

Rückbau und Wiederverwendung von Holzbauten

Projekt 2420.2625 Rückbaufähigkeit von Holzbauten

Auftraggeber Bundesamt für Umwelt BAFU
Christian Aebischer
Abteilung Wald
3003 Bern

Bestellnummer 110011717 / 8T10 /00.0387.PZ/0025

Vertragsnummer 00.0387.PZ / B773484FC

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Ort, Datum Rain, 23.03.2022

Projektleiter Daniel Müller

T: +41 41 459 70 94, daniel.mueller@pirminjung.ch

PIRMIN JUNG Schweiz AG

Grossweid 4, CH-6026 Rain, +41 41 459 70 40
Bahnhofpark 1, CH-7320 Sargans, +41 81 254 70 40
Frutigenstrasse 2, CH-3600 Thun, +41 33 227 72 40
Bahnhofstrasse 86, CH-8500 Frauenfeld, +41 52 724 70 40
info@pirminjung.ch, pirminjung.ch

Impressum

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Wald
3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer

PIRMIN JUNG Schweiz AG
Grossweid 4
6026 Rain

Autoren

Daniel Müller, PIRMIN JUNG Schweiz AG
Dan Moser, PIRMIN JUNG Schweiz AG

Bestellnummer

110011717 / 8T10 /00.0387.PZ/0025

Kreditnummer

A200.0001 Globalkredit / Vollzug und Beratung

Vertragsnummer

00.0387.PZ / B773484FC

Hinweis

Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist alleine der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
1.1	Problemstellung.....	5
1.2	Zielsetzung.....	6
1.3	Vorgehensweise.....	6
1.4	Ausgangsdaten.....	7
1.5	Rahmenbedingungen und Abgrenzung.....	7
2	Stand des Wissens.....	8
2.1	Begriffe und Definitionen.....	8
2.2	Aktueller Stand und Übersicht der Methoden.....	9
2.2.1	Planung für den Rückbau.....	9
2.2.2	Modellierung von Informationen für die Rückgewinnung.....	10
2.2.3	Verbreitung des Themas in der Schweiz.....	11
2.2.4	Bauteilbörsen.....	11
2.2.5	In Europa.....	12
2.3	Lebenszyklus von Gebäuden.....	13
2.4	Kreislaufwirtschaft in der Baubranche.....	14
2.5	Systemtrennung.....	16
2.5.1	Scherschichten.....	16
2.5.2	Systemtrennung in der Schweiz.....	17
2.5.3	Trennbarkeit der Bauteile.....	17
2.6	Holzbau in der Schweiz.....	18
2.6.1	Holz als nachhaltiger Rohstoff.....	18
2.6.2	Holzbausysteme.....	19
3	Ermittlung der Einflussfaktoren auf Wiederverwendbarkeit.....	23
3.1	Methode und Vorgehensweise.....	23
3.2	Technische Einflussfaktoren.....	24
3.2.1	Einflussfaktoren bei Scherschichten im Holzbau.....	24
3.2.2	Digitalisierung.....	27
3.2.3	Standardisierung in der Baubranche.....	29
3.2.4	Fazit bezüglich den technischen Einflussfaktoren.....	31
3.3	Normative und labelbestimmte Einflussfaktoren.....	32
3.3.1	Normen.....	32
3.3.2	Organisationen, Energiepolitik und Label.....	37
3.3.3	Fazit aus den normativen und labelbestimmten Einflussfaktoren.....	40
3.4	Gesellschaftliche Einflussfaktoren.....	41
3.4.1	Eingesetzte Baumaterialien.....	41
3.4.2	Mentalität.....	42
3.4.3	Kommunikation.....	42
3.4.4	Fazit zu den gesellschaftlichen Einflussfaktoren.....	43
3.5	Wirtschaftliche Einflussfaktoren.....	44
3.5.1	Planung.....	44
3.5.2	Rückbau.....	44
3.5.3	Sortierung und Reinigung der Baumaterialien.....	44
3.5.4	Transport.....	45
3.5.5	Lagerung.....	45
3.5.6	Verkauf.....	45
3.5.7	Restwert von Baumaterialien.....	45

3.5.8	Fazit aus den wirtschaftlichen Einflussfaktoren	45
4	Kreislaufwirtschaft Baumaterialien (Recycling vs. Wiederverwendung).....	46
4.1	Einführung in die Thematik	46
4.2	Methode und Vorgehensweise	47
4.3	Baumaterialien.....	47
4.3.1	Aussenwandsystem.....	47
4.3.2	Deckensystem	51
4.3.3	Stützen	53
4.3.4	Materialien	53
4.4	Ablaufprozesse der Wiederverwendung und des Recyclings	54
4.5	Wirkungsberechnung.....	57
4.5.1	Graue Energie	57
4.5.2	Treibhausgasemissionen.....	57
4.5.3	Berechnung pro Schicht	58
4.6	Wiederverwendungs- und Recyclingfähigkeit von Baumaterialien	65
4.6.1	Dämmung	66
4.6.2	Beplankungsmaterialien	66
4.6.3	Struktur	67
4.6.4	Wiederverwendung von Bauteilen ohne Materialtrennung	68
4.7	Fazit.....	69
5	Auswirkungen auf die Planung	71
5.1	Einführung in die Thematik	71
5.2	Methode und Vorgehensweise	71
5.3	Bauplanungsprozess	72
5.3.1	Strategische Planung.....	73
5.3.2	Vorstudien	74
5.3.3	Projektierung	76
5.3.4	Ausschreibung.....	80
5.3.5	Realisierung.....	80
5.3.6	Bewirtschaftung.....	81
5.4	Planungshilfe	81
5.5	Entwicklung von Wiederverwendungswerkzeugen	83
5.5.1	Berechnungen der Umweltauswirkungen	83
5.5.2	Label Minergie ECO und SNBS.....	83
5.5.3	Geoinformationssystem für Baumaterialien	84
5.6	Fazit.....	84
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	85
6.1	Schlussfolgerungen	85
6.1.1	Stand des Wissens	85
6.1.2	Ermittlung der Einflussfaktoren auf Wiederverwendung	85
6.1.3	Wiederverwendung vs Recycling.....	85
6.1.4	Auswirkungen auf die Planung	86
6.2	Ausblick	86
7	Verzeichnisse	87
7.1	Abbildungsverzeichnis	87
7.2	Tabellenverzeichnis	88
7.3	Abkürzungen	89
8	Literaturverzeichnis.....	90

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Bis Anfang des 20. Jahrhunderts wurden verschiedene Baustoffe wie Holz beim Rückbau eines Hauses wiederverwendet. Baustoffe hatten Wert, auch wenn er bereits gebraucht wurde. Die industrielle Revolution führte zu einem Paradigmenwechsel in der Baubranche. Man begann unter dem Motto «schneller, mehr und günstiger» zu bauen. Diese Massenproduktion wird bis heute bevorzugt, weil einerseits die Kosten geringer sind und es andererseits die einfachste und bekannteste Variante ist. Da die Betriebsenergie bei neuen Gebäuden kaum mehr ins Gewicht fällt bleibt als letztes grosser Stellhebel zu mehr Nachhaltigkeit die Materialisierung eines des Gebäudes. In der lastabtragenden Konstruktion von Gebäuden besteht das grösste Potential der Wiederverwendung, da dort am meisten Material eingesetzt wird. Das grösste Problem liegt jedoch in der abnehmenden Verfügbarkeit der Ressourcen. Zudem ist es aus ethischer Sicht problematisch, dass einwandfreie und qualitativ hochwertige Produkte entsorgt werden. Die Bautätigkeit generiert mit einem Anteil von 84 Prozent den grössten Teil der Abfallmenge in der Schweiz, wobei es sich bei 19 Prozent um Rückbaumaterial handelt [1].

Der moderne Holzbau wird als nachhaltige und klimaschonende Bauweise betrachtet, obwohl die verwendeten Baustoffe am Ende des Lebenszyklus des Gebäudes oft nicht weiterverwendet, sondern verwertet werden. Altholz wird heute gesammelt und entweder thermisch verwertet oder dem Recycling in Spanplatten zugeführt. Trotzdem gibt es ein grosses Potenzial für die Wiederverwendung von Materialien und Bauteilen bei Holzbaukonstruktionen. Zudem ist bekannt, dass kaum zusätzliche graue Energie anfällt, wenn Bauteile wiederverwendet werden.

Wenn der Holzbau als langfristiger Speicher von Kohlenstoff aus der Atmosphäre einen Beitrag zur Minderung der Klimaerwärmung leisten will, spielt die Permanenz und damit die Speicherdauer in wiederverwendbaren Bauteilen eine entscheidende Rolle. Bis zu 700-jährige Holzbauten in der Schweiz beweisen, dass Holzbauten ein sicherer Kohlenstoffspeicher sein können.

Daraus ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Was sind die Faktoren, um den Holzbau in eine Kreislaufwirtschaft zu führen?
- Was sind die Faktoren, die im Holzbau geändert werden müssen, damit die Materialien und Bauteile effizient rückgebaut und wiederverwendet werden können?
- Wie ist ein zu Holzbau planen, damit dieser noch nachhaltiger ist?

1.2 Zielsetzung

Ziel ist es, Verbesserungspotential hinsichtlich des Rückbaus und der Wiederverwendung von Bauteilen im Holzbau aufzuzeigen. Dafür müssen erst aktuelle Bedingungen berücksichtigt werden, um anschliessend realistische Massnahmen für die künftige Holzbaukonstruktion definieren zu können.

Der gesamte Prozess von der Planung bis hin zur weiteren Verwendung muss dargestellt werden, um zu verstehen, welches die Hebel und Einflussfaktoren sind. Diese Darstellung soll auch die Bedürfnisse der Holzbaubranche reflektieren. Zudem wird ein Variantenvergleich verschiedener Baustoffe erstellt. Dieser Vergleich beinhaltet die Kriterien Recyclingfähigkeit und Wiederverwendung.

Um das Potential des zunehmend digitalen Planungsprozesses auszuschöpfen, gilt es auch, die Wiederverwendbarkeit von Bauteilen zu prüfen.

1.3 Vorgehensweise

Um ein grundlegendes Wissen über den Rückbau und die Wiederverwendung zu erlangen, ist als erster Schritt ein ausführliches Literaturstudium nötig. Das Thema Recycling wird dabei ebenfalls berücksichtigt. Zudem werden für einen Erfahrungsaustausch Personen kontaktiert, die in diesen Bereichen tätig sind.

In einer weiteren Phase werden die Prozesse Planung, Rückbau und der Wiederverwendung eines Holzbaus definiert. Zudem müssen die Einflussfaktoren ermittelt werden, um die allfälligen Möglichkeiten zu kennen.

Um die Konsistenz der Wiederverwendung zu beweisen, werden der Recyclings-Prozess und Wiederverwendungs-Prozess verglichen.

In der letzten Phase müssen die Einflussfaktoren und die Massnahmen anhand konkreter Beispiele definiert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in einer Anwendungshilfe zusammengefasst und den planenden Personen anschliessend zur Verfügung gestellt.

1.4 Ausgangsdaten

Teil des Grundlagenstudiums zur Thematik «Rückbau und Wiederverwendung» sind verschiedene Fachbücher, Berichte und Publikationen. Unter anderen beziehen sich Angaben im Bericht auf das auf das Buch « Déconstruction et réemploi, comment faire circuler les éléments de construction » [2]. Die Normen SIA 2032:2020 [4], SIA 2040:2017 [5] und SIA 112:2014 [6] dienen als weitere Grundlagen.

1.5 Rahmenbedingungen und Abgrenzung

Es wird ausschliesslich das Thema Rückbau und Wiederverwendung vertieft. Dabei liegt der Fokus auf handelsüblichen und in der Schweiz etablierten Wand- und Deckenaufbauten. Es werden keine Ökonomische Berechnungen vorgenommen.

Der Schwerpunkt dieser Studie liegt beim Planen von neuen Gebäuden und der gleichzeitigen Absicht, die verwendeten Bauteile später rückzubauen und wiederverwenden zu können. Nicht behandelt werden jedoch Umbauten oder der Rückbau von bereits bestehenden Bauten. Die Komponenten der Holzbauweise werden analysiert. Die Planung wird hinsichtlich bereits bestehender Lösungen beurteilt.

In dieser Studie kann nicht die gesamte Vielfalt der heutigen Gebäude betrachtet werden. Sie konzentriert sich darauf, generelle Massnahmen für die Planung zu erarbeiten.

2 Stand des Wissens

2.1 Begriffe und Definitionen

Recycling

Für das Wort Recycling existieren in der deutschen Sprache mehrere Definitionen und Bedeutungen. In dieser Studie wird Recycling gleichgesetzt mit: «Eine Reihe von Techniken zur Rückgewinnung von Abfällen und deren Wiedereinführung in den Produktionszyklus, aus dem sie stammen». Anders gesagt, es handelt sich dabei um die ganzheitliche Verwertung von Materialien. Dabei wird auch die thermische Verwertung thematisiert, um noch weitere Möglichkeiten zu ermitteln [7]. Es gibt drei Hauptarten von Recycling:

- Chemisches Recycling, bei welchem chemische Reaktion genutzt werden, um die Bestandteile aufzutrennen.
- Mechanisches Recycling, bei dem Maschinen für die Umwandlung der Abfälle verwendet werden
- Organisches Recycling, bei dem Abfälle durch Vergärung oder Kompostierung in Dünger oder Treibstoffe wie Biogas umgewandelt werden. [8]

Wiederverwendung

Unter der Wiederverwendung von Bauelementen versteht man die Rückgewinnung von Bauelementen bei Sanierungs-, Umbau- oder Abbrucharbeiten sowie die Suche nach einer neuen Verwendung für diese in einem anderen Objekt. Das Element kann dabei entweder in seiner ursprünglichen oder einer anderen Funktion eingesetzt werden. In allen Fällen werden die Elemente nicht oder nur geringfügig verändert [9].

Primärenergie gesamt

Darunter versteht man Rohenergie, die noch nicht technisch bearbeitet oder umgewandelt und auch nicht transportiert wurde. Beispiele sind Rohöl, Erdgas, Uran oder Kohle in der Erde, Holz in der Form eines Baumes, Solarstrahlung, potenzielle Energie des Wassers oder kinetische Energie des Windes. Die Primärenergie setzt sich insgesamt zusammen aus der erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärenergie [5].

Erneuerbare Primärenergie

Primärenergie, die aus einer Quelle gewonnen wird, die durch Nutzung nicht erschöpft wird. Beispiele erneuerbarer Primärenergie sind beispielsweise die thermische und Sonnenenergie, Windenergie, Umgebungswärme, hydraulische Energie sowie Biomasse aus nachhaltiger Land- und Forstwirtschaft [5].

Nicht erneuerbare Primärenergie

Primärenergie, die aus einer Quelle gewonnen wird, die durch Nutzung erschöpft wird. Beispielsweise Uran, Rohöl, Kohle oder Erdgas [5].

Graue Energie

Darunter fällt die gesamte Menge nicht erneuerbarer Primärenergie, die für alle vorgelagerten Prozesse erforderlich ist. Das heisst, vom Rohstoffabbau über Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse sowie für die Entsorgung, inklusive der dazu notwendigen Transporte und Hilfsmittel. Graue Energie wird auch als kumulierter, nicht erneuerbarer Energieaufwand bezeichnet. Die graue Energie der Bauteile und der gebäudetechnischen Anlagen wird aufgrund der Amortisationszeit in Kilowattstunden pro Jahr umgerechnet [5].

2.2 Aktueller Stand und Übersicht der Methoden

Früher gab es bei Holzbauten viele Wiederverwendungen, besonders bei denjenigen mit dem Fachwerkssystem [2]. Damals waren die Architekturstile regional betrachtet einheitlicher und die Baustoffe waren teuer. Mit der Industriellen Revolution gab es eine grosse Umstellung in der Art des Bauens. Die Erstellung der Bauteile wurde mechanisiert und es gab die Möglichkeit viel schneller und günstiger zu bauen. Heute wird versucht, die Erstellungskosten eines Bauwerks möglichst zu optimieren. Der Einfluss der Wiederverwendung von Bauteilen respektive die Art des Rückbaus findet heute in der Regel wenig Beachtung in der Bauplanung.

2.2.1 Planung für den Rückbau

Das Konzept des "Design for Disassembly" (DfD), das erste Mal 1990 definiert, ist in den letzten Jahren ein wichtiger Begriff geworden. Es handelt sich um eine Lösung des Ressourcenverbrauchs und der Recyclingfähigkeit der Bauteile. Hingegen ist das Konzept ziemlich neu und daher gibt es wenige Rückbauten im Sinne des Konzepts DfD.

Das DfD bedeutet einfache anpassbare und schnell rückbaubare Gebäude. Dadurch sind alle Verbindungssysteme, die gesamte Materialwahl und als auch die ganze Rückbaustrategie beinhaltet. Der DfD-Prozess erfordert eine genaue Planung von Anfang des Entwurfs der Projekte. Eine Planung nach DfD ist teurer als eine «normale Planung», aber es ermöglicht eine Amortisation dieser Mehrkosten am Ende des ersten Zyklus der eingesetzten Baustoffe. Nach der Studie von «Environmental Protection Agency of United States» [10] ist der Rückbau für die Wiederverwendung der Materialien günstiger als ein Abbruch mit anschliessender umweltgerechter Entsorgung.

Nach einem Blogartikel von ArchDaily sind wichtigsten Elemente des DfD die folgenden:

- Planung des Rückbaus:
 - Eine detaillierte Rückbauplanung mit allen Details und den richtigen Materialien entwickeln.
 - Idealerweise steht in der Planung wie die Materialien wiederverwendet, recycelt oder verwertet werden sollten.
- Bewertung von Materialien:
 - Baustoffe wählen die nicht toxisch oder giftig sind, hochwertige Materialien mit einer guten Lebensdauer. Die wichtigste Frage zu diesem Thema: Was passiert mit einem Bauteil am Ende seiner Nutzungsdauer?
- Wahl der Verbindungsdetails:
 - Die Verbindungen müssen möglichst einfach, sowie mit kleinen und einfachen Werkzeug demontierbar sein. Prioritär müssen verbolzende, geschraubt oder genagelte Lösungen gewählt werden. Die chemischen, nicht wieder anschließbaren Verbindungen müssen vermieden werden.
- Anpassung des Gebäudes:
 - Obwohl am Ende des Zyklus das Ziel ist, die Bauteile wieder zu verwenden, ist die vorgängige Überlegung von möglichen späteren Einsatzgebiete eine gute Strategie. Ein zukünftiger Umbau eines Gebäudes wird mit einer richtigen Systemtrennung vereinfacht [11].

In der folgenden Abbildung ist ein Beispiel von möglichen Systemtrennungen der Bauteile im Sinne des Rückbaus ersichtlich. Das übliche Vorgehen mit der Überlegung «wie man dieses Gebäude plant», muss mit der Überlegung «wie man das Gebäude einfach auseinanderbauen kann» einhergehen. Ausserdem ist die Planung eines neuen Gebäudes mit gebrauchten Bauteilen oder Baustoffen eine Herausforderung, weil die Elemente bereits vorgegeben sind. Wenn sich das DfD-Konzept etabliert, werden mehr Bauteile und damit mehr Entwurfs-Möglichkeiten zur Verfügung stehen.

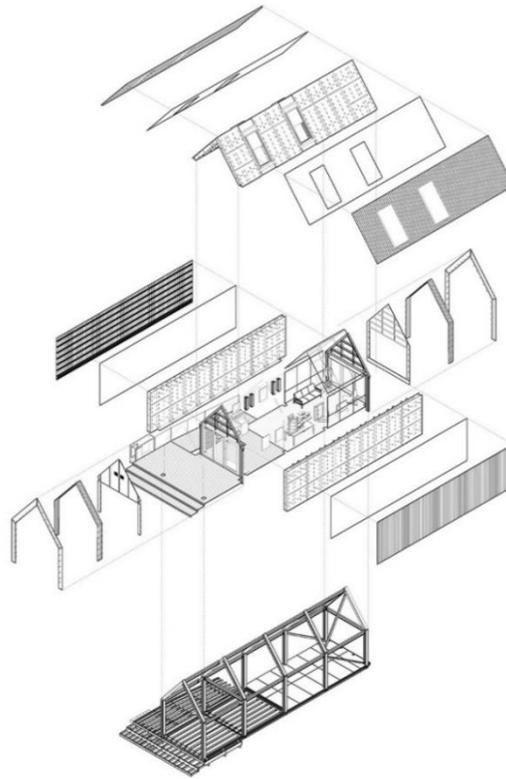


Abbildung 1: Konstruktionsdiagramm eines DfD-Gebäudes [11]

Eine Planung nach DfD ist zukunftsorientiert und muss absolut vollständig sein. Je besser die Planung ist, umso besser wird die Verwertung der Bauteile sein. Das Konzept kann auch sehr gut mit neuen Planungsinstrumenten wie zum Beispiel BIM angewandt werden.

2.2.2 Modellierung von Informationen für die Rückgewinnung

Die BIM-Technologie (Building Information Modeling) beschreibt eine vernetzte, modellbasierte Planung. Alle wichtigen Daten sind digital modelliert und erfasst. Mit dieser Technologie sollten die Fehlerquellen reduziert sowie die Kommunikation zwischen den im Bauprojekt involvierten Akteuren verbessert werden. Der grösste Vorteil eines virtuellen Modells ist, dass es für die kontinuierliche Evolution des Gebäudes aktualisiert werden kann. BIM kann auch im Rückbau ein interessantes Instrument sein. Die Sammlung der verschiedenen Daten ermöglicht einen Zugriff auf wichtige Informationen über das Gebäude [2].

Der in England entwickelte Begriff DRIM (Deconstruction recovery information modelling) beschreibt eine Methode für die Simulation des Rückbaus eines Gebäudes. DRIM ist, in vereinfachter Form, die Anwendung von DfD in einem BIM-Konzept. Nach dem Forschungsartikel «BIM-based deconstruction tool: Towards essential functionalities» kann das BIM die Leistung von DfD erhöhen [12]. So können die Informationen der Materialien richtig und mit einer standardisierten Lösung modelliert sein. Mit dieser Technologie können alle verfügbaren Materialien eines Neubaus oder eines zurückzubauenden

Gebäudes betrachtet und geplant werden. Die Gefahr mit einem solchen Verfahren ist, dass das Modell während seines Lebenszyklus nicht aktualisiert wird und damit die Informationen für den Rückbau zum Teil fehlen.

Bereits in den 80er Jahren hat die Holzbaubranche die Potentiale der computergestützten Planung (CAD) und der automatenunterstützten Fertigung (CNC) erkannt und macht sich diese zu Nutzen. Die grosse Mehrheit der Holzbauwerke in der Schweiz werden mit digitalen 3D-Modellen geplant und die erforderlichen Baumaterialien ab diesen Modellen bestellt. Meist werden die Holzbauten dann auch als Element- oder Modulbauten vofabriziert und auf den jeweiligen Baustellen nur noch montiert. Die verbauten Materialien sind so bei Holzbauwerken – im Gegensatz zu Massivbauten in Ortsbauweise - bereits aktuell, gut dokumentiert und damit nachverfolgbar. Dieses Potential kann genutzt werden um die so verbauten Materialien zu erheben, zu lokalisieren und später wieder dem Materialkreislauf zuzuführen.

2.2.3 Verbreitung des Themas in der Schweiz

In der Schweiz sind der Rückbau und die Wiederverwendung der Bauteile noch nicht sehr bekannt. Trotzdem hat das Thema in den letzten Jahren seinen Platz gefunden und ist aktuell eines der meist diskutierten Themen an Fachvorträgen. Gerade die aktuelle Materialverfügbarkeit und Preissteigerungen führen zu einem neuen Bewusstsein der Wichtigkeit einer sinnvollen Kreislaufwirtschaft.

2.2.4 Bauteilbörsen

In mehreren Orten, besonders in den grossen Ballungsgebieten gibt es Bauteilbörsen. Einige davon sind auch Mitglied von «Bauteilnetz Schweiz». Die Börsen bieten gebrauchte Baumaterialien wie Elektrohaushaltsgerät, Waschbecken, Fenster oder Türen [13]. Manchmal gibt es auch grössere Bauteile wie Holzbalken oder neue Bauteile die nicht verkauft wurden. Die Bauteilbörsen sind zurzeit jedoch noch in den Kinderschuhen und deshalb haben sie keine grosse und breite Auswahl. Die Bauteile stammen meistens von Rückbauten alter Gebäude und sind manchmal schon vor dem Rückbau mit Bildern auf der Internetseite dokumentiert.

2.2.4.1 Madaster

Madaster ist eine Plattform, die 2017 in den Niederlanden gegründet wurde. Seit 2019 gibt es der Schweiz Strategiepartner wie Eberhard Unternehmungen oder Losinger Marazzi. Madaster Schweiz ist eine nicht gewinnorientierte Organisation, die wie eine Online-Bibliothek für verbaute Materialien funktioniert. Alle Bauteile eines Gebäudes sind in einem «Materialpass» erfasst und mit einem kostenpflichtigen Abonnement auf einem externen Server gesichert. Der Besitzer kann seine Informationen nachsehen und entscheiden, welche Daten öffentlich sind. Das Hauptziel der Plattform ist die gebaute Umgebung vollständig zu dokumentieren und die Bauteile nach einem Zyklus mit anderen Projekten zu teilen. Diese Plattform hat ein grosses Potential in der Zukunft; sobald mehrere Gebäude erfasst sind. Dadurch gibt es eine grosse Materialauswahl und ermöglicht viel mehr Möglichkeit bei der Planung von neuen Projekte.

2.2.4.2 Strategie des Bundes

In der Schweiz hat die Bevölkerung 2017 die Revision des Energiegesetzes angenommen [14]. Dank der Revision muss der Energieverbrauch in allen Sektoren, also auch der Bau, reduziert werden. Es geht darum die Energieeffizienz zu verbessern und die Nutzung erneuerbarer Energien zu fördern. Um das neue Energiegesetz umzusetzen, hat der Bundesrat die Energiestrategie 2050 mit verschiedenen Massnahmen verabschiedet [15]. In heutigen Neubauten macht die Graue Energie bis zu einem Viertel der gesamten Primärenergie für Erstellung, Betrieb und Mobilität aus [16].

Parallel hat der Bundesrat den Bericht «Massnahmen des Bundes für eine ressourcenschonende, zukunftsfähige Schweiz (Grüne Wirtschaft)» [17] publiziert. In diesem Bericht geht es um die Definition der Grünen Wirtschaft. Das Konzept der Grünen Wirtschaft beinhaltet die Ressourcenschonung und Kreislaufwirtschaft, nach welchem der Druck auf die natürlichen Ressourcen abnehmen muss. Das Ziel ist eine mögliche lange Nutzung derselben Rohstoffe im Sinne einer Kreislaufwirtschaft.

2.2.4.3 Anforderungen in der Schweiz

Für die Berechnung der Grauen Energie gibt in der Schweiz die Norm SIA 2032:2020. Mit der Grauen Energie ist die Gesamtmenge der aufgewandten nicht erneuerbaren Primärenergie für ein Produkt, inklusive aller vorgelagerten Prozesse von der Austragung über die Herstellung bis hin zur Umsetzung und Entsorgung, einschliesslich Transport und Hilfsmitteln gemeint. In der Norm ist das Berechnungsverfahren für die Graue Energie der Materialien aufgeführt. Die Berechnung gilt für den Lebenszyklus eines Gebäudes. Die Lebensdauer der verschiedenen Bauteile eines Gebäudes sind nach der Amortisationszeit definiert. Die verschiedenen Teile eines Gebäudes haben nicht alle die gleiche Lebensdauer und müssen mit unterschiedlichen Lebensdauern berechnet werden. Für alle Berechnungen sind die Ökobilanzdaten im Baubereich der KBOB oder vergleichbaren Daten mit gleicher Qualität zu verwenden. Die Ökobilanzdaten können auch auf Produkt und Hersteller spezifische Werte aus Produktdeklarationen verwendet werden [18].

Die Norm SIA 480:2016 «Wirtschaftlichkeitsrechnung für Investitionen im Hochbau» definiert auch den Lebenszyklus eines Gebäudes.

2.2.4.4 Eco Bau

Eco Bau ist eine Informationsplattform eines Vereins. Bauämter von Bund, Kantonen und Städten haben sich zu diesem Verein zusammengeschlossen mit dem Zweck, das ökologische und gesunde Bauen zu etablieren. Die Organisationen wie KBOB, CRB und Bildungsinstitutionen sind auch Mitglieder. Der Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung und Verbreitung von Planungsinstrumenten für nachhaltiges, ökologisches und gesundes Bauen [19].

2.2.5 In Europa

In Europa gibt es grosse Unterschiede zwischen den verschiedenen Ländern. Der Einfluss liegt hauptsächlich bei der Politik aber auch kollektiv bei den Architekten, die das ganze Thema weiterbringen. Im Vergleich zur Schweiz weist Europa eine grössere Fläche auf und hat daher eine Austauschplattform mit grösserer Auswahl entwickelt.

2.2.5.1 Organisationen

Das Thema «Rückbau und Wiederverwendung» ist in Belgien gut bekannt, besonders in der Stadt Brüssel. Dort gibt es den Rotor-Verein mit Pionieren die sich seit mehr als 15 Jahre mit Rückbau und Wiederverwendung von alten Häusern auseinandersetzen. Der Verein publiziert regelmässig Berichte sowie Literatur und veranstaltet Ausstellungen. Seit 2016 hat der Verein eine Firma für den Rückbau und das Consulting von Projekten gegründet. Für mehrere Länder hat Rotor eine Plattform für eine Bauteilbörse unter dem Namen Opalis entwickelt [20].

In anderen Ländern gibt es auch Strukturen, die sich mit «Rückbau und Wiederverwendung» beschäftigen. Aber wie in der Schweiz, sind die Organisation noch nicht sehr bekannt, weil sie zum grössten Teil erst kürzlich neu gegründet wurden. Es gibt auch Architekten, die sich vertieft mit dem Thema befassen.

Weiter gibt es die Wissens- und Netzwerkplattform CircularHub, welches sich mit dem Thema der Kreislaufwirtschaft befasst. CircularHub gibt ein Online Magazin zum Thema heraus.

2.2.5.2 Bauteilebörsen

In Europa gibt es mehrere Bauteilbörsen, die regional sehr aktiv sind. Die Börsen bieten verschiedene Materialien auch für den Rohbau wie Backsteine oder Tragwerkelemente an. Es gibt auch grössere Plattformen, wie z.B. die Opalis Plattform, die mehreren Ländern genutzt wird.

2.3 Lebenszyklus von Gebäuden

Definitionsgemäss bezieht sich der Lebenszyklus eines Gebäudes nicht nur auf das Gebäude selber, sondern es gibt innerhalb des Zyklus mehrere Phasen. Der Lebenszyklus eines Gebäudes beschreibt die ganze Zeit von Rohstoffgewinnung und der Herstellung der Baustoffe, durch den Transport bis zur Baustelle und die Aufrichtung des Gebäudes, über dessen Nutzung bis hin zur Entsorgung. Der Begriff ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Der Lebenszyklus kann je nach der Materialqualität, Umgebung, der Nutzungszweck und der Lage variieren.

Herstellung Produkt

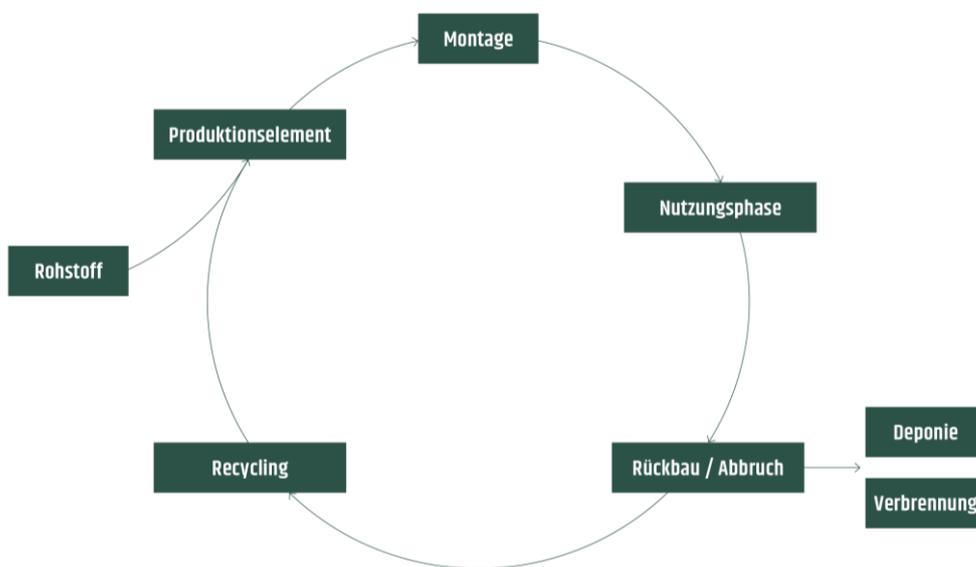


Abbildung 2: Lebenszyklus von Gebäuden

Die nachfolgende Tabelle zeigt den Zusammenhang von Gebäudenutzung und durchschnittlicher Nutzungsdauer. Hier muss der Unterschied zwischen wirtschaftlichem Lebenszyklus und des effektiven Lebenszyklus gemacht werden. Die wirtschaftliche Berechnung des ersten Zyklus erfolgt in der Schweiz gemäss SIA 480:2004. Der durchschnittliche Lebenszyklus ist definiert über die Nutzung des Gebäudes (siehe nachfolgende Tabelle).

Gebäudenutzung	Durchschnittliche Nutzungsdauer
Einfamilienhäuser	60 - 100 Jahre
Mehrfamilienhäuser (Mietwohngebäude)	60 - 80 Jahre
Verwaltungsgebäude, Bankgebäude	50 - 80 Jahre
Kindergärten, Kindertagesstätten	50 - 70 Jahre
Schulen, Berufsschulen	50 - 80 Jahre
Hallenbäder	40 - 70 Jahre
Tennishallen	30 - 50 Jahre
Kauf- und Warenhäuser	40 - 60 Jahre
Einkaufsmärkte	30 - 80 Jahre
Industriegebäude, Werkstätten, Lagergebäude	40 - 60 Jahre
Tankstelle	10 - 20 Jahre

Tabelle 1: Zusammenhang Gebäudenutzung und durchschnittliche Nutzungsdauer [30]

2.4 Kreislaufwirtschaft in der Baubranche

Der Bausektor ist einer der grössten Konsumenten von natürlichen Ressourcen [21]. Wenn der hergestellte Baustoff gebaut, genutzt und nach dem Verbrauch in eine Verbrennungsanlage oder in die Deponie geht, ist es ein lineares Wirtschaftssystem. Das erwähnte System bringt aus dem Baustoff nur einmal Wertschöpfung in seiner Lebensdauer und senkt danach seinen Wert bis zur Entsorgung. Das führt zu Rohstoffverknappung, Emissionen, grossen Abfallmengen und damit verbundenen Umweltbelastungen. In der Fachsprache wird oft von «cradle to grave» (von der Wiege bis zum Grabe) gesprochen, um das lineare Wirtschaftssystem zu beschreiben [22].



Abbildung 3: Schematische des linearen Wirtschaftssystems [22]

Die Kreislaufwirtschaft ist im Vergleich zum linearen Wirtschaftssystem, ein System mit Wiederverwendung der alten Materialien. Das Ziel ist eine Verwendung der Materialien in neue oder wiederverwendbare Produkte. Dieses System kann auch mit dem Fachausdruck «cradle to cradle» (von Wiege zu Wiege) bezeichnet werden, um den ganzen Zyklus vom Baustoff zu erwähnen. Die Kreislaufwirtschaft integriert immer wieder die Materialien während des ganzen Zyklus durch verschiedene Weisen (grüne Pfeile in der nachfolgenden Abbildung). Das Hauptziel einer Kreislaufwirtschaft ist eine möglichst lange Lebensdauer des Gebäudes zu ermöglichen, zum Beispiel mit der Reparatur und nicht dem Ersatz von den beschädigten Komponenten. Eine andere Art von Kreislaufwirtschaft ist das Recycling von Baustoffen. Dies schafft auch neue Arbeitsplätze in diesem Sektor. Gemäss BAFU können die Materialien im Kreislauf zwar behalten werden, aber der Energieverbrauch für das Recycling von Baustoffen ist jedoch gross.

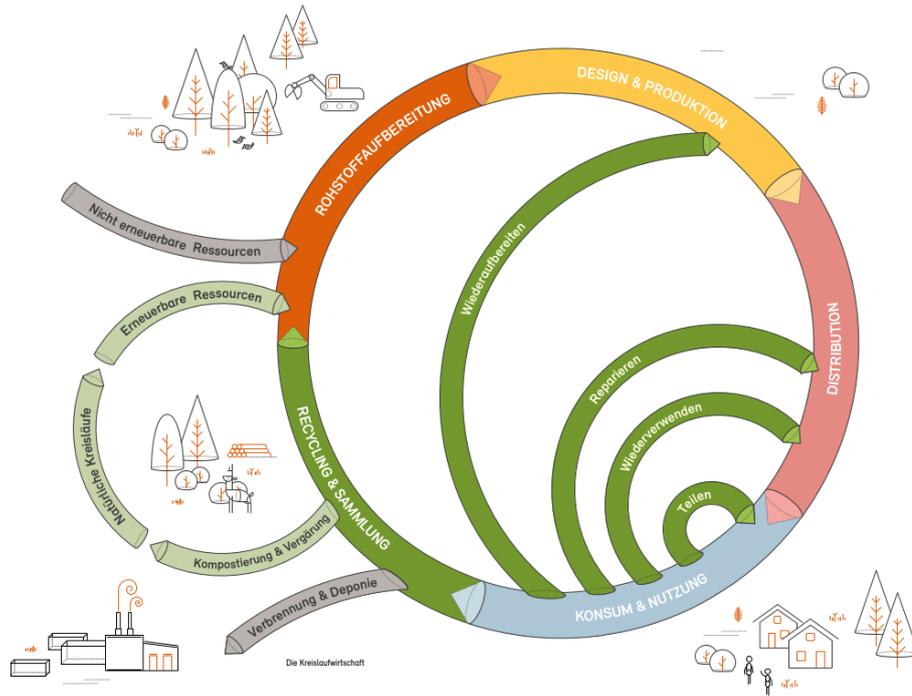


Abbildung 4: Schematische Kreislaufwirtschaft [22]

2.5 Systemtrennung

2.5.1 Scherschichten

Scherschichten (Shearing layers) ist ein Konzept des Architekten Franck Duffy. Das Gebäude ist für Duffy nicht nur eine Hülle, sondern beinhaltet mehrere Schichten, die alle andere Lebensdauern aufweisen. Das Konzept ist mit vier Schichten definiert:

- die Aussenhülle (Shell), die traditionelle Struktur des Gebäudes, die 30-50 Jahre halten kann
- die Haustechnik (Services), Verkabelung, Sanitäranlagen, Klimaanlage, die alle 15 Jahre ersetzt werden müssen.
- die Innenräume (Scenery), Anordnung von Trennwänden und abgehängten Decken, die 5 Jahre halten.
- die Möblierung (Set), die Anordnung der Möbel, die sich alle paar Monate, Wochen oder sogar häufiger ändern können

Später hat Stewart Brand diesen Begriff noch weiter entwickelt mit sechs verschiedenen Schichten:

- das Grundstück (Site), ist die geografische und städtische Lage. Es bleibt statisch, auch wenn darauf bereits verschiedene Gebäude standen.
- die Struktur (Structure), die tragenden Elemente sind aufwendig und teuer zu ändern. Die Struktur ist das Herz des Gebäudes. Die Lebensdauer variiert zwischen 30 und 300 Jahren.
- die Bekleidung (Skin), die Aussenhaut muss alle zwanzig Jahre neu gemacht werden. Die Gründe dafür sind meistens der Trend oder der technologische Fortschritt wie die Luftdichtigkeit und die bessere Wärmedämmung.
- die Haustechnik (Services) Dies sind die funktionierenden Anlagen eines Gebäudes: Kommunikationsverkabelung, elektrische Leitungen, Sanitäranlagen, Sprinkleranlagen, HLK (Heizung, Lüftung und Klimaanlage) und bewegliche Teile wie Aufzüge und Rolltreppen. Sie verschleissen alle sieben bis fünfzehn Jahre.
- der Raum (Space Plan), die Innenaufteilung sowie Wände, Decken, Bodenbelag und Türen. Geschäftsräume können sich etwa alle 3 Jahre ändern; aussergewöhnlich ruhige Wohnungen können 30 Jahre warten.
- das Mobiliar (Stuff) Stühle, Schreibtische, Telefone, Bilder; Küchengeräte, Lampen, Haarbürsten; alle die Dinge, die täglich bis monatlich verschoben werden [23].

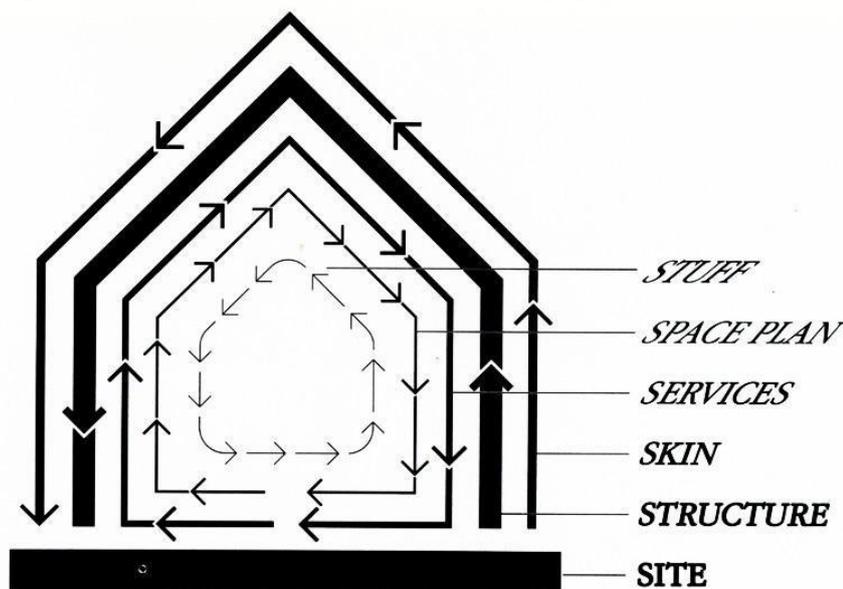


Abbildung 5: Scherschichten (Shearing layers) von Stewart Brand [24]

Die Konzepte von Duffy und Brand zielen auf eine gute Trennung von allen Hauptschichten ab. Das Ziel dieser Trennung ist eine möglichst lange Lebensdauer durch die Flexibilität der Gebäude. Bei diesem Konzept ist die Planung eines Projekts eine sehr wichtige Phase, weil es Auswirkungen auf die ganze Lebensdauer des Gebäudes hat.

2.5.2 Systemtrennung in der Schweiz

In der Schweiz hat das AGG (Amt für Grundstücke und Gebäude des Kantons Bern) ein Dokument über die Systemtrennung erstellt [25]. Das AGG stellt die Bauweise mit Systemtrennung gegenüber der herkömmlichen Bauweise. Dabei kommt heraus, dass mit der Systemtrennung langfristig von Bauteilen profitiert werden kann, wobei mit der herkömmlichen Bauweise die Bauteile meistens nur einmal genutzt werden. Die Systemtrennung erfolgt in folgende drei verschiedene Gruppen: Primärsystem (Erschliessung, Tragstruktur, Gebäudehülle), Sekundärsystem (Innenwände, Decken und Böden, feste Installationen) und Tertiärsystem (Apparate, Einrichtungen, Mobiliar). Alle Systemgruppen haben eine andere Lebensdauer und sind teilweise unabhängig von den Anderen.

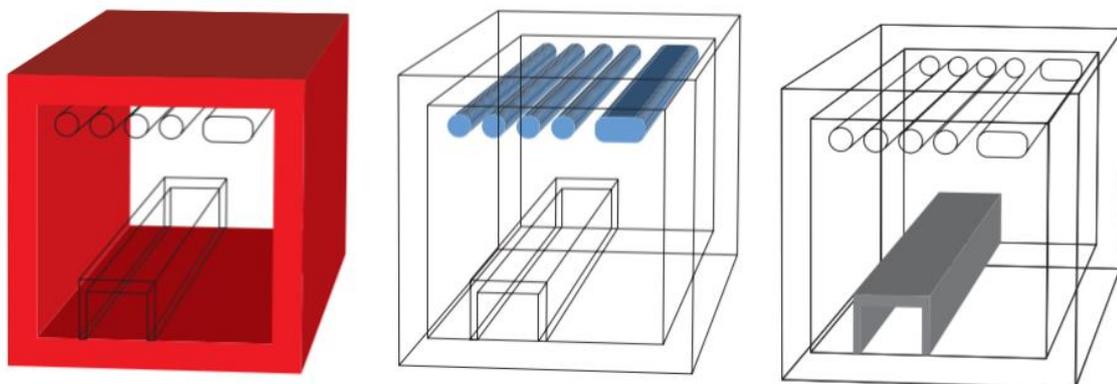


Abbildung 6: Systemtrennung mit Primär-, Sekundär- und Tertiärsystem [25]

Die grossen Gebäude haben eine sehr lange Planungsphase über mehrere Jahre und oft gibt es noch Änderungen während dieser Zeit. Die Systemtrennung bringt einige Vorteile während der Planungsphase. Dank der voneinander unabhängigen Systeme haben nicht alle Projektänderungen zwangsweise einen Einfluss auf alle Systeme (z.B. Änderung der Haustechnik hat oft keinen grossen Einfluss auf die Gebäudestruktur). Während der Nutzungsphase macht die Systemtrennung das Gebäude sehr flexibel für die Entwicklungen der Nutzung oder Umnutzungen werden damit erleichtert. Der Aufwand für die Wartung ist tiefer dank der Zugänglichkeit der verschiedenen Bauteile. Bei der letzten Phase des Rückbaus ist die fachgerechte Separierung möglich.

2.5.3 Trennbarkeit der Bauteile

Die Bauteile oder Baustoffe eines Aufbaus dürfen nicht mit einer unversiegbaren Verbindung fest ineinander verbunden, sondern alle Materialien müssen idealerweise einfach trennbar sein. Die Verbindungen müssen für einen Rückbau ohne Verschnitt umkehrbar sein. Die verschiedenen Schichten müssen möglicherweise zusammenschraubt werden und der Zugang an die Schrauben muss einfach sein. Der Rückbau muss mit einfachen und griffigen Werkzeugen realisierbar sein. Auch die Materialien müssen robust und dauerhaft für die sukzessive Montage, Rückbau, Transport und Lagerung sein. Die folgende Abbildung illustriert einen Standardwandaufbau mit festen Verbindungen zwischen den Materialien im Vergleich mit einem Wandaufbau mit trennbaren Materialien. Die Trennbarkeit ist wirtschaftlich effizient, wenn der ganze Rückbauprozess in kurzer Zeit erfolgen kann. In einigen Fällen

ist die Verschraubung oder mechanische Verbindung aus statischen oder optischen Gründen nicht möglich. Bei solchen «untrennbaren» Bauteilen besteht die Möglichkeit, diese als ganzes Bauteilelement wieder zu verwenden (z.B. Hohlkastendecke) oder das Trennen von Klebefugen (z.B. analog der Auftrennung von Marmorsteinplatten) [2].

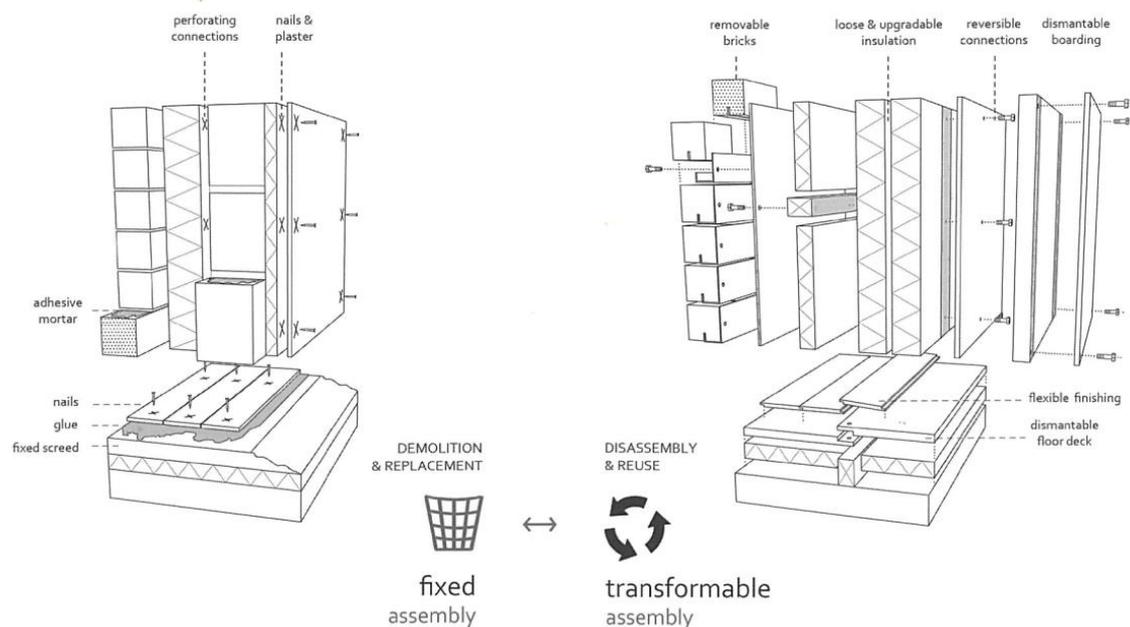


Abbildung 7: Unterschied zwischen Fixe- und Umkehrbarverbindung [2]

2.6 Holzbau in der Schweiz

Das Holz wird traditionell seit langer Zeit in der Schweiz als Baumaterial verwendet. Die Schweiz weist auf einem Drittel der gesamten Fläche Wald auf. Die Nähe des Baustoffs ist früher aufgrund der kurzen Transportwege ein entscheidendes Argument gewesen. Deswegen wurde in den waldreichen Gegenden viel mit Holz gebaut. Die Industrialisierung hat das Holz zugunsten von Stahl und Beton als Tragwerkelement teilweise verdrängt und die Nutzung des Holzes diente oft nur noch als sekundäres Material. Nur während den Krisenzeiten (z.B. Weltkriege) mit der Ressourcenverknappung hat das Holz wieder Marktanteile erobert. Mit der erkannten Problematik der weltweiten Treibhausgas-Emissionen und der lokalen Wertschöpfung ist das Holz als örtlich verfügbares Naturprodukt wieder im Vordergrund gerückt. Auch mit Hilfe der neuen Technologie der Holzbearbeitung ist Holz ein vollwertiges Produkt mit viel Anwendungen. Die Holzkonstruktion ist damit gegenüber Beton- oder Stahlkonstruktion konkurrenzfähig [3].

Gemäss einer Studie der Berner Fachhochschule betrug 2018 der Holzanteil als Tragwerksmaterialien in der Schweiz 17.3% und von Fassaden-Materialien 29.3%. Der Einsatz von Holz bei Mehrfamilienhäusern hat zwischen 2012 und 2017 um 11% zugenommen und um 75.6% bei den öffentlichen Bauten. Bei Einfamilienhäusern hat der Einsatz von Holz um 22% abgenommen, wobei diese Zahl absolut zu betrachten ist und generell eine Reduktion in der Anzahl Neubauten in dieser Kategorie vorhanden ist [26].

2.6.1 Holz als nachhaltiger Rohstoff

Das Holz ist ein nachwachsender Rohstoff aus der Natur und gilt daher als nachhaltig. Tatsächlich bildet der Baum bei der Photosynthese aus Sonnenlicht, Wasser und Kohlendioxid, Glucose und Sauerstoff. Die Glucose ist in der Holozellulose (Gerüstsubstanz der Zellwand) enthalten und Sauerstoff wird

in die Umgebung abgegeben. Das Kohlendioxid ist dann in der Form von Kohlenstoff im Baum gebunden solange das Holz nicht verbrannt wird oder sich zersetzt. Wird das Holz vor dem natürlichen Abbauprozess im Wald geerntet und in einem Gebäude gespeichert, so kann die Speicherdauer des Kohlenstoffs verlängert werden. Betrachtet man die energetische Nutzung von Holz, wird bei der Verbrennung das in der Lebensdauer eines Baums mittels Photosynthese gebundene Kohlendioxid wieder in die Atmosphäre abgegeben. Damit ist der natürliche Kreislauf eines Baumes CO₂-Neutral. Die folgende Abbildung illustriert den Rohstoffkreislauf von Holz aus dem Wald zu den Anwendungen als fertiges Produkt oder als Energieträger.

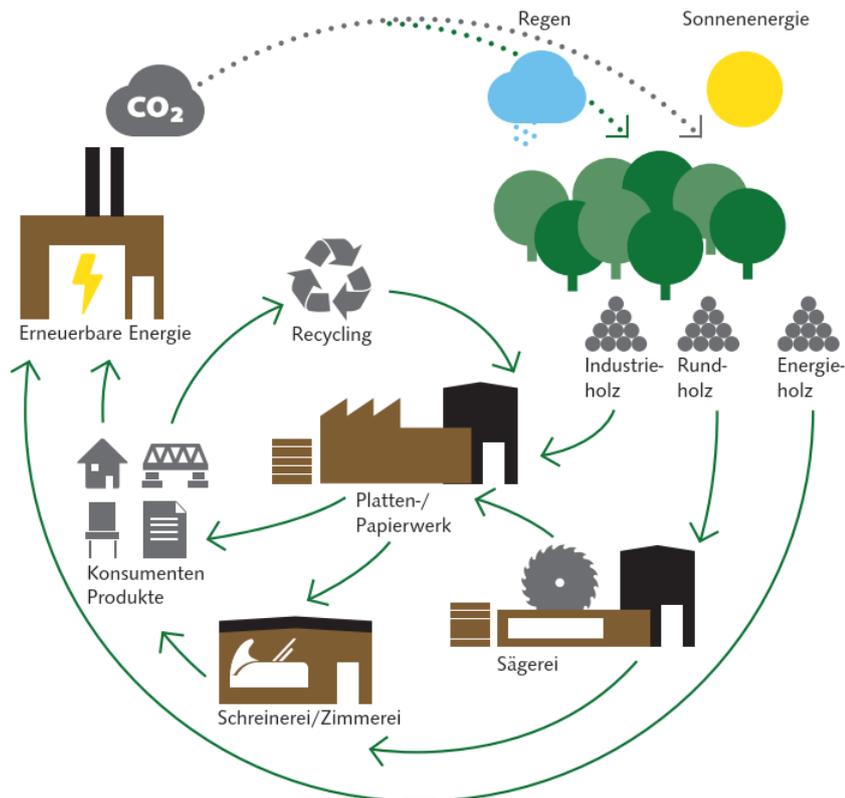


Abbildung 8: Rohstoffkreislauf in der Wald- und Holzwirtschaft [27]

Eine wichtige Beachtung gilt dem Transportweg von Holz, welcher zwischen einheimischem und ausländischem Holz unterschiedlich ist. Der Transportweg ist, neben dem Energiemix bei der Herstellung der Ausgangsprodukte, der Faktor mit der grössten Varianz in der Energiebilanz.

2.6.2 Holzbausysteme

Im Holzbau gibt es mehrere Systeme mit verschiedenen Anwendungen, aber die Vorteile von dieser Bauart bleiben bei allen Systemen gleich. Der Holzbau ist leicht und ermöglicht die Aufstockung von bestehenden Gebäuden ohne grosse statische Verbesserung sowie tiefere Fundationskosten. Mit der Möglichkeit eines grossen Vorfertigungsgrades in der witterungsgeschützten Produktionsstätte kann die Bauzeit massgeblich reduziert werden. Auch Modulbauten haben sich in Punkto Wiederverwendung gerade bei temporären Bauten bewährt. Bei einem Brand in einem Holzbau bleibt der Restquerschnitt unter der verkohlten Oberfläche von Holz noch lange tragfähig. Die Hitze hat keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit. Der Stahl, im Vergleich zum Holz, verliert seine Tragfähigkeit bei 450°C und der Beton verliert bei 650°C um zwei Drittel seiner Druckfestigkeit. Die Abbrand Geschwindigkeit ist beim

Holz messbar und deswegen kann ein Rest-Querschnitt statisch berechnet werden. Das hohe Verformungsvermögen von Holz kann die Kräfte aus Erdbeben abbauen. Die geringen Gewichte von Holzbauten führen dazu, dass weniger Erdbebenkräfte wirken können [27].

In der Schweiz haben sich einige typische Konstruktionsarten für den Holzbau etabliert. Die folgenden vier Konstruktionsarten sind in der Schweiz am häufigsten vertreten:

Massivholzbau

Ist gut geeignet für hohe Lasten; der Massivholzbau ist bei mehrgeschossigen Gebäuden am häufigsten vertreten. Die Gebäude bestehen aus grossflächigen Platten wie Brettsperrholz, verdübelten Brettstapeln oder starr verleimten Hohlkastenelementen. Das Tragsystem nimmt vertikale und horizontale Lasten auf. Diese Bauweise ermöglicht viele konstruktive Varianten, indem beispielsweise Öffnungen für Türen und Fenster ausgeschnitten werden können. Der Holzeinsatz ist bei dieser Bauweise sehr gross.

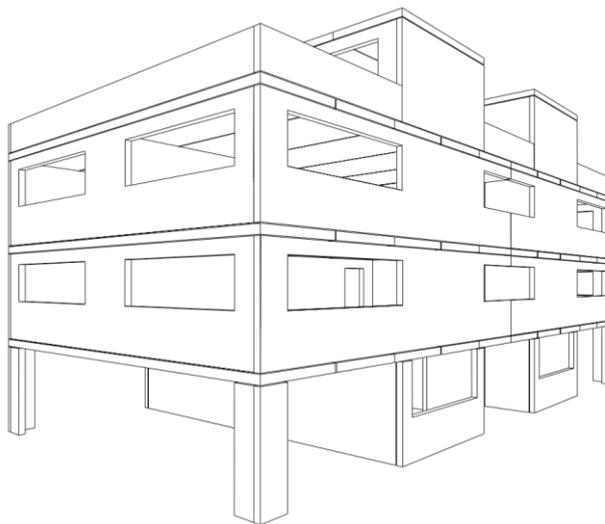


Abbildung 9: Massivholzbau [27]

Holzrahmenbau

Die in der Schweiz am stärksten verbreitete Konstruktionsart; der Holzrahmenbau hat das höchste Potenzial bezüglich des Vorfertigungsgrads und erlaubt daher Platz- und Zeitersparnisse. Die Elemente bestehen aus Rahmen mit verstärkenden Rippen. Der Rahmen wird beidseitig mit Gipsfaserplatten oder Holzwerkstoffen beplankt, dazwischen wird die Wärmedämmung eingelegt. Die Geschosdecken werden im Holzrahmenbau üblicherweise als Vollholzdecken, Hohlkastendecken oder Rippendecken ausgeführt.

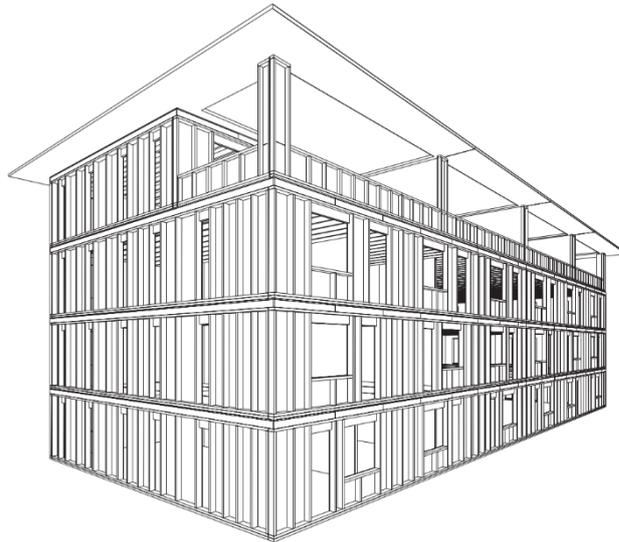


Abbildung 10: Holzrahmenbau [27]

Skelettbau

Kommt vor allem in grossen Gebäuden zum Einsatz. Der Skelettbau besteht in vertikaler Richtung aus Stützen und in horizontaler Richtung aus Trägern. Aufgrund der grossen Spannweiten wird für den Skelettbau meistens Brett-schichtholz verwendet. Die grossen horizontalen Flächen ermöglichen viele Freiheiten bei der Innenwandkonzeption durch nichttragende Wände. Aussenseitig können theoretisch auch Glasfassaden verbaut werden. Die Geschossdecken werden im Skelettbau üblicherweise als Rippendecken ausgeführt.

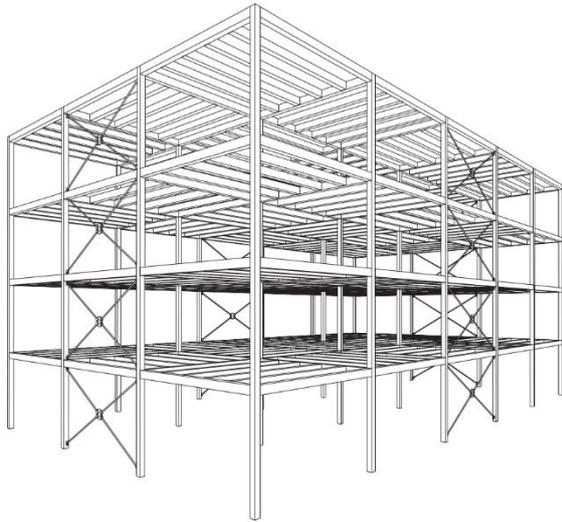


Abbildung 11: Skelettbau [27]

Hybridbau

Das Holz wird beim Hybridbau mit anderen Bauteilen aus dem Massiv- oder Stahlbau kombiniert. Das Ziel der Hybridbauweise ist es, das Material so zu verwenden, dass die spezifischen Vorteile voll genutzt werden und Defizite der Materialien weniger stark zum Vorschein kommen. Der Holzbau kommt im Hybridbau oftmals als Aussenfassade zum Einsatz, während die innere Tragkonstruktion und Geschossdecken in Massivbauweise ausgeführt werden. Auf Bauteilebene ist das Holz-Beton-Verbundsystem (HBV-System) ein typisches Hybridbauteil. Dabei nimmt das Holz die Zugkräfte auf und der Beton die Druckkräfte. Diese Hybridelemente führen zu weniger Gesamtmasse und einer besseren Ökobilanz verglichen mit der massiven Bauweise [27].

Modulbau

Der Modulbau ist eine Bauweise, bei welcher Raumzellen mit einem hohen Vorfertigungsgrad produziert und an den jeweiligen Nutzungsort verschoben werden. Hinsichtlich der Kreiswirtschaft bietet sicher der Vorteil, dass bei Standardisierten Raummodulen diese nach der Nutzungsdauer verschoben und für einen ähnlichen Verwendungszweck einfach wiederverwendet werden können.

3 Ermittlung der Einflussfaktoren auf Wiederverwendbarkeit

3.1 Methode und Vorgehensweise

Dieses Kapitel beschreibt die Einflussfaktoren, welche die Wiederverwendung beeinflussen. Die Einflussfaktoren müssen die aktuelle und künftige Marktsituation sowie die gesellschaftlichen Anforderungen berücksichtigen. Darüber hinaus dürfen diese Faktoren nicht in Konkurrenz stehen zu den geltenden Normen für den Schutz der Gebäudenutzer, wie beispielsweise Brand- oder Schallschutz. Die verschiedenen Einflussfaktoren werden in vier Hauptkategorien unterteilt: technische Einflussfaktoren, normative und labelbestimmte Einflussfaktoren, gesellschaftliche Einflussfaktoren und schliesslich wirtschaftliche Einflussfaktoren. Diese Kategorien decken ein breites Feld ab und erlauben daher, viele Elemente zu berücksichtigen, die sich auf den Rückbau und die Wiederverwendung von Holzkonstruktionen beziehen.

Um zwischen den verschiedenen technischen Elementen eines Gebäudes zu unterscheiden, werden die Scherschichten für den Holzbau nach der Originalversion von Stewart Brand verwendet. In jeder Schicht werden die entsprechenden Elemente und Einflüsse aufgelistet und beschrieben. Die Referenz für die Lebensdauer der Elemente in Abhängigkeit der Schicht wird gemäss SIA 480:2016 (Wirtschaftlichkeitsrechnung für Investitionen im Hochbau) und SIA 2032:2020 (Graue Energie - Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden) vorgegeben. Dabei werden auch Faktoren berücksichtigt, die in Vergangenheit an Bedeutung gewonnen haben, wie die Digitalisierung und Standardisierung.

Die Normen zur Berechnung der grauen Energie (SIA 2032:2020) und der Energieeffizienz (SIA 2040:2017) ermöglichen es, den Stand der Technik zu berücksichtigen. Die Energie-Labels, die sich aus diesen Normen ergeben, müssen ebenso beschrieben werden, wie ihre Einflüsse im Bereich der wiederverwendbaren Materialien.

Die Gesellschaft ist ein Schlüsselfaktor, um die Auswirkungen der Entwicklungen in diesem Bereich abschätzen zu können. Die Studie der Gesellschaft sollte die Möglichkeiten des Rückbaus und der Wiederverwendung im Holzbau aufzeigen, um sich den Gewohnheiten und dem Benehmen der Menschen anzupassen.

Der wirtschaftliche Faktor ist bestimmend für alle Investitionen in der Baubranche, weshalb die verschiedenen Einflussfaktoren in diesem Bereich im Rahmen des Rückbauprozesses und der Wiederverwendung von Holzkonstruktionen entwickelt werden. Bei dieser Studie werden keine wirtschaftlichen Berechnungen berücksichtigt, sondern nur die Elemente, die sich aus dem Wirtschaftsfaktor ableiten lassen.

3.2 Technische Einflussfaktoren

3.2.1 Einflussfaktoren bei Scherschichten im Holzbau

Die Schichtentrennung ist ein wichtiges Element für die Wiederverwendung. Jede Schicht hat eine unterschiedliche Lebensdauer. Auch die Materialien innerhalb einer Schicht können eine unterschiedliche Lebensdauer aufweisen. Diese ist abhängig von der Lage und Funktion des Materials im Gebäude. Je nachdem müssen Schichten miteinander verbunden werden, um Stabilität zu gewährleisten und die Belastungen aufnehmen zu können, denen das Element ausgesetzt ist. In diesem Kapitel werden die Schichten untersucht, die den Aspekt der Wiederverwendung von Holzkonstruktionen beeinflussen. Weiter werden sie gemäss den Normen SIA 480:2016 und SIA 2032:2020 entsprechend ihrer Lebensdauer in Relation gesetzt.

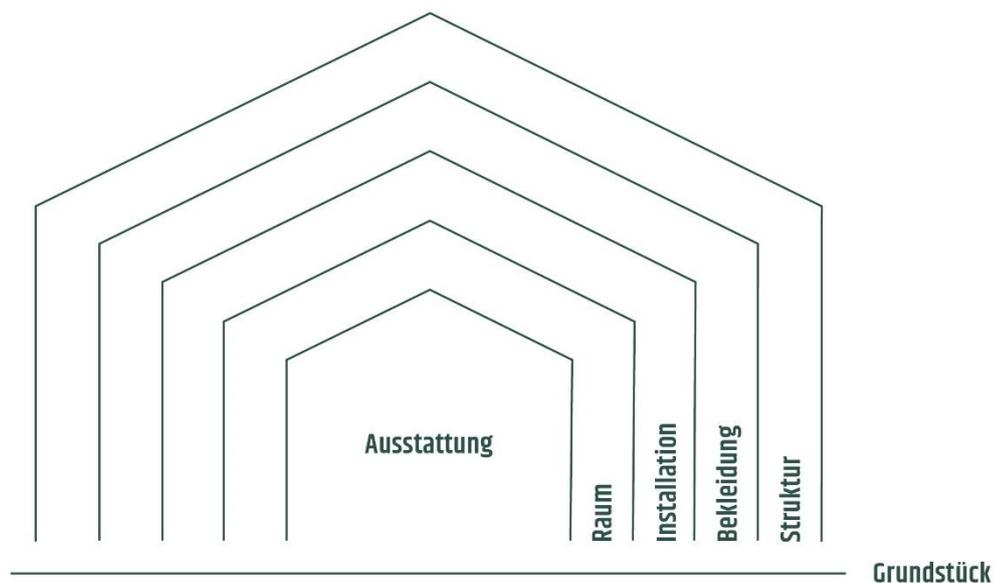


Abbildung 12: Scherschichten im Holzbau, Modellanpassung von Stewart Brand

In Abbildung 13 werden die Schichten hervorgehoben, die den Holzbau betreffen. Das Mobiliar ist kein integraler Bestandteil der Gebäudekonstruktion und wird daher nicht berücksichtigt. Im Holzbau gibt es mehrere Konstruktionsvarianten, nicht alle Materialschichten stimmen genau mit den Scherschichten (siehe Abbildung 12) überein.



Abbildung 13: Schichten im Holzbau

3.2.1.1 Grundstück

Das Grundstück beeinflusst das Gebäude auf verschiedene Weise, von der Planung bis hin zum Rückbau. Da ein Gebäude als potenzielles Lager für wiederverwendbare Materialien betrachtet werden kann, spielt sein Standort eine wichtige Rolle. Je weiter die zukünftige Baustelle vom abzubauenen Gebäude entfernt ist, desto weniger attraktiv wird sie für die Wiederverwendung.

Tabelle 2 : Einflussfaktoren bei den Grundstück

Scherschicht	Einflüsse auf die Wiederverwendung
Grundstück	Grösse, Dimensionen das Gebäude
	Geografischer Standort
	Umgebung des Gebäudes

3.2.1.2 Struktur

Die Struktur eines Gebäudes ist der Teil, ohne den es nicht stehen könnte und somit die Tragkonstruktion beinhaltet. Die Struktur bestimmt massgeblich die Abmessungen und Lebensdauer eines Gebäudes. Die Struktur dient als Grundlage für alle folgenden Konstruktionen. Diese Strukturelemente umfassen Stützen und Decken sowie lastabtragende Bauteile. Die Strukturelemente werden grundsätzlich mit Elementen hergestellt, deren Qualität weit über die Anforderungen an die ursprünglich geplante Lebensdauer des Gebäudes hinausgeht. Die Befestigung der Strukturelemente beeinflusst die Wiederverwendung elementar.

Nach der Norm SIA 480:2016 beträgt die durchschnittliche Lebensdauer einer Gebäudestruktur 75 Jahre. Gemäss der Norm SIA 2032:2020 beträgt die für die Berechnung der Energiebilanz berücksichtigte Abschreibungszeit für tragende Strukturen 60 Jahre. Diese Lebensdauer ist eine Art Massstab für die Zeitspanne, nach der ein Gebäude **gemäss Norm** wieder abgebaut werden **könnte**. Die Lebensdauer von Gebäuden kann jedoch je nach Bauqualität und Wartung während des Lebenszyklus und Nutzung erheblich variieren.

Tabelle 3 : Einflussfaktoren bei den Struktur

Scherschicht	Einflüsse auf die Wiederverwendung
Struktur	Lebensdauer vom Gebäude
	Verbindungssystem
	Grösse der Elemente

3.2.1.3 Bekleidung

Die Bekleidung wird in dieser Studie im weitesten Sinne mit Gebäudehülle inklusive Füllung, jedoch ohne Tragfunktion umschrieben. Im Holzbau handelt es sich dabei um mehrere Schichten mit übereinanderliegenden Materialien wie Plattenwerkstoffe, Bekleidungen und Dämmungen

Die Fassade ist eines der Elemente, welches der Witterung am stärksten ausgesetzt ist. Bei Holzfassaden werden Konservierungsmittel wie Farben, Lacke oder Imprägnierungen eingesetzt, um die Lebensdauer der Elemente zu verlängern. Die Fassade ist ein Element, welches ein Gebäude individualisieren kann. Daher existiert eine grosse Menge an Produkten, die verwendet werden können. Das Befestigungssystem verbindet die verschiedenen Elemente auf mehr oder weniger sichtbare Weise. Die Befestigung kann im Falle von Klebstoff irreversibel sein. Wenn andererseits beispielsweise Schrauben oder Klammern verwendet werden, ist sie hingegen reversibel. Die Komplexität und ständige Weiterentwicklung der Techniken zur Abdichtung der Gebäudehülle macht die Wiederverwendung kompliziert und teuer.

Nach der Norm SIA 480:2016 beträgt die durchschnittliche Lebensdauer der Aussenwandverkleidung von Gebäuden 40 Jahre. In der Norm SIA 2032:2020 beträgt der Betrachtungszeitraum für die Bilanz ebenfalls 40 Jahre.

Tabelle 4 : Einflussfaktoren bei die Verkleidung

Scherschicht	Einflüsse auf die Wiederverwendung
Bekleidung	Verwitterung
	Holzschutzmittel
	hohe Materialvariabilität

3.2.1.4 Installationen

Die Installationen in einem Gebäude sind keine direkten Faktoren bei der Wiederverwendung von Holzkonstruktionen, aber sie können die Konstruktion beeinflussen. Die technischen Installationen, die für die Konstruktion oft individuell angefertigt werden, zwingen den Holzbauer, Raum für Lüftungskanäle, die Verlegung von elektrischen Kabeln oder anderem vorzusehen. Die Trennung dieser «Scherschicht» hat daher Vorrang, wenn eine Wiederverwendung von Materialien vorgesehen ist.

Nach SIA 480:2016 beträgt die durchschnittliche Lebensdauer der Gebäudetechnik 35 Jahre. Gemäss SIA 2032:2020 beträgt der Betrachtungszeitraum für die Bilanz 30 Jahre.

Tabelle 5 : Einflussfaktoren bei die Installationen

Scherschicht	Einflüsse auf die Wiederverwendung
Installation	Trennung
	Stelle
	Komplexität

3.2.1.5 Raum

Die Raum-Scherschicht ist die letzte wirksame Schicht des Gebäudes, obwohl sie kein integraler Bestandteil der Holzkonstruktion ist. Sie repräsentiert die Materialien, die vom Inneren eines Raumes aus sichtbar sind, wie zum Beispiel Fussbodenelemente, Decke, Innenwände und Türen. Wie bei der Bekleidungs-Schicht ist dies ein Element, durch das eine gewisse Individualisierung durch Lackierung oder andere Oberflächenbehandlungen ermöglicht wird. Darüber hinaus kann diese Schicht je nach Trend und Vorlieben der Benutzenden ihre Wiederverwendung sehr spezifisch und komplex machen. Diese Schicht ist oftmals auch Abnutzung und UV-Strahlung ausgesetzt.

Gemäss SIA 480:2016 gibt es keine Spezifikation für die durchschnittliche Lebensdauer dieser Schicht. Im Gegensatz dazu erhöht die Norm SIA 2032:2020 die Amortisationszeit für Elemente in dieser Schicht auf 30 Jahre.

Tabelle 6 : Einflussfaktoren bei den Raum

Scherschicht	Einflüsse auf die Wiederverwendung
Raum	Format und Dimensionen der Elemente
	Oberflächenbehandlung
	Abnutzung

3.2.2 Digitalisierung

Die Digitalisierung ermöglicht der Architektur und Bauplanung seit vielen Jahren verschiedene Vorteile. Der Informationsaustausch wird beispielsweise für die Beteiligten und Akteure der Bauwirtschaft erleichtert, indem sie Schnittstellen vereinfacht und das Format der Kommunikationsdateien standardisiert. Die Planung mit computergestützten Werkzeugen ist Standard im Schweizer Bauwesen, aber die Digitalisierung mit Werkzeugen wie in BIM ist bisher nur einem Teil der Baustellen vorbehalten.

Mit der BIM-Technologie gibt es zurzeit noch sehr wenig Erfahrung hinsichtlich der Wiederverwendung von Materialien. Da es sich um eine relativ neue Technologie handelt, wird sie nur von einem kleinen Teil der Planenden verwendet. Gemäss einer Umfrage der pom+Consulting AG aus dem Jahr 2018 arbeiten 40 Prozent der Befragten in der Baubranche mit BIM, beispielsweise Architekten oder Ingenieure. Bei dieser Zahl gilt zu beachten, dass nicht alle Projekte mit BIM realisiert werden, sondern nur Grossprojekte mit einem geplanten Budget über 50 Millionen Franken [29].

BIM ermöglicht einen besseren Gebäudeentwurf durch Antizipieren und Optimierung in der Anfangsphase von Projekten. Auf diese Weise verfügen die Akteure des Bauprozesses über ein gemeinsames Modell, welches eine bessere Koordination der Arbeit ermöglicht. Diese Technologie ermöglicht zudem eine bessere Überwachung der Baustelle, da sie mit allen Handwerkern abgestimmt ist und der Baufortschritt laufend dokumentiert wird. Schliesslich ermöglicht BIM auch eine bessere Ausnutzung der Infrastruktur, indem ihre Wartung optimiert und das Modell im Zuge der Transformation aktualisiert werden kann [30]. Die BIM-Technologie ermöglicht es zudem, das 3D-Modell mit «Materialpässen» zu verknüpfen, um die verschiedenen in einem Gebäude vorhandenen Materialien digital zu referenzieren. Diese Materialpässe enthalten Informationen über die Abmessungen, das Material und die Qualität eines Elements. Dank des 3D-Modells lässt sich eines Bauteils leicht lokalisieren.

Es gilt anzumerken, dass mit BIM geplante Projekte im Sinne der Wiederverwendung geeignet sind, da ein Teil der Referenzierung von Bauteilen und Materialien bereits erfolgt.

Was der Baubranche allerdings aktuell noch fehlt, sind einheitliche Datenstandards und -strukturen um die Materialinformationen – von Anforderungswerten bis hin zu effektiven Materialeigenschaften – in

allen BIM-Modellen gleich und somit effizient auswertbar zu verorten. Weiter fehlen Datenformatschnittstellen, um bestehende Materialdatenbanken, wie beispielsweise die Ökobilanzdaten von KBOB / eco-bau sowie die effektiven Materialeigenschaften der jeweiligen Hersteller mit den verschiedenen BIM-Autorensoftwares verknüpfen und diese Informationen auch aktualisieren zu können.

Da sich die Holzbaubranche bereits seit den 80er-Jahren die 3D-Planung, Bestellung von Materialien ab diesen Daten sowie die maschinengestützte Fertigung zu Nutzen macht und die Mehrheit der Holzbauten in der Schweiz vorfabriziert werden, sind die darin verbauten Materialien bereits heute auch bei vielen Projekten ohne BIM-Einsatz nachverfolgbar. Somit könnten bei einem grossen Teil der Holzbawerke zumindest die Holz- und Holzsystembauteile wieder den Materialkreisläufen zugeführt werden. In der Tabelle 7 stehen die verschiedenen Einflussfaktoren der BIM-Technologie in Bezug auf die Wiederverwendung von Materialien:

Tabelle 7 : Einflussfaktoren bei die Digitalisierung

Phase	Einflussfaktoren
Planung	Optimierung von Konstruktionsdetails Schnittstelle zwischen Planern Kollisionsvermeidung
Bauen	Besserer Informationsfluss Optimierung der Logistik
Nutzung	Management des Gebäudelebenszyklus Kontinuierliche Aktualisierung Materialdatenbank

Die Madaster-Plattform verwendet das gleiche Prinzip des Materialpasses. Es handelt sich dabei um eine grosse Bibliothek von Materialien, zu der mehrere Gebäude gehören. Die Informationen aus dem BIM-Modell werden in diese Plattform eingespeist und jedes Teil wird mit einem vordefinierten Material in der Datenbank der Plattform verknüpft. Die Bauteile können auch manuell erfasst werden, wenn das Projekt nicht mit BIM geplant wird. Die Plattform bietet einen Überblick über die Gebäude. Also nicht nur über die Materialien, sondern auch über die Kosten und den Bauprozess. Sie erlaubt nur den Zugang zu den Gebäuden, die entweder selbst projektiert werden oder die von anderen Leuten zugänglich gemacht wurden. Die Plattform ist interessant für Firmen, die einen grossen Gebäudebestand mit vielen Gebäuden haben. Für eine Privatperson oder ein Unternehmen, das nur an denkmalgeschützten Gebäuden arbeitet und kein Zugang zu anderen Gebäuden besitzt, ist diese Plattform nicht interessant [31].

In der Tabelle 8 werden die Vor- und Nachteile einer Online-Gebäude-Plattform wie Madaster gegenübergestellt.

Tabelle 8 : Vorteile und Nachteile bei die Online-Gebäude-Plattform

Vorteile	Nachteile
- Übersicht der gebauten Gebäude - Aufwertung von Materialien - wenig Aufwand bei BIM-Projekten	- Einschränkung auf eigene Projekte - interessant nur für grosse Firmen

3.2.3 Standardisierung in der Baubranche

Die Standardisierung der Produkte in der Herstellung ist in der Industrie durch Normen seit vielen Jahren bekannt. Die Standardisierung ermöglicht eine bessere Produktivität durch optimierte Produktionsprozesse. Ein einfaches Beispiel zur Veranschaulichung der Vorteile von standardisierten Produkten ist das Sanitärrohr. Die Durchmesser sind in mehreren Grössen standardisiert. Dies ermöglicht es dem Installateur, mehrere Lieferanten in der gleichen Konfiguration zu verwenden.

Standardisierungssystem

In der Vergangenheit wurden bereits mehrere Systeme implementiert, um die Modularität der Bauelemente zu ermöglichen. Im Projekt «De Drie Hoven» entwarf der Architekt Hermann Hertzberger ein System, welches auf horizontalen Strukturelementen basiert, die ein Vielfaches von 92 Zentimeter ausmachen. In vertikaler Richtung wird ein Querträger zur Aufnahme der verschiedenen Lasten verwendet. Nach diesen Standardmassen wurde die gesamte Struktur eines Komplexes mit mehreren Gebäuden gebaut. Der Vorteil ist die grosse Anpassungsfähigkeit dieses Systems sowie die industriell durchführbare Produktion. Weiter ist das System leicht demontierbar und daher für die Wiederverwendung geeignet [2]. Die Abbildung 14 veranschaulicht dieses Standardisierungssystem.

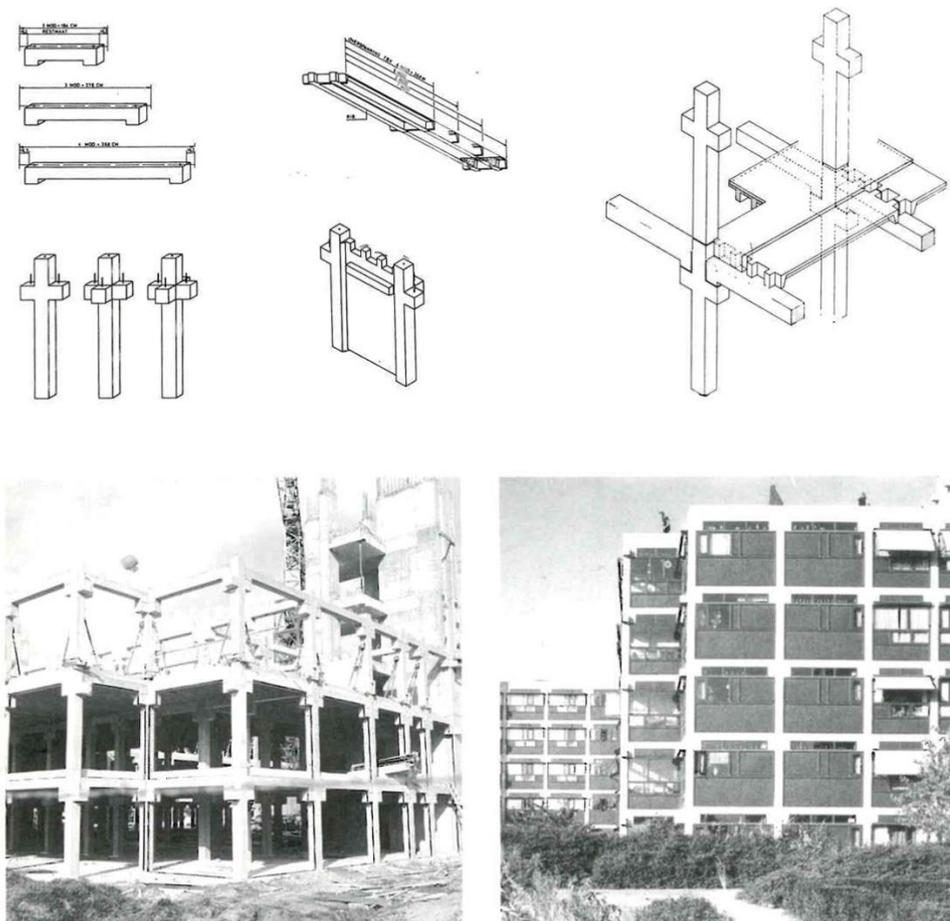


Abbildung 14: Standardisiertes Bausystem von Hermann Hertzberger [32]

Obwohl dieses System aus dem Jahr 1971 stammt und die bauphysikalischen Anforderungen längst nicht mehr dem heutigen Standard entsprechen, ist das Prinzip der Standardisierung der Konstruktion bis heute ähnlich geblieben. In der Tabelle 9 werden die Vor- und Nachteile gegenübergestellt:

Tabelle 9 : Vorteile und Nachteile bei ein Standardisierungssystem

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Anpassungsfähigkeit - Modularität - Rückbau effizient möglich - Wiederverwendung von Bauteilen 	<ul style="list-style-type: none"> - Eine wirtschaftliche Standardisierung kann zu räumlichen Beschränkungen führen

Modulbauweise

Die Modulbauweise ist seit vielen Jahren in der Schweiz vor allem beim Massivbau beliebt. In den letzten Jahren ist diese Bauweise jedoch auch im Holzbau in den Fokus geraten. Das Bausystem zeichnet sich durch einen hohen Vorfertigungsgrad aus. Ziel ist es, einen möglichst grossen Teil des Gebäudes in einer Werkstatt in Form von Modulen herzustellen und so die Montagezeit auf der Baustelle zu minimieren. Ein Modul kann eine tragende Funktion haben oder eine Funktion für einen bestimmten Zweck (z.B. Badezimmer) erfüllen. Diese Gebäude, die oft für kurzfristige Zwecke wie beispielsweise provisorische Schulen bestimmt sind, haben den Vorteil, dass sie leicht auseinander- und wieder zusammengebaut werden können, ohne dass die verwendeten Materialien beschädigt werden. In der Tabelle 10 werden die Vor- und Nachteile der Modulbauweise gegenübergestellt.

Tabelle 10 : Vorteile und Nachteile bei die Modulbauweise

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Module können rückgebaut und dadurch wiederverwendet werden 	<ul style="list-style-type: none"> - Zellen mit hoher Komplexität - Hohe Materialvarianz - Trennung von Materialien innerhalb eines Moduls

3.2.4 Fazit bezüglich den technischen Einflussfaktoren

In den vorherigen Abschnitten wurden mehrere Faktoren auf der technischen Ebene und deren Einfluss auf die Wiederverwendung von Materialien in einem Gebäude beschrieben. All diese Faktoren haben unterschiedliche Einflüsse und Ausprägungen auf den Rückbau oder die Wiederverwendung von Holzkonstruktionen. Je nach Funktion des Materials im Gebäude können die Einflüsse direkt oder indirekt sein.

Um eine Übersicht zu erhalten, werden alle Faktoren in Tabelle 11 klassifiziert. Jeder Faktor wird in dem Bereich klassifiziert, in dem er einen Einfluss haben kann. Das heisst, Einfluss auf das Material, die Wirtschaft und die Umwelt. Darüber hinaus wird jeder Faktor auch nach der Phase klassifiziert, in der der Faktor seinen Einfluss hat. Die Phasen werden unterteilt in Planung, Bau, Betrieb und Rückbau des Gebäudes.

Tabelle 11 : Ermittlung der technischen Einflussfaktoren gemäss Bereich und Projektphase

	Material/Bauteile	Wirtschaftlichkeit	Umwelt	Planungsphase	Bauphase	Betriebsphase	Rückbauphase
Grösse und Dimension des Gebäudes	x	x		x			
Verbindungssystem zwischen den Schichten	x			x			
Grösse der Bauteile	x	x		x	x		x
Verwitterung der Materialien	x	x		x			x
Trennung der Haustechnik	x			x		x	
Lage der Haustechnik (innerhalb der Bauteile)	x			x			
Komplexität von Bauteilen	x			x			
Format und Dimensionen der Elemente	x			x			x
Oberflächenbehandlung	x				x	x	
Abnutzung	x	x				x	
Geographischer Standort		x	x	x			x
Umgebung des Gebäudes		x		x		x	x
Lebensdauer des Gebäudes		x	x	x		x	x
Hohe Materialvarianz	x	x		x		x	
Schnittstelle zwischen Planer	x			x			
Gebäudelebenszyklus-Management		x				x	
Kontinuierliche Aktualisierung der Datenbank	x	x				x	
Holzschutzmittel		x	x	x	x	x	
Anpassungsfähigkeit	x	x		x			
Modularität	x	x		x			
Optimierung von Konstruktionsdetails	x	x		x			
Kollisionsvermeidung	x			x			
Besserer Informationsfluss	x	x		x			x
Logistikoptimierung		x			x		x
Materialdatenbank	x	x		x		x	x

3.3 Normative und labelbestimmte Einflussfaktoren

3.3.1 Normen

In der Schweiz sind es vor allem die SIA-Normen, welche den Hochbau regeln. Die Schweiz ist Mitglied des Europäischen Komitee für Normung (CEN) und hat sich dadurch verpflichtet, die allgemein verbindlichen Prinzipien und Anwendungsregeln des CEN zu übernehmen. Bis heute gibt es jedoch keine Normen, die sich direkt mit der Frage des Rückbaus und der Wiederverwendung befassen. Es gibt allerdings Normen im Bereich der Gebäudeökologie, die sich mit ähnlichen Fragen beschäftigen. Insbesondere hinsichtlich des benötigten Energiebedarfs zur Herstellung und Entsorgung von Materialien existieren Normen. Für die Berechnung der grauen Energie gilt die Norm SIA 2032:2020 als Referenz und beschreibt den Berechnungsprozess und die zu berücksichtigenden Faktoren. Die Norm SIA 2040:2017 definiert den «roten Faden», den es zu verfolgen gilt, um die Ziele der 2000-Watt-Gesellschaft sowie die für 2050 definierten Zwischenziele zu erreichen. Obwohl die beiden Normen nicht direkt mit der Wiederverwendung von Materialien zusammenhängen, sind sie Einflussfaktoren für diesen Bereich. In den folgenden Abschnitten werden diese Standards genauer beschrieben und die Einflussfaktoren identifiziert.

SIA 2032:2020 graue Energie – Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden

Als erstmals festgestellt wurde, wie gross der Anteil der Gebäude am Gesamtenergieverbrauch ist, hat man den Schwerpunkt auf die Verbesserung der Dämmwerte gelegt. Seither wurde der Wärmeverbrauch in Gebäuden, die neu gebaut oder renoviert wurden, deutlich reduziert. «Die Verbrauchsvorgaben sind seit 1975 um über 75% gesenkt worden» [33]. Der Energieverbrauch betrifft jedoch nicht nur den Energieverbrauch während des Betriebs eines Gebäudes, sondern auch deren Erstellung. Mit der Norm SIA 2032 werden die Auswirkungen bei der Erstellung für die Gesamtbewertung eines Gebäudes als ebenso wichtig angesehen wie der Energieverbrauch und die Emissionen im Zusammenhang mit dem Betrieb. Zwei wichtige Faktoren werden in dieser Norm berücksichtigt:

- Nicht-erneuerbare Primärenergie (graue Energie)
- Treibhausgasemissionen

In der Tabelle 12 sind die Phasen dargestellt, welche die Norm nach SN EN 15804 abdeckt. Die Phasen, die in der Ökobilanz berücksichtigt werden, sind mit einem «x» gekennzeichnet, die mit «(x)» markierten Phasen werden nur bedingt beachtet.

Tabelle 12: Bereich Erstellung gemäss SIA 2032:2020 [4]

Phasen gemäss SN EN 15804	Herstellungsphase			Errichtungsphase		Nutzungsphase							Entsorgungsphase				
	Rohstoffbereitstellung	Transport	Herstellung	Transport	Errichtung, Einbau	Nutzung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Betrieblicher Energieeinsatz	Betrieblicher Wassereinsatz	Rückbau, Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung	
																	A1
Bereich Erstellung gemäss SIA 2032	x	x	x	(x)	(x)				x					x	x	x	x

In der Norm SIA 2032:2020 wird zwischen der Energiebilanz eines Materials, eines Bauteils und eines Gebäudes unterschieden:

- Die Materialbilanz berücksichtigt alle Materialflüsse von der Materialgewinnung über die Produktion bis hin zur Entsorgung. Nicht berücksichtigt werden jedoch der Transport vom Materiallager zur Baustelle in der Schweiz, der Energiebedarf der Baumaschinen, die Verpackung und der Verschnitt.
- Die Bilanz eines Bauelements umfasst die Erstellung einer Bilanz aller Materialien, aus denen es sich zusammensetzt, sowie der für die Herstellung dieses Elements erforderlichen Stoff- und Energieströme.
- Die Erstellung der Bilanz eines Gebäudes im Bausektor umfasst die Erstellung aller Bilanzen von Bauelementen, die dem Gebäude während der betreffenden Berechnungsperiode hinzugefügt werden.

Für die Erstellung einer Gebäudebilanz werden umfassende und konsistente Ökobilanzdaten für die verschiedenen Materialien benötigt. Darin enthalten ist auch die erforderliche Energie zur Herstellung. In der Norm SIA 2032:2020 wird die Verwendung von KBOB Ökobilanzdaten im Baubereich als Datenbank vorgeschlagen. Es ist auch möglich, kontrollierte Datenbanken von ähnlicher Qualität zu verwenden. Die Verwendung produktspezifischer Werte ist möglich, solange alle Daten überprüfbar und mit den Materialien in der KBOB-Liste vergleichbar sind.

Im Prinzip ist die Energiebezugsfläche gemäss der Norm SIA 380 die Bezugsgrösse für die Berechnung der nicht erneuerbaren Primärenergie und Treibhausgasemissionen. Es ist aber auch möglich, je nach Zweck der Berechnung andere Bezugsgrössen zu verwenden. Beispielsweise pro Arbeitsplatz, pro Klasse oder pro Person. Die Auswirkungen im Bausektor können als absolute Zahlen oder als Jahresbeträge berechnet werden. Die Berechnung von Jahresbeträgen basiert auf der Abschreibungsdauer der Materialart, entsprechend ihrer Verwendung und Position im Gebäude. Die Bestimmung der Lebensdauer jeder Materialgruppe ist in Anhang C der Norm SIA 2032:2020 zu finden.

Gemäss Tabelle 13 ist es möglich, die Ökobilanz eines Gebäudes auf verschiedene Arten zu beeinflussen:

Tabelle 13 : Einflussfaktoren gemäss SIA 2032:2020

Reduzierung des Energiebedarfs	Renovieren anstatt neu bauen
	optimierte Volumen entsprechend der Grösse und Kompaktheit der Räumlichkeiten
	einfache Tragwerksysteme verwenden
	Dimensionierung der Bauteile im Tiefbau auf das Notwendige reduzieren
Weniger graue Energie verwenden und Treibhausgas-Emissionen reduzieren	Wahl der Bauweise anpassen (Massivbau, Holz, usw.)
	Wahl der Materialien anpassen
Auf Beständigkeit und Langlebigkeit setzen	Systemtrennung beachten
	Materialbeständigkeit
	Anpassungsfähigkeit von Gebäuden
	Reduzierung der technischen Anlagen (haben eine kurze Lebensdauer) auf das unbedingt Notwendige

SIA 2040:2017 SIA-Effizienzpfad Energie

Der Gebäudesektor ist einer der grössten Energieverbraucher der Schweiz. Es liegt an den Gebäudeeigentümern und Investoren, die Ziele der 2000-Watt-Gesellschaft bereits bei den ersten strategischen Überlegungen zu integrieren. Diese Norm bildet die Grundlage für die Erreichung der Zwischenziele der 2000-Watt-Gesellschaft, die für das Jahr 2050 im Dokument «Bilanzierungskonzept 2000-Watt-Gesellschaft» [34] definiert sind. Sie definiert Ziele für den Verbrauch nicht-erneuerbarer Primärenergie und den Ausstoss von Treibhausgasemissionen für sechs verschiedene Gebäudekategorien. Diese beiden Indikatoren werden derzeit als relevant angesehen für die globale Umweltkrise. Nach dieser Norm spielen auch technische, soziale und wirtschaftliche Einflussfaktoren eine wesentliche Rolle, um die für 2050 gesetzten Ziele zu erreichen. Folglich ist politisches und rechtliches Handeln unabdingbar.

Die Norm SIA 2040:2017 basiert auf mehreren Annahmen, welche die Entwicklungen in diesem Bereich in den kommenden Jahren betreffen. Im Bausektor wird erwartet, dass alle Neubauten die von der Norm vorgeschriebenen Zielwerte erfüllen werden. Ausserdem werden alle bestehenden Gebäude gemäss Zielwerten renoviert.

Nach dieser Norm werden die drei Bereiche Erstellung, Betrieb und Mobilität berücksichtigt, um nicht erneuerbare Primärenergie und Treibhausgasemissionen auszugleichen. Diese Studie fokussiert auf die Bewertung auf den Bereich der Erstellung. Die Bewertung erstreckt sich dabei über die gesamte Lebensdauer des betreffenden Gebäudes. Die verschiedenen Energieflüsse, die in der Bilanz berücksichtigt werden, sind in

Abbildung 15 dargestellt. Sie werden von der Primärenergie bis hin zur Nutzung des Gebäudes definiert.

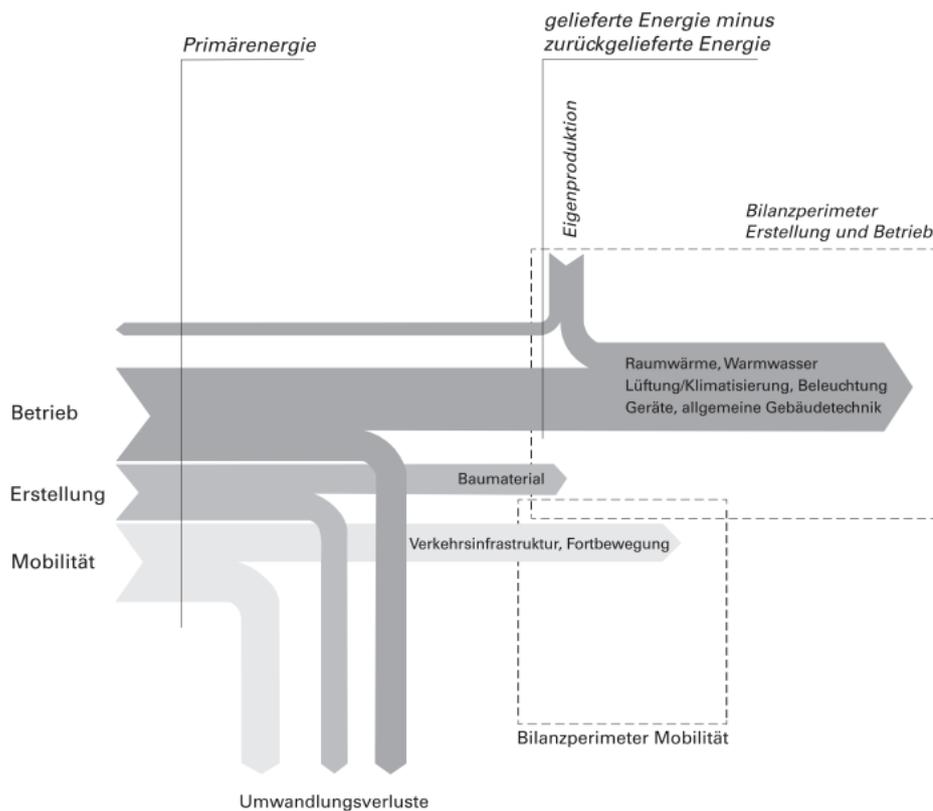


Abbildung 15: Energiefluss von der Primärenergie bis zum Nutzen [5]

Der Bereich Erstellung umfasst den Bau, den Austausch oder die Renovierung von Elementen bis hin zur Entsorgung des Gebäudes. Für die Erstellung werden die graue Energie sowie die Treibhausgasemissionen der Gebäudekomponenten in Jahreswerten entsprechend ihrer Amortisationszeit ausgewiesen.

Die Definition der 2000-Watt-Gesellschaft gemäss dem «Bilanzierungskonzept 2000-Watt-Gesellschaft» [34] stellt Anforderungen an die mittlere Leistung der Primärenergie und die jährlichen Treibhausgasemissionen. Die Anforderungen sind in der Tabelle 14 aufgelistet:

Tabelle 14: Mittlere Leistung der Primärenergie und jährliche Treibhausgasemissionen [5]

Jahr		2010	2050	2100
Mittlere Leistung der Primärenergie gesamt (erneuerbar und nicht erneuerbar)	W pro Person	6'200	3'500	2'000
Mittlere Leistung der Primärenergie nicht erneuerbar	W pro Person	5'500	2'000	500
Jährliche Treibhausgasemissionen	t pro Person und Jahr	7,8	2,0	1,0

Bei Neubauten werden die nicht erneuerbaren Primärenergie- und Treibhausgasemissionen für alle Materialien berechnet, die während des Baus in die Bilanz aufgenommen werden. Im Falle einer Renovation werden auch die Materialien, die während der Renovation in den Bilanzrahmen eingebracht werden, in die Berechnung miteinbezogen. Das bedeutet, dass Materialien aus dem Gebäude vor der Renovation, die vor Ort bleiben, nicht in die Bilanz aufgenommen werden. Die Zielwerte für nicht-erneuerbare Primärenergie sind bei Neubauten und Renovierungen identisch. Anders sind die Zielwerte bezüglich der Treibhausgasemissionen für Neubauten höher als für Renovationen. Nach Norm SIA 2040:2017 sind die graue Energie sowie die Bauteil- und Treibhausgasemissionen nach SIA 2032:2020 zu berechnen. Die Ziel- und Richtwerte für den Bausektor für jede Gebäudekategorie sind in Kapitel 3.3 der SIA 2040:2017 beschrieben. In der Norm SIA 2040 werden mehrere Einflussfaktoren auf die drei Bereichen Bau, Betrieb und Mobilität beschrieben. Für diese Studie werden jedoch nur die Faktoren aufgelistet, die für den Bau relevant sind und auch den Abbau und die Wiederverwendung von Holzkonstruktionen beeinflussen.

Tabelle 15 : Einflussfaktoren gemäss SIA 2040:2017

Reduzierung des Energiebedarfs	Wenig Tiefbau ins Terrain
	Ressourcenschonende Bauweise
	Einfaches Tragwerk mit angemessenen Spannweiten
	Angemessene Fassadenbekleidung (langlebig, wenig Masse)
	Systemtrennung für einfache Zugänglichkeit und Austauschbarkeit von Elementen
	Hohe Nutzungsflexibilität
	Beständige und unterhaltsarme Baustoffe verwenden
	Bei Erneuerungen und Sanierungen Vorleistungen durch die Systemtrennung beachten

3.3.2 Organisationen, Energiepolitik und Label

3.3.2.1 Organisationen

Heimatschutz

In der Schweiz hat der Heimatschutz die Aufgabe, Teile des gebauten historischen Erbes langfristig zu erhalten. Diese gemeinnützige Organisation engagiert sich auf verschiedene Weise für den Bau von Qualitätsgebäuden. Neben dem Schutz ganzer Gebäude umfasst die Arbeit des Heimatschutzes auch die Erhaltung einzelner architektonischer Elemente. Gebäude, die als durch den Heimatschutz geschützt gelten, müssen bei der Renovierung alte Bauelemente übernehmen oder in gleicher Weise wiederaufbauen. Diese Auflage macht es einfacher, bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen, dass durch die Trennung der Materialien diese wiederverwendet werden.

3.3.2.2 Energiepolitik

2000-Watt-Gesellschaft

Die 2000-Watt-Gesellschaft ist ein Konzept mit einem klima- und energiepolitischen Ziel. Das Leitkonzept für die 2000-Watt-Gesellschaft legt in seiner ersten Veröffentlichung Ziele für den Energieverbrauch von 17'520 kWh pro Person und Jahr fest, was einem kontinuierlichen Verbrauch von 2000 Watt entspricht. Darüber hinaus sollen die Treibhausgasemissionen auf eine Tonne pro Person und Jahr reduziert werden. Diese Ziele sollten bis 2100 erreicht werden.

Die Neufassung des Leitkonzepts für die 2000-Watt-Gesellschaft vom Oktober 2020 definiert neue Ziele in der Klima- und Energiepolitik. Der kontinuierliche Verbrauch von 2000 Watt pro Person soll bereits bis 2050 erreicht werden. Darüber hinaus sollen die Treibhausgasemissionen auf netto Null reduziert werden und die gesamte Endenergie aus erneuerbaren Quellen stammen. Das Konzept der 2000-Watt-Gesellschaft berücksichtigt den direkten Verbrauch des Nutzers, aber auch die Energie, die zur Herstellung der Elemente, die er benutzt und ihn umgeben, benötigt wird. Die graue Energie und Treibhausgasemissionen aus dem Bau von Gebäuden ist daher wichtige Elemente des Konzepts.

Das Konzept der 2000-Watt-Gesellschaft funktioniert wie eine Zertifizierung, die an einen Standort oder ein Quartier vergeben wird. Die Geländefläche muss mindestens 10'000 m² betragen. Da die Instrumente der Minergie-ECO- und SNBS-Labels zur Dokumentation der grauen Energie und der Treibhausgasemissionen der verwendeten Materialien eingesetzt werden können, werden sie nicht in diesem, sondern im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

3.3.2.3 Labels

Beim Bau ist es möglich, ein Gebäude mit unterschiedlichen Labels zu zertifizieren. Diese Labels haben im Allgemeinen einen ökologischen Ursprung, wobei mehrere Faktoren berücksichtigt werden. In diesem Abschnitt werden Labels erläutert, die Materialien mit einem geringen Gehalt an grauer Energie und geringen Treibhausgasemissionen berücksichtigen. Da die Wiederverwendung in der Schweiz selten realisiert wird, wird sie bei den Labels nicht direkt berücksichtigt. Die Berechnung der grauen Energie und der Treibhausgasemissionen basiert auf dem Lebenszyklus des Materials (Bau, Nutzung, Abbruch, Entsorgung/Recycling) und nicht auf der Tatsache, dass die Materialien bereits mehrere Zyklen durchlaufen haben. Die Zertifizierung eines Gebäudes mit einem Label ermöglicht es in manchen Fällen, einfacher Subventionen oder Bankkredite zu erhalten. In einigen Fällen wird die Zertifizierung eines Gebäudes mit einem Label gar behördlich in einem Bebauungsplan vorgeschrieben.

Minergie ECO

Minergie ist ein Label für neue oder renovierte Gebäude. Das Minergie-Label zeichnet sich aus durch den Komfort für die Gebäudenutzer, einen niedrigen Energiebedarf und die höchstmögliche Verwendung erneuerbarer Energien. Minergie besteht hauptsächlich aus drei Labels: Minergie, Minergie A und Minergie P. Der ECO-Zusatz kann zu jedem dieser Labels hinzugefügt werden. Er berücksichtigt die gesundheitlichen und ökologischen Aspekte eines Baus. Das Thema der Gebäudeökologie berücksichtigt die graue Energie, die in den Materialien, aus denen das Gebäude besteht, enthalten ist. Dieser Label-Zusatz ist ein Kooperationsprojekt zwischen dem Verein Minergie und eco-bau.

Gemäss dem Minergie-ECO-Label-Komplement wird die graue Energiebilanz nach dem SIA 2032-Verfahren mit den KBOB-Ökobilanzdaten im Baubereich berechnet [35]. Die Zahlen in dieser Datenbank berücksichtigen nicht den Unterschied in der grauen Energie, die in einem wiederverwendbaren Material enthalten ist. Bei einer neuen Konstruktion muss jedes Material, das verbaut wird, in die Berechnung der grauen Energie miteinbezogen werden. Im Falle von Umbauten werden bei der Berechnung nur Materialien berücksichtigt, die dem bestehenden Gebäude hinzugefügt werden. Letzteres bedeutet, dass die Materialien, die an Ort und Stelle bleiben, als neutral betrachtet werden in Bezug auf die Auswirkungen der grauen Energie. Zusätzlich zur Berechnung der grauen Energie erfordert die ECO-Label-Zertifizierung die Erfüllung bestimmter Kriterien, von denen sich einige auf die Wiederverwendung von Materialien beziehen.

SNBS Standard für nachhaltiges Bauen Schweiz

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. Diese Beurteilung erfolgt aufgrund von 45 Indikatoren in den drei Bereichen Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. Das SNBS-Werkzeug berücksichtigt die aktuellen Beiträge zum Thema Nachhaltigkeit der SIA, der Vereine eco-bau und Minergie. Der Standard wurde von mehreren Akteuren verschiedener Tätigkeitsbereiche wie Wirtschaft, öffentliche Hand, Fachorganisationen und weiteren Experten erarbeitet.

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Indikatoren und Kriterien vorgestellt, die den Rückbau und die Verwendung von wiederverwendbaren Materialien beeinflussen können. Andere Indikatoren und Kriterien, die in dieser Studie nicht zitiert werden, stellen keinen signifikanten Einfluss dar. Um den Einfluss der verschiedenen Messgrössen, die sich in den Indikatoren befinden, bestimmen zu können, wird dieser in der folgenden Tabelle farblich gekennzeichnet. Dabei wird die Bedeutung der Farben wie folgt definiert:

-  grosser Einfluss
-  teilweiser Einfluss

Einfluss	SNBS-Messgrösse oder ECO-Kriterium	Beurteilung
	Zugänglichkeit vertikaler Haustechnik-Installationen	Ja/Nein
	Zugänglichkeit horizontaler Haustechnik-Installationen	Ja/Nein
	Bauliche Bedingungen für den Ersatz von Maschinen und Grossgeräten	Ja/Nein
	Austausch- und Rückbaufähigkeit von Tragstruktur und Gebäudehülle	Ja/Nein
	Austausch- und Rückbaufähigkeit des Ausbaus	Ja/Nein

Diese Indikatoren berücksichtigen die Trennung der Systeme und die Zugänglichkeit der verschiedenen technischen Anlagen. In diesen Indikatoren haben die letzten beiden Messgrössen einen grossen Einfluss. Sie tangieren das Thema des Gebäuderückbaus sowie die Ersatzkapazität der verschiedenen Bauelemente und Materialien unmittelbar. Bei den ersten drei aufgeführten Messgrössen ist der Einfluss nicht direkt auf die Holzkonstruktion bezogen, sondern erfordert eine flexible Planung der technischen Anlagen sowie der Maschinen und Grossgeräte. Diese Planung wirkt sich also auf die Art des Rückbaus und die Qualität der wiederzuverwendenden Materialien aus.

Einfluss	SNBS-Messgrösse oder ECO-Kriterium	Beurteilung
	Primärenergie nicht erneuerbar Erstellung	nicht erneuerbar Primärenergie

Wiederverwendbare Materialien spielen eine wichtige Rolle bei der Menge an grauer Energie in einem Gebäude. Die Berechnung dieses Indikators basiert auf der Norm SIA 2032 und auf den KBOB Ökobilanzdaten im Baubereich. Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, werden in der Datenbank keine wiederverwendbaren Materialien berücksichtigt. In diesem Fall ist der Einfluss auf diesen Indikator folglich sehr begrenzt. Da das Thema der Wiederverwendung von Materialien jedoch an Bedeutung gewinnt, ist es möglich, dass in Zukunft solche Materialien bei diesem Faktor berücksichtigt werden.

Einfluss	SNBS-Messgrösse oder ECO-Kriterium	Beurteilung
	Treibhausgasemissionen bei der Erstellung	Treibhausgas-emissionen

Durch den Einsatz von wiederverwendbaren Materialien kann der Ausstoss von Treibhausgasen reduziert werden. Wie beim vorherigen Indikator basiert die Berechnung auf der Norm SIA 2032 und hat daher keinen wesentlichen Einfluss. Und wie bei dem oben erwähnten Indikator ist es möglich, dass auch solche Materialien in Zukunft berücksichtigt werden.

3.3.3 Fazit aus den normativen und labelbestimmten Einflussfaktoren

Die Normen haben einen erheblichen Einfluss auf die Konstruktion. Sie begrenzen oder erlauben bestimmte Prozesse auf konstruktiver Ebene oder bei der Verwendung von Materialien. Die Normen SIA 2040:2017 und SIA 2032:2020 als Richtlinie für den Energieaufwand von Gebäuden erlauben es, den Einfluss der in den Baumaterialien enthaltenen Energie neben dem sonstigen Energieaufwand für den Gebäudebetrieb und die Mobilität der Nutzer zu betrachten. Andererseits betrachten beide Normen auch die ausgestossenen Treibhausgasemissionen. Die SIA 2032:2020 zeigt die Einflussfaktoren der in Baumaterialien enthaltenen grauen Energie sowie der Treibhausgasemissionen auf. Berechnungen, die auf der KBOB-Datenbank basieren, ermöglichen es, die niedrigeren Werte der grauen Energie und die geringeren Treibhausgasemissionen von wiederverwendbaren Materialien nur im Falle eines Umbaus zu berücksichtigen, bei welchem die Materialien auf der Baustelle verbleiben. Wenn wiederverwendbare Materialien auf die Baustelle gebracht werden, ist es mit der aktuellen Datenbank nicht möglich, die Differenz an Energie und Emissionen zu berechnen. Dennoch hat diese Norm unter der Berücksichtigung der Anforderungen Potenzial für wiederverwendbare Materialien. Dieses Potenzial liegt in einer Datenbank für wiederverwendbare Materialien nach den für die KBOB-Datenbank geltenden Normen.

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Labels haben sich in mehreren Bereichen etabliert, unter anderem auch für die in Baumaterialien enthaltene Energie. Da die Faktoren bezüglich der grauen Energie und der Treibhausgasemissionen mit anderen Faktoren kumuliert werden, ist der Einfluss weniger gross, aber nicht vernachlässigbar. Neben anderen direkten konstruktiven Faktoren, wie beispielsweise der Trennung von Systemen oder der Möglichkeit, Bauteile einfach zu demontieren, umfassen die Kennzeichnungen auch andere direkte konstruktive Faktoren. Es ist daher wichtig zu beachten, dass diese Faktoren nicht zu den Ausschlussfaktoren für Labels gehören.

3.4 Gesellschaftliche Einflussfaktoren

Die Meinung der Gesellschaft ist entscheidend für die Akzeptanz einer neuen Idee oder Denkweise, die ein neues Paradigma definieren soll. Seit jeher wurden viele Ideen von der Gesellschaft aufgrund der Diskrepanz zur damaligen Denkweise nicht akzeptiert. Einige Jahrzehnte später wurde die gleiche Idee, die früher noch abgelehnt wurde, von der Mehrheit der Gesellschaft dann aber plötzlich problemlos akzeptiert. Diese Akzeptanz hängt von einer Reihe von Faktoren und der Umwelt ab, die die Annahme einer bestimmten Art und Weise, Dinge zu tun oder zu denken, erleichtert oder erschwert. Die Wiederverwendung im Baugewerbe ist derzeit eher ungewöhnlich und in der Öffentlichkeit daher noch wenig bekannt.

In den folgenden Abschnitten werden mehrere Einflussfaktoren beschrieben, die sich direkt aus den gesellschaftlichen Bindungen und der Psychologie ergeben, aus denen sich die Gesellschaft zusammensetzt. Der Mangel an Informationen sowie die Nähe zum Recycling ermöglichen es, Vergleiche und Parallelen zu diesem Thema zu ziehen.

3.4.1 Eingesetzte Baumaterialien

Trends

Die Architektur als eigenständiges künstlerisches Element ist Teil von Bewegungen und Trends, die sich laufend verändern. Zum Beispiel war die Verwendung von Ornamenten an einer Gebäudefassade vor dem 20. Jahrhundert üblich. Später setzte sich die Konstruktion ohne dekorative Elemente durch. Jede Zivilisation, genauer gesagt aber auch jede Generation baut anders, immer beeinflusst von Meinungen und Überzeugungen.

Die Verwendung von Recyclingmaterialien ist verbreiteter, als wiederverwendbare Materialien. Dabei handelt es sich um ein positives Argument für den Bau aus ökologischer Sicht. Immer mehr Bauherren wollen ökologische Komponenten in ihre Konstruktion integrieren, um die Umwelt zu schonen und so ihren ökologischen Fussabdruck zu verringern.

So ist die Verwendung von altem Holz für die Renovierung alter Gebäude, aber auch für den Bau neuer Häuser oder für den Bau von Möbeln, derzeit eine gängige Praxis. Im Zeitalter der Globalisierung müssen sich die Menschen unterscheiden, indem sie Gegenstände besitzen, die einzigartige Eigenschaften haben und die niemand anderes besitzt. Die moderne Architektur zeichnet sich dadurch aus, dass es eine Geschichte der Objekte mit kohärenten Beziehungen zur Umgebung gibt. Holz im Allgemeinen, aber insbesondere altes Holz, besitzt Charaktereigenschaften, die den oben genannten Kriterien bestens entsprechen.

Optischer Eindruck

Wiederverwendete Materialien haben eine Patina, die durch Gebrauch und Abnutzung der Materialien entsteht. Die Patina kann unregelmässig sein, abhängig von verschiedenen Faktoren wie der Lage des Objekts. Die Patina kann ein positives und begehrtes Kriterium sein, aber es ist entscheidend, dass die oberflächlich sichtbare Abnutzung der Materialien regelmässig ist. Ausserdem erhöhen die Benutzung und Demontage das Risiko, dass Baumaterialien beschädigt werden. In den meisten Fällen handelt es sich bei Oberflächenveränderungen um rein visuelle und keine strukturellen Schäden. Obwohl die Wiederverwendung solcher Materialien theoretisch möglich ist, kann der visuelle Faktor in gewissen Fällen trotzdem auch ein Argument gegen eine Wiederverwendung sein.

Qualitativer Ausdruck

Die Verwendung alter Materialien bedeutet nicht zwangsläufig, dass die Materialien von schlechter Qualität sind. Ein altes Material, im Gegensatz zu einem neuen, hat sich in seiner bisherigen Verwendung bewährt. Es kann als Garantie dafür angesehen werden, dass die Materialien widerstandsfähig sind und genau deshalb wiederverwendet werden können.

3.4.2 Mentalität

Die Themen globaler Klimawandel und Umweltverschmutzung werden heute häufig in den Medien erwähnt und sind Bestandteil vieler politischer Entscheidungen. Diese Themen prägen die Meinung und die Mentalität der Menschen. Und die Mentalität eines Menschen beeinflusst sein Konsumverhalten. Die Wiederverwendung von Holzkonstruktionen ist immer noch ein Nischenmarkt. Es lässt sich noch nicht feststellen, wie sie von der Bevölkerung in der Zukunft akzeptiert wird. Es ist demnach wichtig zu wissen, wie die Bevölkerung Fragen bezüglich der Wiederverwendung von Holzkonstruktionen gegenübersteht.

Im Jahr 1983 wurde das Umweltschutzgesetz verabschiedet und führte zur Entwicklung des Recyclings und der Abfallsortierung. Obwohl es anspruchsvoller ist, den Abfall zu sortieren, als ihn «en bloc» wegzuworfen, hat sich die Schweizer Bevölkerung an die Recyclingverfahren gewöhnt. Mehr als die Hälfte des Hausmülls wird derzeit recycelt. Der Rest wird thermisch verwertet [36]. Dieser Prozess dauerte mehrere Jahre, aber stellt im Alltag längst kein Hindernis mehr dar. Die Bevölkerung betrachtet Recycling und die Verwendung von recycelten Produkten als eine gute Sache und ist in der Schweiz im Bereich der häuslichen Abfälle gut etabliert.

Das visuelle Erscheinungsbild eines Gebäudes ist etwas, das in der Mentalität der Schweizer Bevölkerung wichtig ist. Ein neues Gebäude muss in der Regel saubere Bauelemente mit einer perfekten Oberflächenbeschaffenheit aufweisen. Besonders die Innenverkleidung muss in gutem Zustand sein. Die Aussenverkleidung wie die Fassade ist weniger wichtig, aber es ist trotzdem entscheidend, dass die Oberfläche optisch eben ist. Mit Materialien aus der Demontage von Gebäuden ist diese Vision eines neuen Gebäudes ohne Mängel utopisch, wenn man Baumaterialien aus der wiederverwendet.

Holz ist als Naturprodukt aus dem Wald anerkannt. Es handelt sich um ein erneuerbares Produkt mit einer Treibhausgasbilanz, die als neutral betrachtet wird. Der Holzbau gewann daher in den letzten Jahren wieder an Beachtung. Auch in städtischen Gebieten ist das Interesse gewachsen. Im Vergleich zu den Nachbarländern ist der Anteil des Holzbaus in der Schweiz relativ hoch, vor allem in den Alpenregionen. Das Vertrauen in dieses Material ist vorhanden.

3.4.3 Kommunikation

Gruppen- oder Massenkommunikation ist in unserer Gesellschaft weit verbreitet. Dadurch werden Produkte über verschiedene Kanäle wie Fernsehspots, Plakate, Flyer oder Zeitschriften dem Verbraucher zugänglich gemacht. In den letzten Jahren hat die Kommunikation vor allem über das Internet an Bedeutung gewonnen. Die Kommunikation eines Themas erfolgt jedoch nicht nur durch direkte Instrumente, wie erwähnt, sondern auch durch die Medien in indirekter Form. Presseartikel, Fernsehberichte oder Videos im Internet sind weitere Kommunikationsebenen. In der Schweiz spielen auch der Bund und die Kantone bei der Vermittlung der Möglichkeiten von Nachhaltigkeit und Ökologie eine wichtige Rolle. Insbesondere bei der Förderung von Forschungsarbeiten und das Verfassen von Berichten oder Studien ist dies der Fall.

Das Potenzial und die Wirksamkeit der Kommunikation ist nicht immer direkt messbar und hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Da das Thema der Verwendung von wiederverwendeten Materialien noch nicht dominiert, wurde auch noch nicht viel darüber berichtet. Obwohl das Recycling nicht genau die gleiche Zielgruppe betrifft, verfügt es hingegen über mehrere Jahre Erfahrung. In der Tat werden für das Thema Materialrecycling mehrere Kommunikationskanäle genutzt, um die Zielgruppen zu informieren:

- Werbekampagnen, Spots, Videos
- Websites
- Sensibilisierungskampagnen für Erwachsene, Kinder in Schulen, usw.
- Artikel in Zeitungen und anderen öffentlichen Medien
- Artikel in der Fachpresse
- Weiterbildungen

Im Gegensatz zum stofflichen Recycling ist die Wiederverwendung von Holzbaustoffen auf die Bauindustrie selbst ausgerichtet. Um die Bevölkerung über dieses Thema zu informieren und zu sensibilisieren, ist es wichtig, nicht nur den Bausektor zu erreichen, sondern die Bevölkerung direkt anzusprechen. Das Zielpublikum, an das die Informationen übermittelt werden, ist entscheidend, um ihre Wirksamkeit zu beurteilen. Jedes Zielpublikum nimmt die erhaltenen Informationen auf unterschiedliche Weise wahr. In der Abbildung 16 sind verschiedene Zielgruppen dargestellt, die durch das Thema Rückbau und Wiederverwendung von Holzkonstruktionen erreicht werden können.

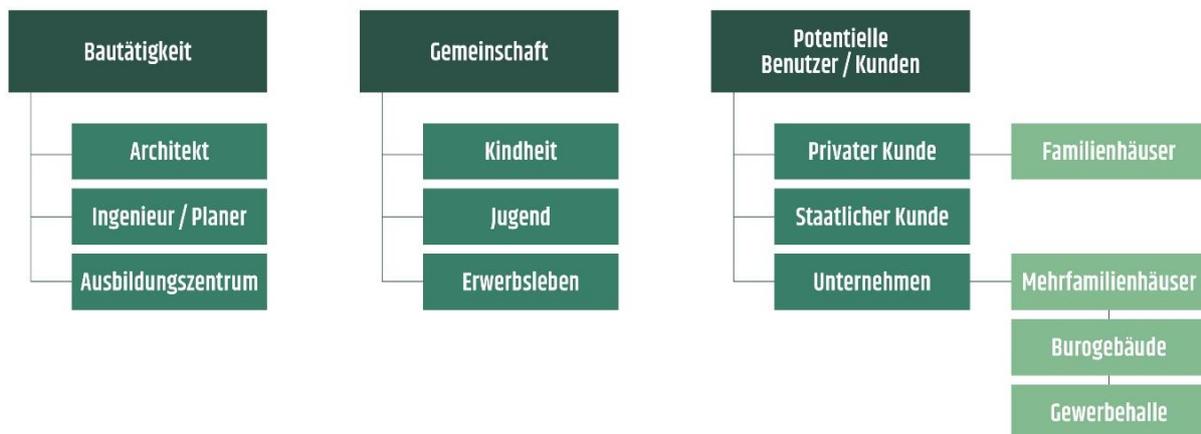


Abbildung 16: Kommunikation nach Ziel Gruppen

3.4.4 Fazit zu den gesellschaftlichen Einflussfaktoren

Die Einflussfaktoren auf gesellschaftlicher Ebene werden oft vernachlässigt, sind aber von grösster Bedeutung. Da potenzielle Kunden Teil der Gesellschaft sind, ist das Verständnis für diese Einflussfaktoren wichtig. Die gesellschaftliche Akzeptanz des Konzepts des Rückbaus und der Wiederverwendung von Holzkonstruktionen ist fundamental, wenn es um die Umsetzung geht. Der wichtigste Faktor, der die Mentalität und Denkweise der Gesellschaft beeinflussen kann, ist eine angemessene Kommunikation zu diesem Thema.

3.5 Wirtschaftliche Einflussfaktoren

Der wirtschaftliche Aspekt ist ein wichtiger Einflussfaktor, da er die Mehrheit der Investitionen antreibt. Ein Konzept kann beispielsweise aus technischer und ökologischer Sicht interessant sein, aber solange der Investitionspreis nicht mit anderen Konzepten, die die gleichen Funktionen erfüllen, konkurrenzfähig ist, wird es nicht weiterverfolgt. Wie in der Abgrenzung von Kapitel 1 erwähnt, berücksichtigt diese Studie keine wirtschaftlichen Berechnungen. Es werden nur Elemente mehrerer wirtschaftlicher Aspekte entwickelt, die einen Einfluss auf die Demontage und Wiederverwendung von Holzkonstruktionen haben.

3.5.1 Planung

Verbindungen zu planen und auszuarbeiten, die später die Demontage von Bauelementen erleichtern, stellen einen zusätzlichen Kostenfaktor beim Bau eines Gebäudes dar. Die Planung einer Rückbaustelle erfordert eine strukturierte Organisation der Schritte und eine an den Materialfluss der wiederverwendeten Materialien angepasste Logistik. Standardisierungen in der Planung helfen, den späteren Rückbau zu vereinfachen, da dieselbe Methode mehrfach angewandt werden kann.

3.5.2 Rückbau

Wenn Baumaterialien stofflich oder thermisch verwertet werden sollen, ist es möglich, diese einfach abzubrechen. Wenn die Baumaterialien hingegen wiederverwendet werden sollen, verlangt dies einen Rückbau. Je nach den Bedürfnissen der Baustelle ist es möglich, beide Verfahren in ein und demselben Bauwerk einzusetzen. Der Rückbau eines Gebäudes erfordert im Gegensatz zum Abbruch grosse Sorgfalt, um die Qualität der wiederzuverwendenden Materialien oder Bauteile zu erhalten.

Die Dauer des Rückbaus ist unter anderem auch von den verwendeten Materialien abhängig und ein wichtiger Kostenfaktor. Die Leichtigkeit der Demontage, die Art des Materials oder der Bauteile, die Trennung der Materialien und die Art der Maschinen und Werkzeuge beeinflussen die Geschwindigkeit des Rückbaus. Diese verschiedenen Faktoren hängen direkt mit der Art der Verbindungen zusammen, die beim Bau verwendet werden. Im Gegensatz zum Abbruch erfordert der Rückbau aufgrund der Sorgfalt, mit der die Materialien behandelt werden müssen, mehr Arbeitskräfte. Nachfolgend werden daher verschiedene Faktoren aufgelistet, die einen wirtschaftlichen Einfluss auf den Rückbauprozess haben:

- Maschinen und Werkzeuge, die für den Rückbau benötigt werden
- Anzahl Arbeitskräfte
- Geschwindigkeit der Demontagebaustelle
- Art der Verbindungen
- Art des Materials und der Bauteile
- Witterungsschutz

3.5.3 Sortierung und Reinigung der Baumaterialien

Das Sortieren der Rückbaumaterialien und die Reinigung kann direkt auf der Rückbaustelle oder im Materiallager vorgenommen werden. Es ist auch möglich, eine Grobsortierung auf dem Gelände und eine weitere Reinigung und Sortierung am Lagerort vorzunehmen. Dieser Prozess wird durch den Bedarf an Maschinen und Arbeitskräften sowie Zeitbedarf beeinflusst.

3.5.4 Transport

Zwei Arten des Transports gilt es zu berücksichtigen:

- Transport von der Rückbaustelle zum Materiallager
- Transport vom Materiallager zur neuen Baustelle

Die Entfernung und die Art dieser Transporte können je nach Lage der Baustellen und Materialdepots variieren.

3.5.5 Lagerung

Die geografische Lage der Materiallager beeinflusst den Preis für die Miete der benötigten Fläche. Zum Beispiel wird ein Materiallager in einem städtischen Gebiet eine teurere Miete verursachen als ein Materiallager in einer ländlichen Gegend. Die nutzbare Fläche kann zudem variieren je nach Art des Materials und der Lagerzeit.

3.5.6 Verkauf

Die Kosten im Zusammenhang mit dem Verkauf von Materialien können je nach Vertriebskanal sehr unterschiedlich sein. Die Dokumentation und Entwicklung von Materialdatenblättern, die die Eigenschaften und Fähigkeiten der Materialien darstellen, benötigen Zeit und verursachen Kosten. Die physischen oder digitalen Verkaufsplattformen und die betreffende Kommunikation sind ebenfalls beeinflussende Faktoren.

3.5.7 Restwert von Baumaterialien

Der Restwert eines wiederverwendbaren Materials hängt von mehreren Faktoren ab. Es ist schwierig, sogar fast unmöglich, den Wert eines wiederverwendbaren Materials oder Bauteils auf lange Sicht zu definieren. Trotzdem erlauben uns mehrere Faktoren, seinen Wert einzuschätzen:

- Die Qualität des Materials oder Bauteils im Vergleich zum gleichen Material im unbenutzten Zustand. Sie hängt vom Umgang mit dem Material im vorherigen Lebenszyklus ab und der eingehaltenen Sorgfalt bei der Demontage und dem Transport sowie der Lagerung.
- Die Menge und Varianz der zur Verfügung gestellten Materialien. Wenn ein Material in grossen Mengen verfügbar ist und seine Verwendung den Bau eines kompletten Gebäudes abdecken kann, wird das Interesse an diesem Material höher sein.
- Die Nachfrage nach wiederverwendbaren Materialien. Dies kann durch Gesetze und Labels beeinflusst werden, welche die Verwendung solcher Materialien fördern.
- Materialien oder Bauteile die in standardisierten Systemen eingesetzt werden können, haben einen höheren Restwert.

3.5.8 Fazit aus den wirtschaftlichen Einflussfaktoren

Die Wirtschaftlichkeit ist ein wesentlicher Faktor bei Entscheidungen der Bauherrschaft für den Bau eines Gebäudes. Einerseits für die Bauherrschaft, die ein Gebäude bauen möchte, das rückbaubar ist, und andererseits auch für die Bauherrschaft, die ein Gebäude mit Materialien aus alten Gebäuden bauen möchte. Jeder Schritt im gesamten Prozess hat Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit, von der Planung bis hin zur Installation des wiederverwendbaren Materials. Durch die Optimierung dieser Schritte ist es möglich, die tatsächlichen Kosten der Konstruktion positiv zu beeinflussen.

4 Kreislaufwirtschaft Baumaterialien (Recycling vs. Wiederverwendung)

In diesem Kapitel werden die Treibhausgasemissionen untersucht sowie die graue Energie, welche für die Herstellung bestimmter Baustoffe für übliche Holzbaukonstruktionen benötigt werden. Die Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit der Materialien werden verglichen, um das Potenzial der einzelnen Materialien zu bewerten. In diesem Kapitel liegt der Schwerpunkt auf dem Material als Einheit für die Wiederverwendung. Gemäss der Abbildung 17 gilt: Je komplexer ein Bauteil ist, desto geringer ist sein Potenzial für die Wiederverwendung. Dieser Logik folgend hat ein einzelnes Material ein grösseres Potenzial zur Wiederverwendung als ein Bauteil, welches aus mehreren Materialien besteht.

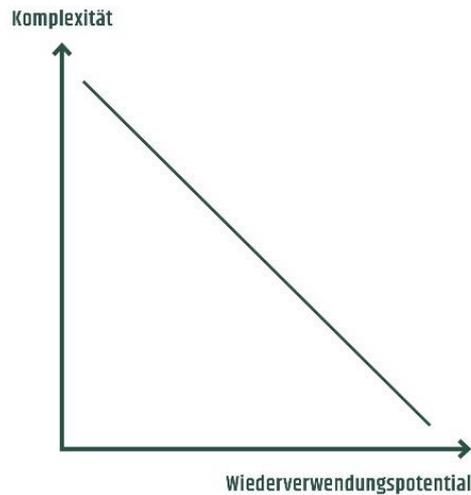


Abbildung 17 : Beziehung zwischen der Komplexität einer Einheit und ihrem Potenzial zur Wiederverwendung

4.1 Einführung in die Thematik

Beim Rückbau oder Abriss eines Gebäudes existieren mehrere Möglichkeiten, was die Zukunft der anfallenden Materialien oder Bauteile betrifft. Gemäss Abbildung 18 sind vier Hauptwege möglich: Wiederverwendung, stoffliche Verwertung, thermische Verwertung oder Entsorgung auf einer Deponie. Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich relativ stark voneinander, vor allem in Bezug auf den Prozessablauf, aber auch in Bezug auf die Treibhausgasemissionen und die dafür benötigte graue Energie. Ausserdem verursachen die genannten Prozesse auch nicht den gleichen Arbeitsaufwand in Bezug auf die Prozessentwicklung.

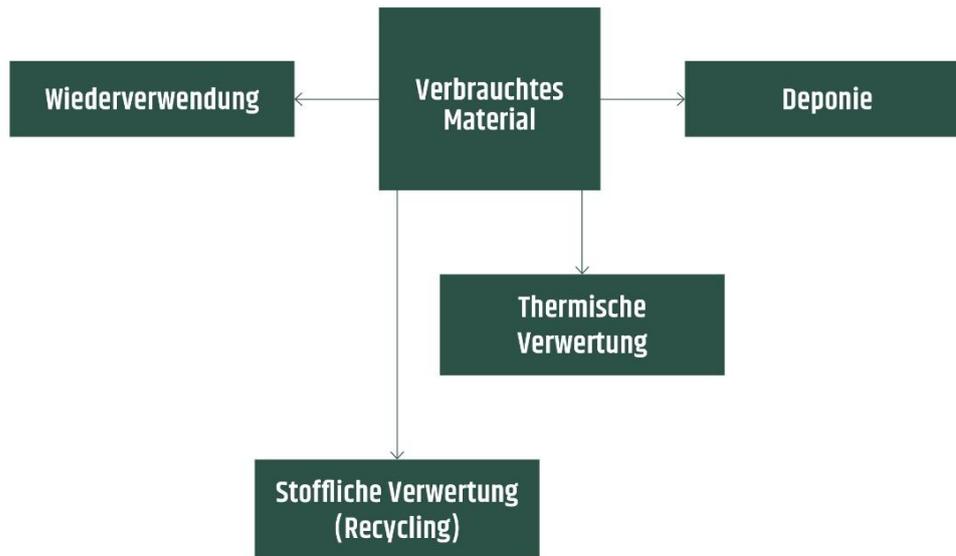


Abbildung 18: Möglichkeiten im Umgang mit Baumaterialien nach ihrem ersten Lebenszyklus

4.2 Methode und Vorgehensweise

Es wird eine repräsentative Auswahl von Holzbaukonstruktionsdetails untersucht. Es werden die wichtigsten im Holzbau verwendeten Materialien für Aussenwände sowie für Geschossdecken betrachtet. Es ist zu beachten, dass Materialien, die sich nicht auf den Holzbau, sondern auf das Mauerwerk beziehen, in dieser Studie nicht berücksichtigt werden. Dazu zählen beispielsweise Putz, Dämmungen/Abdichtungen unterhalb der Bodenplatte, sowie der Estrich/Unterlagsboden.

Um die Fälle der Wiederverwendung und des Recyclings von Materialien zu untersuchen, müssen die jeweiligen Prozesse vom Rückbau eines Gebäudes bis hin zum Einbringen des Materials auf einer neuen Baustelle beschrieben werden. Diese Beschreibung muss ein Verständnis für die Elemente ermöglichen, die einen erheblichen Arbeitsaufwand erfordern und einen hohen Energiebedarf benötigen. Um die für die Herstellung von Baustoffen benötigte graue Energie und die daraus resultierenden Treibhausgasemissionen aufzuzeigen, wird ein Vergleich auf Basis der Datenbank «Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2016» durchgeführt. Die Berechnungen sollen zeigen, wie viel Energie und Treibhausgasemissionen durch die Wiederverwendung der Materialien eingespart werden kann.

Schliesslich müssen die Materialien nach mehreren Kriterien klassifiziert werden, um ihr Potenzial für die Wiederverwendung als Material, für eine stoffliche Verwertung oder für eine thermische Verwertung zu bestimmen. Diese Bewertung stützt sich auf aktuelle Markttrends und Informationen der Lieferanten der betreffenden Materialien.

4.3 Baumaterialien

4.3.1 Aussenwandsystem

Die Aussenwände sind ein wichtiges Element eines Gebäudes und erfüllen mehrere Funktionen bezüglich Ästhetik der Aussenhaut, Schutz vor dem Aussenklima und dem Aussenlärm, Temperatur und Witterung. Zudem müssen Wände weitere Bedingungen erfüllen wie der Brand-, Feuchte- und Schallschutz. Um erwähnte Bedingungen zu erfüllen, ist die Materialisierung sehr wichtig und erfordert den Einsatz geeigneter, spezifischer Baustoffe.

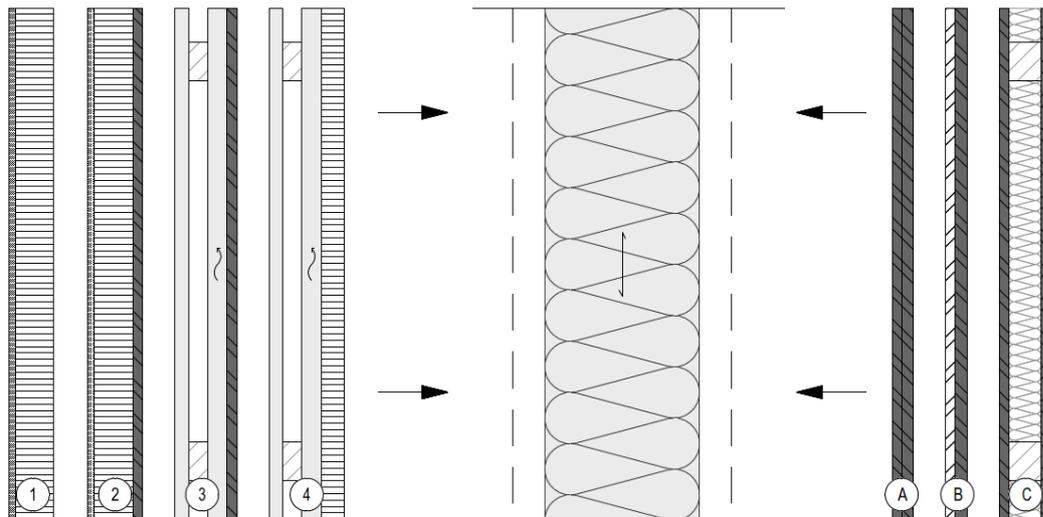
Bei den untersuchten Aussenwandsystemen handelt es sich um gängige Systeme wie den Holzrahmenbau oder Massivholzaufbauten mit hinterlüfteten oder verputzten Fassaden. Die Systeme sind nach Bedarf modulierbar und nach dem gleichen Prinzip aufgebaut. Beim Holzrahmenaufbau wird der

durch den Rahmen generierte Hohlraum mit Dämmung gefüllt und beidseitig beplankt. Beim Massivholzbau wird die Wand aussenseitig gedämmt. Nachfolgend werden die Aufbauten genauer beschrieben und visualisiert. Bei beiden Aufbauten können auf der inneren Seite eine zusätzliche Beplankung oder Vorsatzschale angebracht werden. Auf der äusseren Seite besteht die Möglichkeit, eine kompakte Fassade mit einer verputzten Dämmung oder eine hinterlüfteten Fassade zu verwenden. Die Modularität ermöglicht viele verschiedene Bauteile bei gleichbleibendem Kern. Beim Aussenwandsystem werden vorwiegend nur die Bauteile mit Beplankung, nicht aber mit Verputz oder Abrieb berücksichtigt.

Die Aussenwandsysteme, die in den folgenden Absätzen betrachtet werden, verfügen bereits über Möglichkeiten für den Rückbau. Die Modularität und die Verbindung von Aussenwandaufbauten ermöglichen daher eine gewisse Trennung von den verschiedenen Schichten. Bei den standardisierten Aussenwänden wird in der Regel keine Bauteilschicht verklebt, sondern mechanisch miteinander verbunden.

Holzrahmenbau

Das Standarddetail des Holzrahmenbaus ist durch seine Modulfähigkeit relativ flexibel in der Planung. Der Kern der Konstruktion, der aus einem Holzrahmen besteht und mit Dämmung gefüllt ist, verändert sich bei einer Mehrzahl von Varianten nicht. Auf beiden Seiten dieses Kerns können verschiedene Innen- und Aussenverkleidungen angebracht werden. In den meisten Fällen besteht die Rahmendämmung aus Glas- oder Steinwolle, es kann aber auch eine Zellulosedämmung verwendet werden. In der Abbildung 19 gelten die Zahlen 1 bis 4 für die äusseren und die Buchstaben A bis C für die inneren Verkleidungen. Für jede der Schichten wird die Materialisierung in den Kästen beschrieben. Die Massangaben in den Grafiken sind als orientierend zu verstehen



AUFBAU	
1.	Fassadenputz Holzfaserplatte Dämmung
2.	Fassadenputz Steinwolle als Putzträger (60 mm) Gipsfaserplatte (15 mm)
3.	Schallung vertikal (21 mm) Lattung hotizontal (30/60 mm) Lattung vertikal (30/60 mm) Gipsfaserplatte (15 mm)
4.	Schallung vertikal (21 mm) Lattung hotizontal (30/60 mm) Lattung vertikal (30/60 mm) Holzfaserplatte (35 mm)

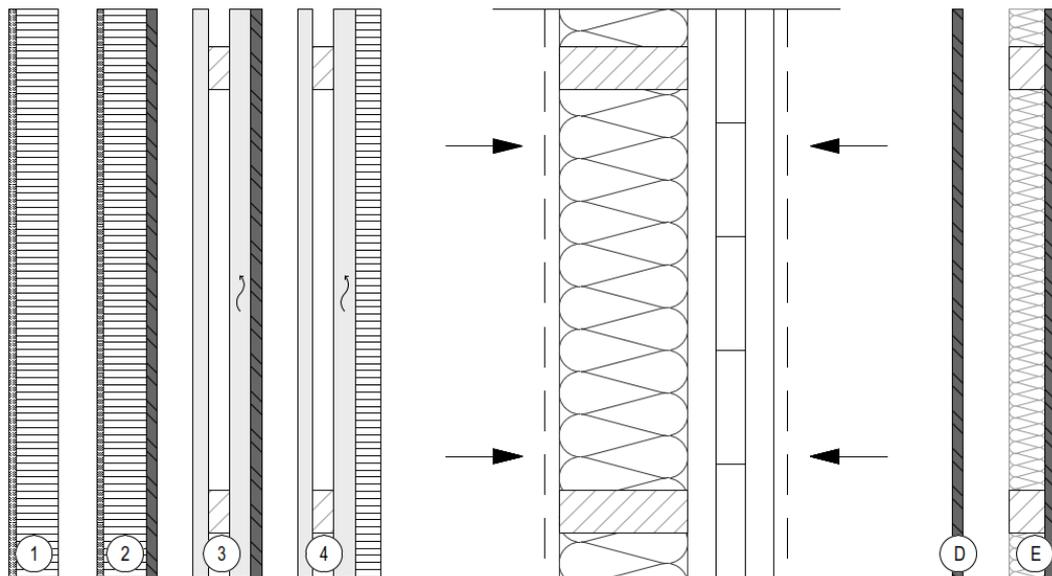
AUFBAU	
Ständer C24 (60/240 mm) , Mineralfaserdämmung (240 mm)	

AUFBAU	
A.	Gipsfaserplatte (15 mm) Gipsfaserplatte (18 mm)
B.	Grobspanplatte OSB (15 mm) Gipsfaserplatte (18 mm)
C.	Gipsfaserplatte (15 mm) Mineralfaserdämmung (50 mm) , Lattung vertikal (50/60 mm) Gipsfaserplatte (15 mm)

Abbildung 19: Varianten des Holzrahmen-Aufbaus

Massivholzbau

Wie beim Holzrahmenbau ist auch der Massivholzbau durch seine Modularität im Standarddetail relativ flexibel in der Planung. Der Kern der Konstruktion besteht Brettsperrholzplatte und aussenseitiger Dämmung. Um die statische Stabilität der Aussenhaut zu gewährleisten, können Ständer auf der Brettsperrholzplatte befestigt werden. Die Möglichkeiten zur Montage der Bekleidung sind dem Holzrahmenbau-Detail sehr ähnlich. In der Abbildung 20 gelten wiederum die Zahlen 1 bis 4 für die äusseren und die Buchstaben A und B für die inneren Verkleidungen. Für jede der Schichten wird die Materialisierung in den Kästen beschrieben. Die Massangaben in den Grafiken sind als orientierend zu verstehen



AUFBAU	
1.	Fassadenputz Holzfaserplatte Dämmung
2.	Fassadenputz Steinwolle als Putzträger (60 mm) Gipsfaserplatte (15 mm)
3.	Schallung vertikal (21 mm) Lattung horizontal (30/60 mm) Lattung vertikal (30/60 mm) Gipsfaserplatte (15 mm)
4.	Schallung vertikal (21 mm) Lattung horizontal (30/60 mm) Lattung vertikal (30/60 mm) Holzfaserplatte (35 mm)

AUFBAU	
	Ständer C24 (60/180 mm) , Mineralfaserdämmung (180 mm) Brettsperrholz (120 mm)

AUFBAU	
D.	Gipsfaserplatte (15 mm)
E.	Mineralfaserdämmung (50 mm) , Lattung vertikal (50/60 mm) Gipsfaserplatte (15 mm)

Abbildung 20: Varianten des Massivholz Aufbaus

4.3.2 Deckensystem

Die Decke in einem Gebäude bildet die obere oder untere Ebene eines Geschosses. Die Decken müssen die Tragwerksanforderungen erfüllen je nach Spannweite und der Nutzung der Räume. Wie die Wandsysteme müssen die Decken Bedingungen bezüglich Brand-, Feuchte- und Schallschutz erfüllen. Bei Holzdecken muss beispielsweise Masse in Form von Splittschüttung oder Überbeton eingebracht werden, um die Schallübertragung zu mindern. Die verschiedenen Anforderungen verlangen die Nutzung verschiedener Baustoffe zusammen mit Holz.

Die statische Anforderung an eine Decke verlangt verschiedene Massnahmen im Aufbau. Um die Deckenhöhe zu reduzieren und die Lasten übertragen zu können, müssen die Materialien fest miteinander verbunden sein. Die feste Verbundenheit kann die Trennung der Elemente zur Wiederverwendung behindern.

Holz-Beton-Verbund-Decken (HBV)

Die HBV-Decke ist ein Hybridaufbau, bei dem die besten Eigenschaften beider Materialien Holz und Beton vereint werden. Das Brettschichtholz auf der Unterseite nimmt die Zugkräfte auf und fungiert als Schalung für den Oberteil. Der armierte Beton wird vor Ort auf die Oberseite gegossen, um dann Druckkräfte aufzufangen. Ein Beispiel eines solchen Aufbaus ist in Abbildung 21 dargestellt. Die zwei Materialien sind mithilfe von Schrauben oder Schubverbindern verbunden, die vor der Betonierung auf dem Holz montiert werden. Die Trennung des Betons vom Holz ist nur möglich, wenn ein Rückbau berücksichtigt ist [37]. Ohne diese Möglichkeit kann diese Konstruktion nur dann wiederverwendet werden, wenn sie als gesamtes Element in einem anderen Gebäude wiederverwendet werden kann.

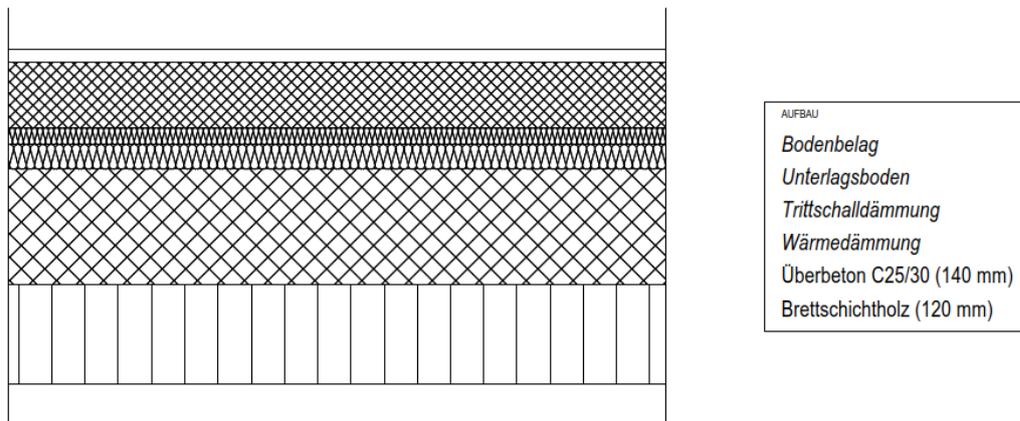


Abbildung 21 : HBV-Decke Aufbau

Brettstapel/Brettschichtholzdecke

Diese Deckenart ist mit einem Brettstapel oder Brettschichtholz als Tragelement verhältnismässig einfach aufgebaut (siehe Abbildung 22). Die geringe Eigenmasse des Holzes reicht nicht aus, um die Schallschutzanforderungen von Nutzungstrennungen zu erfüllen. Um dies zu erreichen, braucht es zusätzliches Baumaterial mit einer hohen Dichte. Deshalb liegt auf dem Brettschichtholz eine Kalksplittschüttung. Diese führt zu einer hohen flächenbezogenen Masse der Decke. Die Trennung der Brettschichtholzdecke als grosses Element ist aufgrund der Schichtordnung von den verschiedenen Materialien gut möglich.

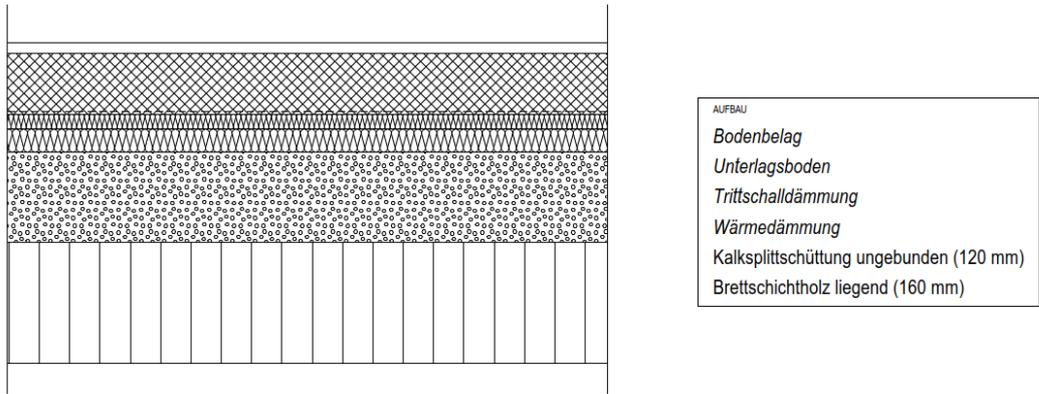


Abbildung 22 : Brettschichtholzdecke Aufbau

Hohlkastendecke

Die Hohlkastendecke besteht aus zwei Dreischichtplatten und einem Ständer dazwischen. Die Baumaterialien sind zusammen mithilfe von Schraubenpressungen verklebt, um die statischen Anforderungen zu erfüllen. Die Hohlkastendecke wird im Betrieb vorproduziert und als Element auf die Baustelle gebracht. Dort wird sie montiert. Im Hohlraum des Kastens liegt wie bei der Brettschichtholzdecke eine Kalksplittschüttung, um Masse einzubringen. Zusätzlich ist eine Mineralfaserdämmung eingesetzt. Zur Veranschaulichung wird in Abbildung 23 ein Beispiel dargestellt. Die einzelnen Bestandteile der Hohlkastendecke können aufgrund der Schraubpressklebung nicht sauber getrennt werden. Deshalb kann die Decke nur dann wiederverwendet werden, wenn sie als gesamtes Element in einem anderen Gebäude wiederverwendet werden kann.

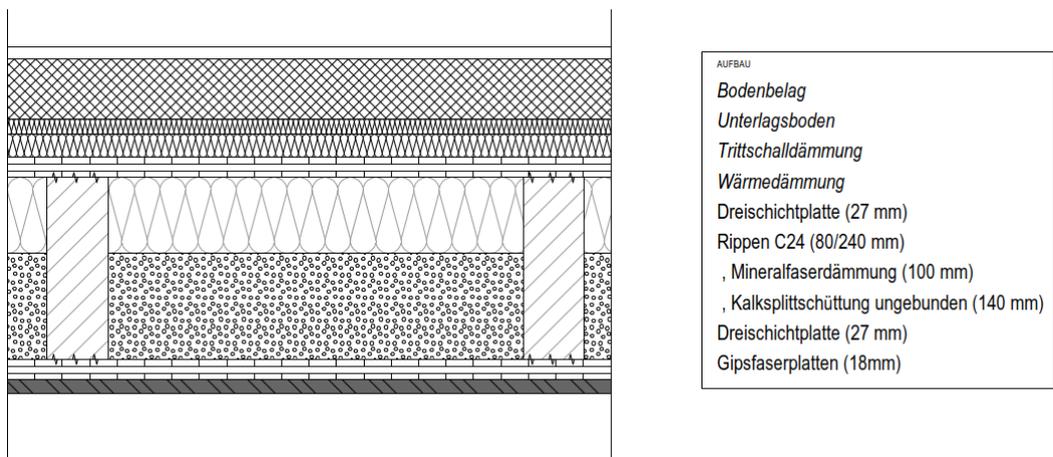


Abbildung 23 : Hohlkastendecke Aufbau

4.3.3 Stützen

Stützen weisen aufgrund deren häufig geringer Komplexität bezüglich Materialisierung ein grosses Potenzial für die Wiederverwendung auf. Die Konstruktionen sind reversibel zu planen.

4.3.4 Materialien

In diesem Kapitel werden nur die Materialien betrachtet, die für den Holzbau relevant sind. Bei Aussenwandkonstruktionen werden der Innen- und Aussenputz sowie allfällige Farbanstriche daher nicht berücksichtigt. Ebenso werden bei Deckenplatten der Estrich sowie die Schall- und Wärmedämmung zwischen dem Tragsystem und dem Unterlagsboden nicht berücksichtigt. An der Unterseite der Bodenplatte werden potenzielle abgehängte Decken und Installationsräume ebenfalls nicht berücksichtigt. Die Tabelle 16 fasst die verschiedenen Materialien zusammen, die bei der Berechnung der grauen Energie und der Treibhausgasemissionen berücksichtigt werden. Um die notwendigen Berechnungswerte, wie beispielsweise die Rohdichte zu definieren, wurden mehrere spezifische Produkte ausgewählt. Die Auswahl bildet die üblicherweise in der Schweiz meist verwendeten Materialein für diese Zwecke ab. Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 16 : Gewählte Materialien

Kategorie	Produktklasse	Hersteller	Produkt	Rohdichte [kg/m ³]
Dämmung	Glaswolle	Isover	Isoconfort 032	28
	Steinwolle	Flumroc	Flumroc-Dämmplatte 1	38
	Steinwolle als Putzträger	Flumroc	Compact PRO	85
	Holzfaserdämmung	Pavatec	Pavaterm	110
	Zellulose Dämmung	Isofloc	Isofloc LM	35
Beplankungsmaterial	Gipsfaserplatte	James Hardie	Fermacell Gipsfaser-Platten	1150
	OSB-Platte	Gemäss KBOB Daten		605
	Dreischichtplatte	Gemäss KBOB Daten		470
Struktur	Brettschichtholz	Gemäss KBOB Daten		470
	Massivholz, kammergetr, gehobelt	Gemäss KBOB Daten		465
	Massivholz, luftgetrocknet, roh	Gemäss KBOB Daten		485
	Beton	Gemäss KBOB Daten		2300
	Armierungsstahl	Gemäss KBOB Daten		7850
	Kalksplittschüttung	Gemäss KBOB Daten		1400

4.4 Ablaufprozesse der Wiederverwendung und des Recyclings

Die Prozesse der Wiederverwendung und des Recyclings weisen ähnliche Schritte auf, haben aber einen anderen Ablauf. In der Abbildung 24 werden die beiden Prozesse bezogen auf die in der Bauindustrie wichtigsten Schritte gegliedert. In der Praxis kann es aber durchaus vorkommen, dass einige Schritte etwas anders ablaufen als in dieser Grafik dargestellt.

Bei beiden Verfahren ist es das Ziel, die Baumaterialien am Ende des ersten Lebenszyklus des Gebäudes wiederverwenden zu können. Viele Recyclingprozesse haben sich bereits etabliert. So wird beispielsweise Altholz zu Spanplatten verarbeitet oder bereits verwendeter Beton wird zerkleinert und für Recyclingbeton verwendet. Da das Recycling schon seit vielen Jahren betrieben wird, ist in bei Recyclingprozessen viel mehr Erfahrung vorhanden, als dies bei Wiederverwendungsprozessen der Fall ist. Durch diese Erfahrung konnte der gesamte Prozess in Bezug auf die finanziellen Kosten, aber nicht unbedingt in Bezug auf den grauen Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen während des Prozesses, optimiert werden. Tatsächlich verbrauchen die Schritte im Recyclingprozess, wie in dieser Grafik beschrieben, mehr graue Energie und emittieren mehr Treibhausgase, als dies beim Wiederverwendungsprozess der Fall ist. In den folgenden Abschnitten werden beide Verfahren detailliert beschrieben.



Abbildung 24: Ablaufprozess Wiederverwendung und Recycling

Wiederverwendungsprozess

Der Rückbau zur Wiederverwendung von Materialien erfordert eine Planung der Arbeitsschritte und der Logistik, um kurze und geordnete Arbeitszeiten am Abbauort zu erreichen. Bei den Rückbauarbeiten zur Wiederverwendung müssen sichtbare Baumaterialien oder Bauteile sorgfältig demontiert werden, um Beschädigungen und Wertverluste beim Wiederverkauf zu vermeiden. In den meisten Fällen erfordert dieser Schritt den Einsatz von Arbeitskräften. Bei schweren Bauteilen wie kompletten Elementen oder Trägern ist zudem der Einsatz von Kränen notwendig, um die einzelnen Komponenten aus dem Gebäude zu entfernen.

Beim Rückbau werden die Materialien entweder getrennt oder bauteilbezogen zurückgebaut. Die Bauteile und Materialien werden nach Beschaffenheit, Format, Qualität und Eignung sortiert und dokumentiert. Dieser Schritt ist entscheidend für die zukünftige Verwendung der Bauteile und Materialien. Je genauer die Materialien dokumentiert werden, desto einfacher wird später die Wiederverwendung erfolgen können. Es ist möglich, dass dieser Schritt mithilfe des Materialpasses durchgeführt wird, sofern einer solcher vorhanden ist. Der Vorteil einer Dokumentation vor dem Rückbau ist, dass die Materialien und Bauteile bereits weiterverkauft oder einen Neubau eingeplant werden können, bevor ein Gebäude zurückgebaut wird. Dadurch ist es möglich, «just-in-time» zu arbeiten und eine kostenintensive Zwischenlagerung zu vermeiden.

Der Transport von Materialien von der Rückbaustelle zum Lager ist ein wichtiger Schritt, der einen grossen Einfluss hat auf die graue Energie und zusätzliche Treibhausgasemissionen für ein wiederverwendetes Material. Bei sperrigen und grossen Materialien ist es kaum möglich, die Beladung für den Transport zu optimieren. Die Entfernung zwischen der Rückbaustelle und dem Lager kann je nach geografischer Lage beider Orte stark variieren.

Je nach Art des Materials wird die Reinigung entweder auf der Rückbaustelle oder im Lager durchgeführt. Beschädigte Materialien werden entsprechend ihrer zukünftigen Verwendung repariert. Die Materialien bleiben bis zum Zeitpunkt ihrer Wiederverwendung im Lager. Die Lagerung muss an die Eigenschaften der Materialien angepasst sein und die langfristige Beibehaltung ihrer Qualität ermöglichen. Materialien aus dem Holzbau werden idealerweise in einem vor Witterungseinflüssen geschützten Gebäude gelagert. Jedes Material wird entsprechend der zuvor erstellten Dokumentation gelagert. Wenn für die Materialien eine neue Verwendung gefunden wird, werden sie vom Lager zur neuen Baustelle transportiert. Wie beim Transport von der Rückbaustelle muss dieser Transport an die Art des Materials angepasst werden. Je nach Verwendung müssen bestimmte Materialien modifiziert werden, um ihrem neuen Zweck gerecht zu werden.

Die Wiederverwendung von Baumaterialien ist in der Schweiz derzeit noch nicht stark verbreitet. Der Prozess ist daher nicht optimiert und mit einem hohen Arbeitsaufwand verbunden, insbesondere in Bezug auf die dafür erforderlichen Arbeitskräfte. Jede Rückbaustelle hat unterschiedliche Materialien und erfordert daher eine spezifische Demontage. Der Hauptvorteil der Wiederverwendung von Materialien ist der geringe Ausstoss von Treibhausgasen und der geringe Verbrauch grauer Energie und die Verlängerung der Speicherdauer des Kohlenstoffs. Durch eine Optimierung des Prozesses, insbesondere durch die Wahl des geeigneten Bausystems, können die Vorteile der Wiederverwendung von Materialien zukünftig noch grösser ausfallen.

Prozess des Recyclings

Wie bei einer Rückbaustelle erfordert auch der Abbruch von Gebäuden für das Recycling eine vorherige Planung des Rückbaus und der benötigten Logistik. Abbrucharbeiten werden in der Regel mit grossen Maschinen wie Baggern durchgeführt. Der Einsatz von Maschinen ermöglicht relativ kurze Abbruchzeiten. Für das Recyclingverfahren ist es nicht erforderlich, dass die Baumaterialien in einem qualitativ hochwertigen Zustand bleiben. Es ist daher möglich, die Materialien durch Schneiden, Brechen oder Zerkleinern zu trennen. In dieser Phase des Prozesses können die Materialien sortiert werden. Ausserdem wird die Verladung in die Container durch Minimierung des Ausgangsvolumens optimiert.

Der Abtransport der Materialien erfolgt während des Abbruchs, um keine Lagerung auf der Baustelle zu verursachen. Der Transport des zu recycelnden Materials von der Abbruchbaustelle zum Recyclingzentrum erfolgt prinzipiell durch Mulden, die ein effizientes Verladen ermöglichen. Im Recyclingzentrum werden die Materialien nach Bedarf sortiert und geordnet. Wenn das Material nicht sofort verarbeitet werden kann, wird es sortenrein eingelagert. Bevor es verarbeitet werden kann, wird das Material zerkleinert, von Fremdkörpern getrennt und gereinigt. Erst dann wird es wieder der Produktion zugeführt.

Das recycelte Material wird entweder in den Herstellungsprozess einer Produktionslinie integriert oder mithilfe von Additiven als vollwertiges Rezyklat verwendet. Die Aufbereitung und Herstellung des Produkts aus recyceltem Material ist der energie- und CO₂-intensivste Schritt im gesamten Recyclingprozess. Der Verbrauch variiert je nach Material. Recycelte Materialien durchlaufen nach ihrer Herstellung den gleichen Bau- und Montageprozess wie herkömmliche Materialien.

Der Vorteil von recycelten Materialien ist, dass die graue Energie und die Treibhausgasemissionen reduziert werden. Da es sich beim Recycling um eine Tätigkeit mit einem gewissen Erfahrungsschatz handelt, sind die Prozessschritte stark optimiert. Das Recycling von Materialien hat einen höheren Ausstoss von Treibhausgasemissionen und einen höheren Verbrauch an grauer Energie als die Wiederverwendung zur Folge, aber weniger als die Herstellung eines gänzlich neuen Produkts. Die Qualität eines recycelten Materials im Vergleich zu einem neuen kann je nach Art des Materials variieren.

4.5 Wirkungsberechnung

4.5.1 Graue Energie

Die graue Energie bezieht sich auf die Gesamtmenge an nicht erneuerbarer Primärenergie in Baumaterialien, Bauelementen und Gebäuden, die für vorgelagerte Prozesse benötigt wird. Sie umfasst alle Stufen von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung und Verarbeitung, den Austausch von Materialien und Bauteilen bis hin zur Entsorgung einschliesslich der erforderlichen Transport- und Hilfsmittel. Die Masseinheit für graue Energie sind Kilowattstunden in Öl-Äquivalente (kWh oil-eq). Für die Berechnung der grauen Energie von Materialien wird als Basis die Datenbank «Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2016» verwendet, die ihrerseits auf der Datenbank ecoinvent v2.2 basiert.

In diesem Kapitel wird die graue Energie jedoch nicht auf die Abschreibungsdauer der Materialien oder Gebäudekomponenten eines Gebäudes bezogen. Der Zweck dieses Kapitels ist, die graue Energie zu quantifizieren, die in den Materialien enthalten sind. Um die in einem Material enthaltene Energie zu bewerten, wird die Berechnung auf Grundlage der grauen Energie durchgeführt, die zur Herstellung der Baustoffe benötigt wird. Die Berechnung berücksichtigt hier nicht den Rückbau, Transport und die Lagerung der wiederverwendeten Materialien. Die zuletzt genannten Quellen wurden in dieser Studie wegen der hohen Variabilität der Daten in Abhängigkeit von den Maschinen und der Transportstrecke vernachlässigt. Ausserdem haben diese Energiequellen keinen grossen Einfluss auf die Gesamtmenge der grauen Energie.

Die Berechnungen in diesem Kapitel definieren ebenfalls nicht, welcher Baustoff aufgrund seines hohen Anteils an grauer Energie vermieden werden sollte, sondern welcher Baustoff unbedingt wiederverwendet werden sollte, um die darin enthaltene graue Energie zu erhalten. Entsprechend der Angaben in 4.3 wird jede Schicht auf ihre grauen Energiewerte untersucht. Um einen konsistenten Vergleich zu ermöglichen, wird die Energie in Kilowattstunde Öl-Äquivalent pro Quadratmeter (kWh Öl-eq/m²) angegeben.

4.5.2 Treibhausgasemissionen

Die Treibhausgasemissionen, wie sie in dieser Studie berechnet werden, beziehen sich auf die kumulativen Auswirkungen verschiedener Treibhausgase wie CO₂ oder Methan, die das Klima negativ beeinflussen. Die Gase werden als äquivalente Menge an Kohlendioxid-Emissionen (kg CO₂-eq) ausgedrückt. Wie bei der Berechnung der grauen Energie werden die Datenbanken «Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2016» und ecoinvent v2.2 verwendet.

In der vorliegenden Studie werden die Treibhausgasemissionen berechnet, um die Auswirkungen der Herstellung von Baumaterialien zu verstehen. Bei der Wiederverwendung eines Baumaterials werden Treibhausgasemissionen für die Herstellung eines neuen Materials vermieden. Die Berechnungen, die im weiteren Verlauf aufgeführt werden, zeigen die Menge an Treibhausgasen, die bei der Wiederverwendung eingespart werden. Bei den errechneten Werten handelt es sich um absolute Werte pro Quadratmeter, das heisst, sie sind nicht auf die Amortisationszeit des Gebäudes bezogen. Wie bei der Berechnung der grauen Energie kann auch bei der Berechnung der Treibhausgase definiert werden, welches Material unbedingt wiederverwendet werden muss, um nicht erneut eine signifikante Menge an Treibhausgasen zu emittieren. Unter Berücksichtigung der gleichen Konstruktionsdetails wie bei den Berechnungen zur grauen Energie werden die Treibhausgasemissionen in Kilo CO₂-Äquivalent pro Quadratmeter (kg CO₂-eq/m²) angegeben.

4.5.3 Berechnung pro Schicht

Im Anhang A sind die Berechnungen der grauen Energie für die Herstellung des ausgewählten Standardbaudetails ersichtlich. Anhang B enthält die Berechnungen der Treibhausgasemissionen für die Herstellung des ausgewählten Standardbaudetails. In den folgenden Abschnitten werden die Berechnungen zusammengefasst und erläutert. Die Berechnungen werden entsprechend der Darstellung in Kapitel 4.3 schichtweise dargestellt. Jeder Schicht wird einem Kapitel zugewiesen. In diesen werden jeweils zuerst die Berechnungen zur grauen Energie der Schicht vorgestellt und dann die Berechnungen zu den Treibhausgasemissionen der entsprechenden Schicht.

4.5.3.1 Aussenwand-Kerne

In diesem Kapitel werden die Holzrahmenbaukerne und Massivholzbaukerne untersucht. Beim Holzrahmenbau wird die Struktur durch die 240mm/60mm Holzständer gebildet, die mit einem 625mm Raster zwischen den einzelnen Ständern angeordnet sind. Beim Massivholzbau werden über der Brettsperrholzplatte Holzständer von 180mm/60mm mit dem gleichen Raster angebracht. Die Dämmung füllt die Lücken zwischen den Holzständern. Für Variante 1 (V1) wird Steinwolle, für Variante 2 (V2) Glaswolle und für Variante 3 (V3) Zellulosedämmung berechnet. Für die beiden unterschiedlichen Kerne werden alle drei Isolationsvarianten berechnet. Die Tabelle 17 zeigt die Materialisierung der verschiedenen Konstruktionen.

Tabelle 17 : Aussenwand-Kerne Varianten

Schicht	Materialisierung
Holzrahmenbau V1	Holzständer C24 (240 mm /60 mm)
	Steinwolle 240 mm
Holzrahmenbau V2	Holzständer C24 (240 mm /60 mm)
	Glaswolle 240 mm
Holzrahmenbau V3	Holzständer C24 (240 mm /60 mm)
	Zellulosedämmung 240mm
Massivholzbau V1	Holzständer C24 (180 mm /60 mm)
	Steinwolle 180mm
	Brettsperrholz 120mm
Massivholzbau V2	Holzständer C24 (180 mm /60 mm)
	Glaswolle 180mm
	Brettsperrholz 120mm
Massivholzbau V3	Holzständer C24 (180 mm /60 mm)
	Zellulosedämmung 180mm
	Brettsperrholz 120mm

Bei den Holzrahmenbau-Varianten ist die graue Energie, die bei der Produktion anfällt, geringer als bei den Massivholz-Varianten. Der grosse Unterschied kommt daher, dass die Produktion des Brett-schichtholzes energieintensiv ist. Im Gegensatz zu den einfachen Massivholzständern wird bei der Produktion von BSH mehr Energie benötigt. Für die Produktion des BSH muss das Holz gesägt, getrocknet, in Bretter geschnitten, gehobelt, verleimt, gepresst und dann wieder gehobelt und sortiert werden der Anteil der grauen Energie ist vom Energiemix für diese Prozesse abhängig. Auch die Herstellung des Klebers, mit dem die Bretter verbunden werden, erfordert graue Energie. Für den Ständer muss das Holz nur gesägt, getrocknet und gehobelt werden.

Die Zellulosedämmung ist die sparsamste Dämmung hinsichtlich der grauen Energie. Das liegt daran, da für deren Herstellung nur bei der Umwandlung von Altpapier in die Dämmung graue Energie benötigt wird. Da das Altpapier als Hauptbestandteil bereits vorhanden ist, wird es nicht berücksichtigt. Unter den beiden Mineralwollen existieren aus Sicht der benötigten grauen Energie keine grossen Unterschiede. Der etwas höhere graue Energiewert von Steinwolle lässt sich durch die Verwendung einer dichteren Dämmplatte (38 kg/m^3) als bei Glaswolle (22 kg/m^3) erklären. In der Abbildung 25 sind die grauen Energiewerte für jede Wand und verschiedenen Materialien dargestellt.

In der Regel werden Mineralwolle als Dämmsysteme in den Kernen von Aussenwänden (Holzständer) eingesetzt. Holzfaser/-wolle weist einen geringeren Dämmwert auf und wird daher seltener verwendet. Sie stellt jedoch eine ökologische Alternative dar. Zudem ist eine Holzwolldämmung problemlos recyclingbar und teilweise auch kompostierbar. Am Ende des Lebenszyklus besteht die Möglichkeit der thermischen Verwertung der Holzwolle. Bezüglich Grauer Energie ist die Holzwolldämmung ähnlich einzustufen wie die Glas- und Steinwolle. Dies ist jedoch stark von der Dichte und dem vergleichbaren Dämmwert abhängig.

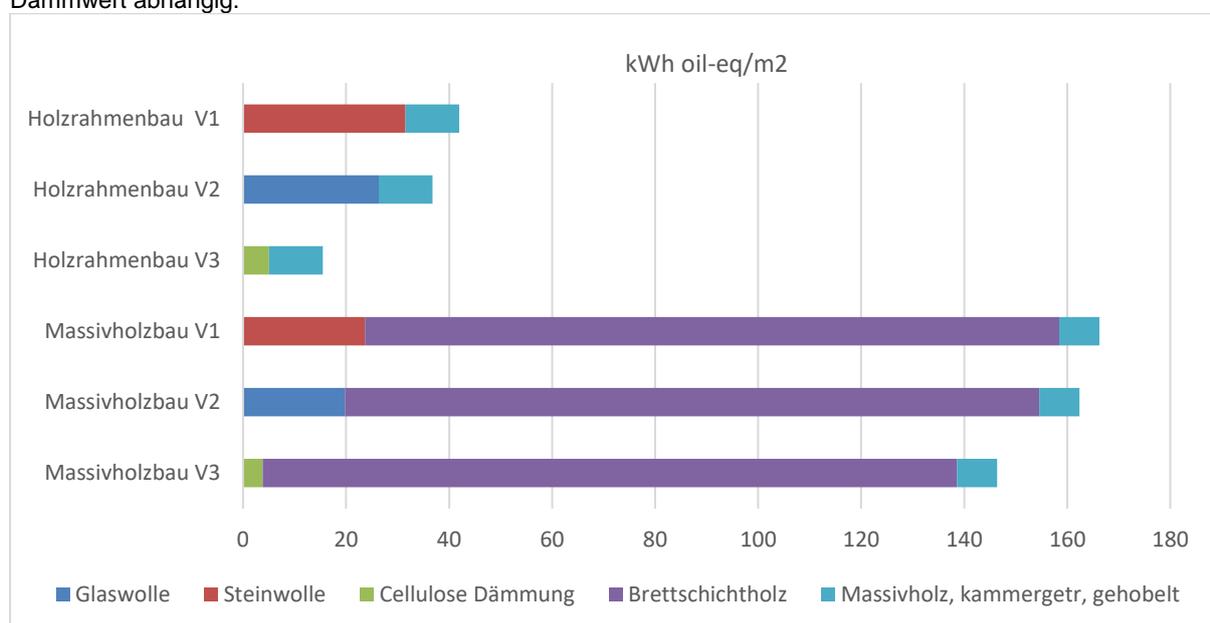


Abbildung 25: Benötigte graue Energie der Herstellung von Aussenwand-Kerne

Die Treibhausgaswerte der Aussenwand-Kerne widerspiegeln mehr oder weniger die Ergebnisse aus den Berechnungen zur grauen Energie. Nur die Werte der Dämmung sind anteilmässig unterschiedlich. Die Werte der Treibhausgasemissionen sind bei Steinwolle fast doppelt so hoch wie bei Glaswolle.

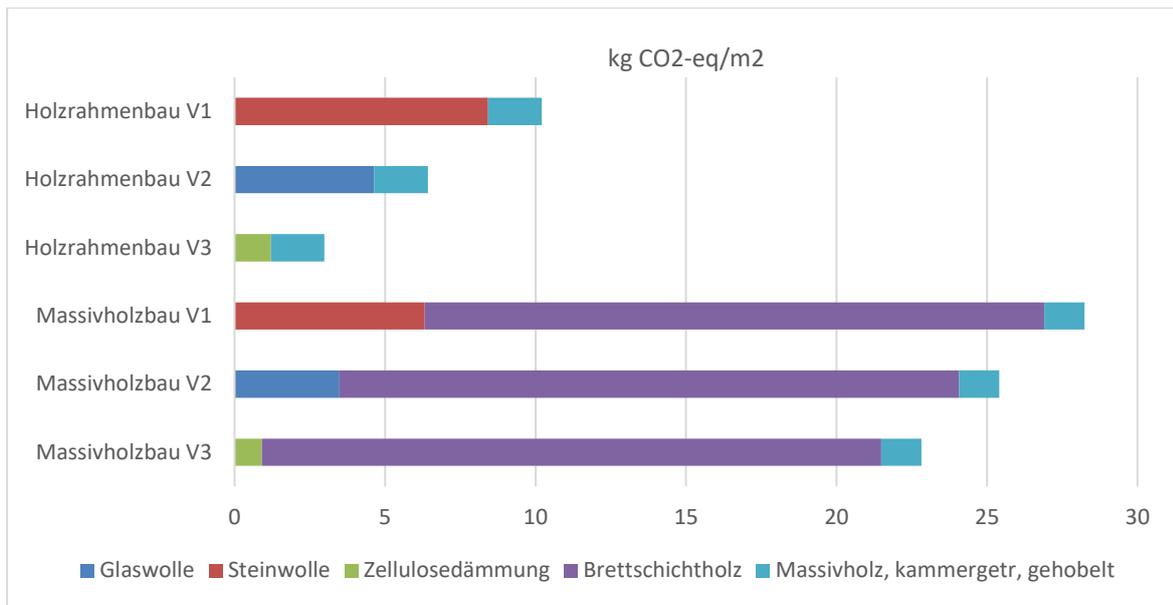


Abbildung 26 : Verursachte Treibhausgasemissionen bei der Herstellung von Aussenwand-Kernen

4.5.3.2 Aussen- und Innenverkleidungen

Die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Zahlen 1 bis 4 gelten für die äusseren und die Buchstaben A bis E für die inneren Verkleidungen, analog zu den Erläuterungen in Kapitel 4.3. Die Verkleidungsschichten 1 und 2 sind Teil der Kompaktfassaden und werden anschliessend mit einem Aussenputz überzogen. Die benötigte graue Energie und verursachten Treibhausgase durch den Putz werden nicht berücksichtigt. Bei den Verkleidungen 3 und 4 handelt es sich um Fassaden mit einer äusseren Holzverkleidung, die über einer Hinterlüftungslattung befestigt werden. Die Innenbekleidungen A, B und D sind Schichten, die durch die Verwendung von Gipsfaserplatten die Anforderungen an den Brandschutz erfüllen. Ausserdem dient diese Platte als Speichermasse. Die Schichten C und E ermöglichen die technische Installation von elektrischen oder sanitären Leitungen. Die Vorsatzschale sorgt für eine bessere Dämmung gegen Luftschall angrenzender Elemente. Die Tabelle 18 zeigt die Materialisierung der verschiedenen Verkleidungsschichten.

Tabelle 18 : Aussen- und Innenverkleidungen Varianten

Schichten	Materialisierung
Schicht 1	Holzfaserdämmung 60mm
Schicht 2	Steinwolle als Putzträger 60mm
	Gipsfaserplatte 15mm
Schicht 3	Holzschalung 21mm
	Lattung (30mm /60mm)
	Lattung (30mm /60mm)
	Gipsfaserplatte 15mm
Schicht 4	Holzschalung 21mm
	Lattung (30mm /60mm)
	Lattung (30mm /60mm)
	Holzfaserdämmung 35mm
Schicht A	Gipsfaserplatte 15mm
	Gipsfaserplatte 18mm
Schicht B	OSB-Platte 15mm
	Gipsfaserplatte 18mm
Schicht C	Gipsfaserplatte 15mm
	Steinwolle 50mm
	Lattung (50mm /60mm)
	Gipsfaserplatte 15mm
Schicht D	Gipsfaserplatte 15mm
Schicht E	Steinwolle 50mm
	Lattung vertikal (50mm /60mm)
	Gipsfaserplatte 15mm

Gemäss Abbildung 27 benötigt die Gipsfaserplatte am meisten graue Energie. Der Einfluss dieses Materials ist im Vergleich zu anderen Materialien relativ hoch. Durch eine Doppelbeplankung mit der Gipsfaserplatte ergeben sich hohe Werte. Im Vergleich dazu hat eine OSB-Platte mit der identischen Dicke nur einen fast halb so hohen Bedarf grauer Energie. Unter den Dämmmaterialien benötigt die Holzfaserdämmung am meisten graue Energie. Gefolgt von Steinwolle als Putzträger und Steinwolle. Der unterschiedliche Wert der beiden Steinwollämmungen erklärt sich durch die unterschiedliche Dichte der beiden Materialien. Das für die Lattung und die Aussenverkleidungen verwendete Massivholz weist wenig graue Energie auf. Das liegt daran, dass dieses Holz lediglich gesägt und luftgetrocknet werden muss. Dabei wird weniger graue Energie benötigt als es bei einem Holzprodukt mit höherem Homogenisierungsgrad der Fall wäre.

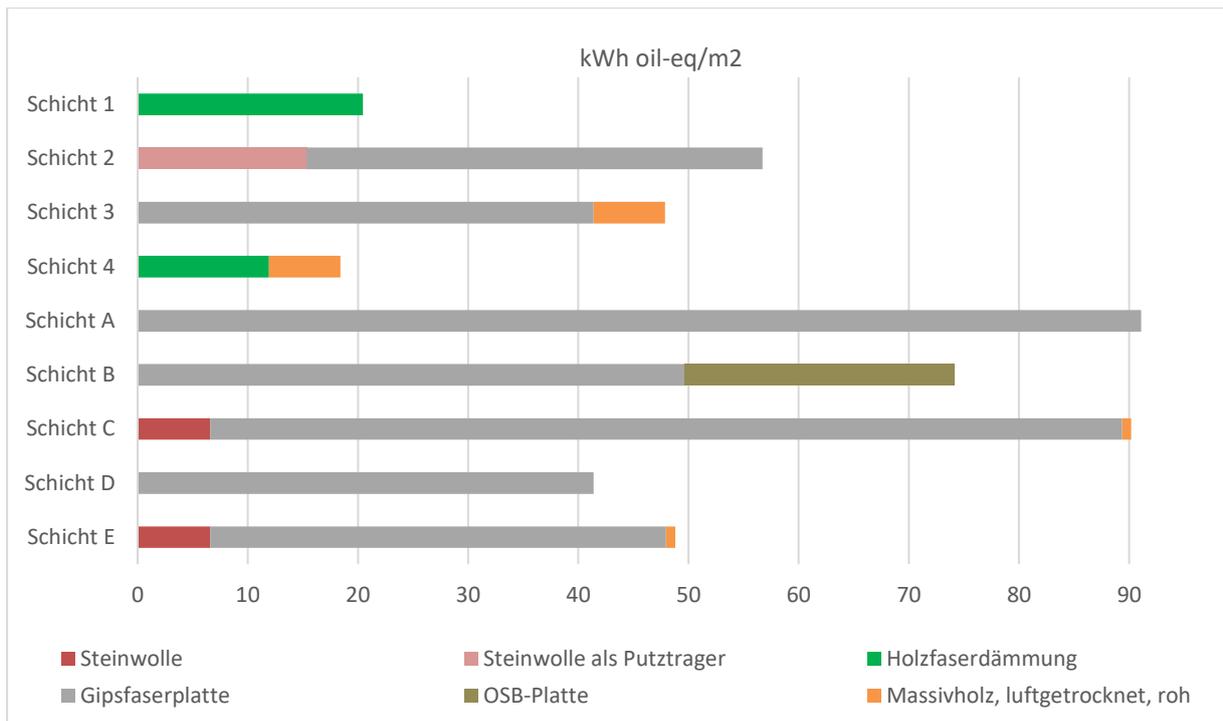


Abbildung 27 : Benötigte graue Energie für die Herstellung von Aussen- und Innenverkleidungen

Die Ergebnisse der Berechnungen bezüglich der Treibhausgasemissionen führen unter den Schichten zu ähnlichen Resultaten, wie es bereits bei der Berechnung der grauen Energie der Fall war. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben wurde, existieren nur punkto Isolierung unterschiedliche Werte. Die Holzfaserdämmung, die in Bezug auf die graue Energie einen höheren Wert als Steinwolle als Putzträger aufweist, hat einen niedrigeren Wert für die Treibhausgasemissionen im Vergleich zur Steinwolle.

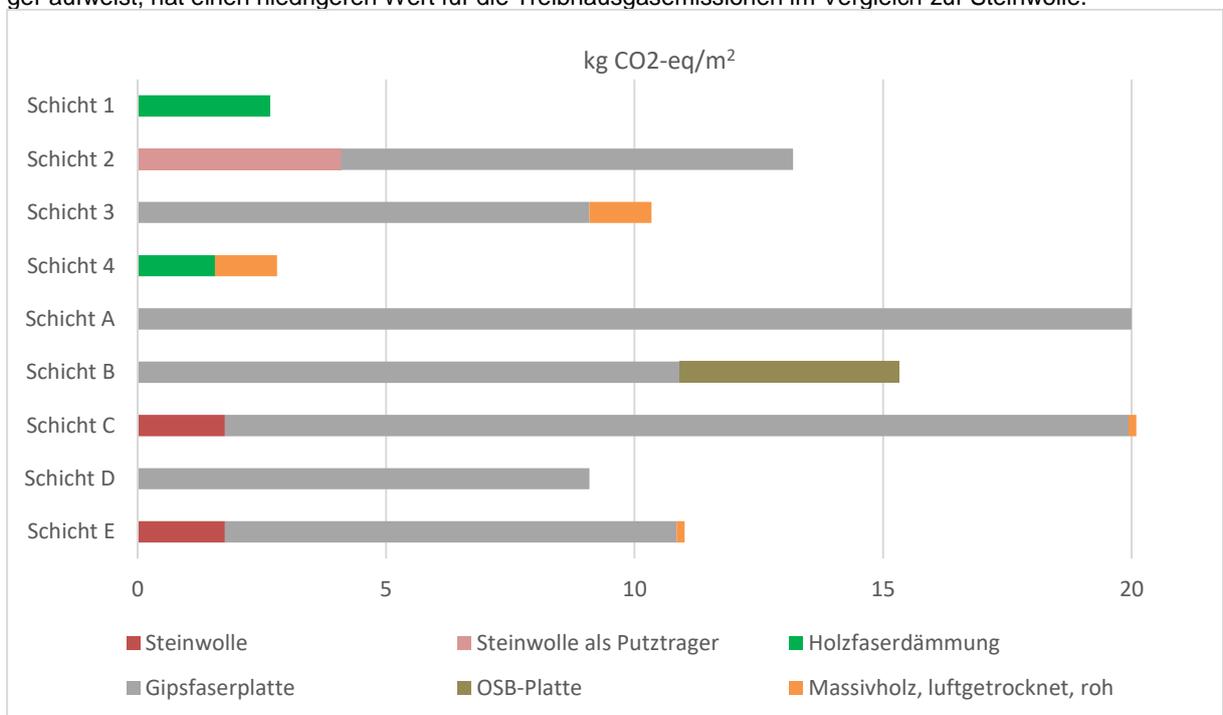


Abbildung 28 : Verursachte Treibhausgasemissionen für die Herstellung von Aussen- und Innenverkleidungen

4.5.3.3 Deckensysteme

In diesem Abschnitt wird das Deckensystem betrachtet. Das heisst, es werden die HBV-Decke, BSH-Decke und Hohlkastendecke verglichen. Die HBV-Decke ist eine Mischkombination aus Holz und Beton. Das 120 Millimeter starke Brettschichtholz ist ein massives Element, das die Betonschalung und die Zuglasten aufnimmt. Der 140 Millimeter starke Beton, der die Drucklasten aufnimmt, wird darüber gegossen und mit einer Stahlbewehrung verstärkt. Die Brettschichtholzdecke besteht aus 160mm starkem Brettschichtholz, mit dem die statischen Anforderungen erreicht werden. Auf das Brettschichtholz wird Kalksplitt aufgebracht, um die flächenbezogene Masse zu erhöhen und die Geräuschübertragung reduzieren zu können. Die Hohlkastendecke ist ein System, das aus zwei 27mm Dreischichtplatten besteht, die mit Schrauben und Leim mit 240mm hohen und 80mm starken Rippen verbunden werden, die wiederum in einem 625mm Raster angeordnet sind. Die Lücken werden mit Kalksplittung und Dämmung gefüllt. Der untere Teil dieser Decke ist mit einer Gipsfaserplatte beschichtet. In der Tabelle 19 ist die Materialisierung der verschiedenen Deckensysteme aufgeführt.

Tabelle 19 : Deckensysteme Varianten

Schichten	Materialisierung
HBV-Decke	Überbeton 140mm
	Brettschichtholz 120mm
Brettschichtholzdecke	Kalksplittung 120mm
	Brettschichtholz 160mm
Hohlkastendecke	Dreischichtplatte 27mm
	Rippen (240mm/ 80mm)
	Steinwolle 100mm
	Kalksplittung 140mm
	Dreischichtplatte 27mm
	Gipsfaserplatte 18mm

Die Berechnungen haben ergeben, dass wenn BSH in einem Deckensystem verwendet wird, dieses für mehr als die Hälfte der benötigten grauen Energie des Deckensystems verantwortlich ist. Bei der HBV-Decke ist der Anteil der grauen Energie für die Produktion bei Beton und Brettschichtholz fast gleich. Von den drei untersuchten Deckenmaterialien enthält die HBV-Decke absolut gesehen den höchsten Anteil grauer Energie. Bei der Brettschichtholz-Decke macht das Brettschichtholz den grössten Anteil grauer Energie aus. Für die Hohlkastendecke ist der grösste Anteil an grauer Energie in der Dreischichtplatte zu finden, gefolgt von der Kalksplittung und der Gipsfaserplatte. Die Kalksplittschüttung ist je nach verwendeten Bindemittel nicht wiederverwendbar. Bei dieser Decke machen die Steinwolle-Dämmung und das Massivholz den kleinsten Anteil aus.

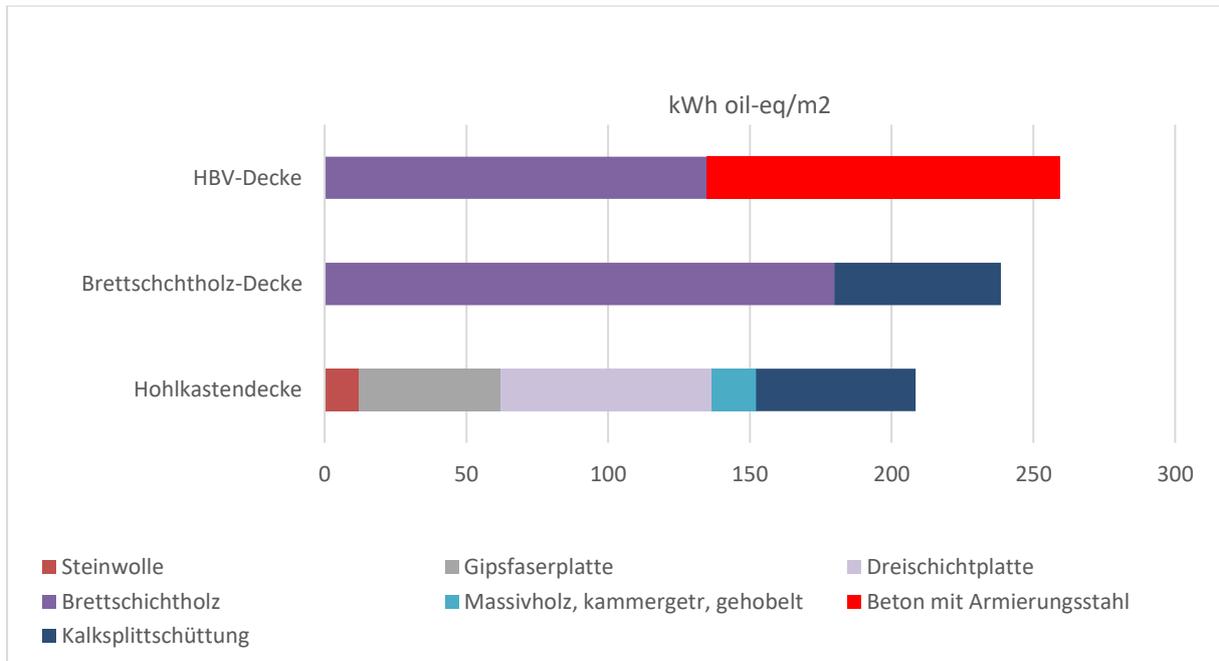


Abbildung 29 : Benötigte graue Energie für die Herstellung von Deckensystemen

Gemäss Abbildung 30 verursacht die HBV-Decke die höchsten Treibhausgasemissionen. Das Hohlkastendeckensystem verursacht etwas weniger, die BSH-Decke schneidet am besten ab. Bei der HBV-Decke verursacht die Betonschicht die höchsten Emissionen. Im Vergleich zu den grauen Energiewerten ist die Wirkung der Anwendung von Brettischtholz deutlich weniger problematisch, als es bei Beton der Fall ist. Für die Brettischtholz-Decke ist der Emissionswert der Kalksplittung anteilmässig höher als für die graue Energie. Auch in der Holzkastendecke ist der Wert von Massivholz anteilmässig höher als bei der grauen Energie.

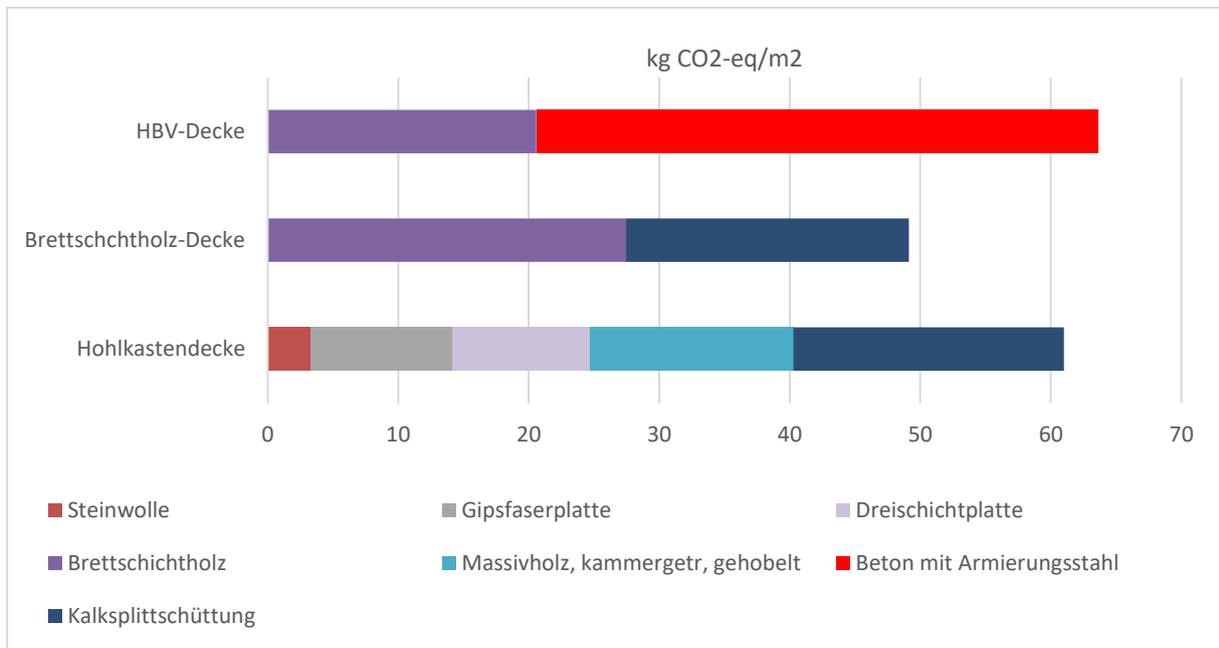


Abbildung 30 : Verursachte Treibhausgasemissionen für die Herstellung von Deckensystemen

4.6 Wiederverwendungs- und Recyclingfähigkeit von Baumaterialien

Einige Baustoffe eignen sich für die Wiederverwendung, andere hingegen eignen sich besser für das Recycling. Jedes Material repräsentiert unterschiedliche Eigenschaften, die es für eine Klassifizierung der Materialien in eine der beiden Vorgehensweisen zu berücksichtigen gilt. In den nachfolgenden Tabellen dieses Kapitels werden die Baumaterialien deshalb unterteilt. Die Klassifizierung erfolgt in folgende drei Farben:

Der beschriebene Prozess ist möglich. In der Praxis wird dieser Prozess von Produktionsfirmen durchgeführt.

Der beschriebene Prozess ist schwierig umzusetzen. In der Theorie ist das Verfahren möglich, wird aber in der Praxis nicht realisiert, weil es zu teuer oder zu komplex und nicht kosteneffizient umzusetzen ist.

Der beschriebene Prozess ist nicht möglich.

Um eine möglichst repräsentative Klassifizierung zu erhalten, wurden mehrere Unternehmen kontaktiert, um sich für jede Produktkategorie über das Recyclingprogramm und die Möglichkeiten der Wiederverwendung zu informieren. Jede Produktkategorie wird nach mehreren Kriterien hinsichtlich ihrer Eignung zur Wiederverwendung oder zum Recycling sortiert. Es ist wichtig zu beachten, dass es viele verschiedene Formen des Recyclings gibt und dass sich die Prozesse unterscheiden. In dieser Studie wird auch die thermische Verwertung berücksichtigt, da sie eine Verwertungsleistung für Bauschutt darstellt. Die Klassifizierung wird nach den folgenden Kriterien beschrieben:

Wiederverwendung: Das fragliche Material wird im gleichen Kontext und für die gleichen Funktionen wiederverwendet: Beispielsweise ein Sparren, der für die Konstruktion einer Dachkonstruktion wiederverwendet wird.

Baustoffrecycling: Das Material wird recycelt, um ein identisches Material mit den gleichen Eigenschaften herzustellen. Dieser Prozess wird in der Regel auf dem Weg des chemischen Recyclings durchgeführt, kann aber auch mechanisch erfolgen. So werden beispielsweise Abfälle von Steinwolle geschmolzen, um daraus neue Steinwolle herzustellen.

Downcycling: Das Material wird zu einem Produkt mit minderer Qualität recycelt. Im Allgemeinen wird dieser Prozess durch mechanisches Recycling durchgeführt. So werden beispielsweise alte Holzbalken zerhackt und zur Herstellung von Spanplatten verwendet.

Thermische Verwertung: Das Material wird durch Verbrennung in einer Zentralheizungsanlage zurückgewonnen. Mit der im Material enthaltenen Energie ist es durch Verbrennung beispielsweise möglich, Haushalte zu heizen.

4.6.1 Dämmung

In der Bauindustrie werden mehrere Arten von Dämmstoffen mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen verwendet. Die Art und Weise wie sie hergestellt, wiederverwendet und recycelt werden, ist je nach Produkt unterschiedlich. Nachfolgend werden die Produkte in die, in der Bauindustrie gängigen drei wesentlichen Beschaffenheit eingeteilt. Die erste gängige Beschaffenheit sind Schnittreste. Sie entstehen durch das Zuschneiden von Dämmstoffen, die einen kleinen, aber nicht zu vernachlässigenden Teil des absoluten Bedarfs ausmachen. Die Schneidabfälle werden in der Regel gesammelt und zur weiteren Verarbeitung an den Herstellungsbetrieb zurückgegeben. In eine weitere Beschaffenheit eingeteilt werden können Dämmungen, die zwar bereits verwendet wurden, aber in ihrer Qualität keine Einbußen erlebt haben. In der Holzrahmenbauweise zum Beispiel wird die Dämmung nur eingelegt und kann dadurch später problemlos weiterverwendet werden. Bei der dritten Beschaffenheit handelt es sich um Dämmungen, die direkt verputzt werden. Dies ist beispielsweise bei Fassadendämmungen der Fall. In der Tabelle 20 sind die drei Dämmmaterialien Glaswolle, Steinwolle und Holzfaserdämmung in Abhängigkeit ihrer Beschaffenheit bezüglich der möglichen Weiterverwertungsprozesse bewertet.

Tabelle 20 : Wiederverwendungs- und Recyclingfähigkeit von Dämmungsmaterialien

Beschaffenheit	Dämmmaterialien	Wiederverwendung	Baustoffrecycling	Downcycling	Thermische Verwertung
Schnittreste	Glaswolle	Yellow	Red	Green	Red
	Steinwolle	Yellow	Green	Green	Red
	Holzfaserdämmung	Yellow	Red	Green	Green
verwendet, sauber, nicht geklebt, nicht verputzt	Glaswolle	Green	Yellow	Yellow	Red
	Steinwolle	Green	Green	Green	Red
	Zellulosedämmung	Yellow	Red	Red	Green
	Holzfaserdämmung	Green	Yellow	Red	Green
verputzt	Glaswolle	Red	Red	Red	Red
	Steinwolle	Red	Yellow	Yellow	Red
	Holzfaserdämmung	Red	Red	Red	Green

4.6.2 Beplankungsmaterialien

Im Holzbau ist das Beplankungsmaterial das äusserste Element der Konstruktion und zugleich Träger der sichtbaren Fassade. Bei Doppel-Beplankungen ist die innere Schicht geschützt und bleibt in gutem Zustand. Im Gegensatz dazu wird die äussere Schicht stark beansprucht. Je nachdem wie die äussere Beplankung montiert wird, ist es schwieriger, die Platten später zu trennen. Eine Verschraubung ermöglicht eine einfache Demontage, während bei der Befestigung mit Nägeln oder Klammern keine beschädigungsfreie Demontage möglich ist. Zudem ist die Demontage komplexer, wenn das Beplankungsmaterial verspachtelt oder verputzt wird. In der Tabelle 21 werden die Beplankungsmaterialien nach dem gleichen Schema wie in der Tabelle 20 bewertet.

Tabelle 21 : Wiederverwendungs- und Recyclingfähigkeit von Beplankungsmaterialien

Beschaffenheit	Beplankungsmaterialien	Wiederverwendung	Baustoffrecycling	Downcycling	Thermische Verwertung
geschraubt	Gipsfaserplatte	Green	Green	Yellow	Red
	OSB	Green	Yellow	Yellow	Green
	Dreischichtplatte	Green	Yellow	Green	Green
	Holzschalung	Green	Yellow	Green	Green
verklammert oder genagelt	Gipsfaserplatte	Yellow	Green	Yellow	Red
	OSB	Yellow	Red	Yellow	Green
	Dreischichtplatte	Yellow	Red	Green	Green
	Holzschalung	Yellow	Red	Green	Green
geklebt, spachtelt oder verputzt	Gipsfaserplatte	Red	Green	Yellow	Red
	OSB	Red	Red	Red	Green
	Dreischichtplatte	Red	Yellow	Yellow	Green

4.6.3 Struktur

Auf der strukturellen Ebene stellen grosse Holzelemente gutes Potenzial dar für die Wiederverwendung, solange diese vor Witterungseinflüssen geschützt sind. Lattungen werden oft von Schrauben oder Nägeln durchbohrt. Da sie nur in kleineren Dimensionen benötigt werden, werden sie dadurch geschwächt. Beim Rückbau eines Gebäudes muss der Beton in der HBV-Decke zerschnitten und zerbrochen werden. Weiter wird die Kalksplitt-Schüttung teilweise mit Zusätzen versehen, was ihre Wiederverwendung erschwert. In der Tabelle 22 werden die oben genannten Strukturkategorien wiederholt:

Tabelle 22 : Wiederverwendungs- und Recyclingfähigkeit von Strukturmaterialien

Strukturmaterial	Typ	Wiederverwendung	Baustoffrecycling	Downcycling	Thermische Verwertung
Holz	Brettschichtholz	Green	Red	Green	Green
	Ständer	Green	Red	Green	Green
	Lattung	Yellow	Red	Green	Green
Beton mit Armierungsstahl		Red	Yellow	Green	Red
Kalksplitt-Schüttung		Yellow	Green	Green	Red

4.6.4 Wiederverwendung von Bauteilen ohne Materialtrennung

Eine Wiederverwendung von Bauteilen ohne vorher die Materialien voneinander zu trennen, kann unter Umständen angebracht sein. Dabei ist allerdings zu beachten, dass sich die unterschiedlichen Anforderungen in der Bauplanung ständig weiterentwickeln und die Aufbauten der wieder zu verwendenden Bauteilen dahingehend umfassend beurteilt werden müssen. Zudem erscheint es beim Ausmass der wiederverwendbaren Bauteile ohne Materialtrennung wichtig, die Verbindungen an die angrenzenden Bauteile zu berücksichtigen. Entscheidend ist hier eine Standardisierung von Bauteilen. Bei einer Deckenkonstruktion von einem Wohnungsbau mit üblichen Spannweiten könnte in einem ähnlichen Gebäude wiederverwendet werden. Erfahrungen hierfür fehlen jedoch noch grösstenteils.

4.7 Fazit

Gemäss den in Kapitel 4.3 vorgestellten Konstruktionsdetails wurden die Materialien nach den Berechnungen der für die Herstellung erforderlichen grauen Energie und den emittierten Treibhausgasemissionen untersucht. Ausserdem wurde die Eignung der Materialien am Ende des ersten Zyklus bezüglich der weiteren Verwendung in Abhängigkeit verschiedener in der Praxis existierender Beschaffenheit ermittelt. Anhand dieser Werkzeuge lässt sich grundsätzlich feststellen, welche Materialien potenziell wiederverwendbar und welche Materialien am besten für die Wiederverwendung eignen. Andere Materialien sind nicht unbedingt für die Wiederverwendung geeignet und kommen nur für thermische Verwertung in Frage.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse aus den Berechnungen kombiniert mit der Eignungsbewertung hinsichtlich der weiteren Verwendung der drei Materialgruppen Dämmung, Beplankungsmaterial und Struktur.

Dämmstoffe

Mineralische Dämmstoffe können nur dann wiederverwendet werden, wenn sie frei von Fremdkörpern wie Gips oder Kleber und somit sauber sind. Angesichts des benötigten Arbeitsaufwands und des Mangels an effektiven Mitteln zur Reinigung verschmutzter Mineraldämmstoffen, müssen diese recycelt werden. Gebrauchte Glaswolle kann nur teilweise wiederverwendet. Glaswolle benötigt zur Produktion etwa gleich viel Energie wie Steinwolle, emittiert dabei aber weniger Treibhausgase. Aufgrund des grossen Volumens von Mineralwolle im Verhältnis zu ihrem Gewicht ist ihre Wirkung mittelmässig. Die Holzfaserdämmung, die in Fassaden verputzt wird, ist direkt nicht wiederverwendbar, kann aber durch Verbrennen thermisch verwertet oder kompostiert werden. Wie bei der Mineralwolle ist nur eine Dämmung, die in einem Bauteil geschützt ist, für die Wiederverwendung geeignet. Die Holzfaserdämmung benötigt mehr graue Energie als Mineralwolle, hat dadurch aber auch ein besseres Wärmerückgewinnungspotenzial. Die betrachtete Holzfaserdämmung emittiert weniger Treibhausgase als Mineralwolle.

. Die niedrigen Werte für graue Energie und Treibhausgasemissionen sowie die gute thermische Verwertung machen es absolut zu einem Material mit einem relativ geringen Einfluss auf die Umwelt

Beplankungsmaterial

Für bestimmte Konstruktionen ist die Gipsfaserplatte unverzichtbar, die vor allem in Bezug auf den Brandschutz Vorteile bietet. Die hohen Werte der grauen Energie und der Treibhausgasemissionen machen es zu einem Material, das wiederverwendet werden sollte. Ausserdem ist das Recycling energieintensiv und eine thermische Verwertung nicht möglich. Die Konstruktionen sind daher unbedingt reversibel zu planen.

OSB- und Dreischichtplatten sind nur dann wiederverwendbar, wenn sie mit reversiblen Verbindungen montiert werden. Die Dreischichtplatte ist aufgrund ihres Aufbaus und ihrer Herstellung leichter wiederverwendbar als OSB. Wenn die OSB-Platte beschichtet oder verputzt ist, kann sie zwar thermisch verwertet werden. Zum Recycling ist das Material nur geeignet, wenn die Platten unbehandelt sind. Dreischichtplatten lassen sich ebenfalls gut thermisch verwerten und können durch Downcycling zurück in den Materialkreislauf gebracht werden.

Die Fassadenverkleidung ist aufgrund ihrer Konstruktion prinzipiell leicht wiederverwendbar. Auch das Montagesystem spielt bei der Wiederverwendung eine Rolle.

Je nach Witterungseinflüssen kann die Verkleidung während ihres ersten Zyklus entwertet und folglich nicht als gleichwertiges Material wiederverwendet werden. Dennoch kommt es in Frage für den Einsatz mit geringeren Qualitätsanforderungen. Die niedrigen Werte bezüglich grauer Energie und Treibhausgas-Emissionen bei der Herstellung sowie die gute Eignung zur thermischen und stofflichen Verwertung machen Massivholzverkleidungen zu einem flexiblen weiterverwendbaren Werkstoff.

Struktur

Brettschichtholz sollte aufgrund der dafür aufgewendeten grauen Energie und verursachten Treibhausgasemissionen wiederverwendet werden. BSH ist ein unverzichtbarer Baustoff im Holzbau, wenn grosse Spannweiten mit hohen Lasten in einem Gebäude realisiert und abgeführt werden sollen. Es ist wichtig, dass Elemente aus BSH mit reversiblen Verbindungen installiert werden oder dass sie notfalls so konstruiert werden, dass sich Elemente zur Wiederverwendung wegschneiden lassen. BSH ist auch für die thermische und stoffliche Verwertung durch Downcycling geeignet. Diese beiden Recyclingmethoden sind jedoch nur dann zu bevorzugen, wenn es nicht anders geht.

Für Massivholz gilt: Je stärker bearbeitet es ist, beispielsweise getrocknet oder gehobelt, desto höher sind seine Werte bezüglich grauer Energie und Treibhausgasemissionen. Bei Latten-Konstruktionen ist der Bearbeitungsgrad gering, dafür ist auch die Wiederverwendbarkeit niedrig. Andererseits können die Latten im Sinne eines Downcycling gut thermisch und stofflich verwertet werden. Massivholz für Rippen oder Ständer hat einen höheren Bearbeitungsgrad. Der Querschnitt dieser meist standardisierten Materialien und die Tatsache, dass sie in den Bauteilen prinzipiell gut geschützt sind, erlaubt eine gute Wiederverwendbarkeit.

Beton, der hohe Werte bezüglich grauer Energie und Treibhausgasemissionen aufweist, kann nicht wiederverwendet werden. Bei der HBV-Decke ermöglicht er zwar die Aufnahme von Drucklasten und damit eine Reduzierung der Holzplattendicke. Bei der Wiederverwertung dieses Materials ist es jedoch nicht möglich, die gleichen Qualitäten und Eigenschaften beizubehalten, ohne einen grossen Anteil an Primärmaterialien und Additiven hinzuzufügen. Vom Gebrauch von Beton im Holzbau ist demnach aus Sicht der Wiederverwendbarkeit von Gebäudeelementen abzuraten, sofern nicht ganze Bauteile wiederverwendet werden können.

Die Kalkspaltung überwindet die Nachteile der Holzbauweise bei Bodenplatten. Sie weist bessere ökologische Werte als Beton vor, ist jedoch nicht tragfähig. Kalkspaltung ist schwer wiederverwendbar, kann aber recycelt werden.

Stützen eignen sich mit reversiblen Verbindungen gut für die Wiederverwendung.

5 Auswirkungen auf die Planung

Dieses Kapitel enthält alle Elemente, die es bei der Planung von Holzkonstruktionen mit vorgesehener Wiederverwendung zu beachten gilt. Die in den Kapiteln 3 und 4 thematisierten Einzelelemente sind so zusammengefasst und miteinander verknüpft, dass sie in der Praxis genutzt werden können. Ziel dieses Kapitels ist es nicht, direkte Lösungen wie beispielsweise Konstruktionsdetails abzugeben. Es geht vielmehr darum, den Weg zur Realisierung des Prozesses der Wiederverwendung für eine Konstruktion in der Planung aufzuzeigen. Auf diese Weise ist es möglich, die Massnahmen auf verschiedene Konstruktionsausführungen und somit nicht nur auf ein Konstruktionsmodell anzuwenden.

5.1 Einführung in die Thematik

Die Bauplanung ist der erste Schritt in einem Bauprojekt. In dieser Phase werden alle Grundlagen für die Ausarbeitung eines Projekts gelegt, jede Bauphase wird nach Materialien, Volumen und Kontext untersucht. In dieser Phase ist es möglich, maximalen Einfluss auf Entscheidungen zu nehmen und die Kosten zu senken. Wenn die Entscheidung, mit Blick auf eine Wiederverwendung zu bauen, bereits in der Planungsphase getroffen wird, sind die Auswirkungen gross. Umgekehrt sind die Kosten für einen Rückbau zur Wiederverwendung höher, wenn die Entscheidung erst während der Nutzung des Gebäudes getroffen wird.

5.2 Methode und Vorgehensweise

In dieser Studie wird der Planungsprozess für die Wiederverwendung aus der Sicht eines Planungsbüros entwickelt. Auf Basis der Norm SIA 112:2014 wird der Bauprozess im Sinne der Wiederverwendung des Holzbaus entwickelt.

Die Auswahl der wiederverwendbaren Baumaterialien wird unter Berücksichtigung der in Kapitel 4 aufgeführten Elemente getroffen. Die derzeit auf dem Markt erhältlichen Standardmaterialien werden sowohl in Bezug auf das Format des Materials als auch auf dessen Beschaffenheit berücksichtigt.

Jeder Schritt des Prozesses muss die verschiedenen Elemente berücksichtigen, die für ihn in Bezug auf die verschiedenen in Kapitel 3 aufgeführten Punkte verantwortlich sind. In jeder Phase des Planungsprozesses müssen zudem die verschiedenen Einflussfaktoren betrachtet werden, um eine für die Wiederverwendung optimierte Konstruktion zu ermöglichen, die den aktuellen ökologischen Zielen gerecht wird.

Ein Diagramm soll ein Verständnis für die Problematik schaffen und die Planung der wiederverwendbaren Konstruktionen vereinfachen. Das Diagramm bildet die Grundlage für den Planungsprozess, damit die Planenden Projekte künftig optimal durchführen können.

Schliesslich sollen Elemente aufgeführt werden, die noch nicht vorhanden sind oder die entwickelt werden müssen, weil sie Schwachstellen darstellen. Diese verschiedenen Elemente werden zusammen dazu beitragen, das Konzept der Wiederverwendung weiterzuentwickeln, indem sie die Arbeit der verschiedenen an der Bauplanung beteiligten Akteure erleichtern.

5.3 Bauplanungsprozess

Der Grossteil der Bauentscheidungen wird in der Planungsphase getroffen. Diese Entscheidungen sind mit Kosten verbunden, die je nach Zeitpunkt und Art schwanken können. Je später der Bauprozess verändert wird, desto höher sind die Kosten. Es ist daher wichtig, bereits in der ersten Phase optimal zu planen, um die Realisierung des Baus innerhalb des Budgets zu erreichen.

Obwohl das Hauptthema dieser Studie der Rückbau und die Wiederverwendung von Holzkonstruktionen ist, kann nur dann optimal vorgegangen werden, wenn man schon vor dem Bau eines Gebäudes antizipiert, was später aus ihm werden soll. Die Planung in der Konstruktion hängt auch von der Struktur der Projektentwicklung ab.

Nachfolgend wird der Planungsprozess auf Basis der Norm SIA 112:2014 für Projektplanung und -management entwickelt. Die in der genannten Norm beschriebenen Phasen werden so entwickelt, dass sie speziell für die Wiederverwendung im Holzbau ausgerichtet sind. Die Phasen reichen von der Definition der Ziele bis hin zum Betrieb des Gebäudes. Jede Phase ist mit mehreren Einflussfaktoren sowie den zu ergreifenden Massnahmen verbunden, die in den vorherigen Kapiteln untersucht wurden. Die verschiedenen Elemente, die mit den Phasen der SIA 112:2014 verbunden sind, können sich je nach Projekt leicht unterscheiden. In dieser Studie finden sich daher die verschiedenen Elemente wieder, die in den einzelnen Phasen genannt werden, je nach Art des Projekts in der nächsten oder in der vorherigen Phase.

Gemäss der Norm SIA 112:2014 bilden sechs Hauptphasen den Prozess eines Bauprojekts. Zusätzlich zu diesen Phasen gibt es Unterphasen und Ziele, die in dieser Studie nicht berücksichtigt werden. Der Schwerpunkt liegt auf den Hauptphasen, um einen Leitfaden für die Implementation der vorliegenden Studie in der Praxis zu ermöglichen. In der Abbildung 31 sind die sechs Phasen eines Projekts in chronologischer Reihenfolge dargestellt:



Abbildung 31 : Phasen der Bauplanung nach SIA 112:2014

In den nachfolgenden Kapiteln werden die einzelnen Phasen genauer beschrieben.

5.3.1 Strategische Planung

In der ersten Planungsphase werden die Ziele für den Bau eines Gebäudes definiert. Diese Phase ist sehr wichtig, denn hier werden die Hauptideen festgelegt, die dann in den folgenden Phasen technisch gelöst werden müssen. Die strategische Planung hat grossen Einfluss auf die späteren Wiederverwendungsmöglichkeiten. In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Elemente beschrieben, die zu dieser Phase gehören.

Kommunikation

Die Kommunikation über die verschiedenen Baumöglichkeiten spielt in dieser Phase eine entscheidende Rolle. Indem man der Bauherrschaft das Konzept der Wiederverwendung im Holzbau vorstellt, kann auf die Vorteile dieser Bauweise eingegangen werden. Die Argumente, die für die Planung der Wiederverwendung von Baumaterialien sprechen, sind die folgenden:

- Wiederverwendung von Materialien nach dem ersten Lebenszyklus des Gebäudes
- Minimierung des ökologischen Fussabdrucks durch den Einsatz entsprechender Materialien (graue Energie und Treibhausgasemissionen)
- Materialeinsparung
- weniger Verschwendung von Baumaterialien
- Mehrwert durch den Wiederverkauf von Materialien beim Rückbau
- Marketing-Argument für Vermietung und Verkauf

Die Kommunikation über das Potenzial der Wiederverwendung muss folglich Teil der ersten Planungsüberlegungen sein.

Lage

In der ersten Phase sind Gelände- und Standortfragen oft schon bekannt oder werden spätestens hier entwickelt. Unter Berücksichtigung des Bedarfs für die Nutzung des geplanten Gebäudes ist es möglich, das Volumen und Format der Räume zu beeinflussen. Je einfacher die Architektur des Gebäudes ist, desto mehr Potenzial gibt es für die Wiederverwendung von Materialien. Abgerundete und asymmetrisch geformte Bauelemente sind jedoch nicht geeignet für eine Wiederverwendung. Ein grosses, durch leicht demontierbare Trennwände abgetrenntes Volumen ermöglicht ein hohes Mass an Flexibilität im Gebäude und verlängert die Lebensdauer.

Das Errichten von Kellern und Elementen im Erdreich, oft in Massivbauweise, lässt eine effiziente Wiederverwendung von Materialien nicht zu. Im Sinne der Wiederverwendung ist der Tiefbau zu vermeiden, da am Ende des ersten Lebenszyklus kein Potenzial für Wiederverwendung vorhanden ist.

Grad der Wiederverwendung

Wenn die Wiederverwendung von Materialien als Bedingung für den Bau des Gebäudes definiert wurde, ist es wichtig, ihren Grad zu definieren. So ist es möglich, dass die Wiederverwendung auf das gesamte Gebäude oder nur bestimmte Teile angewendet wird. Bei einer teilweisen Wiederverwendung der Materialien müssen die Anschlussdetails den Abbau des wiederzuverwendenden Teils ermöglichen. Der Grad der Wiederverwendung beeinflusst die Wahl der Materialien für die Konstruktion. Bei einer Gebäudesanierung ist es wichtig, der weiteren Nutzung vorhandener Gebäudeteile höchste Priorität einzuräumen. Auf diese Weise wird die Wiederverwendung von Baumaterialien ohne zusätzliche Produktion von grauer Energie und ohne Treibhausgasemissionen gewährleistet.

5.3.2 Vorstudien

In dieser Phase werden die ersten konkreten Elemente definiert und geplant. Es werden die Spezifikationen festgelegt und die konkreten Grunddaten für das Projekt festgelegt. Der Ablauf und die Organisation der Konstruktion werden ebenfalls definiert. Die Vorstudienphase legt die gesamte Konstruktion fest, ohne auf alle Details der Konstruktion einzugehen. In dieser und den folgenden Phasen ist es wichtig, einen Überblick über den Planungsprozess zu haben, damit die verschiedenen Elemente im gesamten Projekt konsistent sein können. In den folgenden Abschnitten werden deshalb die verschiedenen Punkte beschrieben, die von der Vorstudienphase betroffen sind.

Systemtrennung

Die Systemtrennung ist ein grundlegendes Element für die Wiederverwendungsplanung. Durch die Berücksichtigung der Wiederverwendung in der Planung wird eine Vereinfachung der Bauteilaufbauten vorweggenommen. Denn jede Schicht hat unterschiedliche Eigenschaften wie Lebensdauer oder Funktion innerhalb des Bauteils.

Es ist wichtig, zu Beginn der Vorstudienphase die verschiedenen Schichten zu definieren, die im gesamten Gebäude zu finden sind. Die einzelnen Schichten sollten montage-technisch so gut wie möglich voneinander getrennt sein. Nach dem Modell der Scherschichten im Holzbau, welches in Abbildung 32 dargestellt ist, sollte unter den verschiedenen Schichten innerhalb des Gebäudes und entsprechend ihrer Funktion unterschieden werden.

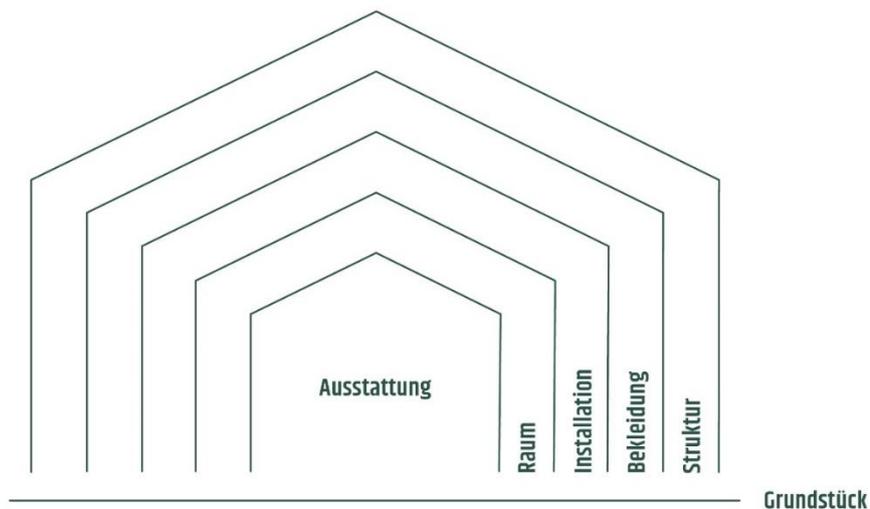


Abbildung 32 : Scherschichten im Holzbau, Modellanpassung von Stewart Brand

Die Verbindungen zwischen den verschiedenen Schichten müssen reversibel sein. Die Verwendung von Klebstoff und anderen nicht-reversiblen Bindemitteln sollte vermieden werden. Die Befestigung mit Klammern oder Nägeln eignet sich für Materialien, bei denen der obere Teil des Verbindungsbeschlags beim Rückbau nicht zugänglich ist. Ein typisches Beispiel dafür ist eine verputzte Gipsfaserplatte.

Wenn der obere Teil der Anschlusstechnik zugänglich ist, wird die Verwendung von Schrauben bevorzugt. Ein typisches Beispiel dafür ist eine verkleidete Gipsfaserplatte. Dieses Paneel ist im Betrieb durch die Verkleidung geschützt. Bei abgenommener Abdeckung sind die Armaturen zugänglich und können somit einfach abgeschraubt werden.

Da die Lebensdauer der Materialien nicht für jede Schicht gleich ist, ist es wichtig, dass der Austausch von Schichten mit einer geringeren Lebensdauer effizient durchgeführt werden kann. Dies, um die restlichen Schichten nicht zu beschädigen. Die Wahl von soliden und robusten Materialien mit langer Lebensdauer ermöglicht eine einfache Wiederverwendung mit Materialien.

Die Komplexität der Schichten sollte auf ein Minimum reduziert werden. Ziel ist es, möglichst einfache Schichten mit wenig Materialvariationen zu verwenden. Je einfacher eine Schicht realisiert ist, desto mehr Potenzial für die Wiederverwendung ist vorhanden. Technische Installationen, die eine Schicht darstellen, welche nicht direkt Teil der Holzkonstruktion ist, sollten so gut und klar wie möglich von Bauelementen getrennt werden. Zudem ist es gemäss SIA 2032:2020 wichtig, die technischen Anlagen auf das notwendige Minimum zu reduzieren, da sie eine kurze Lebensdauer und ein relativ geringes Wiederverwendungspotenzial haben.

Anpassungsfähigkeit

Die Anpassungsfähigkeit eines Gebäudes ergibt sich aus seinem Design, aber auch aus der Wahl der Materialien und Bauelemente. In direktem Zusammenhang mit der Trennbarkeit der verschiedenen Schichten im Gebäude ist es wichtig, dass sie mit einer kürzeren Lebensdauer ausgetauscht oder ersetzt werden können, ohne die Qualität der anderen Schichten zu beeinträchtigen.

Standardisierung und Modularität

Die Standardisierung von Bauelementen ermöglicht die Vereinfachung verschiedener Prozesse wie Planung, Realisierung, Austausch von defekten Elementen und Materialien sowie die Demontage und Wiederverwendung. Die Standardisierung führt zur Entwicklung einer Konstruktionstechnik, die an die gesamte Konstruktion eines Gebäudes angepasst werden kann. Derzeit gibt es im Holzbau nur sehr wenige standardisierte Systeme, abgesehen von den im Handel erhältlichen Balken- und Plattenprofilen. Die Entwicklung eines standardisierten Systems muss so gestaltet sein, dass es möglichst wenig unterschiedliche Elemente gibt und sie untereinander möglichst kompatibel sind.

Die Konstruktion von gleichformatigen Zellen (z.B. mittels Brettstapeldecken und Stützenraster) ermöglicht ein hohes Mass an Modularität über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes. Die modulare Bauweise ermöglicht zudem den Einsatz von Geräten mit unterschiedlichen Funktionen, die auf einem ähnlichen Format und Montagesystem basieren. Die Wiederverwendung im ersten Lebenszyklus ist relativ einfach, da weniger Anpassungen erforderlich sind. Die Komplexität eines Moduls schränkt jedoch eine mögliche Zuordnung für die nächste Funktion bei der Wiederverwendung eines Moduls ein. Darüber hinaus garantiert die ständige Weiterentwicklung von Normen und Kennzeichnungen – vor allem in Bezug auf die Bauphysik – nicht die Einhaltung der Werte, die durch die Wiederverwendung von gebrauchten Modulen auferlegt werden.

5.3.3 Projektierung

In dieser Phase werden die verschiedenen Elemente konkretisiert, die in den vorangegangenen Phasen definiert wurden. Dadurch können die Ziele des Lastenheftes umgesetzt werden. In diesem Stadium werden die Konstruktionsdetails, Materialisierung sowie die Abmessungen und Hauptmerkmale des Gebäudes festgelegt. Die Wahl des Konstruktionssystems sowie der Materialisierung sind hier entscheidend und ermöglichen den Übergang zur folgenden Ausschreibungsphase. In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Punkte erläutert, die von der Projektierungsphase betroffen sind.

Wiederverwendungskonzept

Während der Projektierung muss festgelegt werden, auf welcher Ebene die Wiederverwendung erfolgen soll. Bei dieser Studie lag der Schwerpunkt auf der Wiederverwendung auf Ebene des Materials, da in dieser Form mit standardisierten Aufbauten das grösste Potenzial vorhanden ist. In Abbildung 33 ersichtlich sind die Einheitskomplexitäten, Anpassungsfähigkeit und der Arbeitsaufwand für Materialien, Bauteile und Modulzellen in Anbetracht der Wiederverwendung. Je komplexer die zur Wiederverwendung vorgesehene Einheit ist, desto geringer ist der Aufwand für den Rückbau und die Wiederverwendung. Aber desto schwieriger ist es, dem Teil später in einem anderen Gebäude eine weitere Verwendung zuweisen zu können. Dies ist bei der einfachen Einheit nicht der Fall, sie erfordert dafür einen erheblichen Aufwand beim Rückbau und der Wiederverwendung.

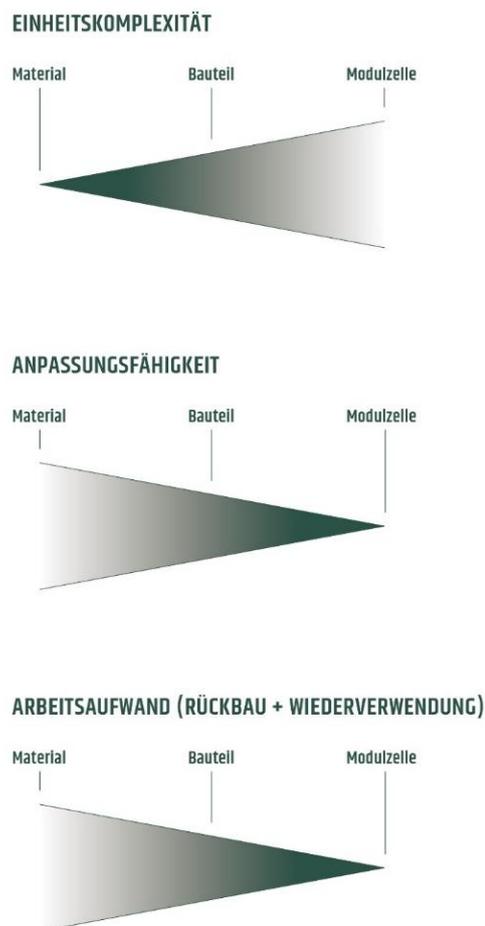


Abbildung 33 : Anpassungsfähigkeit und Arbeitsaufwand in Abhängigkeit der Einheitskomplexität

Detailaufbau

Wie bei den im vorherigen Kapitel vorgestellten Scherschichten ist es wichtig, dass die Schichten der Holzbaulemente möglichst getrennt sind. Jedes Material muss auf einfache Weise von den anderen Materialien, an denen es befestigt ist, trennbar sein. In der Abbildung 34 werden die Schichten und ihre Funktion dargestellt. Hier werden die einzelnen Schichten entsprechend der Anpassung der Scherschichten für die Detailkonstruktion beschrieben.



Abbildung 34 : Scherschichten für den Detailaufbau

Um die Qualität von Baustoffen, die zur Wiederverwendung benötigt ist, zu erhalten, muss ein ausreichender Schutz gewährleistet sein. Im Holzbau sind zwei Hauptarten des Schutzes möglich. Entweder durch konstruktive Systeme oder durch die Anwendung von Schutzmitteln. Um ein zuverlässiges Konstruktionssystem zu entwickeln, muss untersucht werden, welche Parameter die Qualität der für die Wiederverwendung vorgesehenen Materialien verändern können. Daraus muss ein Schutzsystem abgeleitet werden. Beispielsweise kann ein Traufdach die Fassadenmaterialien schützen. Bei Holzschutzmitteln ist es wichtig, dass sie korrekt angewendet werden und dass das Gebäude während seiner Lebensdauer fachgerecht gewartet wird.

Die Verbindungssysteme zwischen den verschiedenen Bauelementen müssen reversibel und gestaltet sein, damit die verschiedenen Elemente wiederverwendet werden können.

Materialisierung

Die in der Planungsphase gewählten Materialien haben einen grossen Einfluss auf die Wiederverwendbarkeit eines Gebäudes. Wie in Kapitel 4 beschrieben wurde, ist die Wiederverwendung von ganzen Gebäudeelementen möglich. Ihre Komplexität schränkt aber ihr Einsatzgebiet ein. Bei der Auswahl der Werkstoffe sind mehrere entscheidende Faktoren zu berücksichtigen:

- Form (Schüttgut, Platte)
- Dimension
- Qualität
- Langzeitverschleiss
- Benötigte Befestigungsmittel
- Anfälligkeit für Qualitätsminderungen während der Betriebsphase
- Graue Energie und Treibhausgasemissionen bei der Herstellung

Die in der Planung ausgewählten Materialien müssen von hoher Qualität und langlebig sein. Bei Materialien, die zur Produktion viel graue Energie benötigen und eine grosse Menge Treibhausgase emittieren, gilt ein besonderes Augenmerk der Wiederverwendung. Die Form des Materials spielt bei der Wiederverwendung eine wichtige Rolle. Einfache geometrische Formen erleichtern die Handhabung und Logistik. So sind beispielsweise Schüttgüter weniger gut für die Wiederverwendung geeignet als Plattenmaterialien.

Wie in Kapitel 4 beschrieben, sollte der Einsatz von Materialien, die in flüssiger Form aufgetragen werden und aushärten, wie beispielsweise Beton, Mörtel, Kleber und Gips, vermieden werden. Diese Materialien erschweren den Rückbau. Dabei lassen sich nicht nur die Materialien nicht mehr wiederverwenden, sondern auch alle damit verbundenen Werkstoffe. Wenn beispielsweise eine Gipsfaserplatte verputzt wird, lassen sich weder Verputz noch Gipsfaserplatte weiterverwenden.

In der Tabelle 23 sind Materialkombinationen aus standardisierten Konstruktionsdetails aufgezeigt, die sich aus Sicht der Materialisierung nicht für die Wiederverwendung eignen. In der zweiten Spalte befindet sich jeweils ein Optimierungsvorschlag:

Tabelle 23 : Standardisiertes Konstruktionsdetail mit Lösungsvorschlag

Standardisiertes Konstruktionsdetails	Lösungsvorschlag
Doppellagige Gipsfaserplatte mit Innenputz	Einschichtige Gipsfaserplatte mit Holzstreifenbeschichtung verwenden oder Trennbare Platten
Kompaktfassade mit Aussenputz direkt auf der Dämmung	Hinterlüftete Fassade mit Holzverkleidung konstruieren
Befestigen von Beschichtungen mit Klammern	Schraubenverbindungen anwenden
Verwendung von Dämmstoffen in loser Form (eingebblasen)	Verwendung von Dämmstoffen in Form von festen Platten
Befestigung von Schichten und Verbindungen mittels Klebstoffes	Befestigung von Schichten und Verbindungen durch reversible Verbindungselemente wie Schrauben

Einige Materialien eignen sich gut zur Wiederverwendung, während andere diesbezüglich bereits bei der Planung eines Gebäudes zu vermeiden sind. In den folgenden Tabellen sind Materialien aufgelistet die sich gut, mittel oder gar nicht zur Wiederverwendung eignen:

Tabelle 24 : Materialien mit guter Wiederverwendbarkeit

Gebraucht, sauber, nicht geklebt, nicht verputzt	Glaswolle
	Steinwolle
	Holzfaserdämmung
Verschraubt	Gipsfaserplatte
	OSB
	Dreischichtplatte
	Holzschalung
Holz	Brettschichtholz
	Ständer
	Lattung

Tabelle 25 : Materialien mit mittlerer Wiederverwendbarkeit

Gebraucht, sauber, nicht geklebt	Zellulosedämmung
Schnittreste	Glaswolle
	Steinwolle
Geklammerte oder genagelte Verbindungen	Gipsfaserplatte
	OSB
	Dreischichtplatte
	Holzschalung
Gebraucht, sauber	Kalksplittschüttung

Tabelle 26 : Ungeeignete Materialien für die Wiederverwendung

Schnittreste	Holzfaserdämmung
Verputzte Konstruktionen	Glaswolle
	Steinwolle
	Holzfaserdämmung
Geklebte, gespachtelte oder verputzte Konstruktionen	Gipsfaserplatte
	OSB
	Dreischichtplatte
Vor Ort gegossene Konstruktionen	Beton mit Armierungsstahl

Materialdokumentation

Die Dokumentation von Materialien, Bauteilen sowie Anschlüssen ist ein Schlüsselement beim Bauen und der angestrebten Wiederverwendung. Da die BIM-Technologie zunehmend im Bauwesen eingesetzt wird, ist es möglich, eine Materialdatenbank mit dem BIM-Konstruktionsmodell zu kombinieren. Ein BIM-Modell ist für die Materialdokumentation nicht zwingend erforderlich, aber es vereinfacht den Prozess. Die Materialdokumentation muss die folgenden Informationen enthalten:

- Standort im Gebäude, idealerweise durch eine 3D-Visualisierung
- die Zusammensetzung des Materials, der Bauteile sowie der Anschlüsse
- Dimensionen wie Dicke, Breite und Länge
- Faserorientierung bei Massivholz, welche auf dem Plan zu sehen sind
- spezifische Dichte

Der Einsatz einer Plattform wie Madaster kann für Unternehmen interessant sein, die bereits mehrere Gebäude besitzen und die Wiederverwendung zum Herzstück ihrer Immobilien machen wollen. Für einzelne Gebäude oder Einfamilienhausbesitzer ist das Potenzial dieser Plattform bescheiden. In diesem Fall verwendet man besser ein BIM-Modell mit einer laufend aktualisierten Dokumentation der verschiedenen Materialien. Diese Form der Dokumentation muss jedoch während des gesamten Lebenszyklus aufbewahrt werden.

5.3.4 Ausschreibung

Sobald die Ziele festgelegt und die Pläne und Baudetails ausgearbeitet sind, muss eine Ausschreibung erfolgen. In dieser Phase melden sich interessierte Auftragsnehmer und es lassen sich die allgemeinen Kosten bewerten. In dieser Phase muss der Planer sicherstellen, dass die folgenden Punkte angesprochen werden:

- Einhaltung von Zielen, Konstruktionsdetails und Materialisierung in den Ausschreibungen
- Bereitstellung aller Informationen über die Materialien
- Betriebswirtschaftliches Know-How bei der Ausführung von Details
- Schnittstelle, die eine effiziente Arbeit zwischen den verschiedenen Akteuren beim Bau ermöglicht, zum Beispiel mit Hilfe von BIM

5.3.5 Realisierung

Die Realisierungsphase stellt die Umsetzung aller vorherigen Phasen dar. Ab diesem Stadium wird der Einfluss für die Wiederverwendung der Materialien immer geringer. Die Aufgabe des Planers in dieser Phase ist es, dafür zu sorgen, dass die verschiedenen Massnahmen in der richtigen Weise umgesetzt werden. Nachfolgend sind die wichtigsten Punkte aufgeführt, die der Planer beachten sollte:

- Qualitätskontrolle hinsichtlich der Umsetzung der geplanten Massnahmen
- Konformitätsprüfung
- Detailausführung
- Schichtentrennung
- Separate Trennung der Gebäudetechnik
- Informationsfluss zwischen den verschiedenen Akteuren in der Bauindustrie

5.3.6 Bewirtschaftung

Der Betrieb eines Gebäudes ist die längste Phase, die in der SIA 112:2014 in chronologischer Reihenfolge beschrieben wird. In dieser Phase ist es wichtig, dass die Wartung der Bauelemente und Materialien durchgeführt wird, um die Lebensdauer der Baumaterialien so lange wie möglich zu verlängern. Um die Wartung zu gewährleisten, können Serviceverträge abgeschlossen werden.

Bei Umbauten, Erweiterungen oder Renovationen des Gebäudes müssen das BIM-Modell und die Materialdatenbank laufend aktualisiert werden. Wenn das Projekt nicht auf einem BIM-Modell basiert, muss nur die Materialdatenbank aktualisiert werden. Die BIM-Technologie ermöglicht daher auch die Verwaltung und Betrachtung des Lebenszyklus eines Gebäudes. Die Aktualisierung der Dokumente ist ein wichtiger Schritt, der die Rückbauphase am Ende des Lebenszyklus erleichtert. Die Dokumentation von Materialien ermöglicht es, die Wiederverwendung von Materialien zu antizipieren, indem sie bereits vor dem Rückbau zum Verkauf angeboten und eingeplant werden können.

Bei Umbauten, Anbauten oder Renovationen des Gebäudes ist es zudem wichtig, eine zu grosse Variabilität der Materialien, Bauteile und Systemen zu vermeiden. Es sind Materialien daher zu bevorzugen, die der Grundkonstruktion ähnlich sind.

5.4 Planungshilfe

Um die Planenden bei der Organisation des Projekts der Planung eines Gebäudes zur Wiederverwendung zu unterstützen, wird in diesem Kapitel ein Diagramm entwickelt. Die Abbildung 35 zeigt die Phasen der Norm SIA 112:2014 und die Hauptelemente, die in Kapitel 5.3 erläutert wurden.

In der Spalte auf der linken Seite des Diagramms sind die verschiedenen Informationen und Massnahmen aufgeführt, die umgesetzt werden müssen, um einen zuverlässigen Informationsfluss zwischen den verschiedenen Akteuren im Bauprozess zu ermöglichen. Jedes Element in dieser Spalte wird durch eine Linie symbolisiert, die seine Auswirkungen in chronologischer Reihenfolge darstellt. In der mittleren Spalte sind die wichtigsten Schritte aufgeführt, die von den Planenden befolgt werden müssen, um ein Projekt für ein zum Rückbau und zur Wiederverwendung vorgesehenes Gebäude zu entwickeln. In der rechten Spalte werden zudem die sechs Planungsphasen dargestellt.

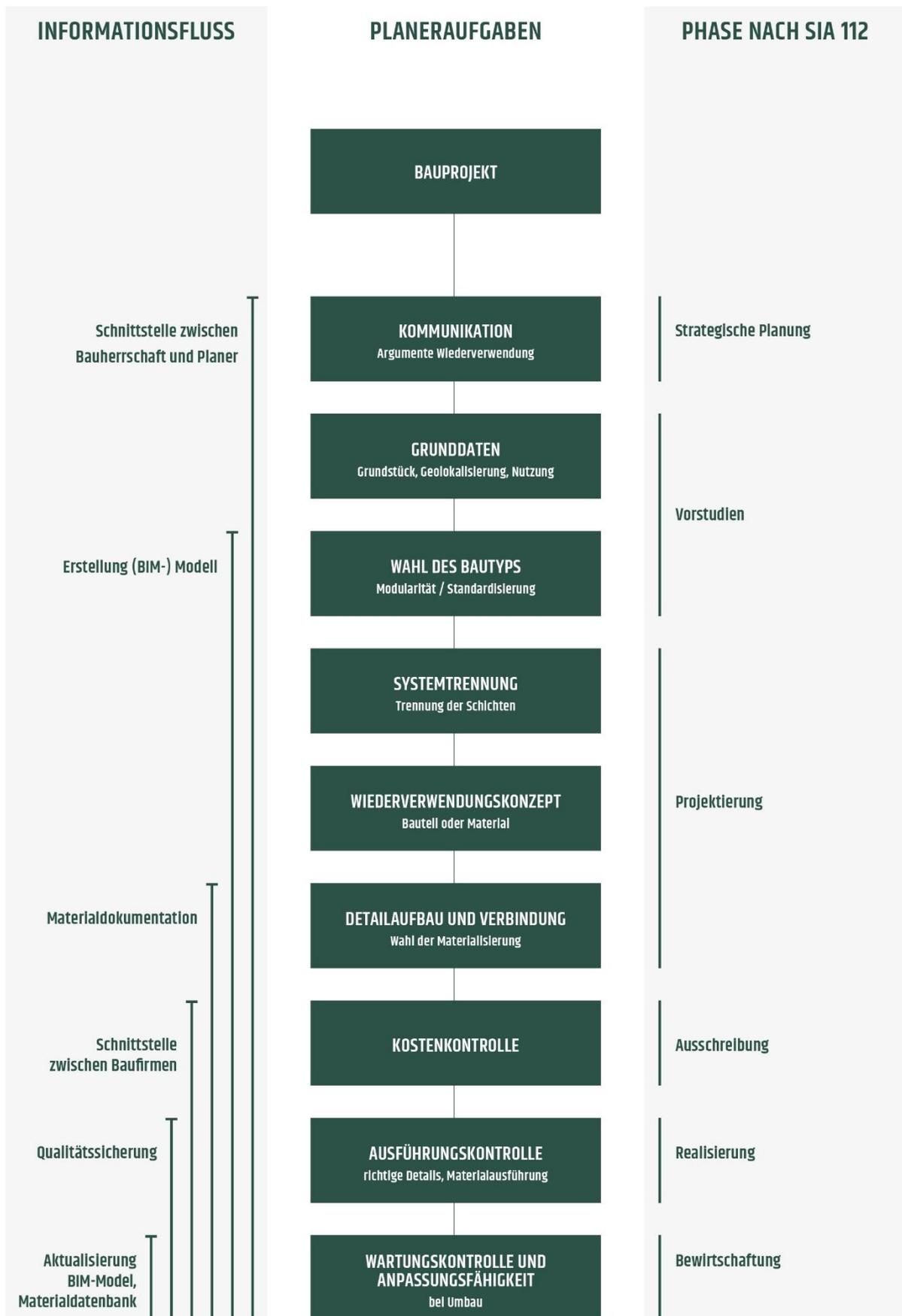


Abbildung 35 : Hilfe für die Gebäudeplanung im Sinn des Rückbaus und der Wiederverwendung

5.5 Entwicklung von Wiederverwendungswerkzeugen

Das Thema Wiederverwendung im Holzbau wird derzeit wenig umgesetzt. Es werden selten Gebäude geplant, bei denen bereits vorhergesehen ist, dieses nach Ende seiner Lebenszeit wiederzuverwenden. Das liegt vor allem daran, dass ein grösserer Planungsaufwand entsteht. Ausserdem gibt es nur sehr wenige Werkzeuge und Kennzeichnungen, die es ermöglichen, ein zur Wiederverwendung geplantes Gebäude von einem normalen Gebäude zu unterscheiden. In diesem Kapitel werden deshalb einige bestehende Tools und Label aufgeführt, um deren Potenzial zu beschreiben. Ideen für die Entwicklung könnten letztlich die Planung für die Wiederverwendung von Baumaterialien fördern.

5.5.1 Berechnungen der Umweltauswirkungen

Das erläuterte Entwicklungspotenzial für die Norm SIA 2032:2020 ermöglicht es, die über mehrere Materiallebenszyklen berechneten Umweltauswirkungen aufzuteilen. Das erläuterte Entwicklungspotenzial für die KBOB Ökobilanzdaten im Baubereich ermöglicht es auch, alle Umweltauswirkungen abzuleiten, da sie über den ersten Lebenszyklus des Materials berechnet werden. Bei diesen Vorschlägen handelt es sich folglich um zwei Lösungen zur Förderung der Wiederverwendung, wobei entweder die eine oder die andere umgesetzt werden kann.

SIA 2032

Die Norm SIA 2032:2020 berücksichtigt sowohl die graue Energie als auch die Treibhausgasemissionen, die in einem Baumaterial enthalten sind. Der graue Energiewert sowie die Treibhausgasemissionen werden auf die Amortisationszeit der einzelnen Gebäudekomponenten aufgeteilt. Die Abschreibungszeiträume ergeben sich aus der jeweiligen Norm. Bei wiederverwendbaren Materialien werden nur diejenigen berücksichtigt, die auf der Baustelle verbleiben.

Um die Wiederverwendung zu fördern, sollte es möglich sein, einen längeren Abschreibungszeitraum für Gebäude festzulegen, die zur Wiederverwendung vorgesehen sind sowie für Gebäude, die mit wiederverwendbaren Materialien errichtet wurden. Auf diese Weise wären die berechneten Umweltauswirkungen geringer und würden eher der Realität entsprechen.

KBOB Ökobilanzdaten im Baubereich

Für die Berechnungen der Norm SIA 2032 werden insbesondere Ökobilanzdaten für Umweltauswirkungen wie Treibhausgasemissionen und graue Energie verwendet. Diese Daten berücksichtigen die Gewinnung, den Transport und die Herstellung von Materialien. Im Falle von Materialien aus dem Rückbau zur Wiederverwendung gibt es keine Datenbasis, die belegt, dass diese Materialien im Einsatz im Vergleich zu neuen Materialien eine geringere Belastung verursachen.

Um die Wiederverwendung von Materialien zu fördern, sollten in den Daten nur die Auswirkungen aufgrund des Rückbaus und des Transports zur Lagerstätte berücksichtigt werden. Auf diese Weise würden wiederverwendete Materialien eine Wirkungsberechnung mit geringeren Umweltauswirkungen ermöglichen als einmalig verwendete Materialien.

5.5.2 Label Minergie ECO und SNBS

Derzeit haben die Label SNBS oder Minergie-ECO einen relativ geringen Einfluss auf die Wiederverwendung von Baumaterialien. Nur die in Kapitel 4 entwickelten Kriterien haben darauf einen Einfluss. Da die Berechnungen der Umweltauswirkungen der Norm SIA 2032:2020 Teil der Kriterien der Minergie ECO- und SNBS-Labels sind, haben sie gemäss den im vorherigen Kapitel erwähnten Punkten automatisch einen Einfluss auf die Wiederverwendung von Materialien.

Um die Wiederverwendung von Materialien während der Bauplanung zu fördern, könnten bestimmte Kriterien, wie beispielsweise die Trennbarkeit von Schichten in der Konstruktion, höher gewichtet werden.

5.5.3 Geoinformationssystem für Baumaterialien

Auf nationaler Ebene existiert ein Geoinformationssystem [38], welches den Zugriff auf verschiedene Informationen aus unterschiedlichen Bereichen ermöglicht. Insbesondere liefert es Informationen über das Schweizer Liegenschaftskataster.

Um wiederverwendbare Materialien in Schweizer Bauten zu fördern, sollte das geografische Potenzial genutzt werden. In einer Karte sollte gekennzeichnet werden, welche Gebäude für eine Wiederverwendung vorgesehen sind. Für jedes in Frage kommende Gebäude gäbe es eine Datenbank, in der alle zum Zeitpunkt des Rückbaus des Gebäudes vorhandenen Materialien und das geplante Rückbaudatum bereits dokumentiert wurden. Die Zugänglichkeit dieser Daten für die Öffentlichkeit würde es ermöglichen, die vorhandenen wiederverwendbaren Materialien zu kennen. Über einen virtuellen Markt könnten diese verkauft werden. Derzeit erlauben Plattformen wie Madaster keinen offenen Zugang zu den Informationen über die Materialien in den referenzierten Gebäuden.

Schliesslich würde das hier vorgeschlagene Werkzeug es ermöglichen, den Aspekt der Wiederverwendung einer breiten Öffentlichkeit zu vermitteln und den Zugang zu Wiederverwendungsmaterialien zu erleichtern.

5.6 Fazit

Um die Wiederverwendung von Bauteilen und Materialien im Holzbau zu ermöglichen, müssten bestimmte Massnahmen bereits in der frühen Planungsphase berücksichtigt werden. Je mehr Massnahmen zu Beginn des Projekts ergriffen werden, desto mehr kann langfristig erreicht werden. Um den Gedanken der Wiederverwendung an die Bauherrschaft heranzutragen, ist es wichtig, die Vorteile einer auf die zukünftige Verwendung von Materialien ausgerichteten Planung zu vermitteln. Je einfacher die Konstruktion ist, desto grösser ist ihr Potenzial zur Wiederverwendung und desto geringer ist der Aufwand in den Phasen des Rückbaus, der Logistik, der Lagerung und des Wiederaufbaus.

Es sollte zudem ein grosses Augenmerk auf die Schichtentrennung gelegt werden. Es ist auch auf den Einsatz einfacher und reversibler Montagesystemen zu achten. Bei der Auswahl der verwendeten Materialien soll eine gute Qualität, lange Lebensdauer, geeignete Dimensionen und gute Rückbaubarkeit angestrebt werden.

Wichtig ist der Einfluss des Planungspersonals auf das Konzept des Rückbaus und der Wiederverwendung im Holzbau. Aktuelle Instrumente wie die SIA 2032-Normen oder die Labels Minergie-Eco/SNBS berücksichtigen dieses Konzept noch nicht ausreichend. Um die Wiederverwendung im Holzbau zu fördern, sollten Label die Massnahmen im Sinne des Rückbaus und der Wiederverwendung im Planungsprozess berücksichtigen. Darüber hinaus sollte die Norm SIA 2032 in der Lage sein, entweder die Amortisationszeiten von Materialien zu verlängern oder den geringeren Anteil an grauer Energie und Treibhausgasemissionen bei der Wiederverwendung von Materialien zu berücksichtigen. Eine Normung in diesem Bereich wäre wünschenswert und würde unterstützend wirken.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

6.1 Schlussfolgerungen

6.1.1 Stand des Wissens

Durch die Literaturrecherche konnte bereits vorhandenes Basiswissen über den Rückbau und die Wiederverwendung von Baustoffen ausgebaut werden. Um dieses Wissen nochmals zu erweitern, wurden verschiedene Werkzeuge dokumentiert, mit welchen Massnahmen zur Förderung der Wiederverwendung umgesetzt werden können. Diese Massnahmen betreffen zwar das Bauwesen im Allgemeinen, sind aber zum grössten Teil auch für den Holzbau relevant. Die Lebenszyklus-Studie von Gebäuden hat gezeigt, dass am Ende der Lebensdauer ein Teil der Materialien recycelt, ein Teil deponiert und ein Teil wiederverwendet wird.

Die Differenzierung zwischen der Kreislaufwirtschaft und dem linearen Wirtschaftssystem in der Schweiz hat es ermöglicht, den Vorteilen und Herausforderungen zu begegnen in Bezug auf die Wiederverwendung und das Recycling von Materialien in Gebäuden. Das Thema Holzbau wurde entwickelt, um das zukünftige Potenzial für die Wiederverwendung von Materialien und Bauteilen dieser Bauart zu beschreiben.

6.1.2 Ermittlung der Einflussfaktoren auf Wiederverwendung

Da das Thema Wiederverwendung in der Baubranche noch nicht weit verbreitet ist, erwies sich die Auswertung der verschiedenen Einflussfaktoren als unerlässlich. Und weil die Thematik Rückbau und Wiederverwendung von Materialien sehr breit gefächert ist, ermöglichte die Einteilung in vier Hauptkategorien, die verschiedenen Einflussfaktoren gezielt zu erfassen. Die vier Kategorien berücksichtigen Einflussfaktoren auf der Ebene von Technik, Normen, Labels, Gesellschaft und Wirtschaft.

Die technischen Einflussfaktoren haben gezeigt, wie wichtig es ist, die verschiedenen Schichten zu trennen, aus denen die Bauelemente bestehen. Darüber hinaus sollten die Verbindungen zwischen den Elementen und Schichten so einfach und reversibel wie möglich sein, um die Rückbauzeit zu reduzieren und gleichzeitig eine gute Qualität der wieder zu verwendenden Materialien zu gewährleisten. Die normativen und durch Label bestimmten Einflussfaktoren haben gezeigt, dass die Normen SIA 2032:2020 und SIA 2040:2017 die Planung zur Wiederverwendung beziehungsweise den Einsatz von wiederverwendeten Materialien nicht berücksichtigen. Zudem basieren die derzeit verwendeten Labels auf den genannten Normen, so dass der Rückbau und die Wiederverwendung weniger Einfluss auf die Wiederverwendung haben.

Die Erarbeitung der gesellschaftlichen Einflussfaktoren haben gezeigt, wie wichtig die Gesellschaft für die Akzeptanz neuer Ideen in der Bauwirtschaft ist. Es war elementar zu verstehen, wie wichtig es ist, die Themen Rückbau und Wiederverwendung in den verschiedenen Zielgruppen aus der die Gesellschaft besteht, zu kommunizieren.

Der wirtschaftliche Einflussfaktor wurde ebenfalls untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass der dieser Faktor eminent wichtig ist. Zudem muss zur Rechtfertigung zusätzlichen Kosten, die bei Bauten mit wiederverwendeten Materialien anfallen, die ganze Lebensdauer von einem Gebäude betrachtet werden. Nur so kann entschieden werden, welche Massnahmen sich auch wirklich lohnen.

6.1.3 Wiederverwendung vs Recycling

Die Beschreibung der Wiederverwendungs- und Recyclingprozesse ermöglichte einen entsprechenden Vergleich. Je nach Verfahren ist das Recycling, obwohl es etablierter ist, energieintensiver als die Wiederverwendung. Die Beschreibung der standardisierten und in der Schweiz etablierten Konstruktionsdetails ermöglicht es, die für die Berechnungen der Treibhausgasemissionen und der grauen Energie berücksichtigten Materialien gezielt zu bewerten.

Berechnungen in Verbindung mit den Wiederverwendbarkeitsmatrizen zeigten, dass einige Materialien, wie Zellulosedämmung nicht wirklich für die Wiederverwendung im Bauwesen geeignet sind. Andererseits müssten unverzichtbare Materialien wie die Gipsfaserplatte wegen ihrer hohen Umweltbelastung grundsätzlich wiederverwendet werden. Abbindende Materialien wie Beton, Gips oder Kleber sollten in einer für die Wiederverwendung bestimmte Konstruktion jedoch stets vermieden werden.

6.1.4 Auswirkungen auf die Planung

Die Anlehnung an die Norm SIA 112:2014 hat es ermöglicht, die verschiedenen Massnahmen zu beschreiben, die bei der Planung eines Gebäudes für die Wiederverwendung umzusetzen sind. Obwohl die umzusetzenden Massnahmen in nur zwei Phasen zu finden sind, ermöglicht die Beschreibung anhand der Norm SIA 112:2014 ein methodisches Vorgehen. Mit der Erstellung einer Planungshilfe in Form eines Diagramms steht dem Planer zudem ein einfaches Werkzeug zur Verfügung, bei dem die wichtigsten Elemente enthalten sind.

Schliesslich müssen zur Förderung der Wiederverwendung die verschiedenen Normen und Label weiterentwickelt werden, die den Bau und damit potenziell den Rückbau und die Wiederverwendung betreffen. Zudem sollte ein offenes Zugangssystem eingerichtet werden, in dem alle Gebäude mit wiederverwendbaren Materialien referenziert sind, um die Wiederverwendung im Bauwesen zu etablieren.

6.2 Ausblick

Die für die Wiederverwendung vorgesehenen Einheiten wurden erwähnt, so die Einheit «Material», «Bauelement» und «Modulare Zelle». Der Schwerpunkt wurde in dieser Arbeit auf die Materialeinheit gelegt. Dies liegt daran, da diese das grösste Potenzial bei standardisierten Bauteilaufbauten zur Wiederverwendung bietet und an eine grosse Anzahl von Designs angepasst werden kann. Es erscheint sinnvoll, die drei Einheiten miteinander zu vergleichen, um die verschiedenen Möglichkeiten des Rückbaus und der Wiederverwendung zu ermitteln und um zu definieren, welche Einheit aus wirtschaftlicher und praktischer Sicht am geeignetsten ist.

Wie zu Beginn dieser Studie erwähnt, wurde das Thema Wirtschaftlichkeit beim Rückbau und der Wiederverwendung von Holzkonstruktionen nur qualitativ auf Ebene der Einflussfaktoren beschrieben und nicht rechnerisch aufgezeigt. Um die tatsächliche Wirtschaftlichkeit eines für den Rückbau und die Wiederverwendung dieser Bauteile geplanten Gebäudes beurteilen zu können, ist es sinnvoll, detaillierte Berechnungen durchzuführen. Idealerweise sollte ein Vergleich mit einer gewöhnlichen Konstruktion durchgeführt werden, um so auch die finanziellen Vorteile der Wiederverwendung von Bauteilen eines Gebäudes zu ermitteln.



Daniel Müller
Dipl. Holzingenieur FH/SIA
MAS EnBau HSLU/FHZ

7 Verzeichnisse

7.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konstruktionsdiagramm eines DfD-Gebäudes [11].....	10
Abbildung 2: Lebenszyklus von Gebäuden	13
Abbildung 3: Schematische des linearen Wirtschaftssystems [22]	14
Abbildung 4: Schematische Kreislaufwirtschaft [22]	15
Abbildung 5: Scherschichten (Shearing layers) von Stewart Brand [24].....	16
Abbildung 6: Systemtrennung mit Primär-, Sekundär- und Tertiärsystem [25]	17
Abbildung 7: Unterschied zwischen Fixe- und Umkehrbarverbindung [2].....	18
Abbildung 8: Rohstoffkreislauf in der Wald- und Holzwirtschaft [27].....	19
Abbildung 9: Massivholzbau [27]	20
Abbildung 10: Holzrahmenbau [27]	21
Abbildung 11: Skelettbau [27].....	22
Abbildung 12: Scherschichten im Holzbau, Modellanpassung von Stewart Brand	24
Abbildung 13: Schichten im Holzbau	24
Abbildung 14: Standardisiertes Bausystem von Hermann Hertzberger [32]	29
Abbildung 15: Energiefluss von der Primärenergie bis zum Nutzen [5]	35
Abbildung 16: Kommunikation nach Ziel Gruppen.....	43
Abbildung 17 : Beziehung zwischen der Komplexität einer Einheit und ihrem Potenzial zur Wiederverwendung.....	46
Abbildung 18: Möglichkeiten im Umgang mit Baumaterialien nach ihrem ersten Lebenszyklus.....	47
Abbildung 19: Varianten des Holzrahmen-Aufbaus	49
Abbildung 20: Varianten des Massivholz Aufbaus	50
Abbildung 21 : HBV-Decke Aufbau.....	51
Abbildung 22 : Brettschichtholzdecke Aufbau.....	52
Abbildung 23 : Holzkastendecke Aufbau.....	52
Abbildung 24: Ablaufprozess Wiederverwendung und Recycling.....	54
Abbildung 25: Benötigte graue Energie der Herstellung von Aussenwand-Kerne	59
Abbildung 26 : Verursachte Treibhausgasemissionen bei der Herstellung von Aussenwand-Kernen...	60
Abbildung 27 : Benötigte graue Energie für die Herstellung von Aussen- und Innenverkleidungen	62
Abbildung 28 : Verursachte Treibhausgasemissionen für die Herstellung von Aussen- und Innenverkleidungen	62
Abbildung 29 : Benötigte graue Energie für die Herstellung von Deckensystemen	64
Abbildung 30 : Verursachte Treibhausgasemissionen für die Herstellung von Deckensystemen.....	64
Abbildung 31 : Phasen der Bauplanung nach SIA 112:2014.....	72
Abbildung 32 : Scherschichten im Holzbau, Modellanpassung von Stewart Brand	74
Abbildung 33 : Anpassungsfähigkeit und Arbeitsaufwand in Abhängigkeit der Einheitskomplexität.....	76
Abbildung 34 : Scherschichten für den Detailaufbau	77
Abbildung 35 : Hilfe für die Gebäudeplanung im Sinn des Rückbaus und der Wiederverwendung.....	82

7.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenhang Gebäudenutzung und durchschnittliche Nutzungsdauer [30].....	14
Tabelle 2 : Einflussfaktoren bei den Grundstück	25
Tabelle 3 : Einflussfaktoren bei den Struktur	25
Tabelle 4 : Einflussfaktoren bei die Verkleidung	26
Tabelle 5 : Einflussfaktoren bei die Installationen	26
Tabelle 6 : Einflussfaktoren bei den Raum	27
Tabelle 7 : Einflussfaktoren bei die Digitalisierung	28
Tabelle 8 : Vorteile und Nachteile bei die Online-Gebäude-Plattform.....	28
Tabelle 9 : Vorteile und Nachteile bei ein Standardisierungssystem	30
Tabelle 10 : Vorteile und Nachteile bei die Modulbauweise	30
Tabelle 11 : Ermittlung der technischen Einflussfaktoren gemäss Bereich und Projektphase.....	31
Tabelle 12: Bereich Erstellung gemäss SIA 2032:2020 [4].....	32
Tabelle 13 : Einflussfaktoren gemäss SIA 2032:2020	34
Tabelle 14: Mittlere Leistung der Primärenergie und jährliche Treibhausgasemissionen [5]	35
Tabelle 15 : Einflussfaktoren gemäss SIA 2040:2017	36
Tabelle 16 : Gewählte Materialien	53
Tabelle 17 : Aussenwand-Kerne Varianten	58
Tabelle 18 : Aussen- und Innenverkleidungen Varianten	61
Tabelle 19 : Deckensysteme Varianten	63
Tabelle 20 : Wiederverwendungs- und Recyclingfähigkeit von Dämmungsmaterialien.....	66
Tabelle 21 : Wiederverwendungs- und Recyclingfähigkeit von Beplankungsmaterialien	67
Tabelle 22 : Wiederverwendungs- und Recyclingfähigkeit von Strukturmaterialien.....	67
Tabelle 23 : Standardisiertes Konstruktionsdetail mit Lösungsvorschlag	78
Tabelle 24 : Materialien mit guter Wiederverwendbarkeit.....	79
Tabelle 25 : Materialien mit mittlerer Wiederverwendbarkeit	79
Tabelle 26 : Ungeeignete Materialien für die Wiederverwendung	79

7.3 Abkürzungen

PJ	PIRMIN JUNG Schweiz AG
DfD	Design for Disassembly (design for disassembly)
BIM	Building Information Modeling (Bauwerksdatenmodellierung)
DRIM	Deconstruction recovery information modelling
BAFU	Bundesamt für Umwelt
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
HBV	Holz-Beton-Verbund
NNBS	Netzwerk Nachhaltiges Bauen Schweiz
SNBS	Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz
LCA	Life Cycle Assessment, Ökobilanz
LCIA	Life Cycle Impact Assessment, Wirkungsabschätzung
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
CEN	Europäisches Komitee für Normung
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)
BSH	Brettschichtholz

8 Literaturverzeichnis

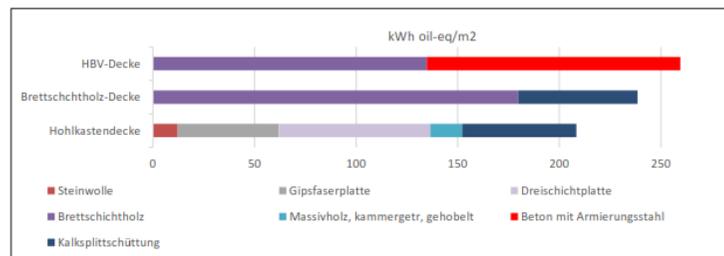
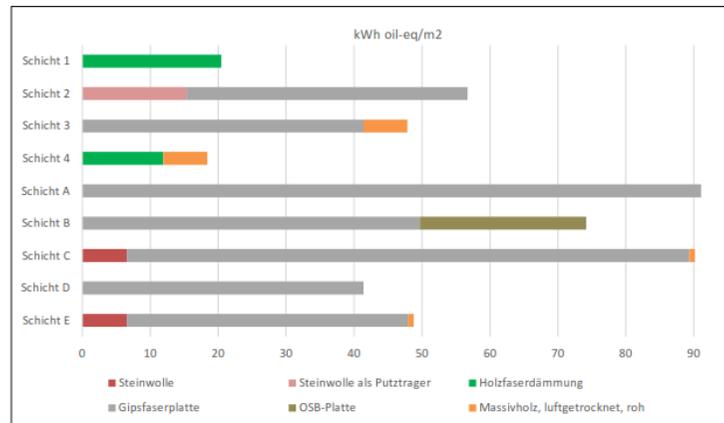
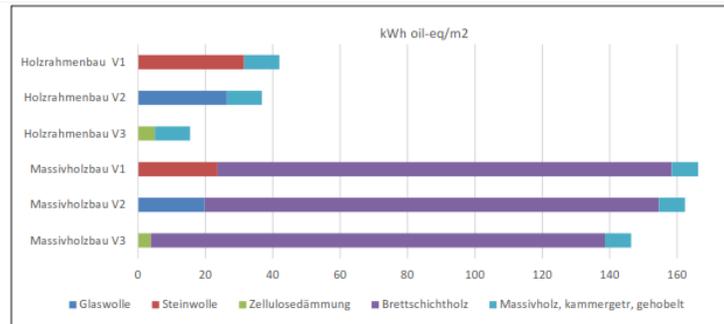
- [1] BAFU, «Abfall und Rohstoffe: Das Wichtigste in Kürze,» [Online]. Available: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/inkuerze.html>. [Zugriff am 15 September 2020].
- [2] M. Ghyoot, L. Devlieger, L. Billiet, A. Warnier und Rotor, *Déconstruction et réemploi, comment faire circuler les éléments de construction*, 2018.
- [3] M. Enz, «Entsorgungswege ausgewählter Deckensysteme,» 2014.
- [4] SIA, «SIA 2032, Graue Energie - Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden,» 2020.
- [5] SIA, «SIA 2040, SIA-Effizienzpfad Energie,» 2017.
- [6] SIA, «SIA 112, Modell Bauplanung,» 2014.
- [7] Larousse, «Recyclage,» [Online]. Available: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/recyclage/67278>. [Zugriff am 19 Oktober 2020].
- [8] Wikipedia, «Recyclage,» [Online]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Recyclage#Trois_types_de_recyclage. [Zugriff am 20 November 2020].
- [9] Salza, «Wiederverwendung Bauen,» 2020.
- [10] U.S. Environmental Protection Agency, «OSWER Innovation Project Success Story: DECONSTRUCTION,» 2019.
- [11] Archdaily, «A Guide to Design for Disassembly,» 10 July 2020. [Online]. Available: <https://www.archdaily.com/943366/a-guide-to-design-for-disassembly>. [Zugriff am 18 September 2020].
- [12] O. O. Akinade, «BIM-based deconstruction tool: Towards essential functionalities,» 2017.
- [13] bauteilclick, «Bauteilnetz Schweiz,» [Online]. Available: <https://www.bauteilclick.ch/>. [Zugriff am 22 September 2020].
- [14] UVEK, «Grundsätze der Energiepolitik,» [Online]. Available: <https://www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/energie/grundsätze-der-energiepolitik.html>. [Zugriff am 21 September 2020].
- [15] UVEK, «Energiestrategie 2050,» [Online]. Available: <https://www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/energie/energiestrategie-2050.html>. [Zugriff am 21 September 2020].
- [16] Energieschweiz, «Graue Energie von Neubauten,» 2017.
- [17] B. f. U. BAFU, «Massnahmen des Bundes für eine ressourcenschonende, zukunftsfähige Schweiz (Grüne Wirtschaft),» 2020.
- [18] S. I.- u. Architektenverein, «SIA 2034, Graue Energie - Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden,» 2010.
- [19] EcoBau, «Verein,» [Online]. Available: <https://www.eco-bau.ch/index.cfm?Nav=22>. [Zugriff am 22 September 2020].
- [20] Rotor. [Online]. Available: <https://rotordb.org/en>. [Zugriff am 22 September 2020].
- [21] Arup, «The Circular Economy in the Built Environment,» 2016.
- [22] BAFU, «Kreislaufwirtschaft,» [Online]. Available: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaft-konsum/fachinformationen/kreislaufwirtschaft.html>. [Zugriff am 25 September 2020].
- [23] Wikipedia, «Shearing layers,» [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Shearing_layers. [Zugriff am 29 September 2020].
- [24] S. Brand, «How Buildings Learn: What Happens After They're Built,» London, 1996.
- [25] Amt für Grundstücke und Gebäude des Kantons Bern, «Systemtrennung,» 2006.
- [26] Berner Fachhochschule, Institut für digitale Bau- und Holzwirtschaft IdBH, «Holzendverbrauch Schweiz 2017,» 2018.

- [27] B. L. KBOB, «Nachhaltiges Bauen mit Holz,» 2020.
- [28] P. Jung, «Der gedübelte Brettstapel,» 2000.
- [29] p. AG, «Auswertung Online-Umfrage 2018 BIM in der Schweizer Immobilienwirtschaft – eine Situationsanalyse,» 2018.
- [30] Swissroc, «Les avantages du BIM,» [Online]. Available: <https://swissroc.ch/les-avantages-du-bim/>. [Zugriff am 14 November 2020].
- [31] S. Rumping, Interviewee, *Vorstellung Madaster*. [Interview]. 21 Oktober 2020.
- [32] hicarquitectura, «Housing for old and disabled people «De drie Hoven”,» [Online]. Available: <http://hicarquitectura.com/2017/03/herman-hertzberger-housing-for-old-and-disabled-people/>. [Zugriff am 16 November 2020].
- [33] EnDK, «MuKE», EnDK, [Online]. Available: https://www.endk.ch/de/energiepolitik-der-kantone/muken?set_language=de. [Zugriff am 14 Dezember 2020].
- [34] EnergieSchweiz, SIA, Stadt Zurich, «Bilanzierungskonzept 2000-Watt-Gesellschaft,» 2014.
- [35] Minergie, «Wegleitung Minergie-eco Ablauf Antragsstellung und Zertifizierung,» 2018.
- [36] BAFU, «Elimination des déchets,» 2016.
- [37] F. Paul, «Mehrgeschossiger Holbau: Recycling und Rückbau,» 2016.
- [38] Schweizerische Eidgenossenschaft, «Karten der Schweiz,» [Online]. Available: <https://map.geo.admin.ch>. [Zugriff am 19 Januar 2021].
- [39] Wikipedia, «Netzwerk Nachhaltiges Bauen Schweiz,» [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Netzwerk_Nachhaltiges_Bauen_Schweiz. [Zugriff am 10 November 2020].
- [40] NNBS, «Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz Hochbau,» [Online]. Available: <https://www.nnbs.ch/standard-snbs-hochbau>. [Zugriff am 10 November 2020].
- [41] C. Lauterburg, «Optimierung von Lebenszykluskosten durch strategische Investitionen,» 2013.

Anhang A

Graue Energie Berechnung pro Schicht

	Glaswolle	Steinwolle	Steinwolle als Putzträger	Holzfaserdämmung	Zellulosedämmung	Gipsfaserplatte	OSB-Platte	Dreischichtplatte	Brettschichtholz	Massivholz, kammergetr., gehobelt	Massivholz, luftgetrocknet, roh	Beton mit Armierungsstahl	Kalksplittschüttung
Holzrahmenbau V1		31.54								10.42			
Holzrahmenbau V2	26.37									10.42			
Holzrahmenbau V3				5.05						10.42			
Massivholzbau V1		23.66							134.80	7.81			
Massivholzbau V2	19.78								134.80	7.81			
Massivholzbau V3				3.79					134.80	7.81			
Schicht 1			20.46										
Schicht 2		15.33				41.40							
Schicht 3						41.40					6.47		
Schicht 4			11.94								6.47		
Schicht A						91.08							
Schicht B						49.68	24.50						
Schicht C		6.57				82.80					0.83		
Schicht D						41.40							
Schicht E		6.57				41.40					0.83		
HBV-Decke									134.80			124.73	
Brettschichtholz-Decke									179.73				58.80
Hohlkastendecke	12.25					49.68	74.62		15.63				56.25



Anhang B

Treibhausgas Berechnung pro Schicht

	Glaswolle	Steinwolle	Steinwolle als Putzträger	Holzfaserdämmung	Zellulosedämmung	Gipsfaserplatte	OSB-Platte	Dreischichtplatte	Brettschichtholz	Massivholz, kammergetr, gehobelt	Massivholz, luftgetrocknet, roh	Beton mit Armierungsstahl	Kalksplittschüttung
Holzrahmenbau V1		8.43								1.78			
Holzrahmenbau V2	4.64									1.78			
Holzrahmenbau V3				1.20						1.78			
Massivholzbau V1		6.32							20.59	1.34			
Massivholzbau V2	3.48								20.59	1.34			
Massivholzbau V3				0.90					20.59	1.34			
Schicht 1				2.67									
Schicht 2			4.10			9.09							
Schicht 3						9.09					1.25		
Schicht 4				1.56							1.25		
Schicht A						20.00							
Schicht B						10.91	4.42						
Schicht C		1.76				18.18						0.16	
Schicht D						9.09							
Schicht E		1.76				9.09						0.16	
HBV-Decke									20.59			43.04	
Brettschchtholz-Decke									27.45				21.67
Hohlkastendecke		3.27				10.91	10.46		15.63				20.73

