



PIRMIN JUNG

Leitfaden kreislauffähiger Holzbau

Sursee, 31. März 2026
Daniel Müller, Corina Schärli
T: +41 41 459 70 94 | daniel.mueller@pirminjung.ch

Impressum

PIRMIN JUNG Schweiz AG
Centralstrasse 34
6210 Sursee

Autoren

Daniel Müller, PIRMIN JUNG Schweiz AG
Corina Schärli, PIRMIN JUNG Schweiz AG
Kevin Straub, PIRMIN JUNG Schweiz AG

Mitarbeitende

Esther Vallone, PIRMIN JUNG Schweiz AG

Fachlektorat

Anne Nyffeler, sysTEAMatik GmbH

Vertragsdauer

01.05.2024 – 31.12.2025

Hinweis

Dieses Projekt wurde realisiert mit Unterstützung des Bundesamts für Umwelt (BAFU), im Rahmen des Aktionsplans Holz.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	6
1 Einleitung	7
1.1 Problemstellung.....	7
1.2 Zielsetzung	8
1.3 Methode	9
1.4 Rahmenbedingungen und Abgrenzung	9
1.5 Ausgangslage.....	10
2 Grundlagen und Theorien	12
2.1 Kreislaufwirtschaft	12
2.2 Zirkuläres Bauen in Bauwerksphasen	13
2.3 Strukturelle Ebenen im Holzbau	13
2.4 Rückbaubarkeit	15
2.5 Rückbauorientierte Planung	16
2.6 Strategien der Kreislaufwirtschaft.....	16
2.7 Kaskadennutzung.....	18
2.8 Systemtrennung - Scherschichten Modell	19
2.9 Werterhaltungskonzept.....	21
2.10 Kriterien und Messbarkeit von Zirkularität	21
2.10.1 Zirkularitäts-Indikator	22
2.10.2 Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz - SNBS	22
2.10.3 Zusatz ECO zu Minergie.....	24
2.10.4 Kreislaufwirtschaft in den SIA-Normen	25
3 Kreislauffähigkeit von Holzbauten	27
3.1 Ebene Bauteilelemente und Systeme	28
3.1.1 Systemtrennung.....	28
3.1.2 Zugänglichkeit.....	31
3.1.3 Gleichteiligkeit.....	33
3.1.4 Konstruktiver Holzschutz	33
3.1.5 Fokus auf Potenzial – Emissionen und Ressourcen.....	34
3.1.6 Kreislauffähigkeit Decken	35
3.1.7 Kreislauffähigkeit Wände	37
3.1.8 Kreislauffähigkeit Dächer.....	38
3.1.9 Betrachtung Bauteilelemente und Systeme	38
3.2 Ebene Material	40
3.2.1 Massives Strukturmaterial.....	42
3.2.2 Holzbasiertes Strukturmaterial	42
3.2.3 Gipsgebundene Beplankung.....	43
3.2.4 Holzbasierte Beplankung.....	43
3.2.5 Mineralwoll-Wärmedämmung	43
3.2.6 Betrachtung Material.....	44
3.3 Ebene Verbindungsmittel	46
3.3.1 Verbindungstyp: gesteckt.....	48
3.3.2 Verbindungstyp: geschraubt	50
3.3.3 Verbindungstyp: genagelt	51
3.3.4 Verbindungstyp: geklammert	53
3.3.5 Verbindungstyp: geklebt	53
3.3.6 Betrachtung Verbindungsmittel.....	54
3.4 Bauwerksdokumentation	55

3.4.1	Was ist zu Dokumentieren	55
3.4.2	Form der Dokumentation	56
4	Fallbeispiele	58
4.1	Haus des Holzes	58
4.1.1	Bauteilelemente und Konstruktionen	58
4.1.2	Verbindungsmittel	62
4.1.3	Bauwerksdokumentation.....	63
4.2	Collegium Academicum.....	64
4.2.1	Bauteilelemente und Konstruktionen	64
4.2.2	Verbindungsmittel	65
5	Diskussion und Ausblick	69
5.1	Implikationen für Planung, Ausführung und Betrieb	69
5.2	Spannungsfelder und Grenzen.....	70
5.3	Ausblick: Entwicklungsbedarfe und nächste Schritte	71
5.4	Schlussfolgerung	72
6	Verzeichnisse.....	73
	Abbildungsverzeichnis.....	73
	Tabellenverzeichnis.....	75
	Abkürzungen	76
	Glossar	77
	Literaturverzeichnis	80

Abstract

Der Leitfaden beschreibt Vorgehensweisen und Prinzipien für den kreislauffähigen Holzbau in der Schweiz. Er basiert auf aktueller Forschung und Praxis, analysiert Strategien der Kreislaufwirtschaft sowie deren Umsetzung im Holzbau auf den Ebenen Gebäude, Bauteilelement und Material. Systemtrennung, Zugänglichkeit und Gleichteiligkeit bilden die Kernprinzipien. Weiter zeigt der Leitfaden, wie Dokumentation und rückbauorientierte Planung zur Ressourcenschonung und Reduktion von Treibhausgasen beitragen. Es werden Hinweise für Planung, Erstellung und Rückbau kreislauffähiger Holzbauten gegeben, um den Übergang zu einer zirkulären Bauweise zu fördern.

Résumé

Le guide décrit les procédures et les principes applicables à la construction circulaire en bois en Suisse. Il s'appuie sur les recherches et les pratiques actuelles, analyse les stratégies de l'économie circulaire et leur mise en œuvre dans la construction en bois au niveau des bâtiments, des éléments de construction et des matériaux. La séparation des systèmes, l'accessibilité et l'uniformité constituent les principes fondamentaux. Le guide montre également comment la documentation et la planification axée sur la déconstruction contribuent à la préservation des ressources et à la réduction des gaz à effet de serre. Il fournit des conseils pour la planification, la construction ainsi que la déconstruction de bâtiments en bois afin de favoriser la transition vers une construction circulaire.

Zusammenfassung

Der Leitfaden kreislauffähiger Holzbau zeigt Wege auf, wie der Holzbau unter Berücksichtigung von Kreislaufprinzipien geplant, konstruiert und dokumentiert werden kann, um Ressourcenverbrauch und Emissionen nachhaltig zu reduzieren. Er richtet sich an Planende, Ausführende und Entscheidungsträger und zielt darauf ab, den Holzbau als zirkuläre Bauweise weiterzuentwickeln und dessen Potenziale für Klimaschutz und Ressourceneffizienz zu nutzen.

Im Zentrum steht die Frage, wie Gebäude aus Holz zu konzipieren sind, dass sie am Ende ihrer Nutzungsdauer zerstörungsfrei in Bauteilelemente und Materialien zerlegt werden können. Der Leitfaden beschreibt hierzu Grundlagen, Strategien und praxisorientierte Massnahmen. Dabei werden drei funktionale Ebenen unterschieden: Gebäude, Bauteilelemente und Materialien. Ergänzend werden die Ebenen Verbindungsmittel und Bauwerksdokumentation behandelt, da sie die Rückbaubarkeit und Wiederverwendung massgeblich beeinflussen.

Kreislauffähigkeit bedeutet, dass Bauteilelemente und Materialien sortenrein getrennt und wieder in technische oder biologische Kreisläufe überführt werden können. Dafür sind grundlegende Prinzipien entscheidend: Systemtrennung, Zugänglichkeit und Gleichteiligkeit. Eine Systemtrennung meint die klare Trennung funktionaler Ebenen wie Konstruktion, Technik und Bekleidungen. Sie ermöglicht, dass Elemente mit unterschiedlichen Nutzungsdauern unabhängig voneinander erneuert oder ersetzt werden können. Die Zugänglichkeit beschreibt die Erreichbarkeit von Verbindungsmitteln und technischen Komponenten, um Demontage und Wartung zu erleichtern. Die Gleichteiligkeit strebt eine Reduktion unterschiedlicher Elementtypen zugunsten wiederkehrender, standardisierter Bauteile an, um deren Wiederverwendung zu vereinfachen.

Ein Schwerpunkt des Leitfadens liegt auf der Material- und Verbindungsebene. Materialien müssen so gewählt und kombiniert werden, dass sie trennbar und sortenrein rückführbar bleiben. Mechanische Verbindungen wie Schrauben, Holznägel oder Stecksysteme sind gegenüber geklebten oder geklammerten Varianten zu bevorzugen. Sie erlauben eine Wiederverwendung ohne Zerstörung und verhindern das Entstehen von Mischabfällen. Auf der Bauteilebene gilt es, Verbundsysteme weitgehend zu vermeiden. Stattdessen sollen mechanisch gefügte Systeme eingesetzt werden, die eine spätere Demontage ermöglichen.

Die Bauwerksdokumentation spielt eine Schlüsselrolle für zukünftige Rückbauprozesse. Sie dient nicht nur der Auffindbarkeit und Zuordnung von Bauteilen, sondern bildet die Grundlage für digitale Materialpässe und Urban-Mining-Konzepte. Durch die im Holzbau etablierte digitale Planung kann diese Dokumentation ohne wesentlichen Zusatzaufwand integriert werden.

Fallbeispiele belegen die technische Machbarkeit und zeigen, dass zirkuläre Holzbauweisen bei frühzeitiger planerischer Berücksichtigung wirtschaftlich konkurrenzfähig sind. Entscheidend ist dabei eine enge Zusammenarbeit zwischen Planung, Ausführung und Rückbaupraxis.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Holzbau durch konsequente Anwendung der beschriebenen Prinzipien eine Vorreiterrolle im zirkulären Bauen übernehmen kann. Er vereint ökologische Vorteile wie Kohlenstoffspeicherung und Ressourcenschonung mit technischer Anpassungsfähigkeit und Langlebigkeit.

Der Leitfaden versteht sich als praxisorientiertes Arbeitsinstrument. Er zeigt auf, dass zirkuläres Bauen keine radikal neue Bauweise erfordert, sondern eine bewusste Weiterentwicklung bestehender Holzbaupraktiken. Durch vorausschauende Planung, gezielte Systemtrennung und transparente Dokumentation können Holzbauten zu reversiblen, ressourceneffizienten und zukunftsfähigen Gebäuden werden. Damit leistet der Holzbau einen zentralen Beitrag zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft im Schweizer Bauwesen und zur Erreichung der nationalen Klimaziele.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Der Bausektor hat einen erheblichen Einfluss auf unsere Umwelt und trägt zur Klimaveränderung bei. In der Schweiz sind der Bau und Betrieb von Gebäuden und Infrastrukturen für rund einen Drittel der nationalen CO₂-Emissionen sowie für etwa die Hälfte des gesamten Rohstoffbedarfs verantwortlich. Mit einem Anteil von rund 80 Prozent am Abfallaufkommen stellen Bauabfälle die grösste Abfallkategorie dar. Diese Zahlen verdeutlichen die hohe Relevanz des Sektors im Hinblick auf den Ressourcenverbrauch und unterstreichen den dringenden Handlungsbedarf zur Förderung nachhaltigerer Bauweisen und zur Etablierung einer Kreislaufwirtschaft. [1]

Das im Jahr 2015 verabschiedete Pariser Klimaabkommen verpflichtet die Unterzeichnerstaaten zur Reduktion der Treibhausgasemissionen mit dem Ziel, die globale Erwärmung zu begrenzen. Die parlamentarische Initiative «Schweizer Kreislaufwirtschaft stärken» vom März 2024 hat zur Folge, dass auch das schweizerische Umweltschutzgesetz mit dem Artikel 35j rechtliche Grundlagen schafft, die auf eine Stärkung der Kreislaufwirtschaft und einen bewussteren Umgang mit natürlichen Ressourcen abzielen. Der Bundesrat hat beschlossen, die entsprechenden Gesetzesänderungen zur Förderung einer ressourcen-effizienten Wirtschaft seit dem 1. Januar 2025 schrittweise umzusetzen. [2] Ziel der Revisionen in den Bereichen Umwelt-, Energie- und Beschaffungsgesetz ist die Verringerung der Umweltbelastung und des Ressourcenverbrauchs sowie die Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit und Versorgungssicherheit. Neu werden Grundsätze der Ressourcenschonung gesetzlich verankert, wobei dem Recycling Vorrang vor der Verbrennung eingeräumt und Grenzwerte für graue Energie im Bauwesen vorgesehen werden (Art. 45 Abs. 3 Bst. e EnG).

Die Grenzwerte für graue Energie und Treibhausgase sind in den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE25) als Basismodul integriert. Der Bund ist verpflichtet, bei Bauvorhaben und Beschaffungen eine Vorbildfunktion einzunehmen und umweltschonende sowie ressourceneffiziente Lösungen gezielt zu fördern. Zudem erhält der Bundesrat die Kompetenz, im Rahmen einer gesamthaften, bauwerks- und lebenszyklusbasierten Nachhaltigkeitsbetrachtung Anforderungen an ressourcenschonendes Bauen sowie an Bauwerke, Baustoffe und Bauteile festzulegen, wobei internationale Verpflichtungen und Entwicklungen zu berücksichtigen sind (Art. 35j USG).

Prognosen des Bundesamts für Statistik gehen davon aus, dass die ständige Wohnbevölkerung der Schweiz in den kommenden Jahren weiter ansteigen wird. [3] Der damit verbundene zunehmende Bedarf an Wohnraum, Energie und Baumaterialien führt zu einer zusätzlichen Belastung der natürlichen Ressourcen und verschärft die bestehenden ökologischen Herausforderungen.

Der moderne Holzbau gilt als nachhaltige und klimaschonende Bauweise. Die Holzbauweise kann zentrale Anforderungen des Bauwesens – etwa in den Bereichen Brand-, Schall-, Wärme- und Feuchteschutz sowie Erdbebensicherheit und Ökologie – erfüllen. Durch die Nutzung eines nachwachsenden, kohlenstoffbindenden Rohstoffs trägt der Holzbau im Vergleich zu mineralischen Bauweisen zu einer Verringerung des ökologischen Fussabdrucks bei. Darüber hinaus ermöglicht die effiziente, witterungs-unabhängige Vorfertigung eine verkürzte Bauzeit und damit potenzielle ökonomische Vorteile. Das geringe Eigengewicht und die gute Bearbeitbarkeit fördern zudem den Einsatz von Holz in ergänzenden Strukturen im Bestand.

Die Nachfrage nach dem biogenen Rohstoff Holz hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Dessen Nutzung ist sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Perspektive zu befürworten, sofern sie auf einer nachhaltigen Produktion basiert und in regionalen Wertschöpfungsketten erfolgt. [4]

Seit 2009 blieb der Holzvorrat in der Schweiz insgesamt stabil, wobei regionale Unterschiede bestehen. In den Alpen und auf der Alpensüdseite nahm der Vorrat zu, während er im Jura und im Mittelland infolge von Trockenheit, Krankheiten und Borkenkäferbefall abnahm [4]. Mit einem Vorratsanteil von 42 Prozent ist die Fichte die häufigste Baumart, gefolgt von der Weissstanne mit 16 Prozent. Nadelhölzer bilden insgesamt rund zwei Drittel des landesweiten Holzvorrats. Da insbesondere die Fichte unter den Folgen des Klimawandels leidet, ist in wirtschaftlich relevanten Regionen mit einem weiteren Rückgang zu rechnen. Die Weissstanne zeigt sich dagegen resilient.

Der Wald übernimmt eine zentrale Funktion als Kohlenstoffsенке. Um diese Funktion aufrechtzuerhalten, müssen die drei Klimaleistungen – die CO₂-Sequestrierung im Wald, die Speicherung von Kohlenstoff in Holzprodukten sowie die stoffliche und energetische Substitution von klimaschädlicheren Materialien durch Holz – langfristig gesichert werden. [4]

Vor dem Hintergrund des Klimawandels, des Bevölkerungswachstums und des steigenden Material- und Energiebedarfs wird deutlich, dass auch der Holzbau von einer linearen zu einer zirkulären Bauweise überführt werden muss. Holz soll zunächst als Bau- und Konstruktionsmaterial genutzt und anschliessend in der sogenannten Kaskadennutzung mehrfach weiterverwendet werden, bevor es schliesslich energetisch zum Einsatz kommt [5]. Durch diese Mehrfachnutzung kann die Speicherung von Kohlenstoff verlängert und der Substitutionseffekt mehrfach realisiert werden. [6]

Im Bausektor ist das Potenzial der Kreislaufwirtschaft bislang nur in geringem Umfang ausgeschöpft. Gebäude, die das Ende ihrer Nutzungsdauer erreichen, werden in der Regel rückgebaut, wobei die anfallenden Materialien recycelt, thermisch verwertet oder deponiert werden [7]. Eine systematische Wiederverwendung von Bauteilen ist bisher kaum etabliert [8]. Um den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft gerecht zu werden, müssen Gebäude so konzipiert und errichtet werden, dass Baustoffe sortenrein getrennt und wiederverwendet werden können. Dies ermöglicht eine effizientere Rückführung in den Materialkreislauf, trägt zur Ressourcenschonung bei und leistet einen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen. Für nachwachsende Rohstoffe wie Holz ist zudem die langfristige Speicherung von Kohlenstoff von zentraler Bedeutung.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie Holzbauten geplant und ausgeführt werden können, um das Potenzial der Kaskadennutzung bestmöglich auszuschöpfen.

Die bisher zögerliche Umsetzung von Re-Use-Projekten im Bauwesen ist nicht auf mangelndes Interesse, sondern auf vielfältige strukturelle, technische und organisatorische Herausforderungen zurückzuführen [9]. Dazu zählen die Verfügbarkeit von Bauteilen und Materialien zum benötigten Zeitpunkt, die Bereitstellung von Qualitäts- und Bestandsdaten, rechtliche Unsicherheiten hinsichtlich Gewährleistung, fehlende Standardisierung und Kompatibilität, unzureichende Infrastruktur und Logistik, ein Mangel an Fachwissen und Akzeptanz sowie wirtschaftliche Unsicherheiten.

1.2 Zielsetzung

Im Leitfaden kreislauffähiger Holzbau wird der aktuelle Wissens- und Forschungsstand in Bezug auf das kreislauffähige Bauen im Holzbau abgebildet. Es sollen Hinweise gegeben werden, wie gebaut werden

sollte, um das Nutzungsende eines Gebäudes und dessen Bestandteile möglichst lange hinauszuzögern. Weiter soll aufgezeigt werden, wie die Materialien und Bauteilelemente gefügt werden können, um die Möglichkeit einer qualitativen Rückgewinnung zu erhöhen. Mit dem Ziel, diese anschliessend für eine weitere Nutzung einsetzen zu können.

Zirkuläres Bauen kann die Transformation des Bauwesens zu nachhaltigen und klimaschonenden Prozessen zwar nicht allein bewältigen, ist aber ein entscheidender Baustein für diese Entwicklung. [10]

Das Ziel dieses Leitfadens ist es, Planenden sowie allgemein an Holzbauprojekten Beteiligten und Interessierten aufzuzeigen, welche Überlegungen und Massnahmen erforderlich sind, um ein Neubauprojekt aus Holz kreislauffähiger zu planen. Der Holzbau soll als kreislauffähige Bauweise etabliert und gestärkt werden und auch in Zukunft eine führende Rolle hinsichtlich der Nachhaltigkeit spielen.

1.3 Methode

Es werden Grundlagen zusammengetragen, welche die Kreislauffähigkeit von Gebäuden beeinflussen. Mittels Literaturrecherche wird das Konzept der Kreislaufwirtschaft eruiert und auf das Bauwesen übertragen. Es werden existierende Methoden zur Messbarkeit der Zirkularität aufgegriffen und Labels und Normen studiert, um festzustellen, wie die Kreislauffähigkeit von Bauwerken beurteilt werden kann. Diese Aspekte werden anschliessend auf die drei Ebenen des Holzbaus – Gebäude, Bauteilelement und Material – sowie ebenenübergreifende Themen – Verbindungsmittel und Dokumentation – übertragen.

Die Erkenntnisse stammen aus der Literatur, aus Projekterfahrungen, Workshops, Untersuchungen und weiteren Recherchen am Markt.

1.4 Rahmenbedingungen und Abgrenzung

Im Leitfaden werden Planungs- und Realisierungsmassnahmen hinsichtlich ihrer Rückbaubarkeit und ihres Potenzials zur Wiedereinführung in Kreisläufe untersucht. Der Schwerpunkt liegt auf der Planung neuer Holzgebäude. Umbauten und Rückbauten des heutigen Bestands werden nur insoweit betrachtet, als daraus Erkenntnisse für eine bessere Planung von Neubauten gewonnen werden können. Das Planen mit Re-Use-Bauteilen ist nicht Bestandteil des Leitfadens.

Für den Leitfaden wird kein Anspruch auf Vollständigkeit hinsichtlich der Vielfalt heutiger Gebäude erhoben. Die Autorenschaft konzentriert sich auf generelle Massnahmen für die Planung von Neubauten sowie auf häufig und wahrscheinlich auftretende Aspekte. Der Fokus liegt auf in der Schweiz etablierten Wand-, Dach- und Deckenaufbauten sowie dem aktuellen Stand der Technik und handelsüblichen Produkten. Teilweise wird auf Alternativen und Innovationen verwiesen.

Im Leitfaden werden die gängigsten Holzbauweisen – Rahmen- und Skelettbau – mit ihren jeweiligen Decken- und Dachsystemen behandelt. Modulbauten und Technologien mit hohem Standardisierungsgrad, die nicht dem aktuellen Stand der Technik entsprechen, werden nicht behandelt.

Die Fokussierung auf gängige Holzbausysteme erlaubt eine praxisnahe Betrachtung, wie sich etablierte Bauweisen im Sinne der Kreislauffähigkeit weiterentwickeln lassen. Im Leitfaden werden Anstösse gegeben, die bestehende Praxis mit einfach umsetzbaren Inputs zu verbessern, ohne die Gesamtstruktur zu revolutionieren.

Ökonomische Aspekte werden nur übergeordnet betrachtet; detaillierte Berechnungen sind nicht Teil des Leitfadens.

Juristische Fragen des zirkulären Bauens, insbesondere im Zusammenhang mit Re-Use-Materialien, sowie Themen wie Beschaffung, Logistik, Lagerung oder Bauteilbörsen werden nicht behandelt. Politische Rahmenbedingungen werden lediglich einleitend zur Orientierung erwähnt.

Der Leitfaden orientiert sich an den nach Swiss Timber Engineers (STE) Compact 01 [11] definierten Leistungen des Holzbaus. Weitere relevante Aspekte werden berücksichtigt, soweit sie Einfluss auf den zirkulären Holzbau haben.

Themen wie Brand-, Schall- und Wärmeschutz werden nicht vertieft behandelt. Einzelne Hinweise im Dokument ergänzen jedoch die Betrachtung. Diese bauphysikalischen Aspekte sind projektspezifisch zu beurteilen und mit den beteiligten Gewerken abzustimmen.

Den Aussagen zu Treibhausgasen und Ökobilanzen liegen hauptsächlich die gelisteten Ökobilanzdaten im Baubereich von der Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB) zu Grunde. Es wurden keine eigenen Berechnungen für Materialien vorgenommen.

1.5 Ausgangslage

Tendenzen zeigen, dass der Anteil an Holzbauten in der Schweiz und im nahen Ausland steigt. Deshalb wird auch das Rückbaupotenzial in Zukunft zunehmen [12]. Bereits heute fallen in der Schweiz jährlich insgesamt rund 1 Mio. t Altholz an, wovon rund 320'000 [13] bis 380'000 t [14] Holzabfälle aus dem Hochbau stammen. Eine grosse Menge, welche zirkulär genutzt werden sollte. Altholz aus dem Bauwesen wird aktuell zu einem grossen Teil der thermischen Verwertung zugeführt, um damit Energie zu gewinnen. Das Ziel muss es aber sein, den Baustoff Holz möglichst lange im technischen Kreislauf zu halten (vgl. 2.1 Kreislaufwirtschaft), anstatt ihn durch eine thermische Verwertung wieder in den biologischen Kreislauf zurückzuführen. Nur so kann das im Holz gespeicherte CO₂ langfristig gebunden bleiben.

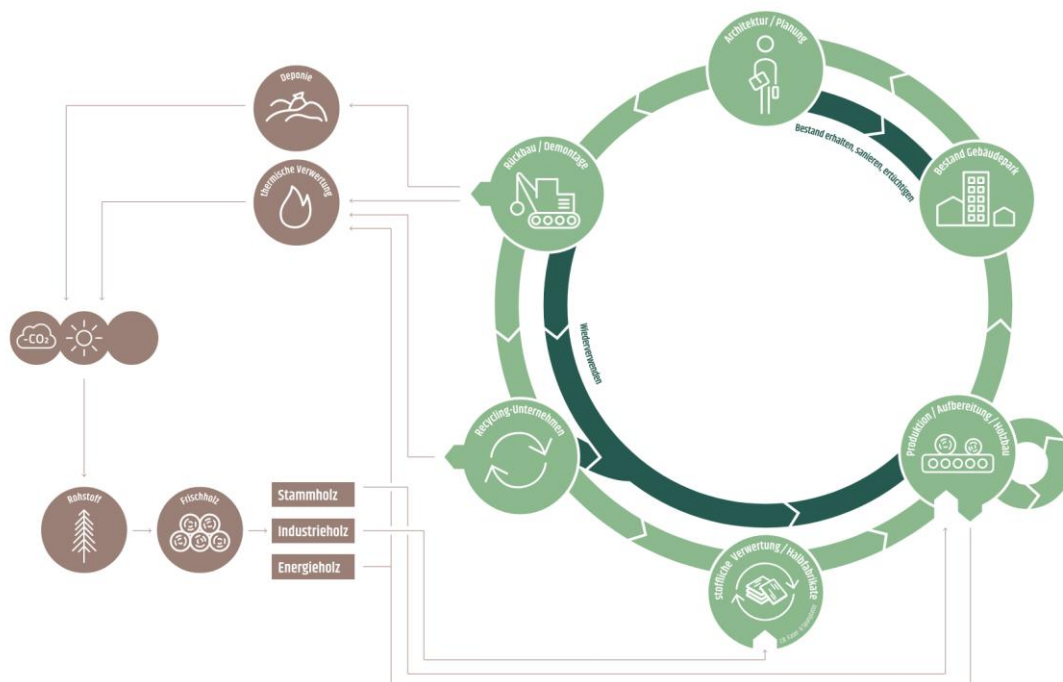


Abbildung 1: Technisch gewünschter (grün) und biologischer (braun) Kreislauf von (Alt)Holz im Bauwesen
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

Rückbauunternehmen betrachten den bestehenden Gebäudebestand zunehmend als Rohstofflager im Sinne des Urban Mining. Rückgebaute Materialien werden nicht mehr ausschliesslich als Abfall, sondern zunehmend als wiederverwertbare Ressourcen angesehen (vgl. 2.10.4 Kreislaufwirtschaft in den SIA-Normen). Der Fokus liegt dabei jedoch vor allem auf mineralischen Baustoffen, während Holz in der Praxis bislang eine untergeordnete Rolle spielt. In der etablierten Abbruch- und Entsorgungsbranche fehlen geeignete Strukturen für eine systematische Wiederverwendung von Holzbauteilen. [15] [12]

Demgegenüber bemühen sich Akteure in der Holzbaubranche, tragende und ausbaurelevante Bauteile möglichst unbeschädigt zurückzugewinnen, um sie für eine spätere Wiederverwendung aufzubereiten. Die derzeitige Marktlage wird oft als «Huhn-Ei-Problem» beschrieben: Der präzise Rückbau erfolgt selten, da die Nachfrage gering ist – zugleich fehlt ein Angebot, weil ein sorgfältiger Rückbau mit zusätzlichem Aufwand verbunden ist.

2 Grundlagen und Theorien

Im Folgenden wird die Kreislaufwirtschaft allgemein sowie ihre Anwendung im Bauwesen unter Berücksichtigung zentraler zugehöriger Konzepte vorgestellt. Darüber hinaus werden Strategien und Ansätze erläutert, welche für die Analyse und Verbesserung der Kreislauffähigkeit im Holzbau von Bedeutung sind. Die theoretischen Grundlagen werden unabhängig voneinander als Basis für das Verständnis des Leitfadens ab Kapitel 3 erklärt.

2.1 Kreislaufwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaft zeichnet sich dadurch aus, dass Rohstoffe effizient und so lange wie möglich genutzt und im Kreislauf gehalten werden [16]. Die Kreislaufwirtschaft nach Ellen MacArthur basiert auf drei Prinzipien [17]:

Das erste Prinzip lautet, Abfall und Verschmutzung zu vermeiden. Dieses Prinzip setzt bereits bei der Produktentwicklung an. Das Design von Produkten soll so gewählt werden, dass keine Abfälle entstehen. Das zweite Prinzip ist die möglichst lange Nutzung, bei der Produkte und Rohstoffe auf möglichst hohem Niveau im Kreislauf gehalten werden. Damit ist zuerst die Erhaltung des Produkts und anschliessend die seiner Komponenten und Rohstoffe gemeint. Durch Wiederverkauf, Teilen, Reparieren, Sanieren, etc. können Produkte im technischen Kreislauf gehalten werden.

Das dritte Prinzip ist die schadstofffreie Rückführung der Materialien in die Natur. So können biologische Nährstoffe unproblematisch in die Umwelt zurückgelangen und sind unbedenklich hinsichtlich des Umwelt- und Gesundheitsschutzes.



Abbildung 2: Grundsätze der Kreislaufwirtschaft
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG in Anlehnung an Ellen MacArthur Stiftung

In der Kreislaufwirtschaft wird zwischen zwei Hauptkreisläufen unterschieden. Dem technischen und dem biologischen Kreislauf. Produkte und Rohstoffe werden durch Wiederverwendung, Reparatur, Aufbereitungen, Produktionen mit Sekundärressourcen, etc. im technischen Kreislauf gehalten. Im biologischen Kreislauf werden abbaubare Materialien wieder der Natur zurückgeben, sodass erneut Ressourcen und Primärrohstoffe entstehen können.

Im vorliegenden Leitfaden wird der Schwerpunkt auf den technischen Kreislauf gelegt.

In der Kreislaufwirtschaft werden Materialien nie als Abfall verbrannt oder deponiert. Der Natur werden nur so viele Ressourcen entnommen, wie sich regenerieren können. Dabei werden Primärressourcen geschont, weniger Treibhausgase ausgestossen und graue Energie wird reduziert. Die Kreislaufwirtschaft unterstützt die Erreichung des Netto-Null-Ziels bis 2050 und schont die vorhandenen Ressourcen. Durch den Übergang der linearen zur Kreislaufwirtschaft verschiebt sich der Schwerpunkt von der Natur als Ressourcenquelle zur Nutzung von Re-Use-Bauteilen und -Materialien, die sich bereits im Nutzungszyklus befinden.

2.2 Zirkuläres Bauen in Bauwerksphasen

Die Zyklen eines Bauwerks werden in der Ökobilanzierungsnorm SN EN15804+A2:2019 (SIA 490.052+A2) in folgende Phasen eingeteilt:

- A Herstellungs- und Errichtungsphase (A1 – A5),
- B Nutzungsphase, (B1 – B7),
- C Entsorgungsphase (C1 – C4).

Diese Phasen werden in der Literatur auch Pre-Use (Herstellungs- und Errichtungsphase), Use (Nutzungsphase) und Post-Use (Entsorgungsphase) genannt.

Tabelle 1: Phasen gemäss SN EN15804+A2:2019 [18]

Herstellungsphase			Errichtungsphase		Nutzungsphase							Rückbauphase (Entsorgungsphase)			
Rohstoffbereitstellung	Transport	Herstellung	Transport	Errichtung, Einbau	Nutzung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Betrieblicher Energieeinsatz	Betrieblicher Wassereinsatz	Rückbau, Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4

Die ursprüngliche Benennung der Phasen ist stark von der linearen Wirtschaft beeinflusst. In vorliegendem Bericht wird die Entsorgungsphase in Rückbauphase umbenannt. Die Rückbauphase dient dazu, Bauteilelemente und Materialien zurückzugewinnen, um diese wieder in die Herstellungs- und Errichtungsphase zurückzuführen. Der Kreis schliesst sich, indem auf die Rückbauphase erneut die Herstellungs- und Errichtungsphase folgt. Dies sowohl beim Rückbau von einzelnen Bauwerksteilen als auch bei ganzen Gebäuden.

Um die Ziele der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen umzusetzen, sind eine ressourcenschonende und emissionsarme Erstellung, eine lange Nutzungsphase und gute Rückbaubarkeit der Bauwerke das Ziel des zirkulären Bauens.

Die Verlängerung der Nutzungsdauer von Holz hat nicht nur einen positiven Effekt auf die Ressourcenschonung, sondern sorgt auch dafür, dass der während des Wachstums von Bäumen durch Sequestrierung von CO₂ eingelagerte Kohlenstoff länger gespeichert wird.

2.3 Strukturelle Ebenen im Holzbau

Gebäude werden aus verschiedenen Teilstücken zusammengefügt. Zur Betrachtung der Kreislauffähigkeit ist eine Einteilung in verschiedene strukturelle Ebenen sinnvoll. Die fünf strukturellen Ebenen eines Gebäudes nach Graf et al. [19] umfassen die folgenden Bereiche (vgl. Abbildung 3):

- Gebäude,
- Bauteil,
- Bauelement,
- Komponente,
- Material.

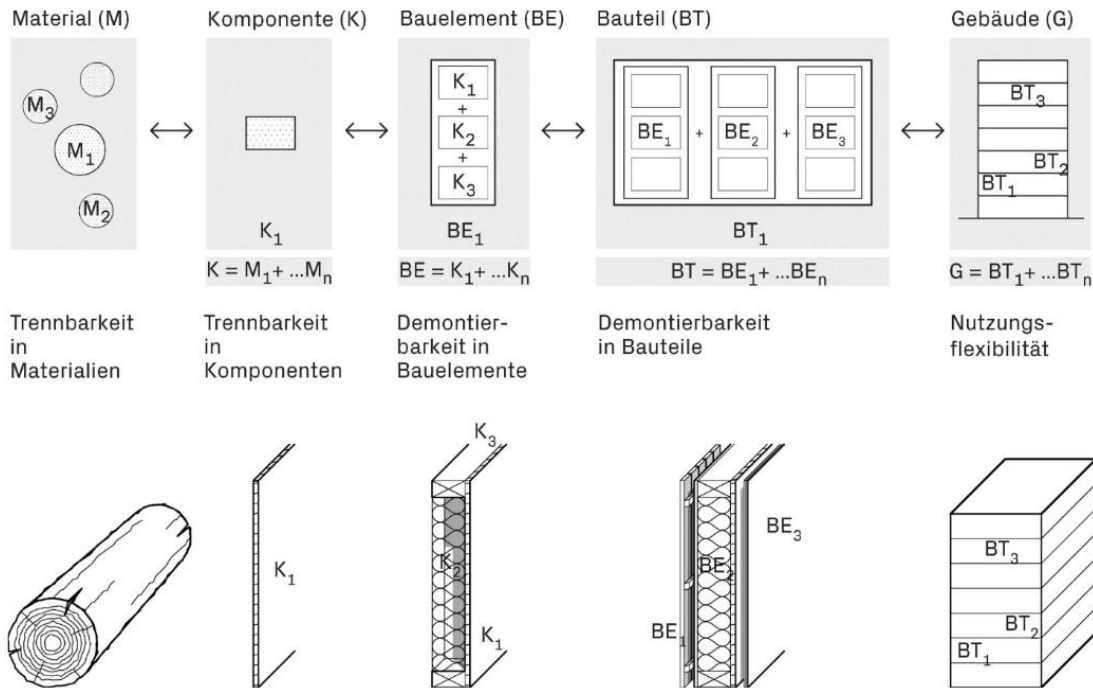


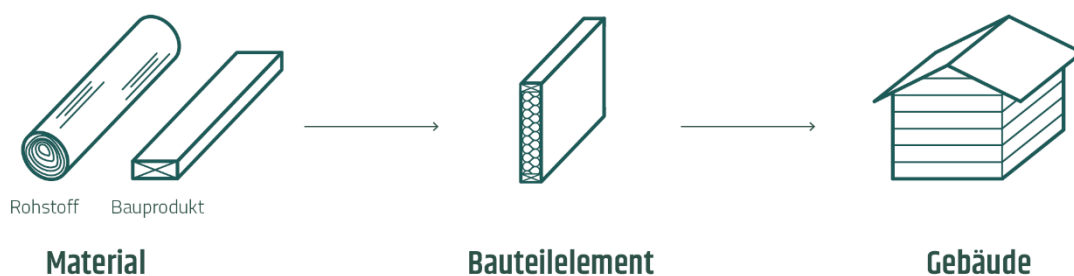
Abbildung 3: Die fünf strukturellen Ebenen im Holzbau nach Graf et al. 2024 am Beispiel der Aussenwand. [18]

Aus der Addition von Materialien (Rohstoffen) entstehen sogenannte Komponenten (Bauprodukte). Aus dem Zusammenfügen von Komponenten (Bauprodukten) entstehen Bauelemente, aus mehreren Bauelementen Bauteile und aus Bauteilen schliesslich Gebäude. Um kreislauffähig zu sein, müssen Gebäude in Bauteile und Bauteile in Bauelemente zerstörungsfrei demontierbar sein. Werden Bauelemente in die kleinere Einheit der Komponenten (Bauprodukte) und Komponenten (Bauprodukte) in Materialien (Rohstoffe) aufgelöst, so spricht man von einer «sortenreinen» Trennbarkeit.

Für den Leitfaden kreislauffähiger Holzbau wird eine analoge Struktur verwendet, jedoch vereinfacht auf drei Stufen und die Benennungen an Schweizer Gegebenheiten angepasst.

- Material (Rohstoffe und Bauprodukte)
- Bauteilelemente
- Gebäude

Was Graf et al. als Material bezeichnen, entspricht im Leitfaden dem Rohstoff. Komponenten entsprechen Bauprodukten. Rohstoffe und Bauprodukte werden zur Gruppe Material zusammengefasst. Bauteilelemente bestehen aus einem oder mehreren Materialien und werden als Einheit zur Montage auf die Baustelle geliefert. Ein Gebäude besteht schliesslich aus mehreren Bauteilelementen.

Abbildung 4: Strukturelle Ebenen im Holzbau
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

Wenn im Leitfaden von einem Bauteil die Rede ist, dann ist damit ein Zusammenschluss mehrerer Bauteilelemente gemeint, welcher aber noch nicht einem Gebäude entspricht. Ein Beispiel ist eine Wand, die aus mehreren vorgefertigten Bauteilelementen besteht. Der Begriff ist für die Lesbarkeit und die Verständlichkeit wichtig. Für die Zirkularität hingegen ist die Gliederung in Gebäude, Bauteilelement und Material relevant.

2.4 Rückbaubarkeit

Die Rückbaubarkeit beschreibt, wie gut sich ein Gebäude am Ende seiner Nutzungsdauer demontieren und in einzelne Teile zerlegen lässt und wie gut sich die Bauteilelemente sowie die Materialien sortenrein zurückgewinnen lassen, um sie erneut in den Kreislauf einzubringen. «Sortenrein» bedeutet, dass ein Bauteilelement oder ein Material so frei von Fremd- und Störstoffen ist, dass es wieder in den gewünschten technischen oder biologischen Kreislauf zurückgeführt werden kann.

Die Rückbaubarkeit wird unter anderem durch die Demontier- und Trennbarkeit beeinflusst.

Demontierbarkeit bezieht sich darauf, wie gut ein Gebäude oder ein Gebäudeteil in Bauteilelemente (vgl. 2.3 Strukturelle Ebenen im Holzbau) zerlegt werden kann. Die Demontage ist das Gegenteil der Montage. Das Ergebnis der Demontage sind zerstörungsfrei freigelegte Bauteilelemente.

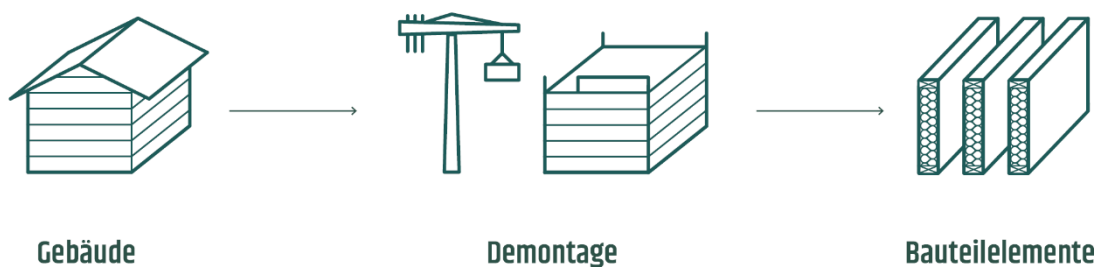


Abbildung 5: Demontierbarkeit
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

Die Trennbarkeit ist Teil einer feineren Gliederung und bezieht sich darauf, ob sich die Materialien, sortenrein aus den Bauteilelementen separieren lassen.

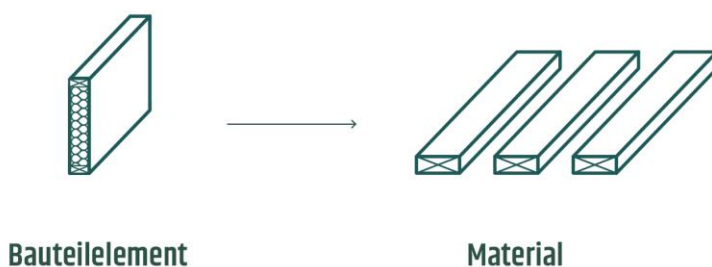


Abbildung 6: Trennbarkeit
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

Sowohl die Demontierbarkeit als auch die Trennbarkeit werden massgeblich durch die verwendeten Verbindungsmittel beeinflusst. Neben der Demontierbarkeit und der Trennbarkeit wird die Rückbaubarkeit auch beeinflusst von der Systemtrennung (vgl. 2.8 Systemtrennung - Scherschichten Modell), der Zugänglichkeit (vgl. 3.1.2 Zugänglichkeit), sowie der Auffindbarkeit (vgl. 3.4 Bauwerksdokumentation), das heisst dem Wissen beziehungsweise der Dokumentation darüber, wo sich das gesuchte Element oder die gesuchte Verbindung befindet.

2.5 Rückbauorientierte Planung

Eine rückbauorientierte Planung, auch «Design for Disassembly» genannt, bezeichnet ein Entwurfs- und Planungsprinzip, Gebäude so zu konzipieren und zu errichten, dass eine bestmögliche Rückbaubarkeit (vgl. 2.3 Strukturelle Ebenen im Holzbau) erreicht wird. Das Ziel ist es, beim Rückbau Bauteilelemente und Materialien mit möglichst hoher Güte zurückzugewinnen. Die Rückgewinnung mit höchster Güte hat am wenigsten Ressourcenverluste und Abfallaufkommen zu verzeichnen. Dementsprechend ist grundsätzlich die Wiederverwendung den anderen Kreislaufstrategien vorzuziehen (vgl. 2.6 Strategien der Kreislaufwirtschaft). Bei der rückbauorientierten Planung ist die Phase C «Rückbau» bereits in der Planung der Phase A «Herstellungs- und Errichtungsphase» gemäss SN EN 15804 zu berücksichtigen.

2.6 Strategien der Kreislaufwirtschaft

Wer sich mit der Kreislaufwirtschaft befasst, stösst auf die sogenannten «R». Mit den «R» sind die englischen Wörter reduce, reuse, recycle, repair, refuse und andere gemeint, die alle auf verschiedene Weisen dazu beitragen die Zirkularität zu erhöhen. Es gibt diverse R-Konzepte, die aus einer unterschiedlichen Anzahl von «R» bestehen.

Grundsätzlich werden vier Strategien definiert, welche die Kreislaufwirtschaft unterstützen [20]:

- Verengung von Ressourcenkreisläufen: Einsatz von weniger Ressourcen pro Produkt.
- Verlangsamung von Ressourcenkreisläufen: Produkte so lange wie möglich in Gebrauch halten.
- Schliessung von Ressourcenkreisläufen: Wiederverwendung, Recycling von Produkten.
- Regenerierung von Ressourcenkreisläufen: Nutzung biogener Ressourcen bei gleichzeitiger Regenerierung der natürlichen Umwelt.

Der Begriff Recycling wird sehr unterschiedlich verwendet. Wörtlich bedeutet Recycling das «Wieder-in-den-Kreislauf-Führen» (re = wieder, cycle = Kreis). In den meisten Fällen ist mit Recycling die Wiederverwertung gemeint, die Auflösung einer bestehenden Struktur und deren erneute Verarbeitung zur Erfüllung derselben Funktion – beispielsweise das Recycling von Glasflaschen, bei dem Altglas gesammelt und unter Nutzung von Sekundärressourcen zu neuen Glasflaschen verarbeitet wird. Da mehrere Strategien für die Rückführung in den Kreislauf existieren, bleibt der Begriff Recycling ohne weitere Präzisierung unklar. In diesem Bericht wird daher bewusst weitgehend auf seine Verwendung verzichtet.

Im vorliegenden Leitfaden wird zwischen Wieder- und Weiterverwendung sowie Wieder- und Weiterverwertung unterschieden. Die Wiederverwendung als höchstes Ziel bedeutet, dass etwas Vorhandenes erneut für dieselbe Funktion eingesetzt wird, ohne dessen Struktur auseinanderzunehmen. Die Weiterverwertung ist die letzte Priorität dieser vier Möglichkeiten und bedeutet, dass das Vorhandene in kleinere Einheiten zerlegt und für eine andere als die ursprüngliche Funktion aufbereitet wird.

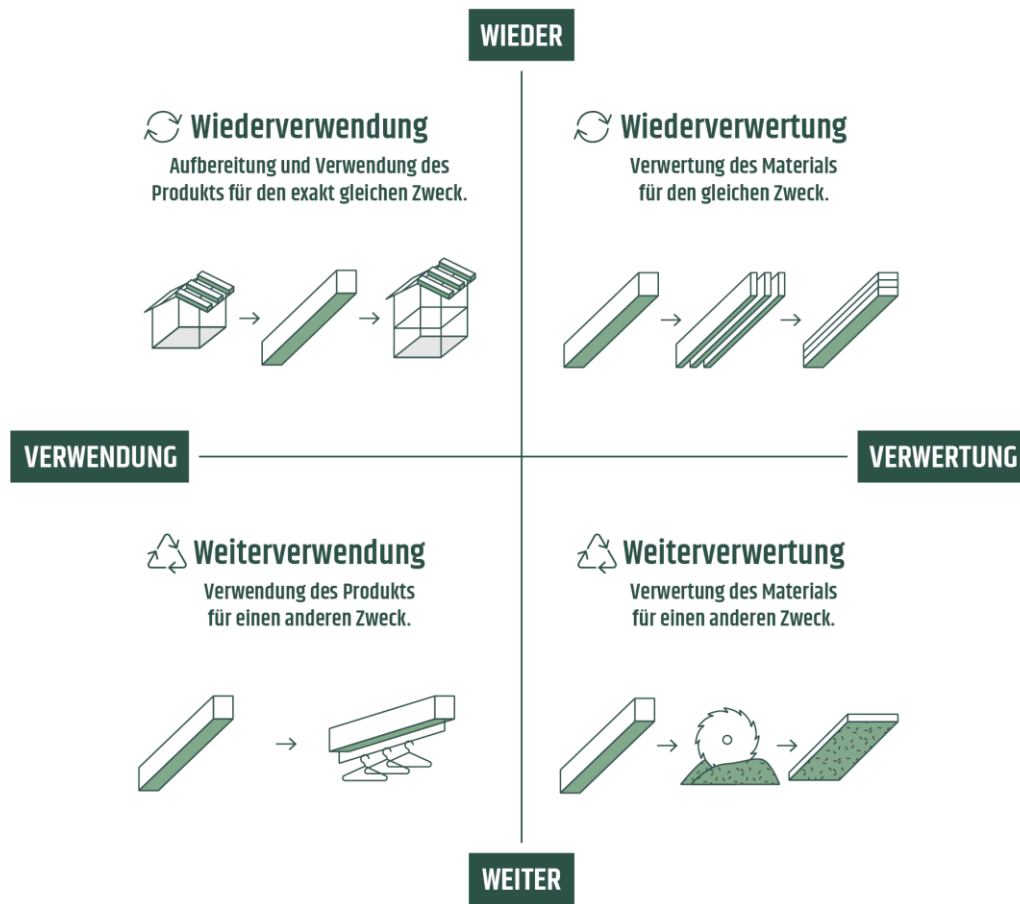


Abbildung 7: Strategien der Kreislaufwirtschaft
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

Folgende Erläuterungen und Beispiele helfen, die Begriffe konkreter zu verstehen:

Wiederverwendung:

Bauteilelement / Material behält die Struktur und wird mit gleichem Zweck wiederverwendet. Beispiel: Ein Holzbalken, der ausgebaut wurde und als Balken wiederverwendet wird.

Weiterverwendung:

Bauteilelement / Material behält die Struktur, wird zu einem anderen Zweck weiterverwendet. Beispiel: Ein Holzbalken, der ausgebaut wurde und einem neuen Zweck als Sitzbank dient.

Wiederverwertung:

Die Struktur des Bauteilelements / Materials wird aufgelöst, Bauprodukt wird zu gleichem Zweck verwertet. Beispiel: Ein Ständer aus dem Rahmenbau, der ausgebaut wurde und durch Keilzinkung zu einem neuen Ständer aufbereitet und damit wiederverwertet wird.

Weiterverwertung:

Die Struktur des Bauteilelements / Materials wird aufgelöst, Bauprodukt wird zu einem anderen Zweck verwertet. Beispiel: Ein Ständer aus dem Rahmenbau wird zu einer Spanplatte weiterverwertet.

2.7 Kaskadennutzung

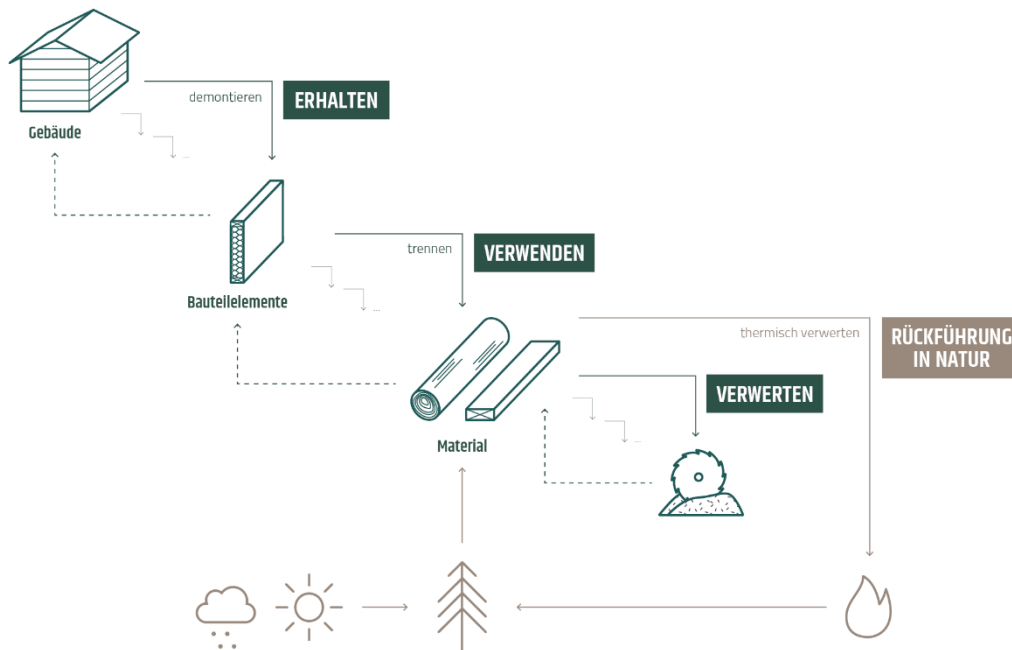


Abbildung 8: Kaskadennutzung und Kreisläufe
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

Als Kaskadennutzung wird die mehrfache Verwendung eines Rohstoffs respektive eines Produktes über mehrere Stufen hinweg bezeichnet. Dabei ist der Erhalt und der erneute Einsatz auf möglichst hoher Kaskadenstufe anzustreben.

Im Kontext des Holzbaus bedeutet das, dass in erster Linie das Gebäude, als zweites die Bauteilelemente und als drittes die Materialien zu erhalten und wieder einzusetzen sind. «Die Verarbeitung soll mit jener Verwertung beginnen, welche die höchste Wertschöpfung aufweist, ökologisch den grössten Nutzen stiftet und die grösste Mehrfachnutzung ermöglicht.» [21]. Zum Beispiel könnte die erste Anwendung ein Bauprodukt mit Vollholzquerschnitt sein, welches in den darauffolgenden Kaskaden in Lamellen geschnitten und später als Späne weiterverarbeitet wird. Dabei ist der mehrfache Einsatz auf einer Kaskadenstufe einer tieferen Kaskade vorzuziehen. So ist es beispielsweise besser, den Holzbauständer mehrfach wieder zu keilzinken und als Ständer zu verwenden, als ihn zu zerkleinern und als Spanplatte einzusetzen. Der Übergang in eine tiefere Kaskade ist mit einer Wertminderung verbunden.

Die thermische Verwertung stellt die letzte Stufe in der Kaskadennutzung von Holz dar und soll erst erfolgen, nachdem alle stofflichen Nutzungsmöglichkeiten ausgeschöpft wurden. Die Kaskadennutzung erhöht die Wertschöpfung und senkt den Ressourcenverbrauch. Ebenfalls ein wichtiger Aspekt ist, dass bei der stofflichen Nutzung der im Holz gebundene Kohlenstoff über längere Zeit gespeichert bleibt. Bei der thermischen Verwertung wird der im Holz gebundene Kohlenstoff als CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt. Die Entwicklungen hin zur Kreislaufwirtschaft und Bioökonomie erhöhen die Nachfrage nach dem Rohstoff Holz, was eine nachhaltige und effiziente Rohstoffnutzung nach dem Kaskadenprinzip umso wichtiger macht. [4]

2.8 Systemtrennung - Scherschichten Modell

Das Scherschichtenmodell nach Stewart Brand beschreibt die Theorie, dass Gebäude aus verschiedenen Schichten bestehen. Diese übernehmen unterschiedliche Funktionen und haben verschiedene Nutzungsdauern. Aufgrund unterschiedlicher Einsatzdauern durch Verbrauch, Abnutzung sowie sich verändernder Bedürfnisse und Ansprüche sollen die Schichten unabhängig voneinander verändert, ersetzt oder eliminiert werden können. Das Ziel besteht darin, durch die Trennung der einzelnen Schichten (Systeme) die Anpassbarkeit des Gebäudes zu erhöhen und somit dessen Nutzungsdauer zu verlängern. Folgende Schichten (Systeme) sind im Modell von Stewart Brand enthalten [22]:

- Grundstück (nach Stewart Brand «Site»)
- Struktur (Tragwerk) (nach Stewart Brand «Structure»)
- Bekleidung (nach Stewart Brand «Skin»)
- Installation (nach Stewart Brand «Services»)
- Raum (nach Stewart Brand «Space Plan»)
- Ausstattung (nach Stewart Brand «Stuff»)

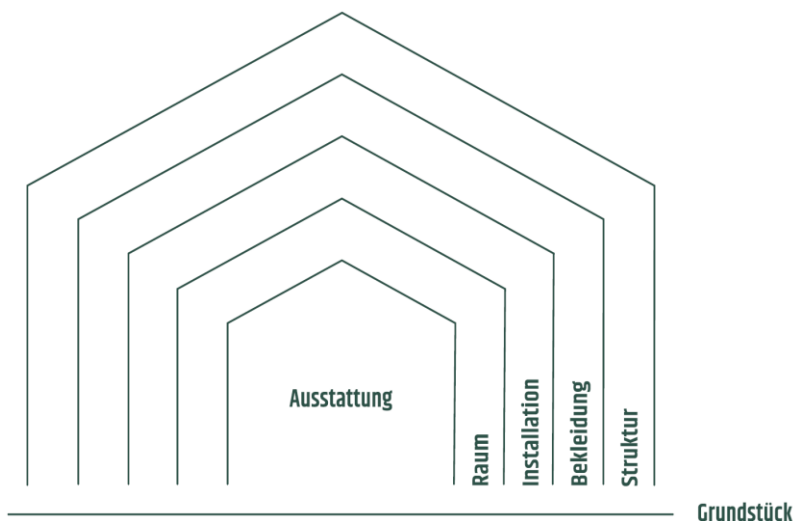


Abbildung 9: Scherschichten im Holzbau
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG in Anlehnung an Stewart Brand [22]

Analog zu den Scherschichten von Stewart Brand beschreibt der Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein (SIA) in Anhang B der Norm 2032:2020 «Graue Energie – Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden» die Systemtrennung ebenfalls dahingehend, dass Bauteilelemente mit verschiedenen Nutzungsdauern einfach voneinander trennbar sein sollen. Die Primärkonstruktion wird in der Norm der Hauptgruppe C «Konstruktion Gebäude» aus dem elementbasierten Baukostenplan Hochbau (eBKP-H) gleichgesetzt. Zu den Sekundär- und Tertiärkonstruktionen werden die Hauptgruppen D «Technik Gebäude», E «Äussere Wandbekleidung Gebäude», F «Bedachung Gebäude» und G «Ausbau Gebäude» gezählt. Die Hauptgruppen bestehen aus diversen Elementgruppen. Den Elementgruppen werden in der Norm SIA 2032:2020 in Anhang C die unterschiedlichen Amortisationszeiten zugeordnet. Besser hinsichtlich Systemtrennung ist somit nicht lediglich das Primärsystem (Hauptgruppe C) von den anderen Hauptgruppen unabhängig zu erstellen, sondern auch die Elementgruppen im Hinblick auf ihre Amortisationszeiten trenn- und austauschbar zu planen.

Tabelle 2: Vereinfachte Tabelle Amortisationszeiten nach Norm SIA 2032:2020

eBKP-H Hauptgruppen	Elementgruppen	Jahre			
		60	40	30	20
C – Konstruktion Gebäude					
	Fundamente, Bodenplatten	x			
	Aussenwandkonstruktion	x			
	Innenwandkonstruktion	x			
	Stützenkonstruktion	x			
	Geschossdecke	x			
	Dachkonstruktion	x			
	Aussen liegende Konstruktion		x		
D – Technik Gebäude					
	Elektroanlage			x	
	Wärmetechnische Anlage - Wärmeerzeugung				x
	Wärmetechnische Anlage - Erdwärmesonden		x		
	Wärmetechnische Anlage - Solarkollektoren			x	
	Lufttechnische Anlage			x	
	Wassertechnische Anlage			x	
E – Äussere Wandbeklei- dung Gebäude					
	Äussere Wandbekleidung unter Terrain	x			
	Äussere Wandbekleidung über Terrain – Äussere Beschichtung (Putz direkt auf Konstruktion)			x	
	Äussere Wandbekleidung über Terrain – Aussenwärmedäm- mung (Kompaktfassade)			x	
	Äussere Wandbekleidung über Terrain – Fassadenbekleidung (hinterlüftet)		x		
	Äussere Wandbekleidung über Terrain – Systemfassade		x		
	Äussere Wandbekleidung über Terrain – Bekleidung Untersicht		x		
	Elemente in Aussenwand – Fenster, Türen, Tore			x	
F – Bedachung Gebäude					
	Dachhaut – Dachabdichtung unter Terrain	x			
	Dachhaut – Bedachung Flachdach (Schutz-/ Nutzschrift)			x	
	Dachhaut – Bedachung geneigtes Dach		x		
	Element zu Dach – Dachfenster, Sonnenschutz			x	
G – Ausbau Gebäude					
	Trennwand, Innentür, Innentor			x	
	Bodenbelag			x	
	Wandbekleidung			x	
	Deckenbekleidung			x	

Die Scherschichten nach Brand und die Systemtrennung nach Norm SIA 2032:2020 zielen beide darauf ab, die Schichten bzw. Systeme entsprechend ihrer Nutzungsdauer zu gliedern. Durch die Trennung in eigenständige Schichten wird der Erhalt funktionstüchtiger Bauteilelemente ermöglicht, während diejenigen mit kürzerer Nutzungsdauer gezielt angepasst oder ersetzt werden können. [23]

2.9 Werterhaltungskonzept

Ein Werterhaltungskonzept ist ein strategisches Instrument zur langfristigen Sicherung und Optimierung des Immobilienwerts. Es beschreibt die geplanten Massnahmen, Investitionen und organisatorischen Vorkehrungen zur Erhaltung oder Steigerung des Wertes einer Immobilie über ihren Nutzungszyklus. Wenn eine Immobilie flexibel auf Veränderungen im Umfeld angepasst werden kann, führt dies zu langfristiger Wertstabilität. Eine langfristig wertstabile Immobilie mit stabilen Renditen ist aus wirtschaftlicher Sicht nachhaltig. [24]

Während das kreislauffähige Bauen derzeit aufgrund von erwarteten höheren Erstellungs- und Planungskosten nur punktuell umgesetzt oder nicht konsequent bis zur Erstellung verfolgt wird, ist die stabile Renditenerwirtschaftung für Investoren ein wichtiges Ziel. Dabei sind die folgenden Argumente sowohl für die Werterhaltung einer Immobilie entscheidend wie auch hinsichtlich einer zirkulären Bauweise zielführend [25]:

- Langfristig denken und bauen (Nutzungsflexibilität, Systemtrennung, Rückbaubarkeit)
- Materialeinsatz steuern (biogene Materialien, Sekundärressourcen, Ressourceneffizienz)
- Dokumentation (vgl. 3.4 Bauwerksdokumentation) und Wiederverwendung steigern.

2.10 Kriterien und Messbarkeit von Zirkularität

Zur Messbarkeit der Zirkularität von Gebäuden gibt es diverse Ansätze. Eine einheitliche Methodik ist weder in der Praxis noch in der Literatur etabliert. [26] [27]

Die Messmodelle für Gebäudezirkularität sind Konstrukte, die oft auf verschiedenen Teilberechnungen und Faktoren beruhen. Der breit anerkannte «Material Circularity Index» (MCI) der Ellen MacArthur Foundation beispielsweise bildet die Basis verschiedener Zirkularitätsindizes. [27]

Die Schwerpunkte dieser Messgrössen liegen entweder im ökologischen Bereich, beispielsweise hinsichtlich Emissionen, Ressourcenverbrauch und Stofffluss, oder im energetischen bzw. im ökonomischen Bereich. Dabei hängen die Qualität und Aussagekraft der Indizes massgeblich von den hinterlegten Daten ab. Je nach Index spielen die folgenden Einflüsse, eingeteilt in die Phasen nach SN EN15804+A2:2019 (SIA 490.052+A2, vgl. 2.2 Zirkuläres Bauen in Bauwerksphasen), in der Berechnung von Indizes eine Rolle:

- Herstellungs- und Errichtungsphase: Art der verwendeten Materialien (Bauprodukte und Ressourcen) mit dessen Herstellungsaufwänden (materielle und energetische Ressourcen und Emissionen)
- Nutzungsphase: Dauer der Nutzung und dessen Verlängerbarkeit
- Rückbauphase: Rückbaubarkeit und Aufwände dafür, Wert der rückgebauten Fragmente abhängig von den Möglichkeiten zur Rückführung in die Kreisläufe

Eine weitere Möglichkeit zur Beurteilung und Steuerung der Zirkularität eines Gebäudes bieten Gebäudelabels.

Während Indizes versuchen, die Zirkularität mit einem Wert abzubilden, werden bei der Erreichung von Labels die Kriterien nicht zu einem Index zusammengerechnet, sondern der Erfüllungsgrad der einzelnen Kriterien betrachtet.

Durch die Messbarkeit und Beurteilung der Zirkularität werden Vergleichbarkeit und Transparenz hergestellt. Dadurch werden Verbesserungen und Massnahmen zum Fortschritt der Zirkularität gefördert.

Nachfolgende Unterkapitel geben einen kurzen Einblick, über den für die Schweiz entwickelten Zirkularitäts-Indikator, das Vorgehen der Labels SNBS und Minergie ECO und die Angaben der SIA-Normen.

2.10.1 Zirkularitäts-Indikator

Der Zirkularitäts-Indikator (ZI) erstellt von einer Projektgruppe des Vereins Madaster Schweiz ist eine für Bauprojekte in der Schweiz entwickelte Messmethode [28]. Der ZI orientiert sich am internationalen «Material Circularity Indicator» (MCI) der Ellen MacArthur Foundation, wurde jedoch für die spezifischen Bedingungen und Datenverfügbarkeiten in der Schweiz angepasst.

Er gliedert sich in die drei Phasen Bauphase, Nutzungsphase und End-of-Life-Phase. Dies entspricht den SIA-Phasen A (Herstellungs-/Errichtungsphase), B (Nutzungsphase) und C (Rückbauphase). Der ZI legt den Fokus auf die Ökologie in Bezug auf den Ressourcenverbrauch und misst den Anteil der Masse in Prozent.

Die einzelnen ZI (Englisch: CI) der jeweiligen Phase werden wie folgt berechnet:

Bauphase (Inflow): Ressourceneinsatz

Der ZI der Bauphase gibt an, in welchem Umfang bei der Herstellung des Bauwerks Materialien eingesetzt werden, die nicht aus Primärrohstoffen bestehen, sondern recycelt, wiederverwendet oder aus nachwachsenden Quellen stammen.

$$CI_{Construction} = F_R + F_{RR} + F_U$$

F_R : Anteil recycelter Materialien (in % der Produktmasse)

F_{RR} : Anteil nachwachsender Rohstoffe (in % der Produktmasse)

F_U : Anteil wiederverwendeter Produkte und/oder Komponenten (in % der Produktmasse)

Nutzungsphase: Nutzungsdauerrelation

Der ZI der Nutzungsphase gibt an, wie lange die eingesetzten Materialien voraussichtlich genutzt werden können, im Verhältnis zur durchschnittlichen Nutzungsdauer¹ vergleichbarer Materialien.

$$CI_{Use} = \frac{L}{L_{av}}$$

L : Nutzungsdauer¹ des Produkts

L_{av} : Nutzungsdauer¹ eines branchenüblichen Produkts

End-of-Life-Phase (Outflow): Kreislauffähigkeit am Nutzungsende

Der dritte ZI gibt an, welcher Anteil der beim Rückbau oder bei der Renovierung anfallenden Materialien erneut verwendet, oder stofflich verwertet werden kann, anstatt als Abfall zu enden.

$$CI_{End-of-Life} = C_R \cdot E_C + C_U$$

C_R : Anteil der Materialien, die am Ende ihrer Nutzungsdauer recycelt werden können (in % der Produktmasse)

E_C : Effizienz des Recyclingprozesses in der End-of-Life-Phase (%)

C_U : Anteil der Komponenten und/oder Produkte, die am Ende ihrer Nutzung wiederverwendet werden können

2.10.2 Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz - SNBS

Der Standard für nachhaltiges Bauen Schweiz (SNBS) ist ein Werkzeug, welches vom Netzwerk für nachhaltiges Bauen Schweiz (NNBS) entwickelt wurde. Dieses Werkzeug dient der Bewertung der Nachhaltigkeit von Bauten. [29]

¹ Von der Autorenschaft zu Nutzungsdauer geändert, im Original als Lebensdauer bezeichnet.

Im Dokument «SNBS-Hochbau 2023.1» wurden Kriterien zur Bewertung der Zirkularität eingeschlossen. Die Ausrichtung der Kriterien soll einer Bevorzugung von Neubauten gegenüber Bestandsbauten entgegenwirken. In gewissen Punkten werden die Kriterien von Minergie-ECO übernommen respektive auf die Messweisen des ECO-Zusatzes von Minergie verwiesen.

SNBS nennt unter dem Thema Zirkularität und Kreislaufwirtschaft die folgenden markierten Kriterien:

Tabelle 3: Übersicht SNBS - Bereiche, Themen, Kriterien [29]

Bereiche	Themen		Kriterien	
Gesellschaft	11	Qualität der Entwicklung	111	Ziele und Pflichtenhefte
			112	Städtebau und Architektur
			113	Partizipation
	12	Angebot und Erreichbarkeit	121	Erreichbarkeit und Nutzungsangebot im Quartierumfeld
			122	Hindernisfreies Bauen
	13	Gebrauchsqualität	131	Räume sozialer Interaktion
			132	Sicherheit
	14	Wohlbefinden und Gesundheit	141	Raumluftqualität
			142	Schadstoffe und Strahlung
			143	Mikroklima
			144	Sommerlicher Wärmeschutz
			145	Winterlicher Wärmeschutz
			146	Tageslicht
Wirtschaft	21	Lebenszyklus	211	Lebenszykluskosten
			212	Bewirtschaftungsgerechte Planung und Realisierung
			213	Wiederverwendung und Systemtrennung
	22	Nutzbarkeit	221	Naturgefahren
			222	Nutzungsichte
			223	Nutzungsflexibilität und -variabilität
	23	Regionalökonomie	231	Regionale Wertschöpfung
Umwelt	31	Klimaschutz	311	Treibhausgasemissionen Erstellung
			312	Treibhausgasemissionen Betrieb
			313	Treibhausgasemissionen Mobilität
	32	Energie	321	Energiebedarf Erstellung
			322	Energiebedarf Betrieb
	33	Ressourcenschonung und Umweltschutz	331	Baustelle
			332	Ökologische Baustoffe
			333	Systematische Inbetriebnahme
			334	Energiemonitoring
			335	Mobilitätsmassnahmen
			336	Elektro-Mobilität
	34	Natur und Landschaft	341	Biodiversität
			342	Wasser
			343	Haushälterische Bodennutzung

Die unter Zirkularität und Kreislaufwirtschaft genannten Kriterien aus dem Bereich Gesellschaft sind darauf ausgerichtet, dass bedürfnisgerecht für die Bauherrschaft und das gesamte umgebende System geplant wird.

Im Bereich der Wirtschaft kommt das Werterhaltungskonzept (vgl. 2.9 Werterhaltungskonzept) zum Tragen. Zykluskosten, die sich unter anderem aus Instandsetzungs- und Erneuerungskosten zusammensetzen, sind geringer, wenn qualitativ hochwertig geplant und gebaut wird (im Sinne von langfristig und dauerhaft). Auch die Kriterien der «Wiederverwendung und Systemtrennung» beeinflussen die Zykluskosten in gleichem Sinne. Darüber hinaus wird durch die Konzepte der «Wiederverwendung und Systemtrennung» der Wert eines Gebäudes am Ende eines Nutzungszyklus massgebend beeinflusst. Wiederverwendung und Systemtrennung werden durch die Messgrößen der Minergie-ECO-Kriterien beurteilt:

- Zugänglichkeit von Gebäudetechnik-Installationen
- Zerstörungsfreie Rückbaubarkeit (Design for Disassembly)
- Wiederverwendung von Bauteilelementgruppen
- Materialdokumentation

Das Kriterium der «Nutzungsflexibilität und -variabilität» geht über die Anpassbarkeit im Sinne von Erneuerung und Instandsetzung hinaus und misst, wie gut das Gebäude neuen Nutzungen angepasst werden kann.

Die Kriterien «Ökologische Baustoffe» und «Wasser» zielen auf die Schonung und ökologische Nutzung der Ressourcen ab, SNBS übernimmt die Kriterien und Messweisen von Minergie-ECO.

2.10.3 Zusatz ECO zu Minergie

Minergie ist ein Label für neue oder sanierte Gebäude. Das Minergie-Label zeichnet sich durch den Komfort für die Gebäudenutzer, einen niedrigen Energiebedarf und die höchstmögliche Verwendung erneuerbarer Energien aus. Minergie besteht hauptsächlich aus drei Labels: Minergie, Minergie A und Minergie P. Der Minergie-Zusatz ECO kann zu jedem dieser Labels hinzugefügt werden. Er berücksichtigt die gesundheitlichen und ökologischen Aspekte eines Baus. Dieser Label-Zusatz ist ein Kooperationsprojekt zwischen den Vereinen Minergie und ecobau. [30]

Der Vorgabekatalog «Zusatz ECO Nachweisversion 2023.1» listet unter dem Bereich Ökologie beim Thema Gebäudekonzept und Kreislaufwirtschaft analoge Kriterien wie SNBS auf, mit den gleichen Zielen:

- Anstreben einer langen Gebäudenutzungsdauer durch Erweiterungsmöglichkeiten, Nutzungsflexibilität und Zugänglichkeit von Installationen,
- Wiederverwendung von Bauteilelementen und Baumaterialien,
- Rückbaufähigkeit durch lösbare Befestigungen und Systemtrennung,
- Verwendung von ressourcenschonenden Sekundärressourcen und in den Kreislauf rückführbare Materialien und Baustoffe.

Tabelle 4: Kriterien aus dem Bereich Ökologie des ECO-Vorgabekatalogs [30]

Gebäudekonzept und Kreislaufwirtschaft	
220-01	Erweiterungsmöglichkeiten
220-02	Nutzungsflexibilität
220-03	Zugänglichkeit von gebäudetechnischen Installationen, Maschinen und Grossgeräten
220-04	Zirkularität
220-05	Montage- Und Abdichtungsarbeiten (A)
220-06	Rückbaufähigkeit
220-07	Schwer trennbare Kunststoffbeläge und -abdichtungen
220-08	Organisch-mineralische Verbundmaterialien
220-09	Recyclingbeton: Mindestanforderung (Neubau) (A)
220-10	Recyclingbeton: Konstruktionsbeton mit erhöhtem Gehalt an RC-Material
220-11	Recyclingbeton: Füll-, Hüll- und Unterlagsbeton mit erhöhtem Gehalt an RC-Material
220-50	Recyclingbeton: Mindestanforderung (Erneuerung)

Neben dem Zusatz ECO stellt ecobau verschiedene, unterstützende Hilfsmittel für das zirkuläre Bauen zur Verfügung:

- Leitfaden Potenzialanalyse zirkuläres Bauen – Zur Erhebung des Potenzials zur Wiederverwendung [31]
- Gebäudecheck ecobau – Fokussiert auf Schadstoffe und Wiederverwendung von Bauteilelementen [32]
- Methodik Baumaterialien – mit Angaben zur Entsorgung respektive Rückführung in den Kreislauf [33]

2.10.4 Kreislaufwirtschaft in den SIA-Normen

Die SIA-Normen rücken zunehmend Aspekte der Nachhaltigkeit und Zirkularität in den Fokus. Im SIA-Faktenblatt [34] zum Planen und Bauen in der Kreislaufwirtschaft sind mehrere Normen aufgelistet, die Aspekte zur Kreislaufwirtschaft enthalten. Die drei aktuellsten, welche sich mit Ressourcenschonung und Emissionsreduktion befassen sind:

- SIA 390/1:2025 Klimapfad – Treibhausgasbilanz über den Nutzungszyklus² von Gebäuden
- SIA 430:2023 Vermeidung und Entsorgung von Bauabfällen und
- SIA 2032:2020 Graue Energie – Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden

Während sich die Norm SIA 390/1 und die Norm SIA 2032 auf energetische Emissionen in verschiedenen Bauwerksphasen beziehen, bezieht sich die Norm SIA 430 auf die materielle Masse hinsichtlich Abfallvermeidung und Ressourcenschonung. Die Norm besagt, dass bereits in der Projektierungsphase die Aspekte der Wiederverwendbarkeit, Trennbarkeit und die Minimierung von Abfällen zu berücksichtigen sind. Sie beeinflussen die Wahl von Baustoffen und Konstruktionsverfahren wesentlich. Abfälle sind durch den Erhalt und die Weiternutzung der bestehenden Bausubstanz sowie durch Wiederverwendung schadstofffreier Bauteile und Materialien zu vermeiden. Ist eine Wieder- oder Weiterverwendung nicht möglich, ist eine hochwertige stoffliche Verwertung anzustreben. Erst wenn auch das nicht möglich ist, sind die Reststoffe energetisch zu verwerten oder zu deponieren. Im Rahmen der Projektierung ist ein Entsorgungs- bzw. Wiederverwendungskonzept zu erarbeiten, das auch den Bauprozess selbst einschliesst. [35]

² Von der Autorenschaft zu Nutzungszyklus geändert, original als Lebenszyklus bezeichnet.

Die Norm SIA 390/1 ist ein Planungsinstrument, mit dem sich die Umwelteinwirkungen aus Erstellung, Betrieb und Mobilität über alle Planungsphasen hinweg ermitteln lassen. Der Klimapfad ist Nachfolger des Norm SIA-Effizienzpfad Energie (SIA 2040). In der Norm gelten die Treibhausgasemissionen als zentrale Leitgrösse, während der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf mit orientierenden Zielwerten verglichen werden kann. In der Norm wird aufgezeigt, dass Umbauten oft klimafreundlicher sind als Neubauten und die Wiederverwendung von Bauteilen wird gezielt gefördert. Wo ein Weiterbauen nicht möglich ist, verweist die Norm auf die Wiederverwendung. Es ist geregelt, dass wiederverwendete Bauteile in der Phase der Vorstudie und des Vorprojekts pauschal mit 20 % der Emissionen vergleichbarer Neubauteile bilanziert werden dürfen. Dieser Wert berücksichtigt durchschnittliche Aufwendungen für Ausbau, Aufbereitung und Entsorgung. [36]

Diese Bewertung unterscheidet sich von jener im Minergie-ECO-Standard, welcher wiederverwendete Bauteile mit 0 kg CO₂-Äquivalent anrechnet.

Die Norm SIA 2032 - Graue Energie – Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden legt das Verfahren zur Berechnung der grauen Energie von Gebäuden fest und ist damit zentral für die ökologische Bewertung von Baumaterialien. Zur grauen Energie gehört die Gesamtmenge nicht erneuerbarer Primärenergie, die im Bereich der Erstellung anfällt. Dabei ist die Nutzungsdauer von Gebäuden und Bauteilen von zentraler Bedeutung. [18]

3 Kreislauffähigkeit von Holzbauten

Im Kapitel 2 «Grundlagen und Theorien» wurde aufgezeigt, dass sich das Potenzial, dass ein Gebäude im Nutzungskreislauf bleibt, mit zunehmender Dauerhaftigkeit und langfristiger Planung erhöht. Um Bauten langfristig zu erhalten, müssen sie auf die Anforderungen von Nutzenden und des gesamten Systems ausgelegt werden. Dies gilt sowohl für Holzbauten als auch für andere Bauweisen. Bedürfnisse und Ziele müssen umfassend ermittelt, definiert und umgesetzt werden. Dabei ist in allen Bereichen das Prinzip der Suffizienz (vgl. Glossar) zu berücksichtigen: «So wenig wie möglich, soviel wie nötig.» [37]. Weiter müssen Immobilien für eine langfristige Nutzung mittels austauschbaren Bauteilelementen und Materialien reparierbar sein und an sich wandelnde Bedürfnisse und Systemveränderungen angepasst werden können. Dafür ist die Systemtrennung unbedingt zu beachten.

Weiter hängt die Kreislauffähigkeit von Holzbauprojekten von der Kreislauffähigkeit seiner hierarchisch untergeordneten Ebenen ab (vgl. 2.3 Strukturelle Ebenen im Holzbau). In den folgenden Kapiteln werden die Ebenen und Aspekte genauer erläutert.

Hinsichtlich Kreislauffähigkeit und rückbauorientiertem Bauen, sind Elementbauweisen gegenüber anderen Systemen im Vorteil [38]. Vorgefertigte Elemente lassen sich einfacher trennen und einer Wiederverwendung zuführen, sofern eine frühzeitig intelligente Planung mit geeigneten Verbindungsmitteln erfolgt [39]. Die Elementbauweise sowie die ortsunabhängige Vorfertigung haben sich im Schweizer Holzbau als gängige Praxis durchgesetzt.



3.1 Ebene Bauteilelemente und Systeme

Kann ein Gebäude nicht mehr weiter genutzt, erweitert oder angepasst werden, ist im Sinne der Kreislaufwirtschaft eine Wiederverwendung seiner Bauteilelemente anzustreben. Die Kreislauffähigkeit von Bauteilelementen wird von verschiedenen konstruktiven Themen beeinflusst und in den nächsten Kapiteln unter den folgenden Gesichtspunkten betrachtet:

- 3.1.1 Systemtrennung,
- 3.1.2 Zugänglichkeit,
- 3.1.3 Gleichteiligkeit,
- 3.1.4 Konstruktiver Holzschutz.

Insbesondere Bauteile, mit hohem Ressourcenverbrauch, die viel graue Energie und Treibhausgasemissionen verursachen sind so zu gestalten, dass eine Wiederverwendung in einem weiteren Zyklus einfach zu realisieren ist. Erläuterungen dazu sind unter Kapitel 3.1.5 «Fokus auf Potenzial – Emissionen und Ressourcen» zu finden.

Nebst grundlegenden konstruktiven Themen ist die Zirkularität von Bauteilelementen auch abhängig von der Wahl der Systeme, Beplankungen und Aufbauten. Nähere Aspekte und Hinweise dazu sind in den Kapiteln:

- 3.1.6 Kreislauffähigkeit Decken,
- 3.1.7 Kreislauffähigkeit Wände,
- 3.1.8 Kreislauffähigkeit Dächer.

3.1.1 Systemtrennung

Ein zentrales Prinzip der Systemtrennung (vgl. 2.8 Systemtrennung - Scherschichten Modell) ist die Unabhängigkeit des Tragwerks von allen anderen Schichten respektive Bauwerksystemen. Da für das Tragwerk mit einer deutlich längeren Nutzungsdauer zu rechnen ist als für Ausbau- oder Installations-schichten, ist seine Entkoppelung entscheidend für die Anpassungsfähigkeit und Kreislauffähigkeit des Bauwerks.

Im Holzbau lässt sich dieses Prinzip anschaulich umsetzen. Tragwerke können als eigenständige, freistehende Strukturen – etwa in Form eines Stützen-Unterzug-Systems – ausgeführt werden. Dadurch entsteht ein in sich geschlossenes System, welches durch nichttragende, flexibel austauschbare Elemente ergänzt wird. Die konsequente Trennung von Tragstruktur und raumbildenden Elementen entspricht dem Prinzip des Skelettbaus. Dadurch ist eine hohe funktionale Anpassungsfähigkeit gewährleistet: Nichttragende Innenwände können ohne Eingriff in das statische System entfernt, verschoben oder neu eingebracht werden. Damit sind Nutzungsänderungen innerhalb des Gebäudes effizient umsetzbar. Unter Berücksichtigung technischer und rechtlicher Rahmenbedingungen ist in bestimmten Fällen auch eine Anpassung der Gebäudekategorie nach SIA380/1:2016 realisierbar.

Wenn tragende und nichttragende Systeme voneinander entkoppelt werden, sind bei Umbauten in der Regel geringere Eingriffe erforderlich. Der Aufwand für Sicherheitsvorkehrungen wird reduziert, wenn für Anpassungen nicht in das tragende System eingegriffen werden muss. Eine saubere Trennung funktionaler Ebenen erleichtert zukünftige Anpassungen, Modernisierungen und den selektiven Rückbau erheblich.



Abbildung 10: Stützen-Unterzug-System
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

Die gezielte Anordnung von Erschliessungskernen, tragenden Elementen und Nasszellen erhöht die Flexibilität wesentlich. Durch eine zentrische Anordnung der Erschliessungskerne können weitere aussteifende Elemente reduziert werden. Je weniger aussteifende Wände erforderlich sind, desto freier können Raum und Fassade gestaltet werden, was zu einer höheren Flexibilität und Austauschbarkeit führt.

Werden in kleinräumigen Wohnbauten freistehende Stützen- und Unterzug-Systeme als störend empfunden, können die tragenden Elemente in die Flucht der Wände integriert werden. Die Trennung erscheint dann optisch weniger deutlich. Entscheidend ist, dass sie funktional erhalten bleibt: Das Tragwerk ist als eigenständiges System klar von Ausbau und von haustechnischen Schichten zu trennen.

Installationskonzepte für die Gebäudetechnik sind eine weitere wichtige Massnahme zur Erhöhung der Kreislauffähigkeit. Die Entkoppelung zwischen technischen und anderen Systemen lässt sich gut mit Installationsräumen wie Schächten, abgehängten Decken, Doppelböden und Vorsatzschalen umsetzen. Gebündelte Technik in Installationsräumen ist besser zugänglich, einfacher zu warten und bei Bedarf schneller anpassbar – und das, ohne in die Tragstruktur eingreifen zu müssen. Die Bündelung von Installationen in übereinander angeordnete Installationsschächten, spart zudem Material und reduziert den Aufwand bei der Verlegung.

Noch besser zugänglich sind die Installationen, wenn sie sichtbar über den Bekleidungen angebracht werden.



Abbildung 11: Installationsräume – Vorwände, zwischen Balken, Installationsschicht im Bodenaufbau
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG



Abbildung 12: Bekleidete Installationsräume
Quelle: Lukas Murer



3.1.2 Zugänglichkeit

Neben der Lösbarkeit der Verbindungsmittel (vgl. 3.3 Ebene Verbindungsmittel) ist deren Zugänglichkeit ein ebenso entscheidender Faktor für die Rückbaubarkeit von Bauteilelementen und Materialien. Verbindungen können noch so zirkulär gestaltet sein: Wenn der Zugang zu ihnen nicht gegeben ist, können sie nicht gelöst werden. [40]

Das Thema Zugänglichkeit betrifft insbesondere deckende Bekleidungsschichten, deren Hauptfunktion darin besteht, einen ästhetischen und schützenden Abschluss zu bilden, ohne dass dabei sichtbare Befestigungselemente zum Einsatz kommen. Konkret sind beispielsweise bei Wänden der Verputz und bei den Decken der Bodenaufbau zu beachten. Darunter befinden sich viele Knotenpunkte, beispielsweise Verbindungen von Deckenelementen, Verbindungen von Decken und Wandelementen, sowie zwischen Fenstertüren und Decken und Weiteres. Grundsätzlich sind es Deckschichten in Nassbauweise, welche die Zugänglichkeit zu den Verbindungen stören [37]. Am besten wäre es, nass eingebrachte Deckschichten für eine bessere Kreislauffähigkeit mit alternativen Abschlusschichten zu ersetzen. Oder es werden Lösungen entwickelt und angewendet, welche die Zugänglichkeit zu den Verbindungsmitteln erhöhen. Beispielsweise können Schraubenköpfe durch Klebeband abgedeckt werden, welches für die Freisetzung des Schraubenkopfprofils und die Lösung der Schraube abgezogen werden kann. [39]

Bodenaufbauten können mit ungebundenen Schüttungen und Trockenestrichen oder lose verlegten Beschwerungssteinen vollständig demontierbar gestaltet werden [23] [41]. Auch Doppelböden sind eine kreislauffähige Lösung. Die häufig angewendeten gegossenen Schichten wie Überbeton und Nassestriche verhindern jedoch nicht nur die Zugänglichkeit zu anderen Systemschichten und Verbindungen, sondern weisen als Material selbst auch ein geringes Wiederverwendungspotenzial auf. Mit dem Eingießen von Gebäudetechnik wird zudem die Systemtrennung missachtet und es werden Störstoffe eingebunden.



Abbildung 13: Bodenaufbau mit Trockenestrich (Buchenelemente)
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG



Abbildung 14: Doppelboden
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG



Abbildung 15: Lose Splittschüttung als Installationsebene
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG



3.1.3 Gleichteiligkeit

Eine weitere Herausforderung für die Wiederverwendung von Bauteilelementen besteht in der Vielfalt der Querschnitte, Dimensionen und Typen einzelner Bauteilelemente. Für ein hohes Wiederverwendungspotenzial sind grosse Stückzahlen gleichartiger Holzbaulemente und Holzbaumaterialien mit jeweils gleichen Querschnittsmassen und Längen entscheidend [15]. Werden Wände (innen und aussen), Stützen und Unterzüge geschossweise übereinander geplant, wird eine einfache und direkte Lastabtragung ermöglicht. Dies reduziert die konstruktive Komplexität, führt zu wiederkehrenden Knotenpunkten und so zu weniger Bauteilelement-Typen.

Ein weiterer Vorteil ist die gerasterte Planung: Einheitliche Spannweiten und standardisierte Formate reduzieren die Anzahl der Bauteilelementtypen. Die Gleichteiligkeit hat planerische wie auch logistische Vorteile, was sich auch auf die Wirtschaftlichkeit positiv auswirkt. Vereinheitlichte Elemente können einfacher wieder eingeplant, gelagert, ersetzt und wiederverwendet werden. Je regelmässiger das Raster und je weniger konstruktive Ausnahmen geplant werden, desto regelmässiger können die Details und Bauteilelemente sein, was sich positiv auf das Wiederverwendungspotenzial auswirkt.

Durch Standardisierungen im Holzbau könnte die Gleichteiligkeit von Holzbauprodukten und Bauteilelementen über Projekte hinaus umgesetzt werden, was ein grosser Vorteil wäre.

3.1.4 Konstruktiver Holzschutz

Ein dauerhaftes Gebäude in Holzbauweise erfordert einen effektiven Holzschutz. Grundsätzlich sind bei der Planung und Umsetzung des Holzbaus konstruktive Prinzipien zu beachten, um langfristige Nutzbarkeit und Kreislauffähigkeit sicherzustellen.

Um ein Holzbauteilelement am Ende seines Nutzungszyklus weiterhin statisch nutzen zu können, empfiehlt es sich, das Bauteilelement bestmöglich vor unerwünschten, herausfordernden Einflüssen zu schützen.

Bewitterte Bauteilelemente werden stärker beansprucht als unbewitterte. Umwelteinflüsse wie Temperatur, UV-Strahlung und Feuchtigkeit beeinflussen das Holz. Es kommt zu Veränderungen der Holzstruktur, was die Wiederverwendung erschweren kann [42]. Holzbauteile sind konstruktiv vor Bewitterung zu schützen, um den Nutzungszyklus zu verlängern und um möglichst weitere Nutzungskaskaden anzustreben.

Die Massnahmen des baulichen Holzschutzes werden in architektonische, konstruktive und materialtechnische Strategien unterteilt [43]. Ziel dieser Massnahmen ist es, dauerhaft eine Holzfeuchte von unter 20 % zu gewährleisten. Dadurch wird den meisten holzzerstörenden Organismen die Lebensgrundlage entzogen.

Mit architektonischen Massnahmen wie Gebäudeform, Dachausbildung, Anordnung der Balkone oder dem Einsatz von funktionalen Gestaltungselementen kann die Umweltbeanspruchung und somit die Gebrauchsklasse der Bauteile am einfachsten niedrig gehalten werden. Zu diesen Massnahmen gehören unter anderem der Fassadenschutz durch Vordächer und Vorsprünge (vgl. Abbildung 16) sowie das Vermeiden von Erdkontakt, Kontakt mit feuchten Bauteilen und Befeuchtung durch Spritzwasser (vgl. Abbildung 17).



Abbildung 16: Beispiel Vordach zum Schutz der Fassade
Quelle: Ladina Bischof

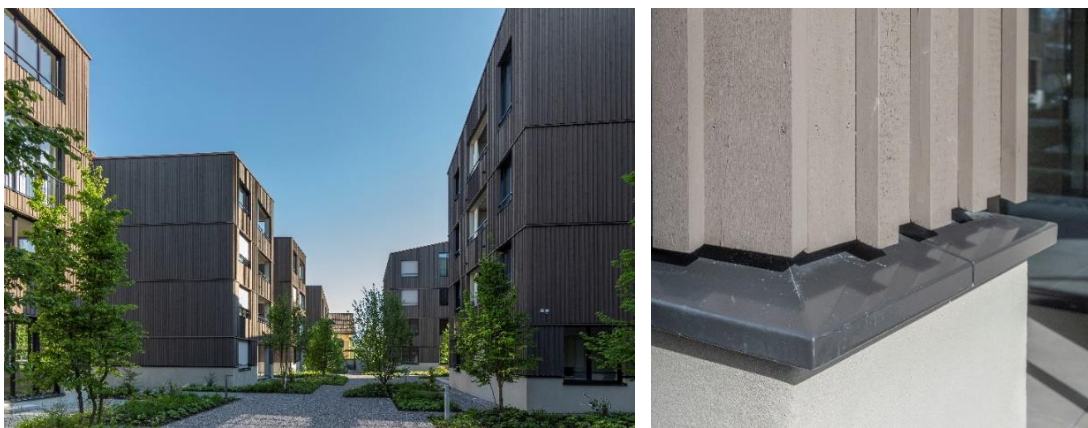


Abbildung 17: Beispiel Spritzschutz im Sockelbereich
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

Zu den Grundsätzen des konstruktiven Holzschutzes gehören das Beschleunigen des Abfließens und Abtropfens von Wasser, die Luftumspülung der Holzbauteile, das Schützen von Hirnholzchnittflächen, die Vermeidung von Rissbildung und Gewährleistung von Schwind- und Quellsbewegungen [44]. Insgesamt zielen diese Grundsätze darauf ab, den Schutz vor und die Abführung von Niederschlagswasser sowie das erneute Austrocknen durch die Luftumspülung zu gewährleisten.

Architektonische und konstruktive Massnahmen sollten für einen idealen konstruktiven Holzschutz ausgeschöpft werden. Sind diese Massnahmen ausgeschöpft, werden anhand der Gebrauchsklasse, welche durch die Exponiertheit des jeweiligen Bauteils abgeleitet wird, materialtechnische Anforderungen definiert. Diese Anforderungen richten sich an die geeignete Holzart sowie Holzwerkstoffe und deren Behandlungen. [43]

3.1.5 Fokus auf Potenzial – Emissionen und Ressourcen

Das Errichten von Gebäuden in Holz anstelle von Gebäuden aus konventionellen, mineralischen Massivbauweisen kann die CO₂-Erstellungsemissionen signifikant senken. Je nach Gebäudetyp werden Einsparungen von 8 % bis hin zu 41 % erreicht [25]. Verschiedene Studien belegen zudem, dass der Verzicht auf unterirdische Gebäudeteile zu den wirksamsten Massnahmen gehört, um Treibhausgasemissionen (THGE) und den Verbrauch grauer Energie pro Quadratmeter Energiebezugsfläche deutlich zu reduzieren [25] [45]. Auch gebäudetechnische Anlagen sowie Fenster weisen einen hohen Anteil an grauen Emissionen auf [25] [45].



Im Hinblick auf die Bauteile des Holzbaus treten insbesondere die materialintensiven Geschossdecken bezüglich Optimierungspotenzial in den Vordergrund [45]. Aufgrund ihres hohen Materialeinsatzes ist bei Geschossdecken neben der Emissionsbilanz insbesondere auch auf deren Kreislauffähigkeit zu achten. Durch die Wiederverwendung dieser Bauteile in zukünftigen Bauvorhaben lassen sich zusätzliche Emissionen vermeiden und wertvolle Ressourcen schonen.

Um die Kreislauffähigkeit dort zu steigern, wo die grössten Potenziale liegen, ist im Planungsprozess gezielt zu entscheiden, welche Bauteilelemente und Konstruktionen besonders berücksichtigt werden sollen. Dabei können folgende Überlegungen als Orientierung dienen:

- Priorisierung von Bauteilen mit hohem Ressourcenverbrauch,
- Fokussierung auf Elemente mit hohem Anteil an grauer Energie und Treibhausgasemissionen,
- Auswahl von Konstruktionsweisen, die sich technisch einfach zirkulär gestalten lassen.

Um grössere Potenziale für die Wiederverwendung und die Ressourcenschonung zu erschliessen, kann es teilweise sinnvoll sein, bewusst eine Verschleisssschicht «zu opfern». Obwohl diese Schicht beim Rückbau als Abfall anfällt, lässt sich dadurch der Erhalt grösserer, werthaltiger Bauteilelemente ermöglichen. In solchen Fällen ist sorgfältig abzuwägen, ob der Materialverlust der Verschleisssschicht durch den Gewinn kreislauffähiger Bauteile überkompensiert wird. Gleichzeitig sollte geprüft werden, ob sich für die Verschleisssschicht ein Material wählen lässt, das selbst gut in biologische oder technische Kreisläufe rückführbar ist.

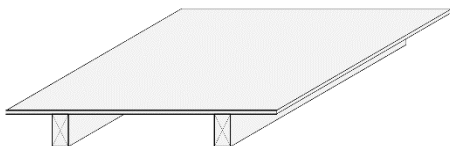
3.1.6 Kreislauffähigkeit Decken

In diesem Kapitel werden Decken ohne Bodenaufbau thematisiert. Hinweise zu Bodenaufbauten sind im Kapitel 3.1.2 «Zugänglichkeit» zu finden.

Im Holzbau kommen hauptsächlich folgende Deckensysteme zum Einsatz [46]:

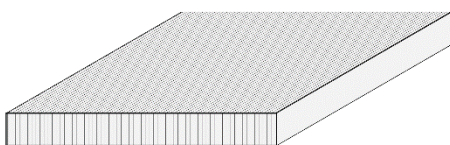
Stabförmige, beplankte Systeme

- Balkendecken

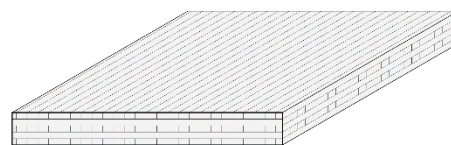


Massivholzsysteme / Vollholzdecken

- Brettstapeldecken
- Brettschichtholzdecken



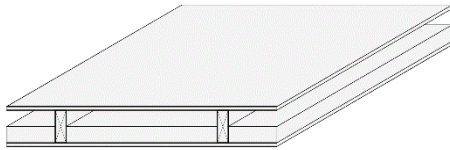
- Brettspertholzdecken





Holz-Holz-Verbundsysteme

- Rippendecken
- Hohlkastendecken



Holz-Beton-Verbundsysteme

- Holz-Beton-Verbundsysteme mit Rippen
- Holz-Beton-Verbundsysteme flächig

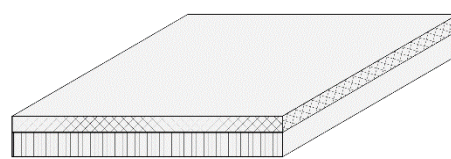
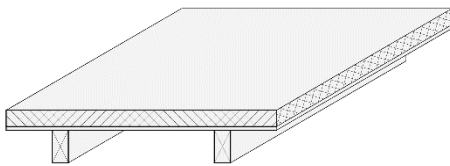


Abbildung 18: Deckensysteme in Anlehnung an Kolb [46]

Die Bauteilelemente dieser Deckensysteme werden im Werk vorgefertigt und auf der Baustelle zur Übertragung von horizontalen Lasten zu einer steifen Scheibe verbunden. Für die Demontierbarkeit von Geschossdecken in ihre ursprünglichen Bauteilelemente ist die Auswahl geeigneter Verbindungsmittel für die Aussteifung zwischen den Elementen entscheidend (vgl. 3.3 Ebene Verbindungsmittel). Für die Aussteifung können neben der Verwendung von vollflächigen Platten alternativ Verbände erstellt werden. Ein aufgeschraubtes, liegendes Fachwerk ist beispielsweise potenziell ressourcenschonender und besser rückbaubar.

Die stabförmigen, beplankten Systeme, die Massivholzsysteme und die Holz-Holz-Verbundsysteme können mit geeigneten mechanischen Verbindungsmitteln montiert werden, wodurch sie sich wieder in ihre ursprünglichen Bauteilelemente zerlegen lassen. Im Gegensatz dazu sind konventionell mit Ortbeton vergossene Holz-Beton-Verbunddecken (HBV) nur schwer in ihre ursprünglichen Elemente demontierbar. Diese Decken müssen beim Rückbau mit leistungsstarken, maschinellen Trennwerkzeugen in transportierbare Stücke zerteilt werden. Eine Wiederverwendung in ursprünglicher Form, mit dem gleichen Aufbau und gleicher Leistung ist kaum möglich. Nebst HBV-Deckensystemen, die mit Ortbeton erstellt werden, gibt es Varianten, die stärker vorgefertigt werden: Einerseits solche, bei denen Holz und Beton in einem Element vorgefertigt verbunden auf die Baustelle geliefert werden, andererseits solche, bei denen die Holz- und Betonelemente jeweils separat vorgefertigt und erst vor Ort verbunden werden. Durch HBV-Systeme mit werkseitig vorgefertigten Elementen statt mit Ortbeton kann eine bessere Demontierbarkeit erzielt werden.

Bei geeigneter Wahl der Verbindungsmittel (vgl. 3.3 Ebene Verbindungsmittel) können Deckensysteme ohne Verbund sortenrein in ihre Bauprodukte getrennt werden. Holz-Holz-Verbundsysteme wie die Rippen- und Hohlkastendecken, sind aufgrund der Verklebung von Balken und Platten hingegen deutlich schwieriger, wenn überhaupt möglich, in einzelne Bauprodukte zu zerlegen. Auch der herkömmliche



Verbund von Holz und Beton weist eine ungewisse Trennbarkeit auf, da nicht einfach mechanische Verbindungen gelöst werden können.

Es gibt Forschungsansätze und Systeme, die darauf ausgelegt sind, dass vorgefertigte Verbundelemente von Beton und Holz besser getrennt werden können [47] [48] [49]. Ein entscheidendes Element welches die Trennbarkeit von Holz und Beton beeinflusst, sind die Verbindungselemente der beiden Materialien. Bei einer Verwendung von Kerven hat die Anordnung und die Form der Kerven einen Einfluss auf die Trennbarkeit, die Zirkularität und weitere Aspekte der Nachhaltigkeit. Mikrokerven beispielsweise fordern keine zusätzlichen Schrauben in den Kervenflächen. Eine bessere Trennung der Materialien ist dadurch zu erwarten. Weiter können zudem zeitliche und materielle Ressourcen eingespart werden. [50]

Die Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die relative Demontierbarkeit und Trennbarkeit der einzelnen Deckensysteme. Mit dem Ampelfarbensystem werden von grün (beste Rückbaubarkeit) über orange bis rot (geringste Rückbaubarkeit) die relativen Vergleiche der erwarteten Rückbaubarkeit aufgezeigt.

Tabelle 5: relative Demontier- und Trennbarkeit von Deckensystemen

Deckensystem	Ausführungsart	Demontieren in ursprüngliche Elemente	Trennen in Materialien
Stabförmig beplankte Systeme	Balkendecken	Grün	Grün
Massivholzsysteme / Vollholzdecken	Brettstapeldecken Brettschichtholzdecken Brettsperrholzdecken	Grün	Grün
Holz-Holz -Verbundsysteme	Rippendecken Hohlkastendecken	Grün	Orange
Holz-Beton-Verbundsysteme	mit Beton-Elementen	Grün	Orange
	mit Ortbeton	Rot	Orange

3.1.7 Kreislauffähigkeit Wände

Rahmenbauwände und Massivholzwände sind die heutzutage am häufigsten angewendeten Wandsysteme in Holzbauweise. Der Fokus liegt auf der häufiger verwendeten Rahmenbauweise. Die Rahmenbauwände bestehen aus einem konstruktiven Ständersystem, das ausgedämmt und beidseitig beplankt wird. Auf die Beplankungen folgen Bekleidungsschichten. Die Bekleidungsschichten sind rückbaubar zu gestalten (vgl. 3.1.2 Zugänglichkeit). Bei der Aussenwandbekleidung sind hinterlüftete Fassaden, die demontiert, aufbereitet und wieder verwendet werden können, gegenüber Verbundsystemen zu bevorzugen [37].

Wandelemente werden individuell an die spezifischen Anforderungen und Gegebenheiten eines Projekts angepasst. Dabei variieren unter anderem Sturzhöhen, Fenstergrößen, Schwellen- und Geschossübergangsdetails, Ausklinkungen im Sockel- und Auflagerbereich der Decken, sowie montage-technische Anforderungen. Hinzu kommen produktionstechnische und montagespezifische Präferenzen der ausführenden Holzbaubetriebe. Diese starken Projektindividualisierungen erschweren die Wiederverwendung auf der Ebene der Bauteilelemente. Die Wahrscheinlichkeit ist tief, dass Rahmenbauwände in ihrer ur-



sprünglichen Form in einem anderen Bauvorhaben wiederverwendet werden können. Eine Wiederverwendung des kompletten Bauteilelementes würde mit einer stärkeren Standardisierung im Holzbau realistischer werden.

Vor diesem Hintergrund rückt die Trennbarkeit von Holzrahmenwänden in den Betrachtungsschwerpunkt. Rückbauversuche, die gezielt die Befestigungsmittel zwischen Beplankungen und tragender Rahmenstruktur untersuchten, haben gezeigt, dass mit dem Ziel einer Wiederverwendung von Holzrahmen und Beplankungen die Verbindung mit metallischen Klammern ungeeignet ist [51] [52]. Für eine sortenreine Trennung und mögliche Wiederverwendung der Bauprodukte sind Schrauben und Holznägel als Alternativen zu berücksichtigen [52]. Rahmenbaukanteln können durch erneute Keilzinkung und Abbund wieder zu Rahmenbaukanteln aufbereitet werden. Diese Wiederverwertung von Rahmenbaukanteln ist praktikabel, solange metallische Rückstände in den Kanteln ausgeschlossen werden können [51].

3.1.8 Kreislauffähigkeit Dächer

Zur Steigerung der Kreislauffähigkeit von Flachdächern sind dieselben Grundprinzipien wie bei Decken anzuwenden (vgl. 3.1.6 Kreislauffähigkeit Decken). Bewertungen zeigen jedoch, dass Flachdächer ohne Hinterlüftung in der Regel bezüglich Rückbaubarkeit deutlich ungünstiger abschneiden als Steildachkonstruktionen. Ursächlich hierfür sind insbesondere die bei Flachdächern erhöhten Anforderungen an die Abdichtung. Diese erfordern häufig den Einsatz von vollflächigen Verklebungen oder Verschweissungen, wodurch die einzelnen Schichten fest miteinander verbunden und damit nur eingeschränkt trennbar sind. Der Rückbau wird dadurch aufwändiger und das sortenreine Wiedergewinnen von Materialien deutlich erschwert. Es sind Systeme und Optionen zu bevorzugen, die möglichst nicht zu verkleben sind und wieder in den technischen Kreislauf zurückgeführt werden können. Lose verlegte Kunststoffabdichtungen können sehr gut wieder vom Dach entfernt und als Sekundärrohstoff erneut zu Kunststoffabdichtungen aufbereitet werden. Auch bituminöse Abdichtungen, bei denen nur die Bahnen unter sich, aber nicht die Abdichtung auf den Untergrund verschweisst werden, können wieder geschnitten und abtransportiert werden. Der Aufwand ist hier aber grösser, weil die bituminösen Abdichtungen dicker sind als Kunststoffabdichtungen. Besonders aufwändig ist das Entfernen bituminöser Dampfbremsen, welche direkt mit der Oberfläche des Dachs verklebt sind. Nicht nur Kunststoffabdichtungen auch bituminöse Abdichtungen lassen sich als Sekundärrohstoff wieder zu Abdichtungsbahnen verarbeiten.

3.1.9 Betrachtung Bauteilelemente und Systeme

Langfristig wird die Fähigkeit, Gebäude flexibel an wechselnde Nutzungsanforderungen anzupassen, zu einem entscheidenden Qualitätsmerkmal des Bauens werden. Eine konsequente Systemtrennung nach funktionalen Ebenen – Konstruktion, Technik und Bekleidungen – ist hierfür unerlässlich. Nur wenn Bauteilelemente zugänglich, lösbar und zerstörungsfrei demontierbar ausgeführt sind, können sie in künftigen Bauzyklen wiederverwendet oder hochwertig weiterverarbeitet werden. Eine solche Bauweise sichert nebst der Anpassungsfähigkeit des Gebäudes auch den Werterhalt der eingesetzten Materialien. Zirkuläres Bauen entwickelt sich zunehmend zu einer zentralen Grundlage nachhaltiger Architektur. Der verantwortungsvolle Umgang mit vorhandenen Ressourcen, insbesondere mit Holz, eröffnet dabei erhebliche ökologische und wirtschaftliche Potenziale. Holz ist unter trockenen Bedingungen und frei von holzerstörenden Pilzen und Insekten praktisch unbegrenzt haltbar; zwischen gealtertem Vollholz und neuem Holz bestehen keine relevanten Festigkeitsunterschiede.

Der Bausektor wird sich zunehmend auf konkrete regulatorische Vorgaben einstellen müssen. Genehmigungspflichten für Abbrüche, Anforderungen an die Wiederverwendung und eine zirkuläre Beschaffungspolitik werden künftig eine zentrale Rolle spielen. Unternehmen und öffentliche Auftraggeber sind



gefordert, innovative Konzepte zu fördern und den Wissenstransfer zwischen Planung, Ausführung und Rückbau gezielt zu stärken.

Für die Beurteilung der Wiederverwendung tragender Holzbauteile stehen bereits Grundlagen wie das Lignatec-Merkblatt «Wiederverwertung von Bauholz für tragende Zwecke» [42] sowie der «Leitfaden zur Wiederverwendung tragender Bauteile» aus Baden-Württemberg [53] zur Verfügung. Diese Dokumente bieten eine Grundlage, um die vorhandene Bausubstanz sachgerecht zu bewerten. Der Wert des Bestands muss erkannt werden, um Entscheidungen für den Erhalt oder die Wiederverwendung zu treffen.



3.2 Ebene Material

Die Kreislauffähigkeit von Gebäuden hängt nicht nur von der Kreislauffähigkeit ihrer Bauteilelemente und Konstruktionen, sondern auch von der ihrer Bauprodukte und Rohstoffe ab. Folgende Kriterien beeinflussen die Kreislauffähigkeit von Materialien:

- Möglichkeit der Rückführung in den technischen Kreislauf / Potenzial der Sekundärressource: Kann das Material am Ende des Nutzungszyklus wiederverwendet (erste Priorität), wiederverwertet (zweite Priorität) oder weiterverwertet (dritte Priorität) werden?
- Möglichkeit der Rückführung in den biologischen Kreislauf / Potenzial der Primärressource: Kann das Material in seinem aktuellen Zustand der Natur zurückgegeben werden (vierte Priorität)? Wie gross ist der Ressourcenvorrat? Regeneriert sich die Ressource innert nützlicher Zeit?
- Aufwände: Wie gross sind die materialtechnischen, energetischen und wirtschaftlichen Aufwendungen für die Herstellung und Rückführung in die verschiedenen Kreisläufe?

Diese Fragestellungen sind komplex und greifen ineinander. Für die Abschätzung der Herstellungsenergie von Bauprodukten und Rohstoffen kann neben den «Ökobilanzdaten im Baubereich» der KBOB- zur schnellen Orientierung auch die «Byggeriets Materialepyramide» [54] beigezogen werden. Diese Materialepyramide ermöglicht einen Vergleich des Treibhausgaspotenzials (Global Warming Potential, GWP) sowie weiterer Umwelteinwirkungen zwischen verschiedenen Materialkategorien oder Materialtypen innerhalb derselben Kategorie. Die Grundlage bilden Umweltproduktdeklarationen (EPD) gemäss EN15804 für die Herstellungsphase (A1–A3). Die Nutzungsdauer der Materialien wird dabei nicht berücksichtigt.

Die Materialepyramide bietet einen Überblick darüber, welche Materialien innerhalb der betrachteten Kategorien besonders umweltwirksam sind. Die dort aufgeführten Werte sind jedoch lediglich als Richtgrössen zu verstehen, da die tatsächlichen Umwelteinwirkungen der Bauprodukte je nach Hersteller und Verfahren variieren.

Für die Rückführung von Bauprodukten in den technischen, aber auch in den biologischen Kreislauf, ist die Behandlung mit problematischen und belastenden Holzschutzmitteln hinderlich. Für die Kreislauffähigkeit ist es ratsam, auf sämtliche chemische Behandlungen zu verzichten und dem konstruktiven Holzschutz (vgl. 3.1.4 Konstruktiver Holzschutz) grosse Beachtung zu schenken. Weitere Informationen zum Thema Holzschutz im Bauwesen bietet das Lignatec «Holzschutz im Bauwesen», auch ecobau stellt auf ihrer Website mit «ecoProdukte» ein unterstützendes Instrument zur Wahl von Bauprodukten bereit.

In den folgenden Unterkapiteln wird auf die Studie des zirkulären Materialflusses von holzbauspezifischen Materialien eingegangen [55]. Mittels einer Analyse von Gebäuden aus der Kategorie «Mehrfamilienhäuser» (MFH) wurden die treibhausgasintensivsten Materialien eruiert. Die Treibhausgasemissionen werden in Kilogramm Kohlenstoffdioxid Äquivalenz pro Quadratmeter Energiebezugsfläche (EBF) und Jahr angegeben [kg CO₂-eq/ (m² Jahr)].



Folgende Tabelle zeigt die THGE pro Quadratmeter EBF und Jahr der mengenmässig verbauten Materialien in den untersuchten Gebäuden und ist kein direkter Vergleich von Material zu Material. Daraus wird ersichtlich, welche Materialien aufgrund ihrer Einbaumenge relevant sind für THGE.

Tabelle 6: Material mit relevanten THGE [55] auf Einbaumasse bezogen

Material	kg CO ₂ -eq/(m ² Jahr) *
Stahlbeton	0.48
Gipsfaserplatte	0.48
Massivholz	0.18
Brettschichtholz	0.17
Steinwolle	0.14
Glaswolle	0.12
Dreischichtplatte	0.10

*Material mit weniger als 0.1 kg CO₂-eq/(m²Jahr) wurden nicht weiter untersucht.

Diese ermittelten Materialien wurden gemäss Verwendung im Holzbau in Schichtkategorien gegliedert, einer Materialgruppe zugeordnet [55]:

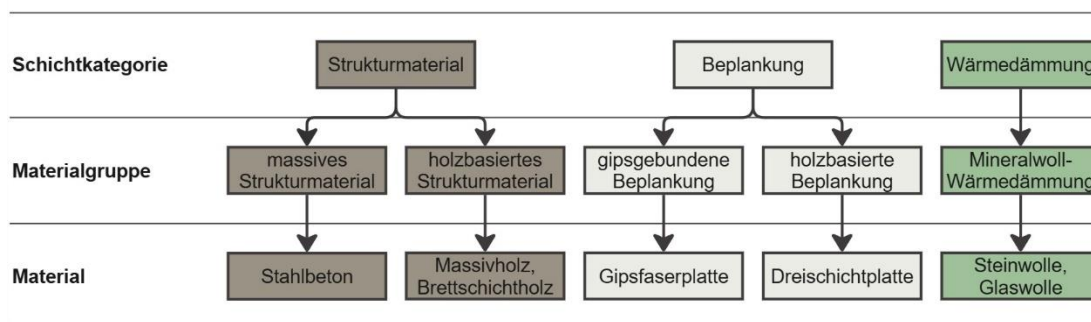


Abbildung 19: Einordnung THGE relevanter Materialien Holzbau in Schichtkategorien und Materialgruppen
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

In der Studie wurde pro Materialgruppe das jeweils THGE relevanteste Material plus ein Ersatzmaterial, welches im gleichen Kontext verwendet wird, untersucht. Im Folgenden wird nun auf die untersuchten Materialien pro Materialgruppe, eingegangen. Der Vergleich der Materialien orientiert sich an der Umsetzbarkeit der zirkulären Strategien, der Wieder- und Weiterverwendung sowie der Wieder- und Weiterverwertung (vgl. 2.6 Strategien der Kreislaufwirtschaft). Dabei erfolgt eine differenzierte Betrachtung von Materialien aus der Herstellungs- und Errichtungsphase (Phase A) einerseits und der Rückbauphase (Phase C) andererseits (vgl. 2.2 Zirkuläres Bauen in Bauwerksphasen).

Die Beurteilung der Umsetzbarkeit stützt sich auf Einschätzungen marktaktiver Unternehmen sowie auf den Stand der Technik. Einzelne Ausnahmen bleiben unberücksichtigt.

Etwa 5 % der Bauabfälle im Schweizer Hochbau entstehen in der Herstellungs- und Errichtungsphase [14]. Diese Abfälle weisen in der Regel eine hohe Sortenreinheit auf. Es handelt sich dabei meist um Verschnittreste oder ungeeignete Formate, welche eine direkte Wieder- oder Weiterverwendung erschweren. Idealerweise werden diese Materialien in den Produktionsprozess zurückgeführt und stofflich wieder- oder weiterverwertet.

Aus der Rückbauphase stammen rund 95 % der Bauabfälle im Hochbau [14]. Diese Materialien weisen in der Regel eine geringere Sortenreinheit auf. Gleichzeitig handelt es sich dabei jedoch oft um geeignete



Materialformate, was eine direkte Wieder- oder Weiterverwendung begünstigt und eine stoffliche Wieder- oder Weiterverwertung weniger naheliegend erscheinen lässt.

3.2.1 Massives Strukturmaterial

Zu den massiven Strukturmaterialien zählt Stahlbeton, der bei den Leistungen von Holzbauingenieuren in Form von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen in Decken zu finden ist. Als mögliche Alternative für den Stahlbeton in HBV-Decken, muss auf ein anderes Deckensystem gewechselt werden, welches mit Splitt beschwert wird. Dem Stahlbeton wurde deshalb die Splittschüttung als alternatives Material zugeordnet. Lose Splittschüttungen weisen die besten zirkulären Eigenschaften auf und sind im zirkulären Kontext dem Stahlbeton und elastisch gebundenen Splittschüttungen vorzuziehen. Elastisch gebundene Splittschüttungen sind bezüglich der Rückbaubarkeit mit Stahlbeton vergleichbar. Unter Berücksichtigung der Emissionen sind elastisch gebundene Splittschüttungen Stahlbeton zu bevorzugen. Eine Entwicklung mit Potenzial ist eine schwach elastisch gebundene Splittschüttung welche durch einfache mechanische Impulse wieder gelöst und dadurch gut ausgebaut werden kann. Gebundene Splittschüttungen wurden nicht betrachtet, da Sie im Holzbau aus schalltechnischen Gründen keine anwendbare Alternative darstellen und weil diese üblicherweise wiederum Bindungsmittel enthalten, die die Zirkularität und THGE-Bilanz verschlechtern. Hingegen können lose Splittschüttungen aus Sekundärmaterialien, wie beispielsweise Ziegelsplitt, zum Einsatz kommen. Werden Sekundärmaterialien eingesetzt kann die Kreislaufbilanz weiter verbessert werden. [55]

3.2.2 Holzbasiertes Strukturmaterial

Bei der Ermittlung von THGE zeigen sich Massivholz und Brettschichtholz als relevant [55]. Diese werden dem Strukturmaterial zugeordnet, welches in Vollholz bzw. geklebtes Vollholz unterteilt ist.

Tabelle 7: Übersicht Vollholz und geklebtes Vollholz

Vollholz	
Vollholz (VH)	Aus Rundholz erzeugte Schnittware mit in der Regel rechteckigem Querschnitt (Kantholz, Bohle, Brett, Latte, Doppellatte)
Geklebtes Vollholz	
Konstruktionsvollholz (KVH)	Entspricht keilgezinktem Vollholz; Bestehend aus mit Keilzinkenverbindungen in Längsrichtung verklebtem Vollholz.
Balkenschichtholz (Duo / Trio etc.)	Bestehend aus zwei bis fünf parallel miteinander verklebten Lamellen, die eine endgültige Dicke von mehr als 45mm bis einschliesslich 85mm aufweisen, und mit Gesamt-Querschnittsmassen von maximal 280mm.
Brettschichtholz (BSH)	Bestehend aus mindestens zwei parallel miteinander verklebten Lamellen, die eine endgültige Dicke von 6mm bis einschliesslich 45mm aufweisen.
Brettspertholz (BSP)	Bestehend aus mindestens drei rechtwinklig miteinander verklebten Lagen aus Brettern oder aus Holzwerkstoffen.

Die Bauprodukte aus Vollholz und geklebtem Vollholz unterscheiden sich wenig betreffend zirkulären Eigenschaften. Schnittreste aus der Herstellungs- und Errichtungsphase werden zu kleineren Produkten wie Kanthölzer weiterverwertet oder verlassen den technischen Kreislauf durch eine thermische Verwertung. Bei grösseren Querschnitten für beispielsweise Konstruktionsvollholz und Vollholz, entstehen mehr Abschnitte die für Produkte geringerer Güte wie beispielsweise Schnitzel oder Pellets verwendet werden. In der Rückbauphase werden ausgewählte Stücke in kleineren Mengen wieder- und weiterverwendet. Vollholz eignet sich in besonderem Masse zur erneuten Anwendung für statische Zwecke [42]. Nebst einer Festigkeitssortierung und einer Beurteilung auf Holzschädlinge ist dafür lediglich eine Überprüfung



auf eine frühere Behandlung mit heute nicht mehr zulässigen Holzschutzmitteln vorzunehmen [42]. Kann die geforderte Festigkeit nicht erreicht werden, kann das Holz für nicht tragende Zwecke deklariert werden. Vollholz für nicht tragende Zwecke kann ohne Einschränkungen wiederverwertet werden [42]. Gelebte Vollholzprodukte sind hinsichtlich erneuter Nutzung für tragende Zwecke komplexer in der Beurteilung. Die vorhergehende Nutzung des Bauteils beeinflusst die Eigenschaften der Klebeverbindungen. Für die Verwendung von aufbereiteten geklebten Vollholzprodukten in einer Tragstruktur ist eine umfangreiche und sorgfältige Prüfung der Bauteile unabdingbar [42]. Hinsichtlich Weiterverwertung entspricht die Produktion zur Spanplatte dem Stand der Technik.

3.2.3 Gipsgebundene Beplankung

Die Gipsfaserplatte als ein für THGE relevantes Material wurde im Vergleich mit der Alternative Gipskartonplatte auf deren Kreislauffähigkeit untersucht. Gips ist aufgrund seiner chemischen Eigenschaft grundsätzlich gut wiederverwertbar. Die hydratisierten Gipsfraktionen können unter Energiezufuhr dehydratisiert werden. Primär- wie auch Sekundärrohstoffe werden unter Zufuhr von Energie erstellt respektive wiederverwertet. Die THGE sind bei der Herstellung aus Primärressourcen und der Wiederverwertung von Sekundärressourcen in der Herstellungs- und Errichtungsphase ähnlich.

Gipsfaserplatten können ohne Separierung der Zellulosefasern und der Gipsanteile wiederverwertet werden. Bei Gipskartonplatten wird die Kartonummantelung von den Gipskernen separiert und thermisch verwertet. Besonders interessant für die Verwertung sind die Vollgips- und die Gipskartonplatten aus dem Trockenbau, denn die reinen Gipskerne können für andere Gipsprodukte weiterverwertet werden. Durch die Verwertung können die Ressource Naturgips und insbesondere auch die Abfalldeponien geschont werden. Metallische Störstoffe wie Verbindungsmittel sind im Verwertungsprozess von Gipsplatten als unkritisch zu betrachten, da diese mittels Magnetabscheider separiert werden können. Der Wiederverwertungsprozess von Gipsfaser- und Gipskartonplatten aus der Rückbauphase wird dennoch kaum umgesetzt, zum einen teilweise, weil das Sekundärmaterial durch Verputz, Fugenleim, etc. verschmutzt ist. Zum andern, weil das Primärmaterial aktuell in ausreichender Menge und günstig vorhanden ist. [56] [55]

3.2.4 Holzbasierte Beplankung

Bei den holzbasierten Beplankungen wurde als für THGE relevantes Material die OSB-Platte mit der Alternative Dreischichtplatte verglichen. Weitere Möglichkeiten wie Vollholzschalungen (beispielsweise Diagonalschalung) wurden in der Studie nicht untersucht, sind aber in der Bauplanung unbedingt als Variante zu berücksichtigen. OSB-Platten erfordern einen orientierten Dreischichtaufbau mit definierter Faser-Geometrie. Diese Geometrie kann mittels Messerring-Zerspanern durch die Verarbeitung ausschliesslich von Rundholz erreicht werden, was den Einsatz von Sekundärressourcen verhindert. Kleine OSB-Mengen werden als Verpackungsmaterial weiterverwendet oder zu Spanplatten weiterverwertet. OSB-Platten lassen sich aufgrund der mit Bindemittel versehenen Späne kaum zu Spanplatten weiterverwerten. Dreischichtplatten hingegen verhalten sich bei der Weiterverwertung ähnlich wie Bauholz. Die Weiterverwertung zu Spanplatten entspricht dem Stand der Technik. Somit ist im zirkulären Kontext die Verwendung von Dreischichtplatten derjenigen von OSB zu bevorzugen. Auch weil bei der Herstellung der OSB-Platten ca. 20% mehr Treibhausgase emittiert werden als bei der Herstellung von Dreischichtplatten. [55]

3.2.5 Mineralwoll-Wärmedämmung

Die Ermittlung der für THGE relevanten Materialien des Holzbaus zeigt auf, dass die Dämmstoffe Steinwolle und Glaswolle relevant sind. Die beiden Mineralwollen haben ähnliche zirkuläre Eigenschaften. Durch das Wiedereinschmelzen lassen sich beide Produkte wiederverwerten. Steinwolle kann mit einem Anteil von bis zu 30% wiederverwerteter Dämmung produziert werden, während der Produktion von



Glaswolle bis zu 8% wiederverwertete Dämmung hinzugegeben werden kann. Da der Anteil rezyklierter Steinwolle im Prozess höher ist, ist die Steinwolle im zirkulären Kontext der Glaswolle zu bevorzugen. [55] In der Studie des zirkulären Materialflusses wurden keine weiteren Dämmungen in den Vergleich miteinbezogen. Im Nachgang jedoch wurde zur Zellulosedämmung recherchiert, welche alternativ zu den Mineralwolldämmungen eingesetzt werden kann. [55]

Exkurs Zellulosedämmung

Die Zellulosedämmung kann ohne Aufbereitungsprozess mindestens dreimal stofflich als Dämmstoff wiederverwendet werden. Hersteller haben Absauganlagen entwickelt, welche Fremdkörper wie Schrauben, Mörtelstücke oder Kunststoffe während des Absaugens von der Zellulosedämmung trennen können. Das Absaugen und erneute Einblasen der Dämmung ist in der Praxis bereits erprobt. Zellulosedämmung zeigt somit sehr gute zirkuläre Eigenschaften [57] [58].

3.2.6 Betrachtung Material

In der folgenden Tabelle werden die Handlungen für jedes Material übersichtlich dargestellt. Die Tabelle gibt keine Auskunft über Mengen und ist somit nicht ausreichend für eine Materialwahl im zirkulären Kontext. Weiter ist zu berücksichtigen, dass keine Differenzierung zwischen endlichen und biogenen Materialien stattfindet. [55]

Tabelle 8: Übersicht der zirkulären Materialflüsse von holzbauspezifischen Materialien

	Stand der Technik		(1) Mengen irrelevant	
	Bedingt Stand der Technik		(2) Stand der Technik bei der Minderheit der befragten Unternehmen	
	Nicht Stand der Technik			

Übersicht	Wieder- verwenden		Weiter- verwenden		Wieder- verwerten		Weiter- verwerten		Thermische Verwertung		Deponieren	
	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C
Phase gemäss SN EN 15804												
Stahlbeton											(1)	
Splittschüttung												
Gebundene Splitt- schüttung (elastisch)												
Vollholz		(1,2)		(1,2)		(1,2)						(1)
Geklebtes Vollholz		(1,2)		(1,2)		(1,2)						(1)
Gipsfaserplatten						(2)						
Gipskartonplatten									(1)			
DSP												(1)
OSB-Platten			(1)				(1)					(1)
Glaswolle			(1,2)			(2)						
Steinwolle												
Zellulosedämmung												



Werden die oben genannten Materialien im Kreislauf gehalten, geschieht dies zurzeit vor allem durch Wieder- und Weiterverwertungen. Die Sekundärressource stammt hierbei oft aus der Herstellungs- und Errichtungsphase aufgrund ihrer Sortenreinheit und Herkunftsinformationen. In der Rückbauphase ist es momentan häufig kostengünstiger – so die Angaben aus den Gesprächen mit Herstellern – das Material zu deponieren, anstatt das Material zu verwerten. Eine direkte Wieder- oder Weiterverwendung des Materials aus dem Bestand ohne rückbauorientierte Planung wird wenig umgesetzt. Dies aufgrund mangelnder Sortenreinheit und Herkunftsinformation der Materialien in der Rückbauphase und ungeeignetem Restformat in der Herstellungs- und Errichtungsphase. Für eine Ressourcenschonung und Reduktion der THGE durch zirkuläres Bauen ist eine Wieder- oder Weiterverwendung der Materialien unabdingbar. Eine geeignete Materialwahl ist wichtig für die Schonung der Primärressourcen und Vermeidung von Abfallaufkommen deren Kreislauffähigkeit nicht gegeben ist und die Umwelt belasten. [55]

Für eine nachhaltige Holznutzung im Sinne der Kreislaufwirtschaft spielt auch die Wahl der Holzverarbeitung eine Rolle. Bei kleinen Querschnitten sind Massivholz und Konstruktionsvollholz gegenüber verlebten oder stark behandelten Holzwerkstoffen zu bevorzugen. Vollholzschalungen beispielsweise bieten hinsichtlich Kreislauffähigkeit eine attraktive Alternative zu OSB-Platten. Sie können als sortenreines Holzprodukt gemäss dem Prinzip der Kaskadennutzung einfacher in den technischen Kreislauf zurückgeführt werden.

Bei grösseren Querschnitten erhöht der Einsatz von Verklebungen die Ausbeute des Stammes als Baumaterial und führt dahingehend zu Materialeinsparungen bei der Produktion. Anders ausgedrückt: Werden aus dem Rundholz grosse Vollholzquerschnitte gesägt, entsteht ein grösseres Nebenproduktevolumen. Nebenprodukte können Schnitzel, Pellets und dergleichen sein, was hinsichtlich Kaskadennutzung auf einer tieferen Stufe einzuordnen ist. Auch steigt mit der Vergrösserung des Querschnitts die notwendige Trocknungszeit in der Trocknungskammer, was zusätzliche Ressourcen (Heizung) erfordert. Weiter kann durch Verklebung Markholz aus dem Produkt entfernt werden. Dies führt zu geringerer Rissbildung und höherer Tragfähigkeit, womit die Einsatzdauer des Bauproduktes verlängert wird. Hinsichtlich Nachhaltigkeit (gemessen mittels THGE) ist die Regionalität des Holzes bedeutend entscheidender als der Anteil der Verklebung.

Weitere Überlegungen über die Verwendung der Holzart sind anzustellen. Die verschiedenen Holzarten weisen unterschiedliche Eigenschaften auf und sind auch hinsichtlich Ressourcenvorrat zu beurteilen.

Die Umsetzung zirkulärer Möglichkeiten wird nicht nur durch Produkte und deren Prozessmöglichkeiten beeinflusst, sondern ist auch stark abhängig vom Engagement lokaler Unternehmen und ihrer Verwertungs- und Produktionsanlagen.

Biogene Alternativen mit lokaler Verfügbarkeit und energiearmer Herstellung gewinnen an Bedeutung. Es ist darauf zu achten, dass keine irreversiblen Verarbeitungen vorgenommen oder Zusatzstoffe eingearbeitet werden, welche die Zirkularität reduzieren. Je reiner die verwendeten Rohstoffe sind, desto besser können sie ohne Wertverlust wieder dem technischen oder biologischen Kreislauf zugeführt werden und umso höher ist ihre Kreislauffähigkeit. Beispiele für solche Materialien sind Holz, Lehm, Dämmungen aus Schafwolle oder Stroh, etc.



3.3 Ebene Verbindungsmittel

Vor dem Hintergrund des zirkulären Bauens erhalten Verbindungsmittel im Holzbau eine neue Bedeutung: Sie sind nicht mehr nur Mittel zur Kraftübertragung, sondern werden zum entscheidenden Faktor für die Rückbaubarkeit, Materialtrennung und damit Kreislauffähigkeit des gesamten Bauwerks.

Rückbaubare Verbindungen ermöglichen die zerstörungsfreie und sortenreine Rückführung von Bauteilelementen und Bauprodukten in den technischen Kreislauf. Um die Rückbaubarkeit von Verbindungsmitteln zu gewährleisten, müssen diese dahingehend gestaltet und entwickelt werden, dass plastische Verformungen vermieden werden und Schrauben vorwiegend axial statt lateral beansprucht werden. [39]

In diesem Kapitel werden Verbindungen und Verbindungsmittel zwischen Materialien sowie zwischen Bauteilelementen untersucht. Die strukturelle Bindung innerhalb von Bauprodukten (Beispiel: Verklebung der Schichten von Dreischichtplatten) wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Der Beitrag der Verbindungsmittel zum kreislauffähigen Bauen liegt nicht nur in ihrer technischen Funktion, sondern in ihrer Rolle als Schnittstelle zwischen Konstruktion, Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz. Sie entscheiden darüber, ob ein Gebäude am Ende seiner Nutzungsdauer zur Rohstoffquelle oder zum Abfallproblem wird. Für die Architektur und das Ingenieurwesen bedeutet das, beim Entwurf und in der Ausführungsplanung nicht nur die statische Funktion, sondern auch den Nutzungszyklus und die Rückbaumöglichkeit der gewählten Verbindungstechniken mitzudenken. Nur so lässt sich der Holzbau langfristig im Sinne einer zirkulären Baukultur weiterentwickeln.

Verbindungsmittel im Holzbau können in zimmermannsmässige, ingenieurmässige und geklebte Verbindungen eingeteilt werden. Die zimmermannsmässigen und ingenieurmässigen Verbindungen sind nachgiebige Verbindungen. Geklebte Verbindungen hingegen sind starr. Zimmermannsmässige «Holz-Holz-Verbindungen», weisen einen Vorteil hinsichtlich der Sortenreinheit auf. Verbindungen aus Holz bzw. mit hölzernen Verbindungsmitteln können aufgrund der Materialhomogenität im Bauteil oder Element verbleiben, ohne die Sortenreinheit zu beeinträchtigen. Dadurch gelten sie im Hinblick auf den Rückbau und Verbleib als unbedenklich.



Abbildung 20: Einteilung Verbindungsmittel im Holzbau
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

Für die rückbauorientierte Planung im Holzbau besteht eine klare Hierarchie der Verbindungstypen, die sich nach ihrer Reversibilität richtet [39]. Für die Einstufung der Rückbaufähigkeit einer Konstruktion ist



in den meisten Fällen nicht das zu verbindende Material, sondern die Art der Verbindung massgeblich. Die jeweilige Einbausituation mit den damit verbundenen Beanspruchungen und Zugänglichkeiten ist dabei für die Wahl der Verbindungsmittel relevant. Insbesondere im Holzrahmenbau, der durch einen schichtweisen Aufbau und komplexe Bauteilübergänge gekennzeichnet ist, kommt der Auswahl geeigneter Verbindungen besondere Bedeutung zu. Entscheidend ist somit weniger der Werkstoff Holz selbst, sondern die Art und Ausführung der Fügungen, da sie bestimmen, ob ein Bauteil nach der Nutzung wiederverwendet oder stofflich beziehungsweise thermisch verwertet werden kann. Verbindungen können daher weitgehend materialunabhängig betrachtet werden.

Die Einteilung der Verbindungsmittel in die folgenden Kategorien beschreibt in absteigender Reihenfolge deren Rückbaufähigkeit, wie auch die Eigenschaften der jeweiligen Verbindungstypen:

- gesteckt,
- geschraubt,
- genagelt,
- geklammert und
- geklebt.

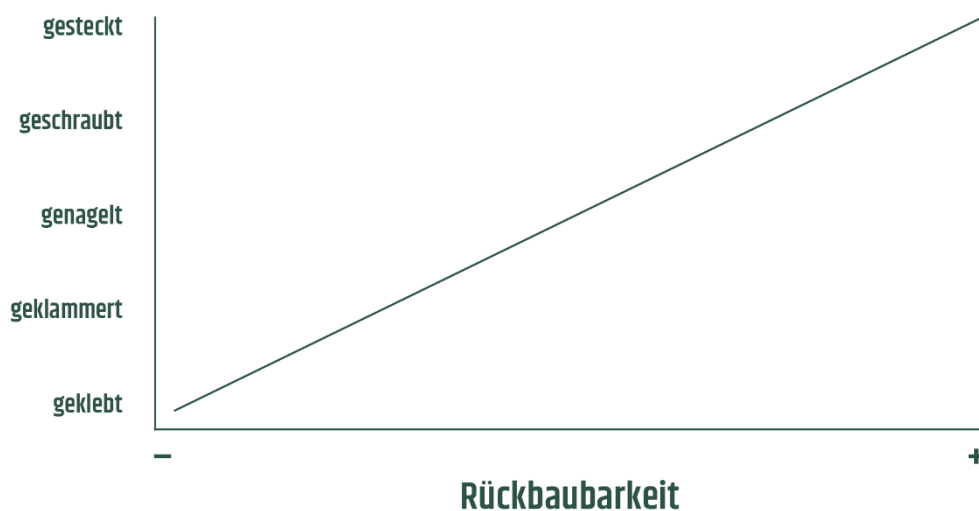


Abbildung 21: Rückbaubarkeit Verbindungsmittel
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

Bei der Konzeption einer Verbindung sind die Nutzungsklassen gemäss den Normen SIA 265 / SN EN 1995 zu berücksichtigen. Diese treffen eine Aussage über die Klimabedingungen und die zu erwartenden Ausgleichsfeuchten. Mit steigender Nutzungsklasse (abhängig von der Lage und Feuchtigkeit des Bauteils) erhöht sich die Belastung der Verbindungsmittel durch Feuchtigkeit, Korrosion und Schadstoffeintrag durch Umwelteinflüsse. Dies kann – je nach gewähltem Verbindungstyp – eine Demontage erschweren.

Im Folgenden werden die erwähnten Kategorien näher erläutert und die jeweiligen Verbindungsmittel beschrieben.



3.3.1 Verbindungstyp: gesteckt

Unter gesteckten Verbindungen werden formschlüssige Fügungen der Bauteile durch einfaches Ineinanderstecken verstanden. Dies kann durch ein separates Verbindungselement, wie beispielsweise Stabdübel, Einhängeverbinder oder Systemen wie Plattenverbindern sowie durch zimmermannsmässige Verbindungen (beispielsweise Schwalbenschwanz, Überblattungen, Versätze und andere) geschehen.



Abbildung 22: Zapfenverbindung mit Holzdübeln
Quelle: DGJ Architektur GmbH

Verbindungen sind am besten lösbar, wenn die Kraftübertragung durch Formschluss erfolgt, oder wenn sich die auftretenden Materialspannungen im elastischen Bereich bewegen. Eine allfällige konstruktive Verschraubung zur Lagesicherung kann somit weitgehend beanspruchungsfrei und demontierbar bleiben. Gesteckte Verbindungen sind hinsichtlich der Rückbaubarkeit deshalb die bevorzugte Lösung.

Gesteckte Verbindungen können zusätzlich durch die Materialisierung der Verbindungsmittel unterschieden werden. Es gibt Ausführungen, die ausschliesslich aus Holz bestehen und solche, bei denen Verbindungsmittel aus Metall zum Einsatz kommen.



Abbildung 23: Doppelschwalbenschwanz-Verbinder
Quelle: Uli Hillenbrand



Abbildung 24: Treppenversatz
Quelle: Horst Pütz



Die gesteckten Holz-Holz-Verbindungen wie Zapfen, Blätter oder Verkämmungen, die über Jahrhunderte die Zimmermannskunst prägten, zeigen sich in dieser Hinsicht als zeitgemäss. Sie kommen ohne zusätzliche Materialien aus und lassen sich bei fachgerechter Ausführung reversibel und wiederverwendbar gestalten. Die rein mechanische Verbindung von Holz mit Holz entspricht ideal dem Gedanken der Kreislaufwirtschaft. Sie erlaubt eine stofflich sortenreine Trennung und vermeidet problematische Reststoffe. Die Rückbesinnung auf solche Techniken, eventuell modernisiert durch digitale Fertigungsmethoden wie CNC-Fräsen oder robotergestützte Bearbeitung, eröffnet neue Möglichkeiten für modulare und rückbaufreundliche Holzbauten.



Abbildung 25: Überblattung
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG



Abbildung 26: Schubnocken (Wand) und Anschluss der Deckenplatte mit einem Doppelschwalbenschwanzverbinder
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG



Abbildung 27 Schwalbenschwanzverbindung
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG



Abbildung 28: Metallverbindung geschraubt
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG



Zu den gesteckten Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln zählen Bolzen und Dübel, sowie Steckverbindungen wie beispielsweise Hirnholz-, oder Schlitzblechverbindungen oder Stahl-Stahl-Verbindungen.



Abbildung 29: Bolzenverbindung
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG



Abbildung 30: Einhängeverbinder
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

Diese Verbindungselemente aus Stahl sind, wenn sie im elastischen Materialbereich eingesetzt werden, eine gute Möglichkeit, um reversible Verbindungen mit hohen Tragfähigkeiten zu erstellen. Dabei ist zu beachten, dass bei auf Abscheren konzipierte Verbindungen die Bildung von plastischen Fließgelenken oder Lochleibungsverformungen die Rückbaufähigkeit beeinträchtigen.

Hybride Lösungen von geschraubten und gesteckten Verbindungen können oft mehrmals zerstörungsfrei auseinandergenommen und wieder zusammengesteckt werden, solange Deformationen und andere Abnützungen vermieden werden.

3.3.2 Verbindungstyp: geschraubt

Die Rückbaubarkeit von geschraubten Verbindungen ist von einer Vielzahl materialtechnischer, geometrischer und umweltbedingter Faktoren abhängig.

- Die Geometrie der Schraube (Länge, Durchmesser, Gewindeart und Steigung, Kopf- und Spitzenform);
- Die Holzart sowie deren Eigenschaften (Rohdichte, Inhomogenität und Faserrichtung, Feuchtegehalt);
- Sowie Umwelt-, Standort-, Einbau- bzw. Montagebedingungen,

spielen eine Rolle und tragen mehr oder weniger zu einer erfolgreichen Rückbaubarkeit bei. Als wichtigste Einflussfaktoren zur Verbesserung der Ausdrehbarkeit werden das Vorbohren der Verbindung sowie der Korrosionsschutz der Schraube gesehen.

Aufgrund der Materialverdichtung beim Eindrehen der Schraube in das Holz steigt bei nicht vorgebohrten Schrauben das Ausschraubmoment proportional zum Einschraubmoment. Durch das Vorbohren kann



die Flankenpressung und Reibung reduziert werden, wodurch das Ausschrauben unabhängig vom Einschraubmoment wird. Dies führt gemäss Versuchen zu einer Reduzierung des Ausschraubmoments um bis zu 30%.

Die Korrosion der Schraube vergrössert den effektiven Schraubenquerschnitt. Dies erhöht den Holzdruck und die Reibung und schwächt den tragenden Schraubenquerschnitt, wodurch ein Torsionsversagen beim Ausdrehen eintreten kann.

Die Schraubengeometrie beeinflusst die Rückbaubarkeit dahingehend, dass mit zunehmender Oberfläche und Gewindelänge die Kontaktfläche mit dem Holz vergrössert wird. Das hat einen höheren Reibwiderstand und ein erschwertes ausdrehen zur Folge. [59]

In einer Studie [60] kamen verschiedene Schraubentypen mit einem Durchmesser von 8mm und Einbindelängen von 10d – 30d in Buchen-Furnierschichtholz sowie in Fichten-Brettschichtholz zum Einsatz. Die Probekörper wurden über einen Zeitraum von bis zu 6 Monaten unter konstanten klimatischen Bedingungen mit einer Luftfeuchte von 20% gelagert. Die Untersuchungen zeigten, dass in Buchen-Furnierschichtholz Schrauben mit Vorbohrung bis zu einer Länge von 240 mm, ohne Vorbohrung jedoch nur bis 80 mm lösbar sind. Ab 120 mm Einbindelänge ohne Vorbohrung trat Torsionsversagen auf. In Fichten-Brettschichtholz konnten Teilgewindeschrauben bis 380 mm problemlos gelöst werden, unabhängig von einer Vorbohrung. Bei Vollgewindeschrauben war dies nur bis 220 mm möglich.

Daraus wurde geschlossen, dass Schraubenverbindungen grundsätzlich nur als bedingt lösbar einzustufen sind, insbesondere, wenn klimatische Wechselbeanspruchungen oder Belastungen hinzukommen, welche die Lösbarkeit zusätzlich beeinträchtigen. Es konnte festgestellt werden, dass Schrauben in vorgebohrten Löchern und mit kurzen Einbindelängen grundsätzlich lösbar bleiben. Allerdings zeigte sich, dass die wiederholte Nutzung derselben Schraubenkanäle zu einer Verringerung der Ausziehtragsfähigkeit führt. Wie bei allen Verbindungsmitteln wurden auch Schrauben bisher so entwickelt, dass sie sich gut einschrauben lassen und die Anforderungen bezüglich Dauerhaftigkeit und Statik erfüllen. Mit der Demontierbarkeit kommt eine weitere Dimension hinzu. Diese wurde von den Herstellern erkannt und es sind bereits Entwicklungen dazu im Gange.

Verbindungen mit Winkeln, Lochblechen o. ä., die mit Schrauben befestigt werden, gehören zur Kategorie geschraubte Verbindungen, da die Schraube und nicht das Blech oder die Platte die Verbindungscharakteristik bestimmt [39].

Eine weitere Form geschraubter Verbindungen ist die Verbindung mit Holzbaumuffen. Diese haben ein innenliegendes metrisches Gewinde und ein aussenliegendes Holzgewinde. Die Verbindung und deren Weiterentwicklung wird als vielversprechende Alternative zu Schrauben eingestuft und kann als lösbar betrachtet werden. [60]

3.3.3 Verbindungstyp: genagelt

Diese Kategorie umfasst alle stiftförmigen Nagelverbindungen; glatte Nägel, Rillen- und Kammnägeln, Schraub- und Ankernägeln sowie Holznägeln. Glatte Nägel sind grundsätzlich mit gewissem Aufwand rückbaubar. Da sie jedoch meistens mit Nagelpistolen und Druckluftnaglern eingebracht werden, ist der Nagelkopf oft im Holz versenkt. Diese Tatsache erschwert die Rückbaubarkeit deutlich, weshalb die genagelten Verbindungen als bedingt rückbaubar einzustufen sind. Eine verbesserte Rückbaubarkeit von glatten Nägeln tritt dann ein, wenn unterlegte Platten, Winkel oder ähnliches, das Versenken des Nagelkopfs im Holz verhindern. Rillen- und Kammnägeln wie auch Schraubnägeln werden auch ohne versenkte Nagelköpfe als schwer oder nicht rückbaubar eingestuft. [39]



Als Alternative zu Rillen-, oder Kammnägeln, welche häufig zum Anschluss von Blechteilen genutzt werden, können beispielsweise Schrauben mit Kegelunterkopf zum Einsatz kommen. Durch ihren zylindrischen Unterkopf und einen grösseren Querschnitt können leistungsfähige Verbindungen mit einer reduzierten Anzahl Verbindungsmittel und erhöhter Rückbaufähigkeit ausgeführt werden.

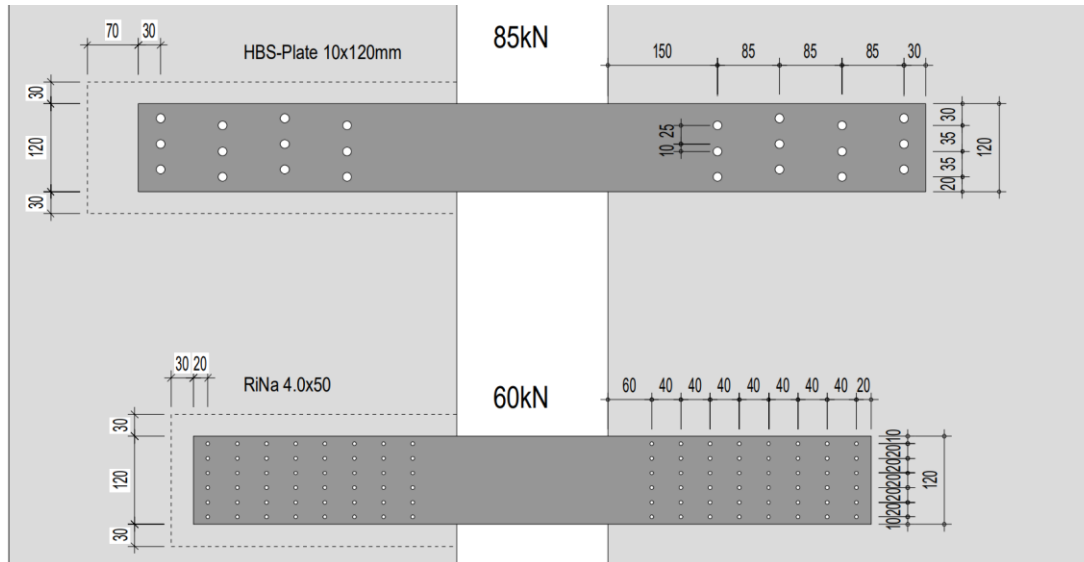


Abbildung 31: Tragfähigkeit [kN] von Schrauben mit Kegelunterkopf (HBS) versus Rillennägel (RiNa)
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

Nagelschrauben, welche zunehmend zur Befestigung von Fassadenschalungen eingesetzt werden, wurden entwickelt, um die Vorteile von Nägeln und Schrauben zu kombinieren: Wie glatte Nägel lassen sie sich mit einem Druckluftnagler zeitsparend einbringen. Erfahrungsgemäss können sie bei Bedarf durch Herausdrehen wieder gelöst werden. Systematische Untersuchungen, die klären, unter welchen Bedingungen dies tatsächlich möglich ist, liegen jedoch derzeit nicht vor. Um zu klären, ob und unter welchen Voraussetzungen ihr Einsatz zur Förderung der Rückbaubarkeit geeignet ist, muss die Ausdrehbarkeit von Nagelschrauben daher weiter untersucht werden.

Holznägel bieten für verschiedene Einsatzbereiche eine Alternative zu Nägeln aus Metall. Aufgrund ihrer Materialhomogenität ergibt sich eine vorteilhafte Einstufung bezüglich der Kreislauffähigkeit. Ihre Einordnung bezüglich der Demontagefähigkeit ist als Sonderstatus bei den gesteckten Verbindungen zu sehen. Wie bei anderen Holz-Holz-Verbindungen (beispielsweise «X-Fix») ist es möglich die Holznägel im Werkstoff zu belassen.

Holznägel werden wie andere Nägel mithilfe einer Luftnagelpistole in das Holz eingeschossen. Wie beim Schrauben entsteht durch den Einschuss des Holznagels Reibung, wodurch Lignin erwärmt wird und sich beim Abkühlen mit dem Holznagel verbindet. Die Verbindung ist nicht zerstörungsfrei rückbaubar. Die Holznägel sind als Verschleissmaterial anzusehen. Es entsteht aber eine monomaterielle Verbindung, die vorteilhaft hinsichtlich Sortenreinheit ist. Die Anwendung des Holznagels ist im Holzbau noch nicht weit verbreitet und bietet Potenzial.



Abbildung 32: Holznägel
Quelle: Raimund Beck KG [61]

3.3.4 Verbindungstyp: geklammert

Hierbei handelt es sich um Verbindungen, die durch das Einbringen von Klammern – wiederum mithilfe von Druckluftwerkzeugen – hergestellt werden. Klammern dringen in der Regel weniger tief ins Holz ein als Nägel, lassen sich jedoch aufgrund ihrer filigranen Form schwerer greifen und entfernen. Rückbauversuche haben gezeigt, dass teilweise verbleibende Stahlstifte der Klammern in den Rahmenbauanteilen eine Wiederverwertung ausschliessen. Diese Verbindungen gelten daher als nicht rückbaubar. Hinsichtlich der Zirkularität sollte, wenn immer möglich, auf Stahlklammern aufgrund ihrer mangelnden Rückbaubarkeit verzichtet werden. [51]

3.3.5 Verbindungstyp: geklebt

Geklebte Verbindungen basieren nicht auf mechanischen Prinzipien und gelten daher grundsätzlich als nicht reversible Verbindungen. Ihr Einsatz ist im Hinblick auf die Rückbaubarkeit möglichst zu vermeiden. In der Baupraxis ist der Einsatz jedoch teilweise erforderlich, da technisch gleichwertige Lösungen einen unverhältnismässig grösseren Aufwand mit sich bringen.

Ein Beispiel für eine geklebte, nicht reversible Verbindung ist ein Schlitzblech, welches mittels einem Epoxylebstoff in die Holzbauteile vergossen wird. Die Trennung der Bauteile kann lediglich unter Zuhilfenahme einer Säge erfolgen, wobei der Trennungsvorgang zerstörend ist. Eine Trennung von Blech und Holz ist nicht möglich.

Bei einem Hohlkastenelement verhält es sich ähnlich. Auch dort werden Rippen und Platten nicht trennbar miteinander verklebt. Eine Möglichkeit der Wiederverwendung besteht darin, die Deckenelemente als Ganzes wiederzuverwenden. Anstelle einer Verklebung kann beispielsweise auch ein Hakenband aus Metall zwischen Rippe und Platte vorgesehen werden, um die erforderlichen Kräfte zu übertragen.



Abbildung 33: Hakenband aus Metall
Quelle: Rothoblaas [62]

3.3.6 Betrachtung Verbindungsmittel

Es lässt sich feststellen, dass auch die Herstellerfirmen von Verbindungsmitteln die Anforderungen an Rückbaubarkeit und Nachhaltigkeit erkannt haben. Es werden kontinuierlich neue Produkte auf den Markt gebracht und bestehende Systeme hinsichtlich Demontagefreundlichkeit und Wiederverwendbarkeit weiterentwickelt.

Diese Entwicklungen verdeutlichen, dass Verbindungsmittel im Holzbau nicht nur technische Details sind, sondern zentrale Elemente für die Förderung der Kreislauffähigkeit darstellen.

Verbindungsmittel sollten daher gezielt und mit Bedacht eingesetzt werden: Nur so viele wie notwendig, und dort, wo sie konstruktiv tatsächlich gebraucht werden (vgl. Glossar Suffizienz).

Zusätzliche, aus einem subjektiven Sicherheitsbedürfnis heraus angebrachte Verbindungen, sind zu vermeiden – egal ob metallisch oder klebend. Aus ökologischer Sicht sind Holz-Holz-Verbindungen besonders interessant: Sie ermöglichen sortenreine Konstruktionen und benötigen deutlich weniger Herstellungsenergie als metallische Systeme. Es gilt, den konkreten Anwendungsfall zu berücksichtigen. In manchen Situationen – beispielsweise bei häufiger Montage und Demontage – kann der Einsatz von Metallverbindungen durchaus vorteilhaft sein, wenn dadurch die Wiederverwendbarkeit verbessert wird. Für eine Bewertung von konkreten Aufbau- und Anschlusssituationen kann der Leitfaden «Rückbauorientiert Planen und Bauen im Holzbau» mit Bewertungsschema [39] beigezogen werden.

Insgesamt zeigt sich: Wer zirkulär und ressourcenschonend bauen will, muss den Fokus auf lösbare, zugängliche und bewusst platzierte Verbindungsmittel sowie holzbaugerechte Fügungen legen. Sie sind ein Schlüssel zur Umsetzung kreislauffähiger Bauweisen im modernen Holzbau. Stiftförmige Verbindungsmittel wie Nägel, Klammern und nicht lösbare Schrauben erschweren in vielen Fällen den sortenreinen Rückbau. Zwar lassen sich diese Metallteile theoretisch entfernen, in der Praxis verbleiben sie jedoch häufig im Holz und mindern dessen Wiederverwertbarkeit. Deutlich günstiger für den Rückbau sind lösbare mechanische Verbindungen: Verschraubungen und zugängliche Bolzen, Stecksysteme, Muffen und Stahl-Stahl-Verbindungen, lassen sich demontieren und wiederverwenden. Damit entsprechen sie sowohl funktionalen als auch ökologischen Anforderungen. Für die Hersteller von Verbindungsmitteln ist eine gewisse Nachfrage nach demontierbaren Komponenten wichtig. Die Nachfrage regelt den Markt. Erst wenn eine ausreichende Nachfrage vorhanden ist, werden entsprechende Produkte entwickelt.



3.4 Bauwerksdokumentation

Die Bauwerksdokumentation stellt ein zentrales Instrument zur Sicherstellung der Qualität im Holzbau dar und sorgt am Ende der Erstellungsphase für einen geordneten Projektabschluss. Durch eine lückenlose Erfassung und Aktualisierung aller Planungs- und Ausführungsunterlagen ermöglicht sie die Überprüfung ausgeführter Standards.

Die Dokumentation startet mit der Planung in der Herstellungsphase. Auf Plänen und Dokumenten werden die Ziele und Projektrichtung festgehalten. Gerade im zirkulären Bauen ist es wichtig, dass die Ziele früh und genau formuliert und an alle Projektbeteiligten kommuniziert werden, so dass diese in den jeweiligen Projektphasen berücksichtigt werden können.

Eine einheitliche Plandarstellung für eine gemeinsame Sprache ist dabei notwendig, um den Informationsfluss zu verbessern und Missverständnissen vorzubeugen. Die Norm SIA 400 enthält Konventionen und Arbeitshilfsmittel für die Herstellung und Verwendung von Plänen im Hochbau. Sie deckt allerdings die im modernen Holzbau üblichen Bauprodukte nicht ab. Der Leitfaden von STE Compact 02 baut daher auf der Norm SIA 400 auf und ergänzt diese mit Standards für die Darstellung von Holzbauplanungen. Neben Erweiterungen von Schraffuren mit den dazugehörigen Abkürzungen, Farben sowie weitere Eigenschaften wie Festigkeiten umfasst sie auch die einheitlich präzise Darstellung verwendeter Verbindungsmittel.

Die Bauwerksdokumentation trägt zu einem effizienteren Gebäudenutzungszyklus bei. Sie fördert die nachhaltige Nutzung des Gebäudes, indem sie als Basis für Instandhaltungen, Umbauten, Aufstockungen oder Rückbauten dient. Sanierungen, Anpassungen und Änderungen am Gebäude jeglicher Art werden mit der Dokumentation vereinfacht. Werden Anpassungen am Gebäude vorgenommen, sind diese kontinuierlich in der Bauwerksdokumentation zu aktualisieren. Wechselt das Gebäude die Eigentümerschaft, müssen auch die aktualisierten Bauwerksdokumentationen übergeben werden. Schliesslich sorgt eine strukturierte Übergabe der Dokumentation an die Besitzenden für Transparenz und unterstützt diese in der zukünftigen Nutzung sowie Instandhaltung des Gebäudes.

Auch für einen potenziellen Rückbau mit dem Ziel der Wiederverwendung von Bauteilelementen und Materialien ist die Dokumentation des tatsächlich gebauten Gebäudes essenziell. Die vollständige und aktualisierte Dokumentation hilft, das Gebäude effizient als urbane Mine nutzen zu können. Sie leistet einen wichtigen Beitrag zur Auffindbarkeit der Bauteilelemente, Materialien und Verbindungsmitteln, sowie deren Zusammensetzungen, Konstruktionsprinzipien und Berechnungen.

3.4.1 Was ist zu Dokumentieren

Die Bauwerksdokumentation besteht aus verschiedenen Dokumenten, die alle relevanten Aspekte des Holzbauprojekts abdecken. Die Verantwortung für die Erstellung dieser Dokumente umfasst sowohl die planenden wie auch die ausführenden Unternehmen. Im Kontext des zirkulären Bauens ist die Dokumentation von besonderer Bedeutung, da vollständige Unterlagen eine effiziente Planung und Umsetzung von Demontage und Rückführung in technische Kreisläufe erleichtern. Für die Wiederverwendung ist die eindeutige Kennzeichnung und Beschriftung von Bauteilelementen und Bauprodukten notwendig. Die Kennzeichnungen sollten auch während und nach dem Rückbau zugeordnet werden können. Weiterführende Informationen zur Kennzeichnung und Identifikation in digitalisierten Datenstrukturen werden in Lignatec 38 «Projektentwicklung mit BIM im Holzbau» beschrieben.



Je mehr relevante Informationen zu den jeweiligen Rückbaufragmenten zugänglich sind, desto effizienter und genauer kann die Beurteilung hinsichtlich einer Wiederverwendung vorgenommen werden. Hilfreiche Informationen sind Angaben zu:

- Werk-, Produktions- und Montagepläne,
- Details,
- Rohstoffe, Bauprodukte, Zusammensetzungen, Herstellungsprozesse und Behandlungen
- Statik-Dossiers, Bemessungsnormen, Festigkeitsklassen,
- Nutzungsvereinbarungen und Leistungserklärungen,
- Unterhalts und Überwachungspläne,
- Einsatzdauer und -ort respektive Lokalisation im Gebäude,
- Vorgenommene Bearbeitungen über gesamten Zyklus (Herstellung, Errichtung, Nutzung, Rückbau) [42]

Die Bauwerksausführung ist gemäss Planung zu erstellen. Muss davon abgewichen werden, ist dies in der Dokumentation festzuhalten. Während respektive im Anschluss an die Erstellungsphase sind Revisionspläne zu erstellen, welche zusammen mit dem Gebäude an die Bauherrschaft übergeben werden. Gemäss SIA müssen beim Abschluss und der Inbetriebnahme der Realisierung eines erstellten Bauwerks Ausführungspläne und – unterlagen über Ausführungsänderungen nachgeführt werden. Die KBOB und die Interessengemeinschaft privater professioneller Bauherren (IPB) haben eine Empfehlung und unterstützende Dokumente für die Bauwerksdokumentation im Hochbau entwickelt. [63]

Insbesondere zu erwähnen ist auch die systematische Erfassung der verwendeten Verbindungsmittel. Sie erleichtert den späteren Rückbau und minimiert das Risiko von Materialverlusten. Verbindungsmittel welche eine Bearbeitung im Holz erfordern, werden in der Werkplanung eingezeichnet. Weitere, auch konstruktive, Verbindungsmittel sind in den Montageplänen zu berücksichtigen, damit diese auf der Baustelle nicht vergessen werden.

Aufgrund des hohen Vorfertigungsgrades von Bauteilelementen werden im Holzbau für die Produktion detaillierte Pläne benötigt. Dies führt zum Vorteil, dass im Vergleich zu anderen Bauweisen, im Rahmen der regulären Projektbearbeitung ohnehin ein Grossteil der benötigten Unterlagen erstellt werden. Es entsteht kein signifikanter Mehraufwand. Dieser beschränkt sich auf die strukturierte Bündelung und Archivierung der Dokumente sowie die Erstellung einer klaren Struktur für die Übergabe an die Bauherrschaft. Wird die Dokumentation frühzeitig und kontinuierlich während des Projekts gepflegt, lässt sich dieser Zusatzaufwand geringhalten. Die Vorteile – insbesondere hinsichtlich der Wiederverwendbarkeit der Bauteile und der langfristigen Werterhaltung des Gebäudes – überwiegen den Aufwand deutlich.

3.4.2 Form der Dokumentation

Die Bauwerksdokumentation muss nicht zwingend digital erfolgen. Aktualisierte, vollständige und gut geordnete analoge Unterlagen helfen ebenso. Dennoch bringt die digitale Dokumentation einige Vorteile mit sich.

Eine Möglichkeit für die Umsetzung der digitalen Dokumentation ist das Building Information Modeling (BIM). BIM steht für ein digital unterstütztes Daten- und Informationsmanagement für die Projektabwicklung im Bau und auch Betrieb von Bauwerken. Aufgrund des hohen Präzisions- und Vorfertigungsgrads eignet sich der Holzbau in besonderem Masse für die Integration dieser Methode. Im Holzbau ist eine modellbasierte Planung in der Ausführungsphase für die Vorfertigung von Holzbauteilelementen üblich. BIM ermöglicht eine vereinfachte Mengenermittlung, die Integration von Ausschreibungstexten und Kosten sowie eine transparente Dokumentation der eingesetzten Materialien.



Zudem lassen sich mit BIM frühzeitig Informationen zu verbauten Bauteilen erfassen, wodurch Rückbau, Wiederverwendung und Umnutzung erleichtert werden. Die präzise Dokumentation von Verbindungsmitteln ermöglicht es, bei einem späteren Rückbau gezielt Demontagepunkte zu identifizieren – eine zentrale Voraussetzung für zirkuläres Bauen.

Darüber hinaus können in digitalen Modellen auch Ökobilanzdaten hinterlegt werden. Produktinformationen und zugehörige ökologische Kennwerte lassen sich somit bereits in frühen Planungsphasen integrieren, was fundierte Entscheidungen im Sinne der Nachhaltigkeit begünstigt. Der Zugang zu Sekundärmaterialien wird systematisiert und verbessert. [64]

Weitere Dokumentationsmöglichkeiten sind digitale Bauproduktepässe (DPP). Diese haben den Vorteil einer zentralen Erfassung, so dass projektübergreifende Synergien entstehen.

Perspektivisch sollten Planungsstandards, Normen und digitale Tools konsequent weiterentwickelt werden, um die Rückbaubarkeit zu einem selbstverständlichen Teil des Bauprozesses zu machen.

Das Whitepaper von Bauen digital Schweiz «Digital vernetzte Bauproduktedaten als Grundlage für die Zirkularität» fasst vorhandene Grundlagen dazu zusammen. [65]

Neben spezifischen Bauprodukteinformationen für spätere Planungsphasen, Ausführung und Rückbau, werden für frühe Planungsphasen auch standardisierte generische Bauprodukteinformationen benötigt. Grundlage dazu ist die Standardisierung der entsprechenden Informationsbezeichnungen. Building smart International schlägt dazu Daten-Diktionäre vor, die je Branche erstellt und verteilt werden sollen.

4 Fallbeispiele

In diesem Kapitel werden zwei Projektbeispiele aufgezeigt, bei welchen die Kreislauffähigkeit und die rückbauorientierte Planung im Fokus war. Sie sollen einen Einblick in konkrete Massnahmen und Ausführungen geben.

4.1 Haus des Holzes

Am Hauptsitz der PIRMIN JUNG Schweiz AG, im «Haus des Holzes» in Sursee, wurden diverse Konzepte des nachhaltigen und zirkulären Bauens umgesetzt. Durch seine hochwertige Architektur, seinen minimalen energetischen Verbrauch im Betrieb und den geringen Treibhausgasemissionen in der Erstellung, ist das Haus des Holzes nachhaltig und marktfähig. Vorfabrizierte Elemente können durch lösbare Verbindungen wieder als Ganzes aus dem Bauwerk demontiert werden. Das Gebäude wird als temporäre Zusammensetzung von Bauteilelementen und Materialien gesehen, welche am Ende ihres Nutzungszyklus ihren Wert behalten. So wird das Bauwerk an seinem Nutzungsende zur urbanen Mine.

Bei der Planung des «Haus des Holzes» wurden die SIA-Planungsphasen zwar durchlaufen, jedoch nicht im klassischen Sinne. Bereits in einem frühen Stadium wurde das gesamte Projektteam zusammengestellt. Alle Ziele, Stossrichtungen und zugehörigen Planungsschritte wurden gemeinsam erarbeitet. Die Fachplanerinnen und Fachplaner erhielten auf Basis von Eignungskriterien Direktaufträge. Sie wurden aufgrund ihrer ausgewiesenen Kompetenzen und ihres innovativen Engagements ausgewählt. Das Projekt wurde gestartet und erste Erfahrungen gesammelt. Erst nach Abschluss der Vorprojektphase wurden Honorarofferten eingereicht. Dies war eine Gratwanderung zwischen Risiko und Aufwand für alle Beteiligten. Dank der frühen Teamzusammenstellung konnten viele Probleme und Aufwände vermieden werden. So waren die Ziele dem gesamten Team von Anfang an klar, wodurch beispielsweise der Gedanke an einen späteren Rückbau bei der Wahl von Verbindungsmitteln und Konstruktionen stets präsent war.

4.1.1 Bauteilelemente und Konstruktionen

Das Haus des Holzes beherbergt sowohl Büroflächen als auch Wohnungen. Für eine lange Nutzungsdauer der Tragstruktur wurde das gesamte Gebäude als Stützen-Unterkonstruktionssystem realisiert. Aus dieser Entkoppelung der tragenden Elemente und dem Innenausbau resultiert eine offene, flexibel gestaltbare Geschossfläche ohne unterteilende Wände. Die Räume können bei einer Umnutzung nach Bedarf neugestaltet und eingerichtet werden. Zusätzlich wurde ein Gebäudeteil so konzipiert, dass künftig eine Aufstockung um ein weiteres Geschoss möglich wäre. Auch die in der Aussenhülle integrierten tragenden Stützen sind so ausgelegt, dass die Wände dazwischen flexibel demontiert, verändert und angepasst werden können. Die Fassadenbekleidung aus Holz ist trennbar auf die Elemente aufgeschraubt. So können auch die Schichten der Bekleidung ausgetauscht werden.

Für das Tragwerk kam grösstenteils Eschenholz zum Einsatz (vgl. Abbildung 34) – ein Holz mit hoher Tragfähigkeit, das den Einsatz von schlankeren Stützen ermöglichte. Sowohl das Eschenholz wie auch das verwendete Fichtenholz in anderen konstruktiven Bereichen, ist heimisches Holz, welches aus der Region stammt.



Abbildung 34: Stützen aus Eschenholz
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

Es wurden unterschiedliche Deckensysteme für Wohnungen und Büroflächen gewählt. Im Wohnungsbau wurden die Brettstapeldecken mit einem aufgeschraubten, liegenden Fachwerk ausgesteift und so die Trennbarkeit im Vergleich zu vollflächig geklammerten Platten erhöht (vgl. Abbildung 35).



Abbildung 35: Liegendes Fachwerk auf Brettstapeldecke
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

Im Bereich der Büroflächen kamen Rippendecken in Elementbauweise zum Einsatz. Die Rippendeckenelemente sind untereinander sowie mit den Aussenwänden über X-Fix-Verbinder verbunden (vgl. Abbildung 36).



Abbildung 36: X-Fix Verbindungen
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

Zwar haben Rippendecken eine grössere Aufbauhöhe als andere Deckenkonstruktionen, der Raum zwischen den Rippen wird aber zugleich als Installationsraum für die Führung von technischen Leitungen genutzt. Dadurch werden gleich mehrere Aspekte vereint: die Technik ist leicht zugänglich, der Platz wird ideal ausgenutzt und die abgehängte Decke trägt zur Verbesserung der Raumakustik bei.

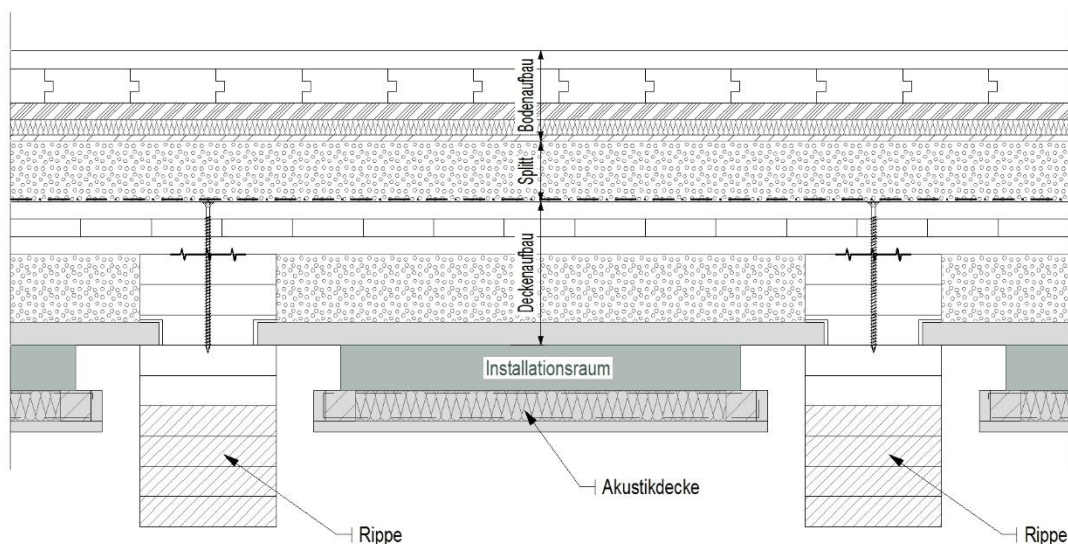


Abbildung 37: Deckenaufbau mit Installationsraum
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

Betreffend Installationen wurde zusätzlich entlang der Aussenwände ein innenseitiger Installationsraum im Brüstungsbereich geschaffen, in welchem beispielsweise die Lüftungstechnik untergebracht ist. Dieser Raum ist einfach über eine klappbare Holzwandverkleidung zugänglich (vgl. Abbildung 38).



Abbildung 38: Installationsraum entlang Aussenwand
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

Weiter sind im Büro-Trakt die Fallstränge konsequent übereinander ausgeführt und mit Revisionszugängen versehen. Auch im Wohnbereich sind die Nasszellen übereinander angeordnet. Lediglich zwischen den beiden verschiedenen Nutzungseinheiten Büro und Wohnen konnte ein Versatz nicht komplett vermieden werden.

Durch die zentralen Erschliessungszonen und den regelmässigen, übereinander angeordneten, konstruktiven Aspekten resultieren viele gleichteilige Bauteilelemente (vgl. 3.1.3 Gleichteiligkeit).

Der Bodenaufbau ist eine gesteckte und gestapelte Konstruktion. Die verschiedenen Schichten (Dreischichtplatte, ungebundene Splittschüttung, Holzfaserplatte, Trittschalldämmung, Holzfaserdämmung und Estrich aus Buchenholz) sind alle lose aufeinandergelegt. Die Buchenholzpanelen sind zwischen Leisten aus Fichtenholz eingeschoben und zusammengesteckt. Das Parkett wurde auf den Estrich geschraubt. So können die Schichten einfach ausgebaut und wiederverwendet werden. Auf zusätzliche Verbindungsmittel wurde weitestgehend verzichtet.

Die Langlebigkeit der Fassade wird durch mehrere konstruktive Massnahmen verbessert. Ein 1,5 m auskragendes Vordach sorgt für den konstruktiven Holzschutz. Für die Fassadenschalung wurde eine Stülpschalung mit Nut und Kamm Profil gewählt. Die horizontal verlaufenden Rippen sind um 15° abgechrägt, sodass Regenwasser gut abfliessen kann und Regentropfen möglichst nicht an die Fassade zurückspritzen. Bei den vertikalen, dicken Rippen handelt es sich um Massivholzquerschnitte, die auf der Rückseite auf der gesamten Länge eingenutet sind, um Rissbildungen aufgrund Spannungen aus Feuchteveränderungen zu vermeiden. Damit die Stossfugen der einzelnen Rippen und Schalungsbretter nach einem Aufweichen optimal austrocknen, sind sie mit 8mm dicken Fugen ausgebildet (vgl. Abbildung 39).



Abbildung 39: Fassade mit Fugen zur Austrocknung
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

4.1.2 Verbindungsmittel

Die übereinanderliegenden aussteifenden Aussenwandelemente wurden über Verzahnungen miteinander verbunden (vgl. Abbildung 40). Für die Verzahnung ist eine präzise Fertigung gefordert. Das Einstellen der Maschinen im ausführenden Betrieb erforderte einen gewissen Zeitaufwand. Sind die Maschinen eingestellt, so ist der Aufwand deutlich geringer und der Montageprozess vereinfacht, da die Verbindungen auf der Baustelle nur noch gesteckt werden müssen.

Die Beplankung der Wände mit Gipsfaserplatten wurden alle geschraubt. Ausschliesslich wenn Wände verputzt wurden, wurde die zweite Beplankung mit Spreizklammern befestigt. Diese lässt sich somit von der ersten Beplankung lösen.

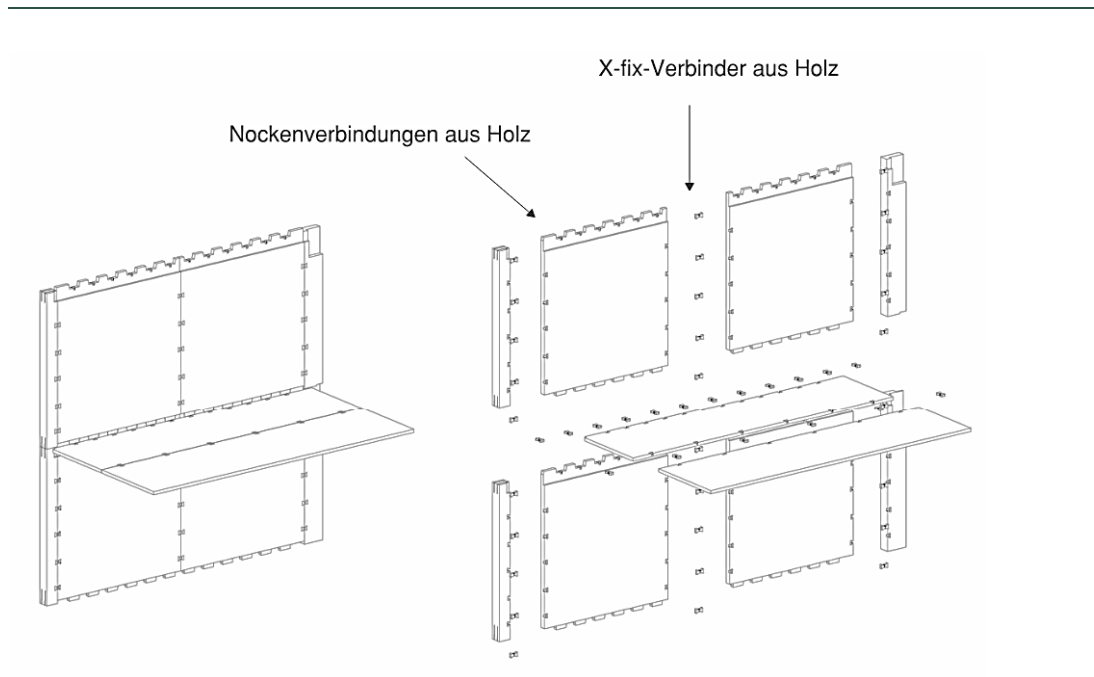


Abbildung 40: Nocken- und X-fix-Verbindungen im Haus des Holzes
Quelle: PIRMIN JUNG Schweiz AG

4.1.3 Bauwerksdokumentation

Die Dokumentation der verwendeten Materialien und Bauteile gilt als wesentlicher Faktor um die Kreislauffähigkeit eines Gebäudes zu ermöglichen. Der Building Circularity Passport dient beim Haus des Holzes als Planungs- und Dokumentationsinstrument. Er gibt Auskunft darüber, welche verwendeten Bauteilelemente und Materialien wie miteinander verbunden sind und aus welchen Zusammensetzungen sie bestehen. Auch die monetären Werte der verbauten Konstruktionen lassen sich so leicht ermitteln. Die Dokumentation wurde durch die konsequente Nutzung der digitalen Tools verstärkt und verbessert. Durch die Nutzung der BIM-Methode und Virtual Design and Construction (VDC), konnten Informationen sichtbar und allen Projektbeteiligten zugänglich gemacht werden. Kommuniziert wurde über eine Datenplattform. Durch die Kommunikation auf einer einzigen Plattform erreicht man eine nachvollziehbare und rückverfolgbare Kommunikation und erhöhte die Transparenz der Prozesse. Neben den Modellen, welche als digitale Abbilder des Gebäudes erstellt wurden, ist es wichtig, auch die Anforderungen an das Gebäude für eine spätere Nutzung festzuhalten. Das vorab erstellte Projekthandbuch und der BIM-Abwicklungsplan definierten, wie die Modelle der einzelnen Fachplanerinnen und -planer erstellt werden sollten, welche Inhalte enthalten sein mussten, wie die Informationen strukturiert und wie die Schnittstellen nach Open-BIM bedient wurden. Auf diese Weise können die Vorteile der digitalen Planungstools für die Kreislaufwirtschaft genutzt werden.

4.2 Collegium Academicum

Das Collegium Academicum in Heidelberg ist ein Studierendenwohnheim, das bewusst in Holzbauweise errichtet wurde, um den Einsatz nachhaltiger und nachwachsender Rohstoffe zu fördern. Im Sinne des zirkulären Bauens verfolgte das Projekt zwei zentrale Ziele: Erstens sollte das Tragwerk ausschliesslich mit Holz-Holz-Verbindungen realisiert werden, um eine einfache Demontage und Wiederverwendung der Bauteile zu ermöglichen. Zweitens sollte den Bewohnerinnen und Bewohnern ein möglichst hohes Mass an räumlicher Flexibilität geboten werden. Im Folgenden werden diese beiden Schwerpunkte näher dargestellt.

4.2.1 Bauteilelemente und Konstruktionen

Das Gebäude wurde als Skelettbauweise errichtet, wodurch ein klares Raster entstand, und viele gleichartige Elemente verbaut werden konnten (vgl. 3.1.3 Gleichteiligkeit).

Zur Aussteifung wurde die Decke als Scheibe ausgebildet; wo erforderlich, kamen aussteifende Innen- oder Aussenwände aus Brettspertholz zum Einsatz.



Abbildung 41: Collegium Academicum
Quelle: DGJ Architektur GmbH

Die Aussenwände wurden vorgefertigt auf die Baustelle geliefert und waren bereits mit Fenstern und Fassadenleisten ausgestattet. Für die Innenwände entwickelten die Studierenden gemeinsam mit den Architektinnen und Architekten verschiedene Wandsysteme. Ein Mock-Up ermöglichte es den Studierenden, den Schallschutz der unterschiedlichen Konstruktionen unmittelbar zu erleben. Die Wahl fiel auf flexible Schiebewände, die zwischen den tragenden Elementen eingeklemmt werden können. Für diese soziale Wohnform innerhalb einer Nutzungseinheit wurden keine schalltechnischen Anforderungen an die Schiebewände gestellt. Um die Schiebewände einzuklemmen, wurden im Raster des Tragwerks entsprechende Vorrichtungen integriert. Die daraus resultierende Flexibilität wird von den Bewohnenden positiv bewertet.

4.2.2 Verbindungsmittel

Für die Auswahl der passenden Verbindungsmittel wurde im Rahmen des Projektes eine umfassende historische Recherche zu traditionellen Holz-Holz-Verbindungen durchgeführt. Für den konkreten Anwendungsfall eines mehrgeschossigen Wohnbaus erwiesen sich zwei Holz-Holz-Verbindungen als besonders geeignet: die X-Fix-Verbindung sowie die Verbindung mit Holzdübeln, teilweise in Kombination mit Holzlaschen oder Zapfen. Das Ziel, ein reines Holztragwerk mit Holz-Holz-Verbindungen umzusetzen, wurde so weitgehend erreicht.



Abbildung 42: Holz-Holz-Verbindungen – Holzdübel, Holzlasche und X-Fix
Quelle: DGJ Architektur GmbH

Die Geschossübergänge von Stütze zu Stütze konnten vollständig metallfrei ausgeführt werden. Dazu wurden die Stützen entweder mit Ausfräsungen versehen, in welche Laschen aus Furnierschichtholz eingelegt wurden, oder am Stützenkopf wurden Zapfen ausgefräst, welche in die Zapfenlöcher am Unterzug eingeführt wurden. Anschliessend wurden die Deckenplatten aus Brettspertholz aufgesetzt. Über Doppelschwalbenschwanzverbinder (X-Fix) wurden die Platten über die gesamte Länge kraftschlüssig verbunden. Die Verbindung zwischen Deckenplatten und Unterzug erfolgt über Buchenholzdübel, was eine einfache Demontage und Wiederverwendung ermöglicht.

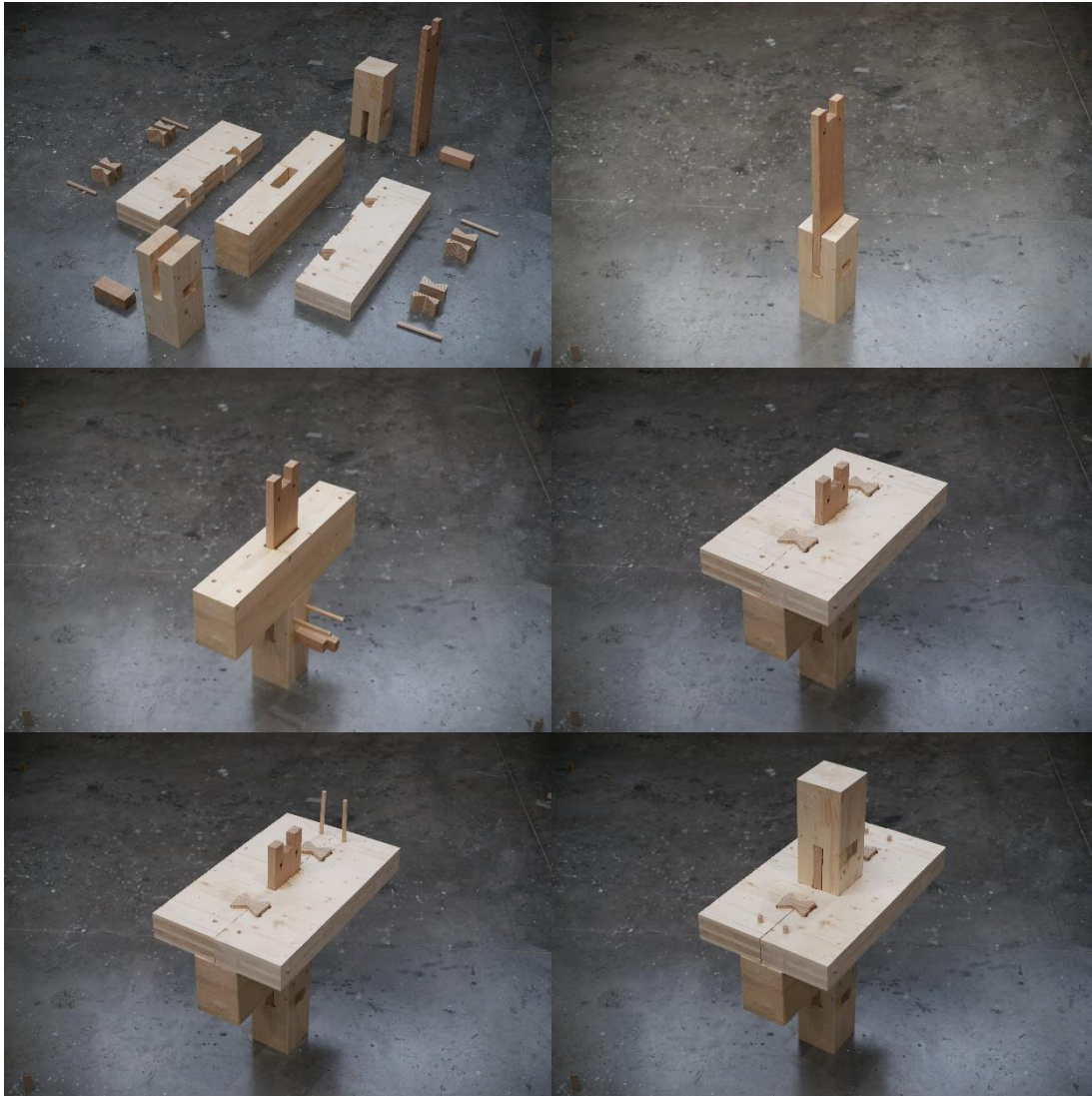


Abbildung 43: Anschluss-Modell Stützen, Unterzüge, Decken
Quelle: DGJ Architektur GmbH

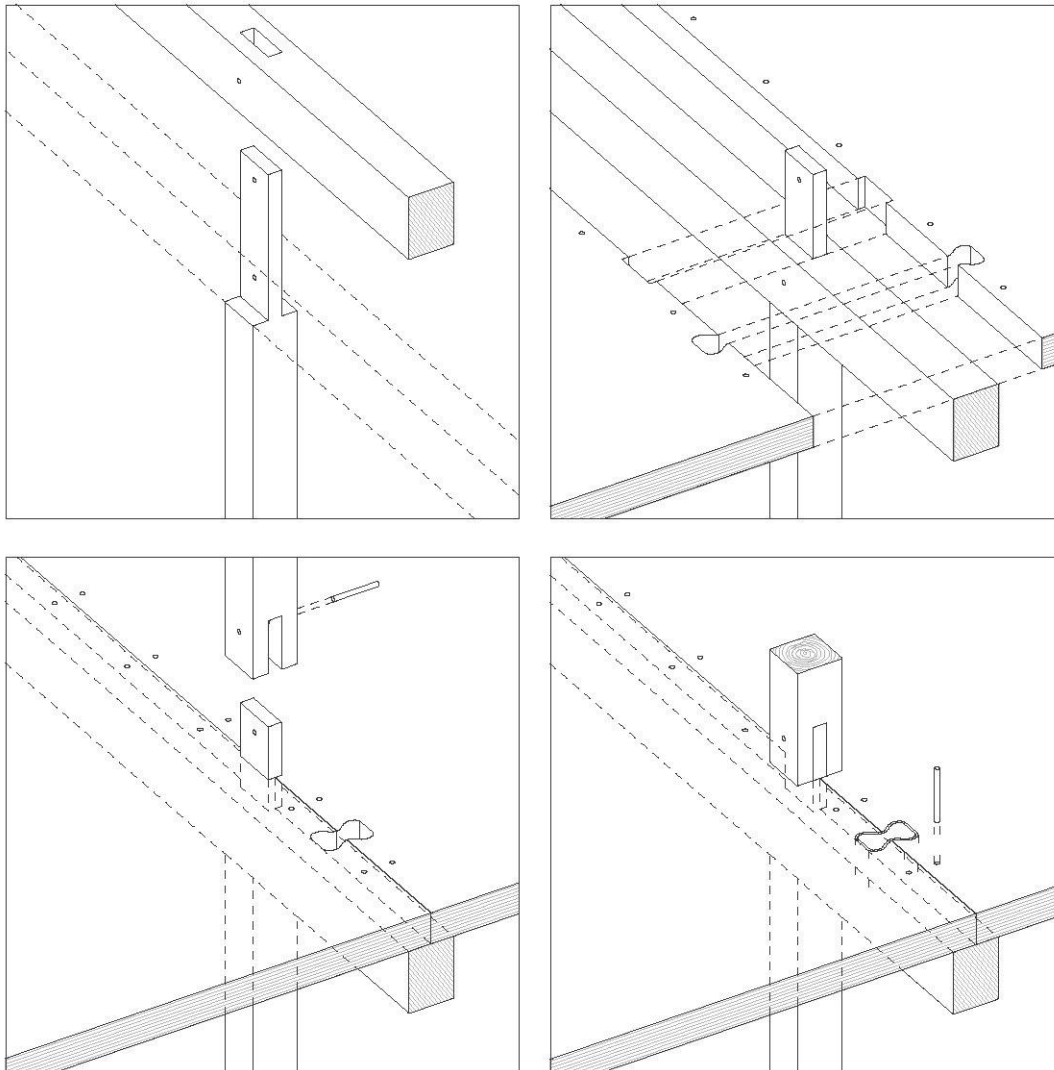


Abbildung 44: Anschluss-Schema Stützen, Unterzüge, Decken
 Quelle: DGJ Architektur GmbH

Für die Geschossübergänge der aussteifenden Wände aus Brettsperrholz wurde ein ähnliches System wie bei den Stützen entwickelt. Die Brettsperrholz-Platten der Wände wurden mittels X-Fix kraftschlüssig mit den darüberliegenden Unterzügen verbunden. Die darauf aufliegenden Deckenplatten wurden ebenfalls durch Buchenholzdübel mit dem Unterzug befestigt. Zur Schwingungsdämpfung und Reduktion der Körperschallübertragung wurden unterhalb der aussteifenden Brettsperrholzwände Elastomerlager eingesetzt.

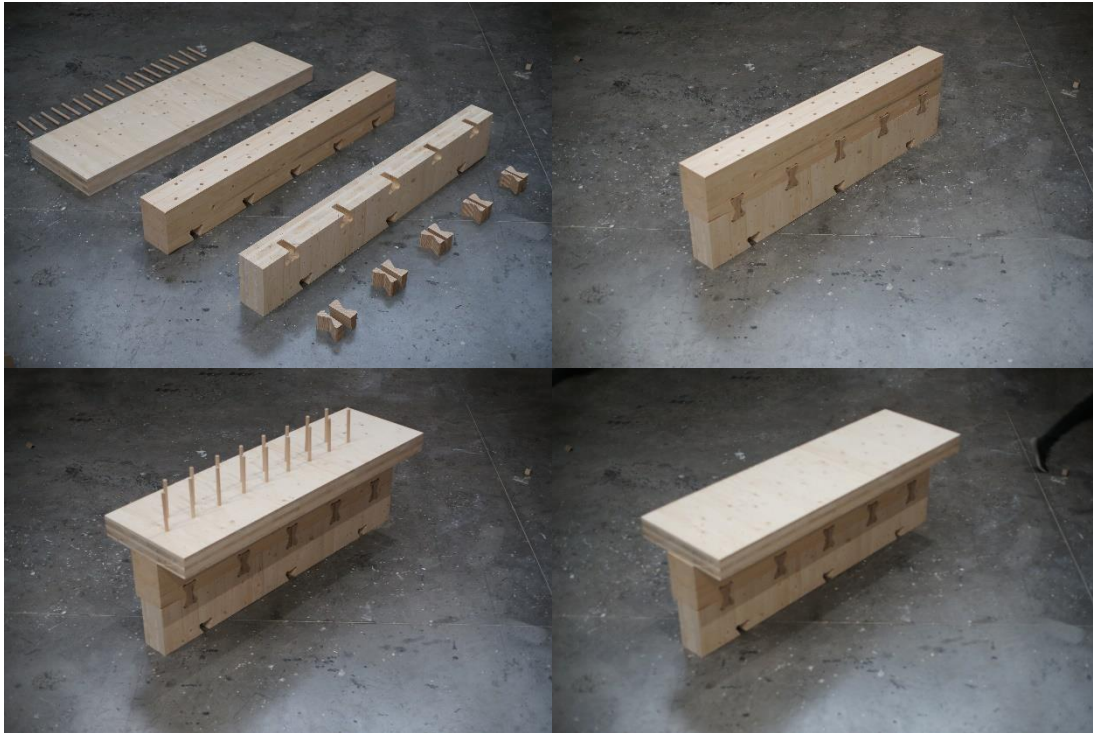


Abbildung 45: Anschluss-Modell Wände, Unterzüge, Decken
Quelle: DGJ Architektur GmbH

Die Verbindungen erwiesen sich als praktikable und ausführungstaugliche Lösung. Dank sachgerechter Vorbereitung durch präzisen Abbund in der Zimmerei und sorgfältiger Ausführung traten keine nennenswerten Schwierigkeiten bei der Anwendung dieser Systeme auf. Die Einhaltung von Masstoleranzen stellt hohe Anforderungen an die Genauigkeit, ist für erfahrene Holzbaubetriebe jedoch gut umsetzbar. Der grössere Aufwand bei den Vorbereitungsarbeiten im Werk gleicht die verkürzte Montagezeit auf der Baustelle aus.

5 Diskussion und Ausblick

In den vorangehenden Kapiteln wird ein Set aus Prinzipien und Instrumenten aufgezeigt, mit denen der Holzbau von einer linearen zu einer zirkulären Bauweise weiterentwickelt und die Bauteilelemente sowie Materialien in die Kaskadennutzung überführt werden können. Als roter Faden erweisen sich die drei Kernprinzipien Systemtrennung, Rückbaubarkeit und Gleichteiligkeit: Die konsequente Entkoppelung des Tragwerks von Ausbau- und Techniksystemen erhöht die Anpassungsfähigkeit, reduziert Eingriffe bei Umbauten und sichert die Rückbaubarkeit am Ende eines Nutzungszyklus. Die reale Umsetzbarkeit wird durch Elementbauweisen mit hoher Vorfertigung und Stützen-Unterzug-System gestützt, da wiederkehrende Knotenpunkte, standardisierte Raster und serielle Elemente die Möglichkeit der Wiederverwendung erhöhen.

Auf der Verbindungsebene entscheidet weniger der Werkstoff als die Reversibilität der Fügung über den späteren Wert eines Gebäudes als «urbane Mine». Rückbaubare Schraub-, Steck- und Bolzenverbindungen sind stiftförmigen, nicht lösbaren Mitteln sowie Klebungen überlegen; Holz-Holz-Verbindungen punkten zusätzlich durch Sortenreinheit. Die Wahl der Verbindungsmittel muss deshalb bereits in frühen Phasen über die gesamte Nutzungsdauer mitgedacht werden.

In den Bauteilen mit hohem Ressourcen- und Emissionsanteil steckt das Einsparpotenzial mit der grössten Hebelwirkung. Eine saubere Bauwerksdokumentation und digitale Methoden sind ein weiterer Schlüssel, um Rückbauprozesse in Zukunft effizient und verlustarm umzusetzen. Sie sichern die Auffindbarkeit, lokalisieren Demontagepunkte und informieren über Bauteilelement- und Materialwerte. Zudem verursachen sie im Holzbau kaum Mehraufwand, weil die Vorfertigung ohnehin detaillierte Produktions- und Montageunterlagen erfordert. Digitale Produktdaten und Daten-Wörterbücher schaffen zudem die Voraussetzung für skalenwirksame, projektübergreifende Synergien.

Die Fallbeispiele unterstreichen die Praxistauglichkeit: Das «Haus des Holzes» entkoppelt Tragwerk und Ausbau, setzt lösbare Verbindungen ein und nutzt einen Building Circularity Passport auf BIM-Basis zur Werterfassung – ein durchgängiger digitaler Faden, der Transparenz und Rückverfolgbarkeit schafft.

Das «Collegium Academicum» zeigt die Potenziale eines gerasterten Skelettbaus mit Holz-Holz-Verbindungen für Demontage und räumliche Flexibilisierung.

Die Auswahl der Fallbeispiele – beide aus dem Hause PIRMIN JUNG – beruht auf der Verfügbarkeit detaillierter Informationen zu Planungsprozessen, Entscheidungsgrundlagen und Umsetzungsschritten. Weitere, vergleichbare Projekte und Ansätze existieren auch andernorts. Für eine tiefergehende Betrachtung dieser Beispiele standen jedoch bislang keine ausreichend aufbereiteten oder zugänglichen Projektdaten zur Verfügung. Die dargestellten Fälle sollen daher exemplarisch verdeutlichen, welche Überlegungen und Prozesse angestoßen und erprobt wurden – ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit oder Allgemeingültigkeit zu erheben.

5.1 Implikationen für Planung, Ausführung und Betrieb

Die frühzeitige Festlegung von Zirkularität als übergeordnetes Projektziel und ein entsprechend interdisziplinäres Teamsetup in der Vorphase, sind zentrale Voraussetzungen für zirkuläres Bauen, wie es etwa im Projekt «Haus des Holzes» praktiziert wurde. Eine solche Zieldefinition prägt bereits zu Beginn die Systemwahl, die Rasterbildung, die konstruktiven Details sowie die Auswahl der Verbindungsmittel und steigert damit die spätere Wiederverwendbarkeit der Bauteilelemente. In der Umsetzung empfiehlt sich eine Priorisierung nach Hebelwirkung: Ressourcen- und emissionsintensive Bauteile sind als erstes auf Zirkularität zu optimieren. Wo erforderlich, können Verschleisschichten bewusst als «Opfer» konzipiert werden, um die Wiederverwendung werthaltiger, tragender oder ausbaufähiger Elemente sicherzustellen. Ergänzend ist eine Hierarchie für Verbindungsmittel nach deren Lösbarkeit anzuwenden; wo technisch sinnvoll, sind Holz-Holz-Lösungen gegenüber materialfremden Kopplungen zu bevorzugen. Eine

Bauwerksdokumentation im Sinne eines «Betriebssystems» mit eindeutiger Bauteilkennzeichnung ermöglicht verlässliche Entscheidungsgrundlagen für Umbau, Instandhaltung und den selektiven Rückbau.

5.2 Spannungsfelder und Grenzen

Die Gestaltung von Baukonstruktionen erfordert eine sorgfältige Abwägung zwischen Reversibilität und Leistungsanforderungen. Verklebte Verbindungen sowie gegossene Nassschichten erhöhen in der Regel Steifigkeit und Nutzungskomfort, verschlechtern jedoch die Trennbarkeit der Bauteile und damit deren Wiederverwendungsfähigkeit. Vor diesem Hintergrund sind bewusst gewählte, mechanisch lösbare Verbindungen empfohlene Alternativen.

Während der Erarbeitung des Leitfadens wurde deutlich, dass sich die Kreislaufwirtschaft dynamisch weiterentwickelt. Neue Erkenntnisse, Materialinnovationen und digitale Werkzeuge verändern die Rahmenbedingungen kontinuierlich. Diese Dynamik ist ausdrücklich positiv zu bewerten, führt jedoch dazu, dass einzelne Inhalte des Leitfadens bereits während seiner Entstehung einer fortlaufenden Aktualisierung bedürfen, während in gewissen Teilen noch grundlegende Untersuchungen fehlen.

Forschungsbedarf zeigt sich beispielsweise im Bereich der Verbindungsmittel. Die Rückbaubarkeit von Schrauben, Nägeln oder anderen Befestigungselementen ist bislang noch wenig untersucht. Feldstudien hinsichtlich heutiger Verbindungen fehlen fast gänzlich, da reale Rückbauprozesse erst mit zeitlichem Abstand stattfinden. Homogene Verbindungen bieten Vorteile für die sortenreine Weiterverwertung, auch wenn sie sich nicht vollständig lösen lassen. Holz-Holz-Verbindungen oder Holznägel besitzen deshalb ein hohes Potenzial für zirkuläre Bauweisen – selbst, wenn sie beim Rückbau teilweise zerstört werden müssen.

Grundsätzlich gilt: Wenn Trennbarkeit nicht gegeben ist, ist die Sortenreinheit umso wichtiger. Umgekehrt kann eine nicht sortenreine, aber lösbare Verbindung – etwa eine metallische Steckverbindung – für die Wiederverwendung einzelner Bauteile geeigneter sein. Vor allem dann, wenn eine gewisse Kurzfristigkeit vorliegt. Die Bewertung hängt stets von der Situation ab: Standardisierte, vielfach identische Elemente erfordern andere Lösungen als Unikate oder Sonderkonstruktionen, welche sowieso möglichst zu vermeiden sind.

Auf Materialebene lag der Fokus der Untersuchung auf den heute im Neubau am häufigsten verwendeten Materialien und deren Treibhausgasemissionen (THGE). THGE als Messgrösse erlauben eine reliable Bewertung, sind in verschiedenen Nachhaltigkeitslabels etabliert und zusammen mit den Umweltbelastungspunkten (UBP) zentrale Kenngrössen für die Beurteilung der ökologischen Nachhaltigkeit. Hinsichtlich Zirkularität sollten zukünftig aber auch Aspekte wie Primärressourcenverfügbarkeit, Sekundärrohstoffkreisläufe und Recyclingfähigkeit stärker über validierte Messwerte berücksichtigt werden. Die Berechnung der THGE beruht auf den Aufbauten flächiger Bauteile in früher Projektphase und wurde auf die Leistungen des Holzbauingenieurwesens eingeschränkt. Lokal eingebaute Materialien wie beispielsweise Baustahle sind aufgrund der Rahmenbedingungen nicht in die Ermittlung der für THGE relevanten Materialien eingeflossen, mit Ausnahme eines Exkurses zu Armierungsstahl. Er zeigt auf, dass das Material zwar kreislauffähig, die Wieder- respektive Weiterverwertung jedoch mit hohen THGE verbunden ist. Stahlkonstruktionen sind für eine Weiternutzung besonders attraktiv, da sie meist als Stabtragwerke ausgeführt werden, die sich aus einzelnen normierten Stahlprofilen zusammensetzen und gut für die Verwendung in neue Bauwerke anpassen lassen [66]. Was dabei hinsichtlich technischer Beurteilung und weiteren Aufgaben für die Wiederverwendung zu beachten sind liest sich im steeldoc 02/23 [66].

Die untersuchten Materialien in der Studie des zirkulären Materialflusses stellen lediglich einen Auszug aus der heutzutage im Holzbau verwendeten Bauprodukten dar. Der Umfang von verwendeten Materialien ist um ein Vielfaches grösser. Weitere Studien zu alternativen und neu auf den Markt kommenden Materialien sind dringend notwendig.

Zirkuläre Architektur ist eine funktionale Architektur. Funktion und Nutzung prägen die Form und Struktur. Werden Gebäude aus ihrer zirkulären Funktion heraus gedacht, sind sie anpassbar, demontierbar und langfristig nutzbar. Das Konzept der Kaskadennutzung hat sich etabliert. Wird ein Bauteilelement oder ein Material durch subjektive oder objektive Einschätzung als nicht wiederverwendbar beurteilt, kann es in einer anderen Kaskadenstufe genutzt werden. Damit wird das Holz langfristig in einer möglichst hohen Güte und Qualität im Kreislauf gehalten und der darin gespeicherte Kohlenstoff bleibt länger gebunden.

5.3 Ausblick: Entwicklungsbedarfe und nächste Schritte

Standardisierungen würden die Skalierung von kreislauffähigen Holzbauten beschleunigen. Der Ausbau von Daten-Wörterbüchern, entsprechenden Schnittstellen und digitalen Produktpässen, die eine durchgängige Nachverfolgbarkeit von Bauteilen gewährleisten, sind von zentraler Bedeutung. Einheitliche Kennzeichnungen über den gesamten Nutzungszyklus bilden dabei die Voraussetzung, um Bauteile eindeutig zu identifizieren, dokumentieren und in neuen Kontexten wiederverwenden zu können.

Klare Anforderungen an Demontierbarkeit, Zugänglichkeit, Systemtrennung und Dokumentationstiefe sind über Projekte hinweg zu definieren, regulieren und in den Leistungsbeschrieben festzuhalten.

Die etablierte Praxis der detaillierten Produktions- und Montageplanung im Holzbau kann als methodischer Anker dienen, um diese Anforderungen in die projektspezifische Planung zu integrieren. Ergänzend sind herstellerübergreifende Komponenten- und Raster-Kataloge zu entwickeln, die wiederverwendbare Standardbauteile mit definierten Raster- und Anschlussgeometrien bereitstellen und geprüfte, lösbare Verbindungsdetails – insbesondere für Geschossdecken und Fassadenelemente – enthalten.

Technologisch rückt die Weiterentwicklung mechanischer Alternativen in den Fokus. Systeme wie Hakenbänder oder Steckverbindungen sind iterativ zu verbessern und anhand standardisierter Rückbaukataloge und Prüfverfahren systematisch zu bewerten. Gleiches gilt für Holz-Beton-Verbundelemente, die in vorgefertigte, trennfreundlichere Varianten weiterzuentwickeln sind, um eine hochwertige Wiederverwendung zu erleichtern. Damit die Wiederverwendung prozessual greift, braucht es zudem regionale Logistik-, Prüf- und Wertschöpfungsketten für Holzbauteile sowie die verbindliche Übergabe aktueller Dokumentationen bei Eigentümerwechseln. BIM-basierte Bauteilregister können hierbei als Grundlage urbaner Minen dienen, indem sie Bauteilbestände lokalisieren, Zustände abbilden und Verfügbarkeiten orchestrieren.

Die Umsetzung erfordert einen gezielten Kompetenzaufbau und einen Kulturwandel in Planung, Ausführung und Bewirtschaftung. Fachakteurinnen und -akteure sind in rückbauorientierter Planung, Bauteilkennzeichnung und digitaler Dokumentation zu qualifizieren; zugleich sollten Ziele der Zirkularität bereits in Wettbewerben und Vergaben verankert werden. Erst das Zusammenspiel aus normativer Verbindlichkeit, technischer Standardisierung, datenbasierter Transparenz und organisatorischen Fähigkeiten ermöglicht es, Wiederverwendungen im Holzbau wirksam und skalenfähig zu etablieren.

Es zeigen sich vielversprechende Perspektiven durch unterstützende digitale Systeme, für die Verwendung und Verwertung von Bauteilelementen und Materialien. Sie können eine wichtige Rolle beim Erfassen von Materialflüssen und Optimieren von Wiederverwendungsprozessen übernehmen. Bereits jetzt zeigen sich Potenziale in verschiedenen Phasen. Sei es bei Aufnahmen im Bestand und bestehenden Fragmenten, im Planungsprozess beim Verwenden von Verschnitten sowie beim Fügen von vorhandenen Bauteilen oder bei der Ansteuerung von Maschinen für die Vorfabrikation. Der Holzbau weist hervorragende Grundvoraussetzungen auf, um mit individuellen Re-Use Bauteilen umgehen zu können.

5.4 Schlussfolgerung

Kreislauffähiger Holzbau ist mit heutigen Mitteln umsetzbar, wenn Entwurf, Konstruktion, Verbindungsmittelwahl und Dokumentation auf rückbauorientierte Planung ausgerichtet werden. Die Fallbeispiele belegen, dass sich Flexibilität, Werterhalt und Rückbaubarkeit in marktfähigen Projekten vereinen lassen – vorausgesetzt, die Weichen werden früh gestellt und durchgängig digital dokumentiert. Mit standardisierten Daten, lösbaren Systemen und fokussierter Optimierung der ressourcenstärksten Bauteile kann der Holzbau seine Vorreiterrolle im zirkulären Bauwesen weiter ausbauen und einen messbaren Beitrag zu Ressourcenschonung und Emissionsreduktion leisten.

6 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Technisch gewünschter (grün) und biologischer (braun) Kreislauf von (Alt)Holz im Bauwesen.....	10
Abbildung 2: Grundsätze der Kreislaufwirtschaft.....	12
Abbildung 3: Die fünf strukturellen Ebenen im Holzbau nach Graf et al. 2024 am Beispiel der Aussenwand.....	14
Abbildung 4: Strukturelle Ebenen im Holzbau	14
Abbildung 5: Demontierbarkeit	15
Abbildung 6: Trennbarkeit	15
Abbildung 7: Strategien der Kreislaufwirtschaft	17
Abbildung 8: Kaskadennutzung und Kreisläufe	18
Abbildung 9: Scherschichten im Holzbau	19
Abbildung 10: Stützen-Unterzug-System.....	29
Abbildung 11: Installationsräume - Vorwände, zwischen Balken, Installationsschicht im Bodenaufbau	30
Abbildung 12: Bekleidete Installationsräume	30
Abbildung 13: Bodenaufbau mit Trockenestrich (Buchenelemente)	31
Abbildung 14: Doppelboden	32
Abbildung 15: Lose Splittschüttung als Installationsebene	32
Abbildung 16: Beispiel Vordach zum Schutz der Fassade	34
Abbildung 17: Beispiel Spritzschutz im Sockelbereich	34
Abbildung 18: Deckensysteme in Anlehnung an Kolb	36
Abbildung 19: Einordnung THGE relevanter Materialien Holzbau in Schichtkategorien und Materialgruppen.....	41
Abbildung 20: Einteilung Verbindungsmittel im Holzbau	46
Abbildung 21: Rückbaubarkeit Verbindungsmittel	47
Abbildung 22: Zapfenverbindung mit Holzdübeln	48
Abbildung 23: Doppelschwalbenschwanz-Verbinder.....	48
Abbildung 24: Treppenversatz.....	48
Abbildung 25: Überblattung	49
Abbildung 26: Schubnocken (Wand) und Anschluss der Deckenplatte mit einem Doppelschwalbenschwanzverbinder	49
Abbildung 27: Schwalbenschwanzverbindung	49
Abbildung 28: Metallverbindung geschraubt.....	49
Abbildung 29: Bolzenverbindung	50
Abbildung 30: Einhängeverbinder.....	50
Abbildung 31: Tragfähigkeit [kN] von Schrauben mit Kegelunterkopf (HBS) versus Rillennägel (RiNa)	52
Abbildung 32: Holznägel.....	53
Abbildung 33: Hakenband aus Metall	54
Abbildung 34: Stützen aus Eschenholz	59
Abbildung 35: Liegendes Fachwerk auf Brettstapeldecke	59
Abbildung 36: X-Fix Verbindungen	60
Abbildung 37: Deckenaufbau mit Installationsraum.....	60
Abbildung 38: Installationsraum entlang Aussenwand	61
Abbildung 39: Fassade mit Fugen zur Austrocknung	62
Abbildung 40: Nocken- und X-fix-Verbindungen im Haus des Holzes	63
Abbildung 41: Collegium Academicum	64

Abbildung 42: Holz-Holz-Verbindungen – Holzdübel, Holzlasche und X-Fix	65
Abbildung 43: Anschluss-Modell Stützen, Unterzüge, Decken	66
Abbildung 44: Anschluss-Schema Stützen, Unterzüge, Decken	67
Abbildung 45: Anschluss-Modell Wände, Unterzüge, Decken.....	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Phasen gemäss SN EN15804+A2:2019.....	13
Tabelle 2: Vereinfachte Tabelle Amortisationszeiten nach Norm SIA 2032:2020.....	20
Tabelle 3: Übersicht SNBS - Bereiche, Themen, Kriterien	23
Tabelle 4: Kriterien aus dem Bereich Ökologie des ECO-Vorgabekatalogs	25
Tabelle 5: relative Demontier- und Trennbarkeit von Deckensystemen	37
Tabelle 6: Material mit relevanten THGE auf Einbaumasse bezogen	41
Tabelle 7: Übersicht Vollholz und geklebtes Vollholz	42
Tabelle 8: Übersicht der zirkulären Materialflüsse von holzbauspezifischen Materialien	44

Abkürzungen

BAFU	Bundesamt für Umwelt
BIM	Building Information Modeling (Bauwerksdatenmodellierung)
BSH	Brettschichtholz
CI	Circularity Indicator auch ZI für Zirkularitäts-Indikator
CNC	Computerized Numerical Control
DPP	Digital Product Passport
EBF	Energiebezugsfläche
eBKP-H	elementbasierter Baukostenplan Hochbau
EPD	Umweltproduktdeklaration
GWP	Global Warming Potential
HBV	Holz-Beton-Verbund
IPB	Interessensgemeinschaft privater professioneller Bauherren
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
MCI	Material Circularity Indikator
MFH	Mehrfamilienhaus
NNBS	Netzwerk Nachhaltiges Bauen Schweiz
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SNBS	Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz
STE	Swiss Timber Engineers
THGE	Treibhausgasemissionen
VDC	Virtual Design and Construction
ZI	Zirkularitäts-Indikator auch CI für Circularity Indicator

Glossar

Altholz	Auch Gebrauchtholz: Holz, das bereits einem Verwendungszweck zugeführt wurde und einem nächsten Kreislauf zur Verfügung steht. Dies ist beispielsweise Holz aus abgebrochenen Gebäuden, von entsorgten Möbeln oder Verpackungen. Altholz ist je nach Herkunft naturbelassen oder behandelt. [21]
Bauteil	Ein Bauteil besteht aus mehreren Bauteilelementen und Materialien ergibt aber noch nicht ein Gebäude. Ein Bauteil wird als ein statisch-konstruktiver, geometrisch abgeschlossener Teil eines Bauwerks, z. B. Aussenwand, Innenwand, Geschossdecke, Bodenplatte, Dachfläche verstanden. [22]
Bauteilelement	Bauteilelemente bestehen aus verschiedenen Materialien (Bauprodukten und Rohstoffen) und kommen als Einheit für die Montage auf die Baustelle.
Byggeriets Materialpyramide	Ein Werkzeug das im Internet zur Verfügung gestellt wird. Es ermöglicht einen Vergleich von Treibhausgaspotenzial und anderen Umwelteinwirkungen von verschiedenen Materialkategorien und Materialtypen.
Demontierbarkeit	Bezieht sich darauf mit welchem Aufwand sich Bauteilelemente zerstörungsfrei und sortenrein aus Gebäuden separieren lassen.
Design for Disassembly	Entwurfs- und Planungsprinzip, auch rückbauorientierte Planung genannt, mit dem Ziel Gebäude so zu konzipieren und zu errichten, dass eine bestmögliche Rückbaubarkeit erreicht wird.
Gebäude	Ein Gebäude besteht aus mehreren Bauteilelementen.
Gebäudekategorien nach SIA380/1:2016	I – Wohnen MFH, II – Wohnen EFH, III – Verwaltung, IV – Schule, V – Verkauf, VI – Restaurant, VII – Versammlungslokal, VIII – Spital, IX – Industrie, X – Lager, XI – Sportbaute, XII – Hallenbad [67]
Graue Energie	Die Graue Energie gemäss SIA ist die Gesamtmenge an nicht erneuerbarer Primärenergie im Bereich der Erstellung. [18]
Holzabfälle	Altholz, das gesammelt, abgegeben und als Abfall registriert wird.
Hybrid	Aus zwei oder mehreren Technologien oder Prozesse bestehend.
Lebenszyklus	Da ein Gebäude nicht ein Lebewesen ist und somit keinen effektiven Lebenszyklus hat, wurde der Begriff Lebenszyklus vermieden, mit Nutzungszyklus ersetzt und da, wo in einer Originalquelle ein anderer Begriff verwendet wurde, mit Fussnote vermerkt, dass die Bezeichnung von der Redaktion geändert wurde.
Massivbauweise	Bauweise, in der raumabschliessende Bauteile wie Wände und Decken auch die tragende Funktion erfüllen. Es gibt die mineralische Massivbauweise und den Holzmassivbau.

Material	Material ist die Ebene mit den kleinsten Einheiten in den strukturellen Ebenen des Holzbaus, als zusammengefasste Gruppe bestehend aus Rohstoffen und Bauprodukten.
Nutzungszyklus	Ersetzt den Begriff Lebenszyklus bei Gebäuden, da ein Gebäude nicht ein Lebewesen ist und somit keinen effektiven Lebenszyklus hat. Da, wo in einer Originalquelle ein anderer Begriff verwendet wurde, ist mit einer Fussnote vermerkt, dass die Bezeichnung von der Redaktion geändert wurde.
Primärrohstoff	Rohstoff, der aus natürlichen Reserven gewonnen wird. [22]
Recycling	Der Begriff Recycling wird sehr unterschiedlich verwendet. Wörtlich bedeutet Recycling das «Wieder-in-den-Kreislauf-Führen» (re = wieder, cycle = Kreis). In den meisten Fällen ist mit Recycling die Wiederverwertung gemeint, also die Auflösung einer bestehenden Struktur und deren erneute Verarbeitung zur Erfüllung derselben Funktion – beispielsweise das Recycling von Glasflaschen, bei dem Altglas gesammelt und unter Nutzung von Sekundärressourcen zu neuen Glasflaschen verarbeitet wird. Da mehrere Strategien für die Rückführung in den Kreislauf existieren (vgl. 2.6 Strategien der Kreislaufwirtschaft), bleibt der Begriff Recycling ohne weitere Präzisierung unklar. In diesem Bericht wird daher bewusst weitgehend auf seine Verwendung verzichtet.
Re-Use	Vgl. Wiederverwendung
Rückbau	Der Rückbau ist die Entnahme von Bauteilelementen und Materialien aus Gebäuden.
Rückbaubarkeit	Die Rückbaubarkeit bezieht sich darauf, wie zerstörungsfrei, sortenrein und ohne Wert- sowie Funktionsverlust sich Bauteilelemente und Materialien einem Gebäude entnehmen lassen. Sie ist stark abhängig von der Systemtrennung und wird von der Demontierbarkeit, der Trennbarkeit, der Auffindbarkeit und der Zugänglichkeit beeinflusst.
Rückbauphase	Phase am Ende eines Nutzungszyklus, in welcher Bauteilelemente und Materialien dem Gebäude entnommen werden.
Sekundärrohstoff	Rohstoff, der aus anthropogenen Reserven durch die Verwertung von Abfällen oder Reststoffen gewonnen wurde. [22]
Skelettbau	Bauweise, die mit Stützen, Trägern und Aussteifungselementen in einem regelmässigen Raster ein Tragwerk bildet. Besonderes Merkmal des Skelettbbaus ist, dass dabei die Stützen konsequent über die gesamte Gebäudehöhe durchgeführt werden. Der Skelettbau weist eine klare Trennung zwischen tragender Konstruktion und raumabschliessenden Wänden auf. [46]
Sortenrein	Sortenrein meint, dass ein Bauteilelement oder ein Material soweit frei von Fremd- und Störstoffen ist, dass es wieder in den gewünschten technischen oder biologischen Kreislauf zurückgeführt werden kann.
Suffizienz	Suffizienz ist ein Nachhaltigkeitsansatz, der auf die Reduktion des absoluten Ressourcen- und Energieverbrauchs durch eine Begrenzung von Konsum und Produktion abzielt. Im Vordergrund steht die Frage, welches Mass an materiellen

Gütern und Dienstleistungen erforderlich ist, um gesellschaftliche Funktionen zu erfüllen und ökologische Belastungsgrenzen einzuhalten. Die Suffizienz ist also das Hinterfragen von Bedürfnissen und altbewährten Vorgehensweisen, Ansprüchen und Vorgaben; was ist heute wirklich notwendig, wo kann auf weniger reduziert werden.

Treibhausgasemission	Kumulierte Menge aller Treibhausgase (CO ₂ , Methan, Distickstoffoxid und weitere klimawirksame Gase), die in die Atmosphäre emittiert wird. Die Treibhausgasemission wird als äquivalente CO ₂ -Emissionsmenge ausgedrückt, die denselben Treibhauseffekt hat wie die Gesamtheit der Treibhausgasemissionen.
Trennbarkeit	Bezieht sich darauf mit welchem Aufwand sich Materialien zerstörungsfrei und sortenrein aus Bauteilelementen separieren lassen.
Urban Mining	Die Stadt respektive der bestehende Gebäudepark dient als Rohstoffmine.
Weiterverwendung	Die Weiterverwendung ist eine Kreislaufstrategie, bei der Bauteilelemente oder Materialien ihre Struktur beibehalten jedoch zu einem anderen Zweck eingesetzt werden.
Weiterverwertung	Die Weiterverwertung ist eine Kreislaufstrategie, bei der die Struktur von Bauteilelementen oder Materialien aufgelöst, erneut zusammengesetzt und das Bauteilelement oder Material zu einem anderen Zweck eingesetzt wird.
Wiederverwendung	Die Wiederverwendung (eng. Re-Use) ist eine Kreislaufstrategie, bei der Bauteilelemente oder Materialien ihre Struktur beibehalten und wieder zum gleichen Zweck eingesetzt werden.
Wiederverwertung	Die Wiederverwertung ist eine Kreislaufstrategie, bei der die Struktur von Bauteilelementen oder Materialien aufgelöst, erneut zusammengesetzt und das Bauteilelement oder Material wieder zum gleichen Zweck eingesetzt wird.

Literaturverzeichnis

- [1] S. Kälin, «Kreislaufwirtschaft beim Bauen: Zwölf Grosse machen vorwärts,» Empa, [Online]. Available: <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-96078.html>. [Zugriff am 21 03 2025].
- [2] Bundesamt für Umwelt BAFU, «Abfallpolitik,» Bundesamt für Umwelt BAFU, [Online]. Available: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/abfallpolitik-und-massnahmen.html>. [Zugriff am 06 08 2025].
- [3] Bundesamt für Statistik BFS, «Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung der Schweiz und der Kantone,» Bundesamt für Statistik BFS, Neuchâtel, 2025.
- [4] Bundesamt für Umwelt BAFU, «Waldbericht 2025,» Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2025.
- [5] Schweizerischer Bundesrat, «Integrale Wald- und Holzstrategie 2025 - Teil I, Strategiebericht,» Schweizerischer Bundesrat, Bern, 2025.
- [6] Bundesamt für Umwelt BAFU, «Die Klimaleistungen von Wald und Holz in der Schweiz,» Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2025.
- [7] M. Gauch, C. Matasci, I. Hincapié, R. Hörler und H. Böni, «Material- und Energieressourcen sowie Umweltauswirkungen der baulichen Infrastruktur der Schweiz,» Empa - Materials Science & Technology, St. Gallen, 2016.
- [8] Salza, «Wiederverwendung Bauen - Aktuelle Situation und Perspektiven: Der Fahrplan,» Salza, Matériuum, Zürich - Genf, 2020.
- [9] C. De Wolf, D. Raghu, A. Sentic und C. Fivet, «Innovations Practitioners Need for Circularity in the Swiss Architecture, Engineering, and Construction Sector,» Zenodo, 2023.
- [10] LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, «Zirkuläres Bauen erfolgreich umsetzen,» LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Karlsruhe, 2024.
- [11] A. Burgherr, I. Brühwiler, M. Büeler, P. Jung, P. Makiol, P. Renggli und L. Rügsegger, «Leistungen der Holzbauingenieure,» Swiss Timber Engineers (STE), Zürich, Compact 01, Version 2020.
- [12] PIRMIN JUNG Schweiz AG, «www.pirminjung.ch,» PIRMIN JUNG Schweiz AG, 11 2024. [Online]. Available: <https://www.pirminjung.ch/journal/studie-industrielle-wertschoepfungskette-altholz>. [Zugriff am 15 07 2025].
- [13] P. Fuchs, L. Seidl und H. Thömen, «Altholzflüsse der Schweiz,» Berner Fachhochschule BFH, Biel, 2025.
- [14] Wüest & Partner AG, «Bauabfälle in der Schweiz - Hochbau,» Wüest & Partner AG, Zürich, 2015.
- [15] M. Frese, P. Dietsch, M. Müller, T. Ummenhofer, C. Ehrenlechner, S. Winter, C. Radlbeck und M. Mensinger, «Vorbereitung der Wiederverwendung von bestimmten Bauprodukten des Holz- und Stahlbaus,» Karlsruher Institut für Technologie, München, 2024.
- [16] Bundesamt für Umwelt BAFU, «Kreislaufwirtschaft,» Bundesamt für Umwelt BAFU, [Online]. Available: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaftskonsum/kreislaufwirtschaft.html>. [Zugriff am 21 03 2025].
- [17] E. M. Foundation, «Circular economy intrduction,» Ellen MacArthur Foundation, [Online]. Available: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>. [Zugriff am 15 11 2024].
- [18] Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein SIA, «SIA 2032 - Graue Energie: Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden,» Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein SIA, Zürich, 2020.
- [19] J. Graf, B. Hao, S. Birk, V. Poteschkin, W. Shi, R. Klopfer, C. Jagsch und E.-M. Ciesla, «Legitimation der kreislaueffektiven Holzbauweise - Nachweis der Klimaschutzwirkung,» *Bautechnik* 101, Bd. Sonderheft Holzbau, Nr. Ausgabe 2, pp. S,64-73, 2024.

-
- [20] P. Bach, D. Bettinaglio, M. Sutter, J. Pitterle und C. Merz, «Zirkularitätsindikator angewandt,» Penzel Valier, Madaster, me22, 2025.
- [21] U. Pauli-Krafft, C.-L. Suter Thalmann und C. Aebischer, «Ressourcenpolitik Holz 2030,» Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2021.
- [22] S. Schuster und S. Geier, «circularWOOD Paradigmenwechsel für eine Kreislaufwirtschaft im Holzbau,» Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung BBSR, Bonn, 2023.
- [23] C. Küpfer und C. Fivet, «Selektiver Rückbau – Rückbaubare Konstruktion: Studie zur Förderung der Abfallreduktion und der Wiederverwendung in der Baubranche,» Zenodo, 2021.
- [24] Lignum Holzwirtschaft Schweiz, «Ein Holzbau kann für die Vermarktung ein Pluspunkt sein,» *Lignum Magazin - Werthaltig bauen mit Holz*, pp. 22-28, März 2025.
- [25] Wüest Partner AG, Durable Planung und Beratung GmbH, «Zirkulär Bauen: Leitfaden für Investoren und Bauherrschaften,» Wüest Partner AG, Durable Planung und Beratung GmbH, Zürich, 2024.
- [26] F. Robineck, «Circular Performance Metrics - Messbarkeit von Zirkularität im Bausektor: Grundlagen und Definitionen,» conspark, Zürich, 2024.
- [27] M. Olender, D. Kellenberger und S. Held, «Zirkularität Messbar Machen,» Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttens, 2024.
- [28] Madaster, «Leitfaden 1.0 - Zirkularität messbar machen - Ein Schweizer Zirkularitäts-Indikator,» 2023.
- [29] Netzwerk Nachhaltiges Bauen Schweiz NNBS, «Kriterienbeschrieb SNBS-HOCHBAU,» Netzwerk Nachhaltiges Bauen Schweiz NNBS, Zürich, 2024.
- [30] ecobau, «Vorgabenkatalog Zusatzprodukt ECO - Alle zertifizierbaren Gebäudekategorien Nachweisversion 2023.1,» ecobau, Zürich, 2024.
- [31] ecobau, «ecobau - Zirkuläres Bauen - Instrumente,» ecobau, [Online]. Available: <https://www.ecobau.ch/de/instrumente/zirkulaeres-bauen>. [Zugriff am 12 11 2025].
- [32] ecobau, «ecobau - Gebäudecheck - Instrumente,» ecobau, [Online]. Available: <https://www.ecobau.ch/de/instrumente/gebaeudecheck>. [Zugriff am 12 11 2025].
- [33] ecobau, «ecobau - Methodik ecobau - Themen,» ecobau, [Online]. Available: <https://www.ecobau.ch/de/themen/methodik-ecobau>. [Zugriff am 12 11 2025].
- [34] SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, [Online]. Available: <https://www.sia.ch/de/cms/node/35652>. [Zugriff am 17 07 2025].
- [35] Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein SIA, «SIA 430 - Vermeidung und Entsorgung von Bauabfällen,» Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein SIA, Zürich, 2023.
- [36] Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein SIA, «SIA 390/1 - Klimapfad: Treibhausgasbilanz über den Lebenszyklus,» Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein SIA, Zürich, 2025.
- [37] S. Lindner, «Cradle to Cradle im Holzfertigbau,» Fraunhofer IRB, Stuttgart, 2022.
- [38] LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, «Zirkuläres Bauen erfolgreich umsetzen,» LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Karlsruhe, 2024.
- [39] D. Koppelhuber, J. Koppelhuber und C. Dold, «Leitfaden Rückbauorientiertes Planen und Bauen im Holzbau,» 2024.
- [40] C. Morgan und F. Stevenson, «Design for Deconstruction,» SEDA, London, 2005.
- [41] F. Dolezal, M. Fellner, I. Mayer, U. Muñoz-Czerny, C. Lux, B. Plössnig-Weigel, S. Polleres und P. Trimmel, «Katalog kreislauffähiger Holzbauteile,» IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, HFA - Holzforschung Austria, Wien, 2024.
-

-
- [42] G. Ratsch, «Lignatec - Wiederverwertung von Bauholz für tragende Zwecke,» Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, Zürich, 2023.
- [43] H. Schmid, «Lignatec - Holzschutz im Bauwesen,» Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, Zürich, 2023.
- [44] H. Bösch, «Lignatec - Fassadenverkleidungen aus unbehandeltem Holz,» Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, Zürich, 1999.
- [45] J. Muff, «Analysieren von Mehrfamilienhäusern in Holzbauweise in Bezug auf Treibhausgase und Grauer Energie,» Luzern, 2021.
- [46] J. Kolb, H. Kolb und A. Müller, Holzbau mit System, Basel: Birkenhäuser Verlag GmbH, 2024.
- [47] Brüninghoff Group, «www.brueninghoff.de,» Brüninghoff Group, 09 12 2024. [Online]. Available: <https://www.brueninghoff.de/news/details/holz-beton-verbund-im-kreislauf/>. [Zugriff am 04 08 2025].
- [48] Wilma AG, «www.wilma.swiss,» Wilma AG, [Online]. Available: <https://www.wilma.swiss/vorteile>. [Zugriff am 26 09 2025].
- [49] Würth, «Holz-Beton-Verbund: Das Beste zweier Materialien in einer neuen Bauweise vereint,» Würth Handelsges. m. b. H., [Online]. Available: <https://news.wuerth.at/holz-beton-verbund/>. [Zugriff am 26 09 2025].
- [50] Lignolution GmbH, «Mikrokerven,» Lignolution GmbH, [Online]. Available: <https://www.lignolution.ch/>. [Zugriff am 19 08 2025].
- [51] M. Heindl, «Zirkuläres Bauen im Fokus: Bewertung der Trenn- und Rückbaubarkeit von Holzrahmenwänden,» Rosenheim, 2024.
- [52] M. Juaristi, I. Sebastiani und S. Avesani, «Timber-based Façades with Different Connections and Claddings: Assessing Materials' Reusability, Water Use and Global Warming Potential,» *Journal of Facades Design & Engineering*, Bd. Volume 10, Nr. Number 2, pp. S.71-85, 2022.
- [53] P. Dietsch, T. Ummenhofer, M. Frese, M. Müller, S. Winter, M. Mensinger und C. Ehrenlechner, «Leitfaden zur Wiederverwendung tragender Bauteile,» Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg, Stuttgart, 2025.
- [54] CINARK, «the construction material pyramid,» CINARK - Centre for Industrialised Architecture, The Royal Danish Academy, [Online]. Available: <https://materialepyramiden.dk/>. [Zugriff am 12 11 2025].
- [55] B. Geistlich, «Zirkulärer Materialfluss von Holzbauten,» Luzern, 2025.
- [56] S. Rubli und E. Kuhn, «Stoffdossier zur Rückgewinnung von Gips aus ausgewählten Abfällen im Vergleich zur Primärproduktion,» Schweizerische Geotechnische Kommission SGTK c/ o ETH Zürich, Zürich, 2014.
- [57] M. Stiegler, «Kreislaufwirtschaft mit Zellulose-Einblasdämmung,» *Holzbau die neue quadriga*, pp. 36-39, 06 2024.
- [58] ISOCELL GmbH & Co KG, «www.isocell.com,» 2025. [Online]. Available: <https://www.isocell.com/de-de/produkte/produkt/zellulose>. [Zugriff am 22 09 2025].
- [59] K. Valentin, Demontierbarkeit von geschraubten Holzverbindungen, Weimar, 2025.
- [60] J. Graf, S. Birk, S. Winter, T. Auer, H. Sadegh-Azar, H. Blaß, S. Pauliuk, E.-M. Ciesla, C. Jagsch, Y. Braun, R. Klopfer, V. Poteschkin, W. Shi, V. Viezens, B. Dillmann, C. Flieger, K. Goldschmidt, C. Lu, S. Glattecker und C. Hepf, «Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen,» Technische Universität Kaiserslautern TUK, Karlsruher Institut für Technologie KIT, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Technische Universität München TUM, 2022.
- [61] R. B. KG, «Lignoloc Holznägel,» Raimund Beck KG, [Online]. Available: <https://www.beck-fastening.com/de/innovation/lignoloc>. [Zugriff am 12 11 2025].
-

- [62] Rotho Blaas SRL, «Sharp Metal,» Rotho Blaas SRL, [Online]. Available: <https://www.rothoblaas.de/produkte/verbindungstechnik/holzbauverbinder/verzahnte-platten/sharp-metal>. [Zugriff am 16 10 2025].
- [63] KBOB, «Bauwerksdokumentation im Hochbau,» Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren KBOB, [Online]. Available: <https://www.kbob.admin.ch/de/bauwerksdokumentation-im-hochbau>. [Zugriff am 08 10 2025].
- [64] A. Nyffeler und H. Schmid, «Lignatec - Projektabwicklung mit BIM im Holzbau,» Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, Zürich, 2025.
- [65] Bauen digital Schweiz / building SMART Switzerland, «Whitepaper - Digital vernetzte Bauprodukt Daten als Grundlage für die Zirkularität,» Bauen digital Schweiz / building SMART Switzerland, Zürich, 2024.
- [66] R. Bärtschi und H. Bigelow, «Re-Use: Wiederverwendung von Stahlbauteilen,» *steel/doc*, Bd. 02/23, 2023.
- [67] Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein SIA, «SIA 380/1 - Heizwärmebedarf,» Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein SIA, Zürich, 2016.