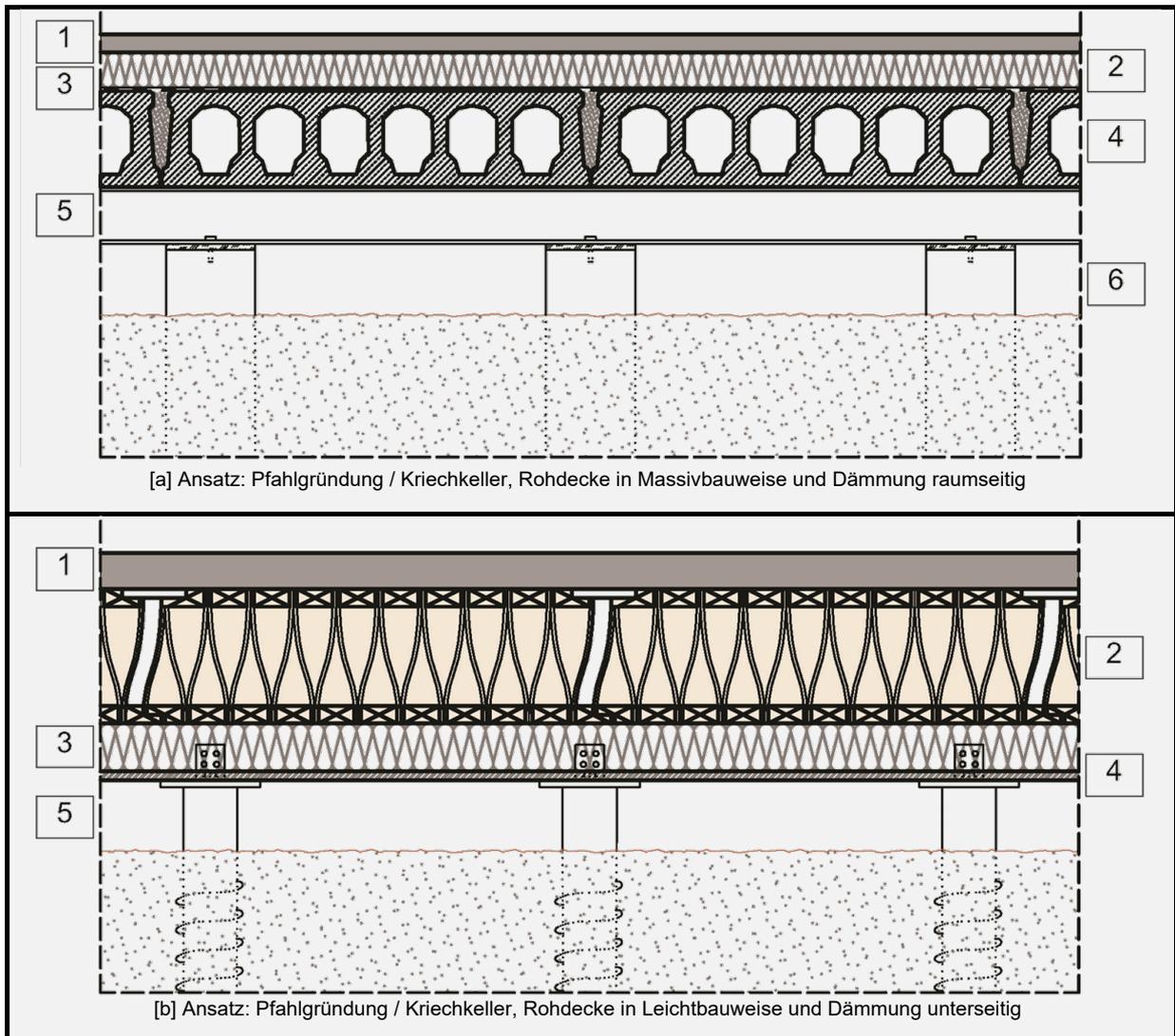
Nr.	Komponentenbeschreibung (Fortsetzung Tabelle 12)
	ÖNORM B 8110-2:2020-01 – 8.9.2, Boden [...] gegen Erdreich mit innenliegendem Dämmstoff
[a] 1-3	Fußboden, siehe Kapitel 3.5
[a] 4	Dämmstoff
[a] 5	Abdichtung
[a] 6	Bodenplatte
[a] 7	Sauberkeitsschichte
[a] 8	Erdreich
	ÖNORM B 8110-2:2020-01 – 8.9.1, Boden [...] gegen Erdreich mit außenliegendem Dämmstoff
[b] 1-4	Fußboden, siehe Kapitel 3.5
[b] 5	Abdichtung
[b] 6	Bodenplatte bei nichtdrückendem Wasser
[b] 7	belastbarer Dämmstoff
[b] 8	Sauberkeitsschichte
[b] 9	Erdreich

Die Ausführung erdberührter Bauteile oder von Sockeln erfordert Abdichtungsmaßnahmen unter anderem gegen Bodenfeuchte, drückendes oder Spritzwasser, sowohl in der Fläche als auch an Bauteilanschlüssen und Durchdringungen. Zur Anwendung kommen je nach Anwendungsfall hierfür typischerweise Bitumendickbeschichtungen, Kunststoff- oder EPDM-Bahnen sowie mineralische Dichtschlämmen mit entsprechenden Verklebungen. Weiters sind statisch die Einwirkungen des Erddrucks zu berücksichtigen. Kellerbauteile und Bodenplatten werden aus den vorgenannten Gründen deswegen vorrangig in Stahlbetonbauweise hergestellt, teilweise auch als wasserundurchlässige sogenannte Weiße Wanne ohne zusätzliche Abdichtungen. Werden die Bauteile außenseitig gedämmt, müssen sogenannte Perimeterdämmstoffe eingesetzt werden, die hinreichend widerstandsfähig gegenüber den chemischen und mechanischen Einwirkungen aus dem Baugrund sind. Hierfür beschränkt sich die Materialauswahl auf geschlossenporige Polystyrolschäume (XPS) und Schaumglasplatten oder -schotter. Beide Materialien weisen Hindernisse für Re-Use-fähige und nachhaltige Konstruktionen auf: Die Herstellung von Schaumglas gilt als sehr energieintensiv, XPS basiert dem Ausgangsstoff Erdöl. Bei beiden Varianten verhindert die häufige bituminöse Verklebung eine Wiederverwendung sowie Weiterverwertung. Bei XPS-Dämmstoffen findet bislang fast ausschließlich eine thermische Verwertung statt, ein umfangreiches Recycling ist aufgrund der schwierigen Rückgewinnung, des hohen Aufwands und der niedrigen Herstellungskosten gegenwärtig nicht absehbar (Hillebrandt et al., 2021).

Erdberührte Bauteile gehen dementsprechend mit vielfältigen Anforderungen einher, die erhebliche Hürden für Re-Use-fähige Konstruktionen darstellen und Möglichkeiten hierfür stark begrenzen. Vor diesem Hintergrund wird für temporäre Gebäude regelmäßig ein Aufständern der untersten Geschoßdecke empfohlen, wodurch die angesprochenen Re-Use-Erschwernisse an Relevanz verlieren (DERIX GmbH, 2022; Graf et al., 2022). Entsprechend dem Build Re-Use-Projektfokus auf Gebäude mit kurzen Nutzungszyklen werden hier somit aufgeständerte Lösungen betrachtet, welche auch als Kriechkeller bezeichnet werden. Re-Use- und Recycling-fähige Optionen für Kellerbauteile, beispielsweise mit sogenannten Glasschaumkissen³⁷, werden unter anderem bei Hillebrandt et al. (2021) und Hebel und Wappner (2023) gezeigt.

Die Optionen für Re-Use-fähige Fußbodenaufbauten unterscheiden sich bei untersten Geschoßdecken im grundlegenden Aufbau nicht von denen der restlichen Geschoße (siehe 3.5 Fußboden). Sie sind deshalb nicht Gegenstand der Betrachtung für die Re-Use-fähige Gründung von Gebäuden (Tabelle 13).

Tabelle 13: Optionen für Re-Use-fähige Gründungskonstruktionen und Beschreibung des Bauteilaufbaus



Nr.	Komponentenbeschreibung (Fortsetzung Tabelle 13)
	Pfahlgründung / Kriechkeller, Rohdecke in Massivbauweise, Dämmung raumseitig
[a] 1	Fußbodenaufbau, siehe 3.5
[a] 2	Wärmedämmung im Fußbodenaufbau
[a] 3	Unterspannbahn
[a] 4	Spannbeton-Deckenplatte, Fugen mit Schüttung verfüllt
[a] 5	Stahlträger oder vergleichbare Unterkonstruktion
[a] 6	Punkt- oder Streifenfundamente Stahlbeton oder Stahlträger als Punktfundamente
	Pfahlgründung / Kriechkeller, Rohdecke in Massivbauweise, Dämmung außenseitig
[b] 1	Fußbodenaufbau, siehe 3.5, dampfdiffusionsdichte Ebene
[b] 2	Kielstegträger, Installationsschicht
[b] 3	Holzbalken oder Stegträger, Gefache z.B. Zellulose-Einblasdämmung
[b] 4	diffusionsoffene Unterdeckplatte als verlorene Schalung
[b] 5	Schraubfundamente

Für das Aufständern der Bodenplatten bieten sich, sofern keine Einschränkungen durch den statischen Nachweis vorliegen, sowohl Punkt- oder Streifenfundamente aus Stahlbeton als auch Punktfundamente aus Stahlträgern an. Als besonders reversibel gelten auch Schraubfundamente ³⁸, da die Einbringung durch Schrauben in umgekehrter Weise zum Einbau rückgängig gemacht werden kann. Hierdurch besteht nicht nur die Möglichkeit zur Wiederverwendung der Fundamente, sondern auch des Grundstücks, da für die Nutzungsphase des Gebäudes auf invasive Eingriffe wie Bodentausch und -verdichtung verzichtet werden kann. Das Grundstück verbleibt deutlich näher am Ausgangszustand als bei üblichen Gründungsmethoden.

Eine darauf aufgebrachte Unterkonstruktion, z.B. aus Stahl- oder Holzträgern, dient dem Höhenausgleich sowie der Aufnahme einer Geschoßdeckenkonstruktion (Tabelle 13). Optionen für Re-Use-fähigen Deckenkonstruktionen sind in „3.1 Flachdach, oberste Geschoßdecke, Träger“ dargestellt. Für den Holzbau wird hier mit sogenannten Kielstegträgern eine zusätzliche materialeffiziente Variante dargestellt, deren Hohlkammern als Installationsebene für Elektroleitungen dienen können ³⁹.

Wie auch bei der üblichen Konstruktion von Bodenplatten gegen Erdreich (Tabelle 12) können aufgeständerte unterste Geschoßdecken sowohl mit innenliegender als auch außenliegender Dämmschicht ausgeführt werden. Im Falle einer Innendämmung ist ein besonderes Augenmerk auf einen möglichen Tauwasseranfall zu legen. Hierbei wird die für den angestrebten Wärmeschutzstandard erforderliche Dämmschicht als druckfeste Dämmplatten oder als weicher Dämmstoff zwischen Lagerhölzern zusätzlich im Fußbodenaufbau eingebracht. Für eine außenliegende Dämmung bietet sich die Unterkonstruktion zwischen Fundament und Deckenplatten an, falls deren Wärmebrückenwirkung minimiert wird. Dies ist zum Beispiel durch den Einsatz von Stegträgern aus Holz anstelle von Stahlträgern möglich. Als unterer Abschluss kann eine diffusionsoffene Platte eingebracht werden, die als verlorene Schalung für die Dämmung dient. Somit ist keine mechanische Befestigung der Dämmung erforderlich, was der begrenzten Höhe der Aufständern entgegenkommt, und es kann mit aufgelegten Dämmmatten oder Einblasdämmstoffen gearbeitet werden, die bei einem Rückbau wieder entnommen oder abgesaugt werden können.

4. Optionen für die Wiederverwendung von Bauteilen aus dem Bestand

Neben dem Ansatz, Gebäude so zu konstruieren, dass ihre Bestandteile im Falle des Rückbaus re-use-fähig sind, können bei deren Errichtung auch Bauteile aus Bestandsgebäuden wiederverwendet werden. Dieses Kapitel basiert auf einem Good Practice Katalog aus den Arbeitspaketen „Technische Anforderungen, Potentiale und Barrieren“ (3) und „Bewertungssysteme“ (5) (siehe Abbildung 1) und bildet eine Übersicht über bereits praktizierte Ansätze. Handlungsempfehlungen für die Gewinnung wiederverwendbarer Bauteile aus bestehenden Gebäuden werden weiters in den Veröffentlichungen des Arbeitspakets „Technische Anforderungen, Potentiale und Barrieren“ (3) dargestellt.

Zur Unterscheidung wird entsprechend Abbildung 6 zwischen dem Quell-/Spendergebäude und dem Zielgebäude differenziert. Als Spendergebäude dienen Rückbaustellen (kompletter oder Teilrückbau), auf denen durch Abbruch- und Entsorgungsunternehmen wiederverwendbare Bauteile gewonnen werden. Für den Wiedereinbau kommt eine direkte Überführung an ein Zielgebäude oder an eine Bauteilbörse als Zwischenstation in Frage. Beim geplanten Einsatz wiederverwendeter Komponenten ist deswegen eine aufwendigere Organisation und Koordination erforderlich als beim Bau mit Neuprodukten.

Da eine Begutachtung der gewünschten Bauteile vor Integration in die Planung angeraten wird, ist eine regionale Beschaffung von Vorteil. Hierdurch können die Maßhaltigkeit der Bauteile und gestalterische, konstruktive und technische Kriterien bewertet werden. Da bei Re-Use-Produkten noch Klärungsbedarf zu Haftungs- und Gewährleistungsfragen besteht, erleichtern geringe baurechtliche und technische Anforderungen, zum Beispiel hinsichtlich des Brandschutzes oder der Statik, die Möglichkeit eines Wiedereinbaus. Um eine Planungssicherheit für die Bauherrschaft zu gewährleisten, ist eine frühzeitige Sicherung relevanter Re-Use-Bauteile erforderlich – ansonsten sollte die Planung so gestaltet werden, dass sie im Zweifel auch ohne deren Einsatz umsetzbar bleibt. Generell unterstützt eine erhöhte Flexibilität und Kompromissbereitschaft in Bezug auf das Angebot, zum Beispiel hinsichtlich der Abmessungen einer Fassadenbekleidung, die Realisierung. Hierfür helfen eine konkrete Festlegung und Beschreibung der unabdingbaren Eigenschaften, beziehungsweise eine Differenzierung in Muss- und Kann-Kriterien.

Bauteile aus Bestandsgebäuden, die in realisierten Projekten in selber Funktion wiederverwendet wurden, sind beispielsweise Trennwandsysteme und Innentüren (Dechantsreiter et al., 2016) sowie Fenster (Stricker et al., 2021). Dass es sich hierbei um Bauelemente, beziehungsweise -systeme, handelt, erleichtert die Wiederverwendung. Genügen bestimmte Eigenschaften nicht mehr den Anforderungen, ist ein Bauteil-Re-Use in geeigneter Funktion denkbar. Ein Beispiel hierfür ist der Wiedereinsatz eines Außenfensters im Innenbereich ohne Wärmeschutzanforderungen. Gegebenenfalls sind Aufbereitungsmaßnahmen zu ergreifen, wie die Erneuerung von Dichtungen und Beschlägen. Dies wird vor allem bei durch die Nutzung stark beanspruchten Bauteilen, wie Fußböden, erforderlich ⁴⁰.

Anhänge

Glossar (verfasst: IBO)

Abfallhierarchie

Definition nach EU-Abfallrahmenrichtlinie (offiziell: Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien) und Abfallwirtschaftsgesetz (offiziell: Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft):

Die fünfstufige Abfallhierarchie nach der europäischen Abfallrahmenrichtlinie und dem österreichischen Abfallwirtschaftsgesetz beinhaltet die folgenden Stufen:

1. **Abfallvermeidung** (*engl.: prevention*): Maßnahmen, die ergriffen werden, bevor ein Produkt zu Abfall geworden ist, und die Folgendes verringern:
 - a) die Abfallmenge, auch durch die Wiederverwendung von Produkten oder die Verlängerung ihrer Lebensdauer;
 - b) die nachteiligen Auswirkungen des nachfolgend anfallenden Abfalls auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit oder
 - c) den Gehalt an gefährlichen Stoffen in Materialien und Produkten.
2. **Vorbereitung zur Wiederverwendung** (*engl.: preparing for re-use*): Jedes Verwertungsverfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur, bei welchem Erzeugnisse oder Bestandteile von Erzeugnissen, die zu Abfällen geworden sind, so vorbereitet werden, dass sie ohne weitere Vorbehandlung wiederverwendet werden können.
3. **Recycling** (*engl.: recycling*): Jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfallmaterialien zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, aber nicht die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind.
4. **Sonstige Verwertung, zB energetische Verwertung** (*engl.: other recovery*): Jedes Verwertungsverfahren, das nicht unter die Punkte 2 und 3 fällt. Damit ist vor allem die energetische Verwertung gemeint.
5. **Beseitigung** (*engl.: disposal*): Jedes Verfahren, das keine Verwertung ist, auch wenn das Verfahren zur Nebenfolge hat, dass Stoffe oder Energie zurückgewonnen werden.

Anmerkung: Re-Use als Maßnahme ist nicht direkt in der Abfallhierarchie zu finden. Abhängig von den tatsächlichen Rahmenbedingungen (v.a. rechtlich) ist Re-Use entweder in der Stufe Abfallvermeidung oder in der Stufe Vorbereitung zur Wiederverwendung zu sehen. Der relevante Unterschied ist, ob es sich bei dem Erzeugnis (rechtlich gesehen) vor der Wiederverwendung um Abfall handelt oder nicht.

Bauwerk

Definition nach OIB-330-003/23, 2023:

Eine Anlage, die mit dem Boden in Verbindung steht und zu deren fachgerechter Herstellung bautechnische Kenntnisse erforderlich sind.

Beispiel: Gebäude, Einfriedungen, Stützmauern zur Geländesicherung

Kreislauffähigkeit

Definition im Sinne dieser Veröffentlichung:

Die Kreislauffähigkeit von Bauprodukten, -teilen, -elementen und -systemen beschreibt, inwieweit diese geeignet sind, die Ziele der Kreislaufwirtschaft zu unterstützen, also so lange wie möglich geteilt, geleast, wiederverwendet, repariert, aufgearbeitet und recycelt werden.

Anmerkung: Die Kreislauffähigkeit von Gebäuden kann dann in Bezug auf die Kreislauffähigkeit der in ihnen verwendeten Bauprodukte, -teile, -elemente und -systeme beurteilt werden.

Im Zusammenhang mit der Abfallhierarchie sind wie beim Begriff Kreislaufwirtschaft die ersten drei Stufen umfasst.

Kreislaufwirtschaft

Definition nach Circular economy action plan (CEAP), 2020:

Die Kreislaufwirtschaft steht im Gegensatz zum traditionellen, linearen Wirtschaftsmodell ("Wegwerfwirtschaft"). Sie ist ein Modell der Produktion und des Verbrauchs, bei dem bestehende Materialien und Produkte so lange wie möglich geteilt, geleast, wiederverwendet, repariert, aufgearbeitet und recycelt werden. Auf diese Weise wird der Lebenszyklus der Produkte verlängert. In der Praxis bedeutet dies, dass Abfälle auf ein Minimum reduziert werden. Nachdem ein Produkt das Ende seiner Lebensdauer erreicht hat, verbleiben die Ressourcen und Materialien so weit wie möglich in der Wirtschaft. Sie werden also immer wieder produktiv weiterverwendet, um weiterhin Wertschöpfung zu generieren (Europäisches Parlament, 2023).

Im Zusammenhang mit der Abfallhierarchie sind somit die ersten drei Stufen (Abfallvermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling) umfasst.

Recyclingfähigkeit

Definition im Sinne dieser Veröffentlichung:

Die Recyclingfähigkeit von Baustoffen gibt an, inwieweit die Materialien, aus denen ein Bauprodukt besteht, nach der Nutzung recycelt werden können. Hierbei kann zwischen theoretischer, technischer und realer Recyclingfähigkeit unterschieden werden (vgl. Pomberger, 2021).

Re-Use (Synonym: Wiederverwendung)

Definition nach europäischer Abfallrahmenrichtlinie und Abfallwirtschaftsgesetz:

Wiederverwendung beinhaltet jedes Verfahren, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, wieder für denselben Zweck verwendet werden, für den sie ursprünglich eingesetzt und bestimmt waren.

Definition im Sinne dieser Veröffentlichung:

Re-Use von Bauprodukten, -teilen, -elementen und -systemen beinhaltet jedes Verfahren, bei dem diese Erzeugnisse oder deren Bestandteile wieder in einem Bauwerk verwendet werden. Dabei ist unerheblich, ob sie weiterhin die Definition eines Bauprodukts erfüllen.

In Abgrenzung zum Recycling stehen Produkte oder Produktteile, nicht Materialien, im Fokus der Betrachtung.

Beispiele:

- Einsatz von demontierten Fensterelementen in einem weiteren Bauvorhaben
- Einsatz von vom Mörtel gereinigten und zugeschnittenen Vollziegeln für Wiedereinsatz in nicht-tragendem Mauerwerk

Re-Use-Fähigkeit

Definition im Sinne dieser Veröffentlichung:

Der Begriff Re-Use-Fähigkeit wird als Eignung von Bauprodukten, -teilen, -elementen und -systemen zum Re-Use (Teilaspekt der Kreislauffähigkeit) definiert. Dabei kann analog zur Recyclingfähigkeit zwischen theoretischer, technischer und realer Re-Use-Fähigkeit unterschieden werden.

Anmerkung: Die Re-Use-Fähigkeit von Gebäuden kann dann in Bezug auf die Re-Use-Fähigkeit der in ihnen verwendeten Bauprodukte, -teile, -elemente und -systeme beurteilt werden.

Rückbau

Definition nach ÖNORM B 3151:2022-01, Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode:

Abbruch eines Bauwerks im Allgemeinen in umgekehrter Reihenfolge der Errichtung eines Bauwerks, mit dem Ziel, dass die beim Abbruch anfallenden Materialien weitgehend einer Wiederverwendung, Vorbereitung zur Wiederverwendung von Bauteilen oder einem Recycling zugeführt werden können unter Trennung der anfallenden Materialien und unter Berücksichtigung der Schadstoffgehalte, so dass eine Vermischung und Verunreinigung der anfallenden Materialien minimiert und ein Entweichen von Schadstoffen verhindert wird.

Schadstoff

Definition nach ÖNORM B 3151:2022-01:

Stoff, der entweder selbst oder im Zusammenwirken mit anderen Stoffen oder durch seine Abbauprodukte oder Emissionen Mensch oder Umwelt schädigen oder beeinträchtigen oder zu einer Wertminderung bzw. Nutzungseinschränkung von Bauwerken führen kann.

Störstoff

Definition nach ÖNORM B 3151:2022-01:

Material, das die vorgesehene Behandlung, einen Behandlungsschritt, die Wiederverwendung oder Verwertung verhindert oder erschwert.

Verwertung

Definition nach europäischer Abfallrahmenrichtlinie und Abfallwirtschaftsgesetz:

Verwertung beinhaltet jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis Abfälle einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie andere Materialien ersetzen, die ansonsten zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen.

→ Material-Fokus; Bsp.: Recycling, sonstige Verwertung (energetische Verwertung, Hinterfüllung)

Literaturverzeichnis

- Allgemeine Bau-Zeitung. (1948, 7. April). *Die Enttrümmerung der deutschen Städte. Neue Wege der Schuttbeseitigung - Interessante Neukonstruktionen*, Österreichische Nationalbibliothek, Zeitschriftensaal. <https://anno.onb.ac.at/cgi-content/anno?apm=0&aid=alg&datum=19480407&seite=4>
- Barth, K. (1922). *Aus dem Siedlungswesen*. Kommissionsverlag Friedrich Pouch.
- BauNetz. Außenwände. *BauNetz*. <https://www.baunetzwissen.de/fassade/fachwissen/fassadenarten/aussenwaende-1457539>
- BauNetz. Fenster und Türen: Konstruktion/Funktion. *BauNetz*. <https://www.baunetzwissen.de/fenster-und-tueren/fachwissen/konstruktion-funktion/>
- BauNetz (18. Juli 2022). Kreislauffähig gestapelt: Feuerwehrhaus in Straubenhardt von wulf architekten. *BauNetz*. https://www.baunetz.de/meldungen/Meldungen-Feuerwehrhaus_in_Straubenhardt_von_wulf_architekten_7982253.html
- BC Housing. (2021). *Vienna House Innovative Affordable Housing Demonstration Project: Design for Disassembly for Residential Construction*.
- Boothroyd, G. & Altling, L. (1992). *Design for Assembly and Disassembly* (CIRP Annals Volume 41, Issue 2).
- Boothroyd, G. & Dewhurst, P. (1983). *Design for Assembly*. A designer's handbook.
- Böttcher, H. & Hennenberg, K. (2024, 9. April). *Tag des Baumes: CO2-Fußabdruck von Holz korrekt berechnen*. Öko-Institut e.V. <https://www.oeko.de/news/pressemitteilungen/tag-des-baumes-co2-fussabdruck-von-holz-korrekt-berechnen/>
- Brand, S. (1995). *How buildings learn: What happens after they're built*. Penguin Books. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=1121084>
- Brennan, A. (2017). Dymaxion House: Ship Shape: R. Buckminster Fuller. In H. F. Mallgrave (Hrsg.), *The companions to the history of architecture* (S. 261–272). John Wiley & Sons, Inc. https://www.researchgate.net/publication/344387266_Dymaxion_House_Ship_Shape
- Bundesverband der Gipsindustrie e. V. (Hrsg.). (10.2021). *Recycling von Gips als Beitrag zur Ressourcenschonung: Gipsindustrie fordert konsequente Anwendung der Gewerbeabfallverordnung*. Medieninformation 02/21. <https://www.gips.de/aktuelles/detail/recycling-von-gips-als-beitrag-zur-ressourcenschonung>
- Capelle, T., Farnetani, M., Lowres, F., Balson, K., Durmisevic, E., Brancart, S., Paduart, A., Elsen, S., Lanckriet, W., Poppe, J., Mul, E.-J., Luscuere, L., Morizur, C., Delatte, M. & Debacker, W. (02.2019). *BAMB. Buildings as Material Banks: Testing BAMB results through prototyping and pilot projects*. Buildings as Material Banks. <https://www.bamb2020.eu/library/>
- ClayTec GmbH & Co. KG. (2023, 31. Mai). *Zirkulär: Kreislauffähigkeit von Lehmbaustoffen*. <https://claytec.de/der-baustoff-lehm/zirkulaer/>
- Le Corbusier & Jeanneret, P. (1927). Fünf Punkte zu einer neuen Architektur. *Die Form. Zeitschrift für gestaltende Arbeit*(2), 272–274.
- Cradle to Cradle NGO. *2 C2C in der gebauten Umwelt*. <https://c2c-bau.org/2-c2c-in-gebauter-umwelt/2-1-c2c/>
- Crowther, P. (2000). Developing Guidelines for Designing for Deconstruction. In Building Research Council (Hrsg.), *Deconstruction - Closing the Loop. Conference Proceedings*. <https://eprints.qut.edu.au/2847/>
- Crowther, P. (2001). Developing an Inclusive Model for Design for Deconstruction. In *CIB Publication: Bd. 266. Deconstruction and Materials Reuse: Technology, Economic, and Policy: Proceedings of the CIB Task Group 39 – Deconstruction Meeting, CIB World Building Congress, Wellington (NZ)* (CIB Publication 266).

- Dechantsreiter, U., Korhammer, S., Lütkemeyer, I., Rissmann, C. & Spieß, M. (12.2016). *Integration von wiederverwendbaren Bauteilen und Recyclingbaustoffen und die damit verbundenen Auswirkungen auf den Planungsprozess eines Neubaus der Stadtwerke Neustadt: Endbericht AZ 32618/01 (Phase 1)*.
- DERIX GmbH. (2022, 14. November). *Holzmodulbau | Ingenieurholzbau | DERIX*. <https://derix.de/produkte-ingenieurholzbau/holzmodulbau/>
- Devlieger, L. (5. Juli 2018). Architektur im Rückwärtsgang. Übersetzung aus dem Englischen: Kirsten Klingbeil. *Bauwelt*. <https://www.bauwelt.de/themen/betrifft/Architektur-im-Rueckwaertsgang-Recycling-Wiederverwendung-von-Baumaterialien-Rotor-3189877.html>
- Drach, E. (2016). Neuferts Oktametersystem – eine neue ›Regola‹ im 20. Jahrhundert? *Architectura*, 46(2), 238–257. <https://doi.org/10.1515/ATC-2016-2006>
- Duffy, F. (1990). Measuring building performance. *Facilities*, 8(5), 17–20. <https://doi.org/10.1108/EUM0000000002112>
- Duffy, F. & Henney, A. (1989). *The changing city*. Bulstrode Press.
- Durmisevic, E. (2006). *Transformable building structures: Design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction* [Dissertation]. Technische Universiteit Delft, Delft (NL).
- Durmisevic, E. (2019). *Design Strategies for Reversible Buildings*. Circular Economy in Construction. <https://www.bamb2020.eu/library/>
- Durmisevic, E. & Brouwer, J. (2002). *Dynamic versus static building structures*. Delft University of Technology, Faculty of Architecture, Department of Building Technology. https://www.4darchitects.nl/4d_profile.htm
- Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa (2020).
- Europäisches Parlament. (06.2023). *Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile*. <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile>
- Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau e.V. (Hrsg.). (07.2019). *FDB-Merkblatt Nr. 10: zum nachhaltigen Bauen mit Betonfertigteilen*.
- Goldense, B. (7. Januar 2022). A History of Design for Manufacturing and Assembly. *Machine Design*. <https://www.machinedesign.com/automation-iiot/article/21213546/a-history-of-design-for-manufacturing-and-assembly>
- Graf, J., Birk, S., Poteschkin, V. & Braun, Y. (2022). Kreislaueffektive Bauwende – Auf dem Weg zu einer neuen Tektonik. *Bautechnik*, 99(S2), 76–84. <https://doi.org/10.1002/bate.202100111>
- Graubner, C.-A., Bleyer, T., Brunk, M. F., Dreßen, T., Fensterer, C., Gehlen, C., Haas, A., Hanenberg, N., Hauer, B., Hegger, J., Heusler, I., Keßler, S., Mielecke, T., Piehl, C., Reinhardt, H.-W., Roth, C., Schießl, P., Schneider, H. N., Schwarte, J., ... Zilch, K. (2014). *Der Stadtbaustein im DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhaben "Nachhaltig Bauen mit Beton": Dossier zu Nachhaltigkeitsuntersuchungen - Teilprojekt A* (1. Aufl.). *DAfStb-Heft: Bd. 588*. Beuth.
- Guy, B. & Ciarimboli, N. (2008). *DfD: Design for Disassembly in the built environment: a guide to closed-loop design and building*. <https://scholar.google.com/citations?user=fgo1jkuaaaaj&hl=en&oi=sra>
- Guy, B. & McLendon, S. (Juli 2000). *Building Deconstruction: Reuse and Recycling of Building Materials*. Center for Construction and Environment, University of Florida.
- Habraken, J. (1961). *De dragers en de Mensen: Het einde van de massawoningbouw*. Scheltema & Holkema.
- Hebel, D. E. & Wappner, L. (Hrsg.). (2023). *Edition Detail. SORTENREIN BAUEN - MATERIAL, KONSTRUKTION, METHODIK: Methodik - material - konstruktion* (Erste Auflage). EDITION DETAIL.
- Hillebrandt, A., Riegler-Floors, P., Rosen, A. & Seggewies, J.-K. (2021). *Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource* (Zweite, korrigierte Auflage). *Edition Detail*. Detail Business Information GmbH. <https://www.degruyter.com/isbn/9783955534165>

- Hobbs, G. & Adams, K. (2017). Reuse of building products and materials – barriers and opportunities. In *International HISER Conference on Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste*. Symposium im Rahmen der Tagung von Delft University of Technology, Delft (NL). <https://www.bamb2020.eu/library/>
- Jäger, W., Youssef, H., Hartmann, R., Bakeer, T., Kollna, M. & Erler, M. (2022). *Rezyklierbarer, demonstrierbarer, energiehocheffizienter, massiver Musterbau (ReDeMaM): Praktische Umsetzung eines Musterhauses in Trockenbauweise* (BBSR-Online-Publikationen 19/2022). <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2022/bbsr-online-19-2022.html>
- Jocher, T., Gasser, M., Lederer, A. & Stamm-Teske, W. (2011). *Raumpilot* (2. Aufl.). K. Krämer.
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT). (2021). *KIT Materialbibliothek, Umbau und Neuausrichtung*. <https://open.arch.kit.edu/arbeiten/kit-materialbibliothek/>
- Leonhardt, R. W. (1998). Selektiver Rückbau und Wiederverwendung. *deutsche bauzeitung*(52), 32–33. <https://antikebau.de/presse/eigenveroeffentlichungen/>
- Leonhardt, R. W. (2000). Zur Wiederverwendung historischer Bauteile. *ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees*(32). <https://journals.ub.uni-heidelberg.de/index.php/icomoshefte/article/view/21314>
- McDonough, W. & Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle remaking the way we make things: Remaking the way we make things* (1. ed.). North Point Press. <http://www.loc.gov/catdir/bios/hol051/2001044245.html>
- Menn, A. (2021). Die Wiederverwendung von Bauteilen: Ein Überblick aus vertragsrechtlicher Perspektive. In A. Abegg & O. Streiff (Hrsg.), *Die Wiederverwendung von Bauteilen* (S. 39–78). SwissLex; Dike Verlag AG.
- Nagler, G. (2015). *Der Wiederaufbau Augsburgs nach den Zerstörungen im Zweiten Weltkrieg: Baupolitik, Stadtplanung und Architektur* [Dissertation]. Technische Universität München, München.
- OpenBuilding.co. (2021). *Manifesto — Open Building*. <https://www.openbuilding.co/manifesto>
- OiB-Richtlinien. Begriffsbestimmungen (2023).
- Pomberger, R. (2021). Über theoretische und reale Recyclingfähigkeit. *Österr. Wasser- und Abfallw. (Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft)*, 73(1-2), 24–35.
- Reinboth, L. (2016, Juni). Zollingerdach: Dachtragwerk mit langer -Geschichte. *dach+holzbau*. https://www.dach-holzbau.de/artikel/bhw_dachtragwerk_mit_langer_geschichte-2591996.html
- Rentz, O [Otto], Ruch, M., Nicolai, M., Spengler, T [Thomas] & Schultmann, F. (1994). *Selektiver Rückbau und Recycling von Gebäuden: dargestellt am Beispiel des Hotel Post in Dobel, Landkreis Calw*.
- Ruch, M., Schultmann, F., Sindt, V. & Rentz, O [Otto] (1997). Selective Dismantling of Buildings: State of the Art and New Developments in Europe. In CSTB (Vorsitz), *Buildings and the Environment. Second International Conference*. Symposium im Rahmen der Tagung von Centre Scientifique et Technique du Batiment, Paris. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=2280057>
- Sára, B., Antonini, E. & Tarantini, M. (2000). *Application of Life Cycle Assessment (LCA) methodology for selective demolition and reuse-recycling of building materials and products*. https://www.researchgate.net/profile/mario-tarantini/publication/242760428_application_of_life_cycle_assessment_lca_methodology_for_selective_demolition_and_reuse-recycling_of_building_materials_and_products
- Schindler, C. (2009). Holz in der Wiederverwendung. *ARCH+*(193), 56–58. <https://archplus.net/de/ausgabe/193/#article-3059>
- Schneider, U., Böck, M. & Mötzl, H. (Dezember 2010). *recyclingfähig konstruieren: Subprojekt 3 zum Leitprojekt „gugler! build & print triple zero“* (Berichte aus Energie- und Umweltforschung 21/2011).
- Schrader, M. (2000). Auf der Suche nach historischem Baumaterial. Selektiver Rückbau statt Abbruch. *ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees*(32). <https://journals.ub.uni-heidelberg.de/index.php/icomoshefte/article/view/21314>

- Shi, W., Klopfer, R., Ciesla, E.-M., Graf, J., Birk, S. & Poteschkin, V. (09.2021). *Standardisierte Buchenholz-Hybridträger großer Spannweite - Steigerungspotential von Produktspeicher und stofflicher Substitution durch Buchenholzprodukte niedriger Holzqualität*. Schlussbericht zum Vorhaben.
- Spengler, T [Th.], Püchert, H., Penkuhn, T. & Rentz, O [O.] (1997). Environmental integrated production and recycling management. *European Journal of Operational Research*, 97(2), 308–326.
- Stricker, E., Brandi, G., Sonderegger, A., Angst, M., Buser, B. & Massmünster, M. (Hrsg.). (2021). *Bauteile wiederverwenden - ein Kompendium zum zirkulären Bauen: Ein Kompendium zum zirkulären Bauen*. Park Books.
- Stürmer, S. & Fritz, W. (2020). Von historischen Ziegelsplitt- und modernen R-Betonen: Ein Plädoyer für mehr Akzeptanz von Recyclingbaustoffen. *Bausubstanz. Zeitschrift für nachhaltiges Bauen, Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege*(6), 37–43. <https://www.bausubstanz.de/zeitschrift/aktuelle-ausgabe/von-historischen-ziegelsplitt-und-modernen-r-betonen/>
- Vismann, U. (2022). *Wendehorst Beispiele aus der Baupraxis* (7. Aufl.). Springer Vieweg. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-32486-5>
- Vollenschaar, D. (Hrsg.). (2011). *Wendehorst Baustoffkunde: Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz* (27. Aufl.). Vieweg+Teubner Verlag.
- Weismann, M., Herget, M., Funck, N. & Dietz, R. (04.2023). *Zirkuläres Bauen in der Praxis: Ein Status Quo*. <https://wrs.region-stuttgart.de/publikationen/zirkulaeres-bauen-in-der-praxis/>
- Zelenka Brandschutztechnik. (2022, 8. Oktober). *Brandschutzbeschichtung Stahl*. <https://zelenka-brandschutztechnik.de/brandschutzbeschichtung-stahl/>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Eirdnung des vorliegenden Dokuments im Forschungsprojekt Build Re-Use und Wechselwirkung mit den Arbeitspaketen (AP); Quelle: eigene Darstellung	5
Abbildung 2: Biologischer und technischer Stoffkreislauf nach dem Cradle-to-Cradle-Prinzip; Quelle: Felix Jörg Müller, CC BY-SA 4.0 < https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/ >, via Wikimedia Commons (modifiziert).....	10
Abbildung 3: Die fünfstufige Abfallhierarchie entsprechend der EU-Abfallrahmenrichtlinie und dem österreichischen Abfallwirtschaftsgesetz 2002; Quelle: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK).....	11
Abbildung 4: Auszug aus der schematischen Erfassung des Bauteils "SPAR - AW6" (Außenwandkonstruktion Nummer 6 des Lebensmittelmarkts) und Verteilung der Materialitäten; Quelle: eigene Darstellung	6
Abbildung 5: Zu klärende Fragestellungen eines Re-Use-Geschäftsmodells; Quelle: eigene Darstellung (AEE Intec)	8
Abbildung 6: Basis für die Bewertungsmethodik sind die Analyse von Prozessen in Quellgebäude und Zielgebäude sowie die Zwischenphase; Quelle: eigene Darstellung (IBO)	9
Abbildung 7: Zur Wiederverwendung historischer Bauteile als Spolien können sowohl repräsentative als auch pragmatische Gründe beigetragen haben; Quelle: GFreihalter, CC BY-SA 3.0 < https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/ >, via Wikimedia Commons	12
Abbildung 8: Nichtwohngebäude-Bestand in Deutschland – für Österreich liegen keine entsprechend differenzierten Daten vor, aufgrund der vergleichbaren Historie wird eine ähnliche Verteilung erwartet; Quelle: eigene Darstellung nach Hörner et al. (2021).....	12
Abbildung 9: Der Crystal Palace nach dem Wiederaufbau auf dem Sydenham Hill (London, UK); Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crystal_Palace,_Sydenham.png	13
Abbildung 10: Das Dymaxion House von 1927 kombiniert ökologische und technologische Ansätze; Quelle: Historic American Buildings Survey (Library of Congress), Public domain, via Wikimedia Commons	13
Abbildung 11. Händische Bergung intakter Mauerwerkssteine aus Trümmerschutt und Entfernung von Mörtelresten (das sog. „Ziegelputzen“), ca. 1946; Quelle: Deutsche Fotothek, Datensatz 88956826 ...	14
Abbildung 12. Durch die entsprechende Anordnung kurzer, gerade Holzlamellen entsteht beim Zollingerdach eine gekrümmte Dachfläche; Quelle: Kulturagent, CC BY 3.0 < https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/ >, via Wikimedia Commons.....	15
Abbildung 14: Anders als bei Gebäuden ermöglicht das übliche Konstruktionsdesign eines Automobils die Zerlegung in dessen Einzelteile und erleichtert somit Wartung, Austausch, Weiter- und Wiederverwendung; Quelle: Paul Hudson from United Kingdom, CC BY 2.0 < https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/ >, via Wikimedia Commons.....	16
Abbildung 14: Übersicht über verschiedene Abbruch- beziehungsweise Rückbaumethoden und schematische Darstellung der Resultate aus stofflicher Sicht; Quelle: eigene Darstellung nach Hillebrandt et al., 2021.....	18
Abbildung 15: Design for Disassembly als Grundlage eines Kreislaufmodells für die Errichtung, Nutzung und den Rückbau von Gebäuden; Quelle: eigene Darstellung nach Durmisevic, 2006.....	19

Abbildung 16: Grundriss-Szenario für einen fiktiven Betrachtungsfall mit aussteifendem Erschließungs- und Sanitärkern und ansonsten freier Grundrisseinteilung durch große Deckenspannweiten; blau hervorgehoben ist ein nachfolgend beispielhaft dargestellter Raum; Quelle: eigene Darstellung.....	23
Abbildung 17: Darstellung eines beispielhaften untersuchten Raums im Schnitt und Explosionszeichnung der das Raumvolumen umschließenden Bauteile; Quelle: eigene Darstellung.....	24
Abbildung 18: Beispielhafte Darstellung eines Bauteils (aufgeständerte Bodenplatte), die Beschreibung der Komponenten erfolgt textlich und über die Schraffur/Farbgebung; Quelle: eigene Darstellung	24
Abbildung 19: Darstellung eines Flachdachs bzw. einer obersten Geschoßdecke im Gefüge der Bauteile	26
Abbildung 20: Darstellung einer Innenwand im Gefüge der Bauteile	30
Abbildung 21: Darstellung einer Außenwand im Gefüge der Bauteile	34
Abbildung 22: Darstellung eines Bauelements im Gefüge der Bauteile	39
Abbildung 23: Darstellung eines Fußbodens im Gefüge der Bauteile	41
Abbildung 24: Darstellung einer Gründung bzw. untersten Geschoßdecke im Gefüge der Bauteile.....	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die vier Schichten von Bürogebäuden nach Duffy, 1990	16
Tabelle 2: Die vier Schichten von Bürogebäuden nach Duffy, 1990	17
Tabelle 3: Annahmen für eine beispielhafte übliche Flachdachkonstruktion und Beschreibung des Bauteilaufbaus.....	26
Tabelle 4: Optionen für Re-Use-fähige Flachdachkonstruktionen und Beschreibung der Bauteilaufbauten	28
Tabelle 5: Annahmen für beispielhafte übliche Innenwandkonstruktionen und Beschreibung der Bauteilaufbauten.....	30
Tabelle 6: Optionen für Re-Use-fähige Innenwandkonstruktionen und Beschreibung der Bauteilaufbauten.....	31
Tabelle 7: Annahmen für beispielhafte übliche Außenwandkonstruktionen und Beschreibung der Bauteilaufbauten.....	34
Tabelle 8: Optionen für Re-Use-fähige Außenwandkonstruktionen und Beschreibung der Bauteilaufbauten.....	36
Tabelle 9: Annahmen für beispielhafte übliche Bauelementeinbindungen und Beschreibung der Bauteilfügung	39
Tabelle 10: Annahmen für beispielhafte übliche Fußbodenkonstruktionen und Beschreibung des Bauteilaufbaus.....	41
Tabelle 11: Optionen für Re-Use-fähige Fußbodenkonstruktionen und Beschreibung des Bauteilaufbaus	42
Tabelle 12: Annahmen für beispielhafte übliche Gründungskonstruktionen und Beschreibung des Bauteilaufbaus.....	44
Tabelle 13: Optionen für Re-Use-fähige Gründungskonstruktionen und Beschreibung des Bauteilaufbaus	46

Produktbeispielverzeichnis

- ¹ Lindner LOOP und RELIFE Aufbereiteter Doppelboden, Lindner Group KG, 94424 Arnstorf (DE), <https://www.lindner-group.com/de/produkte/boden/doppelboden/aufbereitete-holzwerkstoffplatten/relife>;
Weitzer ReParkett, Weitzer Parkett, 8160 Weiz (AT), <https://www.weitzer-parkett.com/reparkett/#urbanmining>
- ² Bausystem, Lukas Lang Building Technologies GmbH, 1130 Wien (AT), <https://www.lukaslang.com/unser-system/>
- ³ Recyclingbeton Typ II nach DIN 1045-2 (Weismann et al., 2023)
- ⁴ Urban Terrazzo, InteriorPark., 70178 Stuttgart (DE), <https://interiorpark.com/bodenbelag-urban-terrazzo>
- ⁵ Hebel Deckenplatten, Xella Aircrete Systems GmbH, 47259 Duisburg (DE)
- ⁶ LIGNO Rippe-x, LIGNOTREND Produktions GmbH, 79809 Weilheim (DE), <https://lignotrend.com/produkte/konstruktion/deckenbauteile>;
LIGNATUR-Kastenelement, Lignatur AG, 9104 Waldstatt (CH), <https://www.lignatur.ch/produkt/oekologie>
KIELSTEG Bauelement, Kielsteg Deutschland GmbH, 84489 Burghausen (DE), https://www.dach-holzbau.de/artikel/bhw_Fuer_weit_gespannte_Konstruktionen-2446055.html
- ⁷ KETONIA Spannbeton-Hohlplatten, KETONIA GmbH Spannbeton-Fertigteilverk, 92637 Weiden i.d.OPf. (DE), <https://www.ketonia.de/fertigdecken>
- ⁸ Massive Vitalziegel-Holzbalken-Decke, Bauhütte Leitl-Werke GmbH, 4070 Eferding (AT), <https://www.energyglobe.at/oberoesterreich/projekt/2021/massive-vitalziegel-holzbalken-decke>
- ⁹ Thermo-Roof, Stauss-Perlite GmbH, 3100 St. Pölten (AT), <https://www.stauss-perlite.at/europerl-expandiertes-perlit/bau-europerl/thermo-roof>
- ¹⁰ BauderGREEN Retention System Drossel Schwamm, Paul Bauder GmbH & Co. KG, 70499 Stuttgart (DE), <https://www.bauder.at/at/bauder-gruendach/systeme/baudergreen-retentionsdach/baudergreen-retention-system-drossel-schwamm.html>
- ¹¹ ZinCo Solar- oder Geländerbasis; ZinCo GmbH, 72622 Nürtingen (DE), <https://www.zinco.de/solar>
- ¹² Lindner Logic 100, Lindner Group KG, 94424 Arnstorf (DE), https://www.lindner-group.com/de_AT/ausbauprodukte/wand/systemtrennwaeende-vollwand/lindner-logic-100-timber/
Trennwände Synops und Synchroner, Clestra, 67100 Strasbourg (FR), <https://www.clestra.com/en/workspaces/solutions/partitions/>
Modulare Trennwandsysteme, Strähle Raum-Systeme GmbH, 71332 Waiblingen (DE), <https://www.straehle.de/produkte/trennwandsysteme/>
- ¹³ JUUNOO demountable wall, JuuNoo, 8550 Zwevegem (BE), <https://juunoo.com/demountable-wall/>
- ¹⁴ Geberit GIS, Geberit Vertriebs GmbH, 88630 Pfullendorf (DE), <https://www.geberit.de/sanitaer-rohrleitungssysteme/installations-spuelsysteme/geberit-gis/>
- ¹⁵ Octawall, Octanorm, 70794 Filderstadt (DE), <http://www.octanorm.com/de/OCTAWall?&id=128>
- ¹⁶ Gramitherm Sustainable Grass Insulation, Gramitherm Europe SA, 5060 Auvélais/Sambreville (BE), <https://gramitherm.eu/?lang=de>
- ¹⁷ NeptuTherm, NeptuGmbH, 76229 Karlsruhe, <http://www.neptugmbh.de/anwendungen.html>
- ¹⁸ STEICOjoist, STEICO SE, 85622 Feldkirchen (DE), <https://www.steico.com/de/produkte/konstruktion/stegtraeger/steicojoist>;
U*psi, LIGNOTREND Produktions GmbH, 79809 Weilheim (DE), <https://www.lignotrend.com/produkte/fassade>
- ¹⁹ Systimber, 9840 De Pinte (BE), <https://www.systimber.com/renovatie/4700/>;
Normstabil HolzZiegel, BAUSATZHAUS, 4863 Seewalchen (AT), <https://www.bausatzhaus.at/der-holzziegel/>
- ²⁰ ClayTec Lehm-Trockenbau, ClayTec GmbH & Co. KG, 41751 Viersen (DE), <https://claytec.de/produkt/lehm-trockenbau/>
- ²¹ Pluma Panels, Mogu S.r.l., 21020 Inarzo (IT), <https://mogu.bio/pluma-panels/>
- ²² Hanf-Kalk-Putzsystem, Schönthaler Bausteinwerk, 39023 Eys (IT), <https://www.hanfstein.eu/home-deutsch/hanfputze/>; Hanfkalkstein, <https://www.hanfstein.eu/>

- ²³ Wandgestaltungssysteme, Joh. Sprinz GmbH & Co. KG, 88287 Grünkraut-Gullen (DE), <https://www.sprinz.eu/index.php?Duschenwelt-Wandgestaltungssystem-TWS-System-Classic>
- ²⁴ TriqBriq, TRIQBRIQ AG, 70469 Stuttgart (DE); <https://triqbriq.de/portfolio/mehrgeschossiges-wohnhaus/>
- ²⁵ Brikawood-Holzbaustein, Brikawood, 49450 Sèvremoine (FR), <https://www.brikawood-ecologie.fr/concept-kit-maison-passive-bois>
- ²⁶ STEKO Holzbausystem, Steko AG, 8047 Zürich (CH), <https://steko.ch/de/>
- ²⁷ Re-Use-Ziegel, Bauhütte Leitl-Werke GmbH, 4070 Eferding (AT), <https://www.leitl.at/produkte/re-using-ziegel>
- ²⁸ Sto SustainR, Sto SE & Co. KgaA, 79780 Stühlingen (DE), <https://archello.com/product/sto-sustain-r>
- ²⁹ StoFix Circonic, Sto SE & Co. KgaA, 79780 Stühlingen (DE), <https://www.sto.de/s/inspiration-information/nachhaltige-produktlinie/wdvs-stootherm-aims>
- ³⁰ Fenstersystem OPTIWIN LIGNUMA, OPTIWIN GmbH, 6341 Ebbs (AT), <http://www.optiwin.net/de/produkte/fenstersysteme-advanced/optiwin-lignuma>
- ³¹ Kalfaterband KB 125, HANFFASER Uckermark eG, 17291 Prenzlau (DE), <https://www.hanffaser.de/uckermark/index.php/produkte/dichtungsband>
- ³² AGEPAN TEP (Trockenestrichplatte), Sonae Arauco Deutschland GmbH, 49716 Meppen (DE), <https://www.sonae-arauco.com/de/configuration/matrix/products-list/agepan-tep/>
- ³³ CW 020, CEMWOOD GmbH, 39126 Magdeburg (DE), <https://www.cemwood.de/sortiment/cw-020/>
- Schüttung, OES GmbH / Naturefloor, 4910 Ried im Innkreis (AT), <https://www.naturefloor.at/schuettung>
- ³⁴ Formplatte mit Holzprofilleiste, LITHOTHERM Deutschland GmbH, 56290 Uhler (DE), <https://www.lithotherm-system.de/fussbodenheizung/>
- ³⁵ Lehm-Terrazzo, ClayTec GmbH & Co. KG, 41751 Viersen (DE), <https://claytec.de/produkt/lehm-terrazzo/>;
Stampflehm Boden, Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, 6824 Schlins (AT), <https://www.lehmtonerde.at/de/produkte/produkt.php?aID=33>;
Lehmkaseinboden, Malerwerkstatt Gerold Ulrich, 6822 Satteins (AT), <http://www.geroldulrich.com/?p=401>
- ³⁶ Thermo Doppelboden, Lenzlinger Söhne AG, 8610 Uster (CH), <https://www.lenzlinger.ch/de/doppelboden/bodensysteme/thermo-doppelboden>
- ³⁷ VIOWALL Glasschaumkissen, Viol.Glass e.K., 81927 München (DE), <https://www.viowall.glass/>
- ³⁸ Schraubfundamente aus verzinktem Stahl, Krinner Schraubfundamente GmbH, 94342 Straßkirchen (DE), <https://www.krinner.io/fundamentbau/schraubfundament/>
- ³⁹ KIELSTEG Holzbauelemente, KIELSTEG Deutschland GmbH, 84489 Burghausen (DE), <https://www.kielsteg.de/>
- ⁴⁰ Lindner LOOP und RELIFE Aufbereiteter Doppelboden, Lindner Group KG, 94424 Arnstorf (DE), <https://www.lindner-group.com/de/produkte/boden/doppelboden/aufbereitete-holzwerkstoffplatten/relife>;
Weitzer ReParkett, Weitzer Parkett, 8160 Weiz (AT), <https://www.weitzer-parkett.com/reparkett/#urbanmining>